

Marek Blicharski

inżynieria materiałowa



STAL

Wydawnictwo WNT



Spis treści

Wstęp	11
1. Wytwarzanie stali	13
1.1. Wstęp	13
1.2. Wsad do wielkiego pieca	15
1.3. Wytwarzanie surówki	17
1.4. Alternatywne metody otrzymywania żelaza	21
1.5. Odsiarczanie surówki (obróbka wstępna)	21
1.6. Wytwarzanie stali	23
1.7. Konwerty tlenowy	24
1.8. Postęp w technologii wytwarzania stali	28
1.9. Piec elektryczny łukowy	29
1.10. Pierwiastki w stali	32
1.10.1. Pierwiastki usuwane w procesie stalowniczym – Pb, Zn i Al	32
1.10.2. Pierwiastki, które nie dają się usunąć w procesie stalowniczym – Cu, Sn, Ni, Co, Mo i W	33
1.10.3. Gazy – tlen, azot, wodór	33
1.10.4. Węgiel i pierwiastki występujące jednocześnie w kąpieli metalowej i żużłu – Si, Mn, S i P	34
1.11. Obróbka pozapiecowa (wtórna)	36
1.12. Odsiarczanie stali	41
1.13. Wtrącenia niemetaliczne	43
1.14. Wtrącenia siarczkowe	45
1.15. Wtrącenia tlenkowe	49
1.16. Odgazowanie	51
1.17. Odtlenianie stali	54
1.18. Rodzaje stali ze względu na odtlenienie	56
1.19. Odlewanie	58
1.19.1. Odlewanie do wlewnic	60
1.19.2. Odlewanie ciągłe	61
1.20. Wytwarzanie stali o szczególnych właściwościach	62
1.20.1. Wytapianie indukcyjne w próżni	63
1.20.2. Procesy przetopieniowe	63

1.21.	Wytwarzanie stali odpornych na korozję	65
1.22.	Metalurgia proszków	70
1.22.1.	Spiekane stале narzędziowe	71
1.22.2.	Spiekane narzędzia	72
1.22.3.	Wytwarzanie rozpyleniowo-osadzeniowe stali	72
2.	Składniki mikrostrukturalne stopów żelaza _____	74
2.1.	Roztwory stałe	74
2.2.	Dyslokacje w ferrycie i austenicie	76
2.2.1.	Wyraźna granica plastyczności	78
2.2.2.	Starzenie po odkształceniu	79
2.3.	Wykres fazowy żelazo-węgiel	81
2.4.	Węglik i azotki	84
2.5.	Wpływ pierwiastków stopowych na tworzenie się austenitu	86
2.6.	Przemiana austenitu w ferryt	88
2.7.	Przemiana austenitu w perlit	90
2.8.	Wpływ pierwiastków stopowych na zakres występowania austenitu	92
2.9.	Przemiana martenzytyczna	94
2.10.	Przemiana bainityczna	101
2.10.1.	Bainit górny	102
2.10.2.	Bainit dolny	103
2.10.3.	Ferryt iglasty	104
2.11.	Wykresy <i>PI</i> i <i>PC</i>	105
2.12.	Hartowność	111
2.13.	Odpuszczanie	121
2.14.	Naprężenia własne	128
2.15.	Kruchość odpuszczania	130
2.16.	Wpływ pierwiastków stopowych na własności stali	133
3.	Zależność między mikrostrukturą a własnościami _____	142
3.1.	Umocnienie	142
3.1.1.	Umocnienie roztworowe	143
3.1.2.	Umocnienie dyslokacyjne	144
3.1.3.	Umocnienie cząstkami innej fazy	145
3.1.4.	Umocnienie przez rozdrobnienie ziarna	146
3.1.5.	Wpływ cząstek wydzieleni na wielkość ziarna osnowy	146
3.1.6.	Umocnienie stali	147
3.2.	Udamność stali	148
3.3.	Czynniki metalurgiczne wpływające na udarność stali	151
3.4.	Spawalność	153
3.5.	Własności stali o mikrostrukturze ferrytycznej	155
3.6.	Własności stali o małej zawartości węgla i mikrostrukturze ferrytyczno-perlitycznej	157
3.7.	Zależność między mikrostrukturą a własnościami stali ferrytyczno-perlitycznych	161

3.8.	Własności perlitu	162
3.9.	Kierunkowość własności	164
3.10.	Własności stali o mikrostrukturze bainitycznej	165
3.11.	Własności stali o mikrostrukturze martenzytycznej	169
3.12.	Własności stali austenitycznych	171
3.13.	Własności stali o mikrostrukturze ferrytyczno-martenzytycznej	171
3.14.	Własności stali o mikrostrukturze ferrytyczno-austenitycznej	172
3.15.	Własności mikrostruktury tworzącej się podczas odpuszczania	173
3.16.	Własności mikrostruktury ferrytycznej z cementytem sferoidalnym	176
4.	Stale na wyroby płaskie do kształtowania na zimno _____	177
4.1.	Wstęp	177
4.2.	Proces wytwarzania	179
4.3.	Podstawy metalurgiczne	186
4.4.	Kształtowanie na zimno	187
4.5.	Stale miękkie	194
4.5.1.	Stal o małej wytrzymałości uspokojona Al wyżarzona w piecu kołpakowym	195
4.5.2.	Stal o małej wytrzymałości uspokojona Al wyżarzona w sposób ciągły	199
4.5.3.	Stal wolna od atomów międzywęzłowych o małej wytrzymałości	206
4.6.	Stale głębokotłoczne o podwyższonej wytrzymałości	215
4.6.1.	Stale umacniane podczas utwardzania lakieru	218
4.6.2.	Stale umacniane roztworowo	223
4.7.	Metalurgia stali o dobrej kształtowości	226
4.8.	Stale wielofazowe	229
4.8.1.	Stale DP	236
4.8.2.	Stale TRIP	239
4.8.3.	Stale o złożonym składzie fazowym (CP)	243
4.9.	Inne metody otrzymywania taśm o podwyższonej wytrzymałości	244
4.10.	Taśmy powlekane w sposób ciągły	247
4.10.1.	Powlekanie ogniowe	248
4.10.2.	Powłoki elektrolityczne	257
4.10.3.	Odporność na korozję	258
4.10.4.	Powłoki Sn	259
4.10.5.	Powłoki organiczne	261
4.10.6.	Taśmy stalowe pokrywane emalią porcelanową	263
5.	Stale konstrukcyjne _____	264
5.1.	Wstęp	264
5.2.	Zależność między mikrostrukturą a własnościami stali konstrukcyjnych	266
5.3.	Mikrododatki	268
5.3.1.	Węglikoazotki Nb, V i Ti	269
5.3.2.	Zależności krystalograficzne między węglikoazotkami a osnową	270
5.3.3.	Rozpuszczalność węglikoazotków	271

5.3.4.	Mikrododatki w stalach NSPW	273
5.3.5.	Wpływ zawartości C i N na ułamek objętości wydzieleni	275
5.3.6.	Dodatek Ti	277
5.4.	Koagulacja	280
5.5.	Regulowane walcowanie	281
5.5.1.	Nagrzewanie do walcowania	284
5.5.2.	Rekrystalizacja austenitu podczas odkształcania plastycznego na gorąco	285
5.5.3.	Regulowane walcowanie konwencjonalne	287
5.5.4.	Walcowanie poniżej A_{r3}	289
5.5.5.	Regulowane walcowanie rekrystalizujące	290
5.6.	Regulowane chłodzenie	292
5.7.	Niejednorodne ziarno ferrytu	297
5.8.	Skład chemiczny stali do walcowania ciepno-plastycznego	297
5.9.	Własności stali z mikrododatkami	298
5.10.	Wyroby ze stali niskostopowych o podwyższonej wytrzymałości walcowane na zimno	300
5.11.	Stale na rurociągi	303
5.12.	Stale stosowane w środowisku gazów kwaśnych	305
5.13.	Stale trudno rdzewiejące	308
5.14.	Stale do zbrojenia betonu	310
5.15.	Stale stosowane w obniżonej temperaturze	311
5.16.	Stale maraging	314
5.17.	Stale znormalizowane	319
5.17.1.	Stale niestopowe konstrukcyjne	319
5.17.2.	Stale konstrukcyjne o podwyższonej granicy plastyczności przeznaczone do kształtowania na zimno	320
5.17.3.	Stale konstrukcyjne o podwyższonej wytrzymałości ulepszone cieplnie lub umocnione wydzieleniowo	322
5.17.4.	Stale konstrukcyjne spawalne drobnoziarniste	325
5.17.5.	Stale spawalne na urządzenia ciśnieniowe	327
6.	Stale maszynowe i o dużej zawartości węgla _____	331
6.1.	Wstęp	331
6.2.	Pierwiastki stopowe i mikrostruktura	332
6.3.	Dobór stali maszynowych obrobionych cieplnie	334
6.4.	Stale do ulepszania cieplnego	335
6.5.	Stale do hartowania powierzchniowego	338
6.6.	Stale do nawęglania	338
6.7.	Stale do azotowania	341
6.8.	Stale umocnione wydzieleniowo z temperatury obróbki plastycznej na gorąco	342
6.9.	Stale do hartowania bezpośredniego	346
6.10.	Stale automatowe	347
6.10.1.	Dodatki zwiększające skrawalność	349
6.10.2.	Skrawalność stali	351
6.11.	Walcówka stalowa na druty (liny)	353

6.12.	Stale sprężynowe	357
6.13.	Stale łożyskowe	362
6.13.1.	Stale na łożyska do pracy w normalnych warunkach	362
6.13.2.	Stale łożyskowe do specjalnych zastosowań	365
6.13.3.	Czynniki wpływające na zachowanie zmęczeniowe	365
6.13.4.	Wytwarzanie i jakość stali łożyskowych	366
6.14.	Stale szynowe	366
6.14.1.	Gatunki o dużej wytrzymałości	368
6.14.2.	Odporność na zużycie	370
6.14.3.	Szyny ze stali austenitycznej z zawartością 14% Mn	370
6.15.	Austeniczne stale manganowe	371
6.16.	Stale do spęczniania i wyciskania na zimno	371
7.	Stale narzędziowe _____	377
7.1.	Wstęp	377
7.2.	Podstawowe charakterystyki stali narzędziowych	378
7.3.	Stale narzędziowe do pracy na zimno	380
7.3.1.	Stale narzędziowe niestopowe do pracy na zimno	381
7.3.2.	Stale narzędziowe stopowe do pracy na zimno	382
7.4.	Stale narzędziowe do pracy na gorąco	385
7.5.	Stale szybko tnące	388
7.5.1.	Charakterystyka ogólna	388
7.5.2.	Pierwiastki stopowe	389
7.5.3.	Mikrostruktura	391
7.6.	Obróbka cieplna stali narzędziowych	394
7.7.	Własności wytwórcze	400
7.8.	Zdolności tnące narzędzi	401
8.	Stale odporne na korozję _____	403
8.1.	Wstęp	403
8.2.	Wykresy fazowe	405
8.3.	Korozja	409
8.4.	Rola pierwiastków stopowych	412
8.5.	Kruchość stali odpornych na korozję	417
8.5.1.	Kruchość 475°C	417
8.5.2.	Kruchość spowodowana fazą σ	419
8.5.3.	Korozja międzykrystaliczna	421
8.6.	Stale odporne na korozję ferrytyczne	427
8.7.	Stale odporne na korozję austenityczne	434
8.8.	Stale odporne na korozję martenzytyczne	442
8.9.	Stale odporne na korozję ferrytyczno-austenityczne	447
8.10.	Stale odporne na korozję umacniane wydzieleniowo	450
8.11.	Stale odporne na korozję metastabilne odkształcane na zimno	452
8.12.	Stale odporne na korozję o regulowanej przemianie	454

9.	Stale stosowane w podwyższonej temperaturze _____	457
9.1.	Wstęp	457
9.2.	Żaroodporność i żarowytrzymałość	458
9.3.	Naprężenia projektowe	465
9.4.	Stale ferrytyczne	469
9.4.1.	Stale niestopowe	469
9.4.2.	Stale nisko- i średniostopowe	470
9.4.3.	Stale z zawartością 9+12% Cr	474
9.5.	Stale austenityczne	480
9.6.	Stale zaworowe	482
9.7.	Stale na układy wydechowe	484
9.8.	Stale na elektryczne elementy grzewcze	485
9.9.	Nadstopy	485
9.9.1.	Nadstopy na osnowie niklu	486
9.9.2.	Nadstopy na osnowie żelaza	489
9.9.3.	Nadstopy na osnowie kobaltu	489
U.	Główne zasady oznaczania stali wg PN-EN _____	491
U.1.	Klasyfikacja stali	491
U.2.	Oznaczanie stali wg PN-EN	492
U.2.1.	Zasady ustalania znaków stali	492
U.2.2.	Oznaczanie gatunków stali wg zastosowania i własności	493
U.2.3.	Oznaczanie gatunków stali wg składu chemicznego	498
U.2.4.	Symbole dodatkowe dla wyrobów stalowych	501
Literatura	503
Pojęcia i ich definicje	513
Skorowidz	545

Wstęp

Stopy żelaza stanowią ponad 90% światowej produkcji metali. Były, są i w dającej się przewidzieć przyszłości pozostaną najważniejszymi materiałami konstrukcyjnymi ze względu na zalety produkcyjne i własności użytkowe. Ze względu na własności stopy żelaza są stosowane we wszystkich kluczowych przemysłach: samochodowym, lotniczym, kolejowym, obronnym, chemicznym, rolniczym, okrętowym, energetycznym i wydobywczym ropy, gazu i węgla.

Podstawowymi zaletami produkcyjnymi stopów żelaza są:

- ogólna dostępność surowców (rudy żelaza bogate w Fe i znajdujące się blisko powierzchni ziemi oraz złom), materiałów redukcyjnych (koks i pył węglowy) oraz materiałów żuzłotwórczych (wapno, dolomit);
- duża wydajność hut stali (10 Mt/rok);
- względnie małe zużycie surowców (ok. 5 t/t stali) i energii potrzebnej do redukcji rudy (22 GJ/t stali).

Cenne własności stopów żelaza to:

- żelazo występuje w dwóch odmianach alotropowych umożliwiających zmianę własności stopów Fe podczas obróbki plastycznej i cieplnej; własności można zmieniać od charakteryzujących się dużą ciągliwością i małą wytrzymałością do charakteryzujących się bardzo dużą wytrzymałością, a jednocześnie odpornością na pękanie wystarczającą do bardzo wielu zastosowań;
- dzięki niezbyt wysokiej temperaturze topnienia żelaza (1538°C) można go bez większych trudności otrzymać w stanie ciekłym, natomiast dyfuzja w temperaturze pokojowej nie jest możliwa, co powoduje, że mikrostruktura i własności stopów żelaza w temperaturze otoczenia nie zmieniają się z czasem;
- duży moduł Younga;
- dobra odporność na korozję po dodaniu pierwiastków stopowych lub wytworzeniu powłok ochronnych.

Podstawową siłą napędową rozwoju stopów żelaza w ostatnich latach jest rynek. Warunki stawiane przez przemysł to przede wszystkim krótki termin realizacji zamówień, wyższa jakość i niższa cena. Wymagania te wymusiły rozwój nowych procesów produkcyjnych w przemyśle stalowym.

Działania mające na celu powstrzymanie globalnego ocieplenia wymuszają obniżenie masy samochodów, a zatem grubości wyrobów stalowych stosowanych na podwozia i karoserie. Grubość można zmniejszyć, zwiększając wytrzymałość, zachowując jednak zdolność do kształtowania, tj. do tłoczenia, obciągania i zginania. Zwykle jednak ze wzrostem wytrzymałości własności plastyczne maleją. Dlatego rozwój wyrobów stalowych, jest ukierunkowany na optymalizację własności wytrzymałościowych i kształtowości. Rozwój tych wyrobów wymuszają również materiały konkurencyjne, którymi w przemyśle samochodowym są stopy Al i polimery oraz kompozyty o osnowie polimerowej.

Zawartość (w procentach masowych) pierwiastków występujących w największej ilości w skorupie ziemskiej jest następująca: 47% tlenu, 27% krzemu, 8% aluminium, 5% żelaza i 4% wapnia. Żelazo jest metalem reaktywnym, dlatego – z wyjątkiem meteorytów – nie występuje w postaci pierwiastkowej (podobnie jak prawie wszystkie metale). W skorupie ziemskiej żelazo występuje w postaci tlenków i siarczków. Tworzy z tlenem trzy tlenki: FeO – wistyt (nie trwały poniżej 570°C), Fe₃O₄ – magnetyt i Fe₂O₃ – hematyt. Siarka niekorzystnie wpływa na własności stali, dlatego do jej wytwarzania są stosowane tylko rudy tlenkowe. Żelazo otrzymuje się głównie z występującego w największych ilościach hematytu (kolor czerwony) lub z magnetytu (kolor czarny). Handlowe gatunki magnetytu i hematytu zawierają 50 ÷ 65% Fe.