
Spis treści

Wstęp	9
Wykaz używanych skrótów	13
1. Wprowadzenie	15
2. Procesy spawania	27
2.1. Klasyfikacja procesów spawania	27
2.2. Spawanie gazowe (OAW)	28
2.2.1. Charakterystyka płomienia spalania C_2H_2 z O_2	30
2.2.2. Zalety i niedoskonałości spawania gazowego	31
2.3. Spawanie łukowe	31
2.4. Gaz osłonowy	32
2.5. Spawanie ręczne elektrodą otuloną SMAW	34
2.5.1. Otuliny elektrod	35
2.5.2. Funkcje otuliny elektrody	35
2.5.3. Zalety i niedoskonałości procesu SMAW	36
2.6. Spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej GTAW	37
2.6.1. Biegunowość podłączenia źródła prądu	38
2.6.2. Zalety i wady GTAW	40
2.7. Spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazowej GMAW	41
2.7.1. Transport ciekłego spoiwa	43
2.7.2. Zalety i wady procesu GMAW	44
2.8. Spawanie plazmowe PAW	44
2.8.1. Zajarzenie łuku w procesie PAW	46
2.8.2. Zalety i wady procesu PAW	46
2.9. Spawanie łukowe drutem rdzeniowym FCAW	46
2.10. Spawanie łukiem krytym (pod topnikiem) SAW	48
2.11. Spawanie elektrodużłowe ESW	49
2.12. Spawanie źródłem ciepła o dużej gęstości mocy	51
2.12.1. Spawanie wiązką elektronów EBW	51
2.12.2. Spawanie wiązką lasera LBW	53
3. Reakcje chemiczne w procesach spawania	55
3.1. Charakterystyka gazów	55

3.2.	Ochrona ciekłego i gorącego metalu przed atmosferą powietrza	56
3.2.1.	Wodór	59
3.2.2.	Azot	61
3.2.3.	Tlen	62
3.3.	Topniki – zasadowość i reakcje metalu→topnik	63
4.	Metale – procesy – mikrostruktura	67
4.1.	Wprowadzenie	67
4.2.	Umocnienie metali	71
4.2.1.	Umocnienie roztworowe	72
4.2.2.	Umocnienie dyslokacyjne	72
4.2.3.	Umocnienie cząstkami innej fazy	74
4.2.4.	Umocnienie przez rozdrobnienie ziarna	74
4.2.5.	Charakterystyka umocnienia metali	75
4.3.	Odporność na pękanie – udarność stali	76
4.4.	Wykresy fazowe, przemiany fazowe i inne zmiany strukturalne	78
4.4.1.	Przemiany fazowe	78
4.4.2.	Wykresy fazowe	79
4.4.3.	Składniki mikrostruktury w stopach układu Fe-Fe ₃ C	81
4.5.	Termodynamika i kinetyka przemian fazowych	82
4.5.1.	Siła pędna przemiany fazowej	83
4.5.2.	Dyfuzja	83
4.6.	Przemiany fazowe	84
4.6.1.	Zarodkowanie i wzrost	85
4.6.2.	Szybkość przemiany dyfuzyjnej	86
4.7.	Procesy wytwarzania wyrobów metalowych	88
4.7.1.	Olewnictwo metali	89
4.7.2.	Krystalizacja	90
4.7.3.	Formy odlewnicze	92
4.8.	Procesy wytwarzania odkształceniowego	94
4.8.1.	Walcowanie	95
4.8.2.	Kucie	96
4.9.	Tarcie w procesach kształtowania odkształceniowego	96
4.10.	Temperatura w procesach kształtowania odkształceniowego	98
4.11.	Obróbka cieplna stopów metali	99
5.	Stal na konstrukcje spawane – z wyjątkiem stali odpornej na korozję	101
5.1.	Stopy żelaza	101
5.2.	Wpływ pierwiastków na właściwości stali	102
5.2.1.	Pierwiastki w stali	102
5.2.2.	Zanieczyszczenia w stali	103
5.2.4.	Postać występowania pierwiastków w stali	106
5.2.5.	Wykresy czas-temperatura-przemiana – krytyczna szybkość chłodzenia	108
5.3.	Kinetyka przemian dyfuzyjnych austenitu w stali	109
5.3.2.	Przemiana martenzytyczna w stali	111
5.3.3.	Umocnienie martenzytu	117
5.3.4.	Przemiana bainityczna	118
5.3.5.	Odpuszczanie	121
5.4.	Stal na konstrukcje spawane	125
5.4.1.	Stal niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości	125
5.4.2.	Stal do pracy w podwyższonej temperaturze	132

6. Stal odporna na korozję na konstrukcje spawane	139
6.1. Charakterystyka ogólna	139
6.2. Pierwiastki stopowe w stali odpornej na korozję	143
6.3. Kruchość stali odpornej na korozję	146
6.4. Stal odporna na korozję ferrytyczna	148
6.5. Stal odporna na korozję austenityczna	151
6.6. Stal odporna na korozję martenzytyczna	152
6.7. Stal odporna na korozję ferrytyczno-austenityczna (dwufazowa)	154
6.8. Stal odporna na korozję umacniana wydzieleniowo	155
6.9. Korozja stali odpornej na korozję	156
6.9.1. Rodzaje korozji stali odpornej na korozję	156
6.9.2. Zapobieganie korozji międzykrystalicznej	160
6.9.3. Korozja strefy wpływu ciepła złącza spawanego	161
7. Stopy umacniane wydzieleniowo na konstrukcje spawane	165
7.1. Stopy aluminium	165
7.1.1. Charakterystyka ogólna	165
7.1.2. Właściwości aluminium	166
7.1.3. Stopy aluminium do obróbki plastycznej	167
7.1.4. Umocnienie wydzieleniowe	171
7.2. Nadstopy niklu	179
7.2.1. Wprowadzenie	179
7.2.2. Umocnienie wydzieleniowe nadstopów niklu	179
8. Struktura połączeń spawanych	183
8.1. Rodzaje połączeń spawanych	183
8.2. Rozcieńczenie (zmieszanie)	185
8.3. Strefy makroskopowe połączenia spawanego	186
8.4. Strefy mikroskopowe połączenia spawanego	187
8.5. Ciekły metal w SCS w temperaturze poniżej równowagowego solidus	191
8.5.1. Mechanizm segregacyjny i stężeniowy tworzenia się ciekłego metalu na granicach ziarn – likwacja stężeniowa	192
8.5.2. Ciekły metal na granicy ziarn	195
9. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła	197
9.1. Wprowadzenie	197
9.2. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła – wpływ stanu materiału	198
9.2.1. Materiał wyżarzony, w którym nie zachodzą przemiany fazowe	199
9.2.2. Materiał w stanie odkształconym, w którym nie zachodzą przemiany fazowe	200
9.2.3. Stopy umacniane wydzieleniowo	202
9.3. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła stali	203
9.3.1. Stal niestopowa i niskostopowa o małej zawartości węgla	207
9.3.2. Stal o średniej zawartości węgla	209
9.3.3. Stal odporna na korozję austenityczna	211
9.3.4. Stal nierdzewna ferrytyczna	211
9.4. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła stopów aluminium do obróbki cieplnej	212
9.5. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła nadstopów niklu do obróbki cieplnej	215
10. Mikrostruktura spoiny	219
10.1. Wprowadzenie	219
10.2. Krystalizacja metali	220
10.2.1. Rozdział (redystrybucja) pierwiastków rozpuszczonych	220

10.2.2.	Przemieszczanie się pierwiastka rozpuszczonego w procesie krystalizacji	222
10.3.	Przechłodzenie stężeniowe i kształt frontu krystalizacji	226
10.3.1.	Przechłodzenie stężeniowe	227
10.3.2.	Wpływ parametrów spawania na stabilność i kształt frontu krystalizacji	228
10.3.3.	Krystalizacja spoiny	230
10.4.	Mikrostruktura krystalizacyjna spoiny	231
10.4.1.	Segregacja makroskopowa	232
10.4.2.	Mikrosegregacja	234
10.4.3.	Niejednorodność składu chemicznego spoiny	235
10.4.4.	Wzrost ziarn w spoinie	237
10.4.5.	Wpływ parametrów spawania na kształt ziarn w spoinie	239
10.5.	Mikrostruktura krystalizacyjna stali odpornej na korozję austenitycznej	243
10.5.1.	Mikrostruktura krystalizacyjna stali Fe-Cr 25-Ni 20% (stal 310)	247
10.5.2.	Mikrostruktura krystalizacyjna stali Fe-Cr 23-Ni 14% (stal 309)	247
10.5.3.	Zawartość optymalna ferrytu w spoinie stali austenitycznej	249
10.5.4.	Przewidywanie mikrostruktury spoiny stali odpornej na korozję	250
10.5.5.	Mikrostruktura spoiny w połączeniach różnych metali	253
11.	Pęknięcia w połączeniach spawanych	257
11.1.	Pęknięcia gorące	257
11.1.1.	Rozszerzalność cieplna metali	258
11.1.2.	Naprężenia w połączeniach spawanych	259
11.2.	Pęknięcia krystalizacyjne – charakterystyka i przyczyny tworzenia	260
11.2.1.	Czynniki wpływające na skłonność do pękania krystalizacyjnego	261
11.2.2.	Metody zmniejszenia skłonności do pękania krystalizacyjnego	264
11.3.	Pęknięcia likwacyjne	267
11.3.1.	Skłonność do tworzenia pęknięć	268
11.3.2.	Pęknięcia likwacyjne spoiny	270
11.4.	Pęknięcia ciepłe (w stanie statym)	270
11.4.1.	Pęknięcia w zakresie zmniejszonej plastyczności	271
11.4.2.	Pęknięcia ponownego nagrzewania (obróbki cieplnej po spawaniu)	275
11.4.3.	Pęknięcia starzeniowo-odkształceniowe nadstopów niklu	279
11.5.	Pęknięcia lamelarne w złączach stali	282
11.6.	Pęknięcia w połączeniach spawanych spowodowane miedzią	283
11.7.	Pęknięcia wodorowe w połączeniach spawanych	285
11.7.1.	Tworzenie się pęknięć wodorowych	286
11.7.2.	Wodór w złączu spawanym stali	286
11.7.3.	Wpływ warunków procesu spawania na zawartość wodoru w połączeniach spawanych	290
11.7.4.	Wpływ mikrostruktury na skłonność złącza spawanego stali do pękania wodorowego	291
11.7.5.	Usztywnienie połączeń spawanych	293
11.7.6.	Charakterystyka pęknięć wodorowych	294
11.7.7.	Zapobieganie pęknięciom wodorowym	295
11.8.	Pęknięcia w heterogenicznych złączach spawanych	297