

SPIS TREŚCI:

Przedmowa 11

1. Spawalność stali 13

1.1. Definicja spawalności stali 13

1.2. Wpływ składników stopowych na spawalność stali 19

2. Pękanie połączeń spawanych 23

2.1. Pęknięcia gorące 23

2.1.1. Pęknięcia krystalizacyjne w spoinie 24

2.1.1.1. Wpływ węgla, siarki i fosforu na proces pęknięcia 30

2.1.1.2. Optymalizacja kształtu spoiny 34

2.1.1.3. Rola wodoru w procesie pęknięcia na gorąco 37

2.1.2. Pęknięcia segregacyjne w strefie wpływu ciepła 39

2.2. Pęknięcia zimne 44

2.2.1. Pękanie „pod ścięciem” 46

2.2.2. Pękanie zwłoczne 48

2.2.3. Pękanie typu „chevron” 53

2.2.4. Pękanie typu „rybie oczy” 56

2.2.5. Wskaźniki skłonności do pęknięcia zimnego 58

2.3. Pęknięcia lamelarne 68

2.3.1. Mechanizm pęknięcia lamelarnego 69

2.3.2. Czynniki wpływające na pękanie lamelarne 71

2.4. Pęknięcia wyżarzeniowe (relaksacyjne) 75

2.4.1. Pęknięcia niskotemperaturowe 75

2.4.2. Pęknięcia wysokotemperaturowe 76

2.4.3. Pęknięcia „podplaterowe” 81

2.5. Pękanie kruche i ciągliwe 82

2.5.1. Warunki plastyczności materiałów ciągliwych 83

2.5.2. Mechanizm pęknięcia plastycznego 86

2.5.3. Mechanizm pęknięcia kruchego 89

2.6. Temperatura przejścia w stan kruchy 92

2.6.1. Wpływ stopnia odtlenienia i odgazowania stali na temperaturę przejścia w stan kruchy 94

2.6.2. Wpływ składu chemicznego 95

2.6.3. Wpływ siarczków 97

2.6.4. Wpływ wielkości ziarna i mikrostruktury 100

2.6.5. Wpływ procesu wytwarzania konstrukcji 102

2.6.6. Wpływ warunków eksploatacji 105

2.7. Współczynnik intensywności naprężeń 106

3. Obliczeniowy sposób oceny spawalności stali 109

3.1. Pękanie gorące 109

3.2. Pękanie zimne 110

3.3. Pękanie lamelarne 110

3.4. Pękanie wyżarzeniowe 110

3.5. Kruchość w wyniku zachodzących przemian 110

3.6. Kruchość w wyniku starzenia 111

3.7. Obliczeniowy sposób wyznaczania wykresów CTPc 114

- 3.8. Własności strefy wpływu ciepła 117**
- 3.8.1. Temperatura przejścia w stan kruchy 118**
- 3.8.2. Twardość strefy wpływu ciepła 120**
- 3.9. Programy komputerowe do oceny spawalności stali i wspomagające opracowanie technologii spawania 121**
- 3.9.1. Mat Spaw 121**
- 3.9.1.1. Moduł „Bazy danych” 121**
- 3.9.1.2. Spawalność 123**
- 3.9.1.3. Moduł „Technologia” 125**
- 3.9.1.4. Moduł „Pomoc” 128**
- 3.9.1.5. Uwagi końcowe 128**
- 3.9.2. Program Starweld 129**
- 3.9.2.1. Moduł Weldware programu Starweld 129**
- 3.9.2.2. Moduł Niroware programu Starweld 131**
- 3.9.3. Schaeffner-Diagramm 133**
- 3.9.4. Spawalność stali stopowych 135**

4. Metody badania spawalności stali oraz odporności na kruche pękanie 136

- 4.1. Próba twardości pod napoiną 137**
- 4.2. Próba napawania ze zmienną energią liniową łuku 137**
- 4.3. Próby pękania na gorąco 138**
- 4.3.1. Badanie skłonności do pęknięć krystalizacyjnych na próbkach o zmieniającej się sztywności ze spoiną czołową 139**
- 4.3.2. Badanie skłonności do pęknięć krystalizacyjnych na zestawie próbek o różnych szerokościach ze spoinami czołowymi 140**
- 4.3.3. Badanie skłonności do pęknięć krystalizacyjnych na próbce teowej ze spoiną pachwinową 142**
- 4.3.3.1. Ocena wyników badań 143**
- 4.3.4. Próba Yarestraint 143**
- 4.3.5. Próba Transvarestraint 144**
- 4.3.6. Próba LTP-1-6 145**
- 4.3.7. Próba Blancheta 146**
- 4.3.8. Próba kołowa segmentowa 148**
- 4.4. Próby pękania zimnego 149**
- 4.4.1. Próba krzyżowa 149**
- 4.4.2. Próba CTS 151**
- 4.4.3. Próba Tekkena 152**
- 4.4.4. Próba Schnadta-Fisco 155**
- 4.4.5. Próba kołkowa (implantacyjna) 156**
- 4.4.6. Próba TRC 162**
- 4.5. Próby pękania lamelarnego 163**
- 4.5.1. Próba Z 163**
- 4.5.2. Próba Cranfielda 164**
- 4.5.3. Próba okienkowa 165**
- 4.6. Próby pękania wyżarzeniowego (relaksacyjnego) 166**
- 4.6.1. Próba kołowa BWRA 166**
- 4.6.2. Próba Tanaki 167**
- 4.6.3. Próba typu H 167**
- 4.6.4. Próby pełzania 168**
- 4.6.5. Próby relaksacji 170**

- 4.7. Próby pękania kruchego 172**
 - 4.7.1. Próba CTOD 173**
 - 4.7.2. Próba szerokiej płyty (Wellsa) 175**
 - 4.7.3. Próba Blink-Nibberinga 177**
 - 4.7.4. Próba Pelliniego 179**
 - 4.7.5. Próba udarności ze zmiennym promieniem karbu 180**
 - 4.7.6. Próba Robertsona 182**
 - 4.7.7. Próba DWTT (Drop Weight Tear Test) 183**
 - 4.7.7.1. Sposób przeprowadzenia próby DWTT 185**
 - 4.7.7.2. Ocena powierzchni przełomu 189**

- 5. Stale konstrukcyjne niestopowe 194**
 - 5.1. Segregacja we wlewkach stalowych i jej wpływ na spawalność 197**
 - 5.2. Starzenie stali niskowęglowych i jego wpływ na własności złącza spawanego 200**
 - 5.2.1. Starzenie po przesycaaniu 200**
 - 5.2.2. Starzenie po zgnioście 202**
 - 5.2.3. Starzenie w procesie spawania 203**
 - 5.3. Porowatość spoin w stalach nieuspokojonych 208**
 - 5.4. Spawalność stali niestopowych 208**

- 6. Stale drobnoziarniste o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości 209**
 - 6.1. Mechanizmy umacniania stali ferrytyczno-perlitycznych 210**
 - 6.1.1. Umocnienie roztworu stałego ferrytu 210**
 - 6.1.2. Umocnienie w wyniku rozdrobnienia ziaren 212**
 - 6.1.3. Utwardzenie wydzieleniowe 214**
 - 6.1.4. Umocnienie dyslokacyjne 215**
 - 6.1.5. Umocnienie przez przemiany fazowe 219**
 - 6.2. Obróbka cieplno-plastyczna 220**
 - 6.3. Rozwój produkcji stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości 228**
 - 6.4. Stale bainityczne 238**
 - 6.5. Stale ulepszone cieplnie 241**
 - 6.6. Efekt Bauschingera 248**
 - 6.7. Spawalność stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości 254**
 - 6.7.1. Pęknięcia gorące 254**
 - 6.7.2. Pęknięcia zimne 256**
 - 6.7.3. Pęknięcie lamelarne 261**
 - 6.7.4. Zmiękczenie strefy wpływu ciepła w wyniku spawania 267**
 - 6.7.5. Odporność złączy spawanych na kruche pęknięcie 272**
 - 6.8. Pęknięcie korozyjne stali i jej połączeń spawanych w obecności wilgotnego siarkowodoru 278**
 - 6.8.1. Pęknięcie wodorowe (HIC) 279**
 - 6.8.2. Pęknięcie naprężeniowe siarczkowe SSC 292**
 - 6.8.3. Metody oceny skłonności do pęknięcia wodorowego HIC 296**
 - 6.8.4. Metody badania korozji naprężeniowej siarczkowej (SSC) 301**

- 7. Stale do pracy w obniżonych i niskich temperaturach 303**
 - 7.1. Spawalność stali do pracy w niskich temperaturach 310**

- 8. Stale do pracy w podwyższonych temperaturach 316**
 - 8.1. Charakterystyka stali stosowanych w energetyce 316**

- 8.2. Charakterystyka stali do instalacji rafineryjnych i petrochemicznych 325**
- 8.3. Zmiany własności plastycznych stali eksploatowanych w podwyższonych temperaturach 331**
 - 8.3.1. Metoda badania skłonności do kruchości eksploatacyjnej połączeń spawanych stali chromowo-molibdenowych 332**
 - 8.3.2. Wpływ składu chemicznego stali i spoin chromowo-molibdenowych na utratę plastyczności 334**
 - 8.3.3. Wskaźniki stosowane do oceny skłonności do utraty plastyczności 336**
 - 8.3.4. Technologiczne sposoby przeciwdziałania obniżeniu plastyczności podczas eksploatacji 336**
- 8.4. Spawanie stali przeznaczonych do pracy w podwyższonych temperaturach 339**
 - 8.4.1. Obróbka cieplna połączeń spawanych 341**
- 8.5. Spawanie stali różniących się składem chemicznym 346**

- 9. Stale odporne na korozję 349**
 - 9.1. Klasyfikacja stali stopowych ze względu na własności użytkowe 350**
 - 9.2. Klasyfikacja stali stopowych ze względu na strukturę 352**
 - 9.3. Stale chromowe ferrytyczne 358**
 - 9.4. Stale chromowe półferrytyczne 360**
 - 9.5. Spawanie stali chromowych ferrytycznych i półferrytycznych 364**
 - 9.5.1. Sposoby zmniejszenia kruchości złączy spawanych ze stali ferrytycznych i półferrytycznych 366**
 - 9.6. Stale chromowe martenzytyczne 368**
 - 9.6.1. Spawanie stali chromowych martenzytycznych 369**
 - 9.7. Stale chromowo-niklowe z miękkim martenzytem 374**
 - 9.7.1. Spawanie stali chromowo-niklowych z miękkim martenzytem 379**
 - 9.8. Stale nierdzewne utwardzane wydzieleniowo 380**
 - 9.8.1. Spawanie stali utwardzanych wydzieleniowo 383**
 - 9.8.2. Własności złączy spawanych 385**
 - 9.8.3. Pękanie złączy spawanych stali nierdzewnych martenzytycznych utwardzanych wydzieleniowo miedzią 386**
 - 9.9. Odporność na korozję międzykrystaliczną połączeń spawanych ze stali chromowych 389**
 - 9.10. Stale austenityczne chromowo-niklowe 391**
 - 9.10.1. Spawalność stali austenitycznych 394**
 - 9.10.1.1. Pękanie na gorąco 394**
 - 9.10.1.2. Kruchość połączeń spawanych stali austenitycznych wskutek tworzenia się fazy sigma 401**
 - 9.10.1.3. Pękanie wyżarzeniowe 407**
 - 9.11. Odporność na korozję połączeń spawanych ze stali austenitycznych 408**
 - 9.11.1. Korozja elektrochemiczna połączeń spawanych 409**
 - 9.11.2. Korozja międzykrystaliczną połączeń spawanych 410**
 - 9.11.3. Korozja nożowa połączeń spawanych w stalach stabilizowanych 415**
 - 9.11.4. Korozja naprężeniowa połączeń spawanych 418**
 - 9.12. Spawanie stali austenitycznych chromowo-niklowych 423**
 - 9.13. Spawanie stali austenitycznych chromowo-niklowo-molibdenowych 425**
 - 9.14. Spawanie stali austenitycznych chromowo-niklowych z dużą zawartością molibdenu 426**
 - 9.15. Spawanie stali ferrytyczno-austenitycznych Cr-Ni-Mo-N (duplex) 432**
 - 9.16. Spawanie stali austenitycznych żaroodpornych i żarowytrzymałych 440**

- 9.17. Spawanie stali różnorodnych przy użyciu spoiwa austenitycznego 444**
- 9.17.1. Struktura spoin w złączach mieszanych 446**
- 9.17.2. Spawanie stali niskostopowych hartujących się 450**
- 9.17.3. Spawanie stali odpornych na korozję, martenzytycznych i ferrytycznych 451**
- 9.17.4. Spawanie stali niskowęglowych ze stalami wysokostopowymi 452**
- 9.17.5. Problemy wykonywania połączeń stali różnorodnych stosowanych w wysokich temperaturach 454**
- 9.18. Spawanie stali platerowanych 455**

- Literatura 459**
- Skorowidz ważniejszych terminów 469**