

Poradnik INŻYNIERA 1

Spawalnictwo

Wydawnictwo WNT

Poradnik
INŻYNIERA
1
Spawalnictwo

Autorzy

prof. dr hab. inż. Piotr Adamiec
dr inż. Marek Banasik
doc. dr inż. Jerzy Brózda
dr inż. Eugeniusz Dębski
dr inż. Edward Dobaj
mgr inż. Stanisław Dziuba
dr inż. Kazimierz Ferenc
prof. dr hab. inż. Andrzej Klimpel
mgr inż. Bolesław Kurpisz
mgr inż. Tadeusz Kuzio
dr inż. Mirosław Łomozik
mgr inż. Jolanta Matusiak
dr inż. Jerzy Niagaj
prof. dr hab. inż. Jan Pilarczyk
dr inż. Piotr Sędek
dr inż. Jacek Słania
dr inż. Eugeniusz Szczok
dr inż. Andrzej Szymański
dr inż. Eugeniusz Turyk
dr inż. Andrzej Winiowski
prof. dr hab. inż. Władysław Włosiński
dr inż. Marian Zeman
mgr Wanda Zeman

Poradnik
INŻYNIERA
1
Spawalnictwo

pod redakcją
prof. dr. hab. inż. Jana Pilarczyka

Wydanie drugie

Wydawnictwo WNT

Koordynator: *dr inż. Jacek Słania*
Redaktor: *mgr inż. Marek Kośnik*
Projekt okładki i stron tytułowych: *Grafos*
Redaktorzy techniczni:
Barbara Chojnacka-Flisiuk, Grażyna Miazek
Korekta: *Zespół*
Skład i łamanie: *Ango Bis*
Fotografia na okładce: *max halanskii/shutterstock*

Wydawca: *Karol Zawadzki*

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo WNT
Warszawa 2003, 2008
Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2017

ISBN 978-83-01-19180-1 (całość)
ISBN 978-83-01-19181-8 (tom 1)

Wydanie II – 3 dodruk (PWN)
Warszawa 2018

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Druk i oprawa: ELPIL, Siedlce

Spis treści

Przedmowa **19**

O zespole autorskim **21**

1

Klasyfikacja i charakterystyka procesów spawania i pokrewnych **23**

Literatura 35

2

Przetwarzanie energii do celów spawalniczych [1] **37**

2.0. Wstęp 37
2.1. Nagrzewanie skoncentrowanym światłem 39
2.2. Nagrzewanie indukcyjne 40
2.3. Nagrzewanie ciepłem wydzielonym na rezystancji 40
2.4. Nagrzewanie łukiem elektrycznym 41
2.5. Nagrzewanie strumieniem plazmy niskotemperaturowej 44
2.6. Nagrzewanie wiązką elektronową 45
2.7. Nagrzewanie wiązką laserową 49
2.8. Nagrzewanie tarciowe 50
Literatura 52

3

Cieplne procesy spawalnicze **53**

3.1. Uwagi ogólne 53
3.2. Przepływ ciepła i pole temperatur przy spajaniu 57

3.2.1. Równanie różniczkowe przewodzenia ciepła 57
3.2.2. Pole temperatur w przypadku napawania lub spawania ciała masywnego 59
3.2.3. Pole temperatur w przypadku spawania i napawania 62
3.2.4. Pole temperatur w przypadku zgrzewania płyt i prętów 65
3.2.5. Napawanie wałków 66
3.3. Wybrane zagadnienia topienia metalu, tworzenia się jeziorka spawalniczego i jego krystalizacji 67
3.3.1. Jeziorko spawalnicze i jego wymiary 67
3.3.2. Efektywność cieplna procesu spawania 70
3.4. Nagrzewanie i topienie drutu elektrodowego 70
3.5. Spawalniczy cykl cieplny 74
3.5.1. Wielkość strefy wpływu ciepła 76
3.5.2. Wielkości charakterystyczne cyklu cieplnego prostego 77
3.5.3. Uwagi dotyczące cyklu cieplnego złożonego 80
3.6. Metody określania pola temperatur i wyznaczania cyklu cieplnego w procesie spajania 81
3.6.1. Metody numeryczne wyznaczania pola temperatur i cykli cieplnych 82
3.6.2. Metoda termografii do oceny pola temperatur 84
3.6.3. Pomiar bezpośredni temperatur i wyznaczenie cykli cieplnych 85
Literatura 87

4

Metalurgia spawania **88**

4.1. Różnorodność metalurgicznych procesów spawania 88
4.2. Utlenianie i redukcja 89
4.3. Odsiarczanie ciekłego metalu 91
4.4. Odfosforowanie ciekłego metalu 92
4.5. Wprowadzanie składników stopowych do spoiny 93
4.6. Żużle spawalnicze 95
4.7. Rozpuszczanie i wydzielanie gazów w ciekłym metalu 98
4.7.1. Wodór w procesie spawania 100
4.7.2. Azot w procesie spawania 102
4.7.3. Tlen w procesie spawania 103
4.8. Krystalizacja 105
4.9. Pęcherze i pory gazowe w spoinach 107
4.10. Wtrącenia niemetaliczne w spoinach 108
4.11. Pęknięcia gorące w spoinach 110
Literatura 112

5

Podstawy metaloznawstwa spawalniczego i spawalność materiałów 113

5.1. Proces spawania ... 113
5.2. Cykl cieplny spawania ... 114
5.3. Strefy ogólne złączy spawanych ... 117
5.4. Strefy szczególne złączy spawanych ... 120
5.4.1. Strefa starzenia w stalach niskowęglowych ... 120
5.4.2. Strefa podhartowania w stalach C-Mn ... 122
5.4.3. Strefa martenzytu odpuszczonego w stalach ulepszanych cieplnie ... 123
5.4.4. Strefa wydzielania węglików w stalach austenitycznych ... 124
5.4.5. Złącza spawane niejednorodne ... 126
5.5. Obróbka cieplna złączy spawanych ... 127
5.6. Określenie i definicja spawalności ... 130
5.7. Rodzaje spawalności ... 132
5.8. Metody oceny spawalności ... 134
5.8.1. Metody teoretyczne ... 134
5.8.2. Metody praktyczne ... 138
5.9. Próby badania skłonności stali do pękania ... 147
Literatura ... 151

6

Stale stosowane na konstrukcje spawane 152

6.0. Podział stali i ich oznaczanie ... 152
6.1. Stale niestopowe ... 154
6.2. Stale stopowe ... 159
6.2.1. Węglowo-manganowe i mikrostopowe stale o podwyższonej wytrzymałości ... 159
6.2.2. Stale walcowane termomechanicznie ... 164
6.2.3. Stale ulepszone cieplnie ... 164
6.2.4. Spawalność i wytyczne spawania drobnoziarnistych stali konstrukcyjnych ... 166
6.2.5. Stale do pracy w bardzo niskich temperaturach (stale kriotechniczne) ... 175
6.2.6. Stale konstrukcyjne do ulepszania cieplnego ... 180
6.2.7. Stale na narzędzia ... 183
6.2.8. Stale stopowe specjalne ... 186
6.3. Stale do pracy w podwyższonych temperaturach ... 189
6.3.1. Wprowadzenie ... 189

6.3.2. Stale energetyczne niestopowe ... 190
6.3.3. Stale energetyczne stopowe ... 194
6.3.4. Spawalność stali energetycznych niestopowych ... 199
6.3.5. Spawalność stali energetycznych stopowych ... 204
6.4. Wysokostopowe stale odporne na korozję ... 217
6.4.1. Ogólna charakterystyka stali odpornych na korozję ... 217
6.4.2. Klasyfikacja stali odpornych na korozję według mikrostruktury ... 218
6.4.3. Chromowe stale martenzytyczne ... 218
6.4.4. Chromowe stale ferrytyczne ... 221
6.4.5. Chromowo-niklowe stale z miękkim martenzytem ... 224
6.4.6. Chromowo-niklowe stale austenityczne ... 226
6.4.7. Austenityczno-ferrytyczne stale odporne na korozję (stale typu duplex) ... 232
Literatura ... 235

7

Metale nieżelazne stosowane na konstrukcje spawane **238**

7.1. Nikiel i jego stopy ... 238
7.1.1. Właściwości niklu ... 238
7.1.2. Spawalność niklu ... 241
7.1.3. Stopy niklu ... 242
7.1.4. Spawalność stopów niklu ... 248
7.1.5. Spawanie niklu i jego stopów ... 248
7.1.6. Problemy występujące podczas spawania stopów niklu i zalecenia odnośnie do technologii ich łączenia ... 250
7.2. Miedź i jej stopy ... 252
7.2.1. Właściwości miedzi ... 252
7.2.2. Spawalność miedzi ... 254
7.2.3. Spawanie miedzi ... 255
7.2.4. Stopy miedzi ... 256
7.3. Aluminium i jego stopy ... 264
7.3.1. Charakterystyka aluminium ... 264
7.3.2. Spawalność aluminium i jego stopów ... 265
7.3.3. Spawanie aluminium i jego stopów ... 269
7.3.4. Badanie technologii spawania aluminium i jego stopów ... 276
7.3.5. Zgrzewanie aluminium i jego stopów ... 278
7.3.6. Lutowanie aluminium i jego stopów ... 280
7.4. Magnez i jego stopy ... 282
7.4.1. Charakterystyka magnezu i jego stopów ... 282

7.4.2. Stopy magnezu i ich spawalność ... 283
7.4.3. Spawanie stopów magnezu ... 285
7.4.4. Obróbka cieplna po spawaniu ... 289
7.4.5. Zgrzewanie stopów magnezu ... 289
7.4.6. Lutowanie stopów magnezu ... 290
7.5. Tytan i jego stopy ... 291
7.5.1. Wprowadzenie ... 291
7.5.2. Spawanie tytanu i jego stopów ... 298
7.5.3. Spawalność stopów tytanu ... 300
7.5.4. Spajanie tytanu i jego stopów ... 301
7.5.5. Problem zgrzewania tytanu i jego stopów ... 311
7.5.6. Problem lutowania tytanu i jego stopów ... 312
7.6. Metale specjalne ... 312
7.6.1. Cyrkon ... 313
7.6.2. Hafn ... 314
7.6.3. Tantal ... 314
7.6.4. Niob ... 315
7.6.5. Beryl ... 316
7.6.6. Uran ... 317
7.6.7. Molibden i wolfram ... 317
7.6.8. Srebro ... 318
7.6.9. Złoto ... 319
7.6.10. Platyna ... 319
7.6.11. Ołów ... 320
Literatura ... 322

8

Inne materiały stosowane na konstrukcje spawane 325

8.1. Materiały ceramiczne ... 325
8.1.1. Obszar zastosowań materiałów ceramicznych ... 325
8.1.2. Wybrane właściwości materiałów ceramicznych ... 328
8.1.3. Podstawy procesów spajania materiałów ceramicznych ... 331
8.1.4. Techniki spajania ... 337
8.1.5. Konstrukcja złączy ceramiczno-metalowych ... 341
8.2. Kompozyty metalowe ... 342
8.2.1. Charakterystyka kompozytów metalowych ... 342
8.2.2. Materiały wyjściowe ... 344
8.2.3. Materiały faz wzmacniających ... 345
8.2.4. Materiały osnowy ... 347
8.2.5. Techniki spajania kompozytów metalowych ... 349

8.3. Materiały do spajania materiałów ceramicznych i kompozytowych ... 351
8.3.1. Spoiwa ... 351
8.3.2. Inne materiały pomocnicze używane do spajania ceramiki i kompozytów ... 363
8.4. Żeliwa ... 364
8.4.1. Ogólna charakterystyka i podział żeliw ... 364
8.4.2. Spawalność żeliw ... 369
8.4.3. Wytyczne spawania żeliw ... 371
8.5. Materiały dodatkowe do spawania żeliwa ... 377
8.6. Tworzywa termoplastyczne ... 378
8.6.1. Ogólne wiadomości o tworzywach termoplastycznych ... 378
8.6.2. Ważniejsze właściwości tworzyw termoplastycznych ... 380
8.6.3. Rodzaje tworzyw termoplastycznych ... 385
8.6.4. Metody spajania tworzyw termoplastycznych ... 390
8.7. Materiały dodatkowe do zgrzewania i spawania tworzyw termoplastycznych ... 392
8.7.1. Materiały dodatkowe do zgrzewania ... 392
8.7.2. Materiały dodatkowe do spawania ... 395
Literatura ... 396

9

Materiały dodatkowe do spawania 398

9.0. Wstęp ... 398
9.1. Rodzaje materiałów dodatkowych ... 398
9.2. Spoiwa ... 399
9.2.1. Charakterystyka ogólna spoiw ... 400
9.2.2. Wymiary spoiw ... 407
9.2.3. Stan dostawy spoiw ... 410
9.2.4. Znakowanie spoiw ... 412
9.2.5. Opakowanie ... 413
9.2.6. Warunki transportu i magazynowania ... 414
9.2.7. Przygotowanie spoiw do użycia ... 415
9.3. Gazy techniczne ... 416
9.3.1. Gazy osłonowe ... 416
9.3.2. Gazy palne ... 421
9.3.3. Gazy podtrzymujące palenie ... 425
9.4. Topniki ... 426
9.4.1. Topniki do spawania łukiem krytym ... 426
9.4.2. Topniki do spawania innymi metodami ... 435

9.5. Inne materiały dodatkowe ... 437
9.5.1. Elektrody wolframowe ... 437
9.5.2. Elektrody węglowe ... 440
9.5.3. Elektrody topliwe do cięcia i żłobienia ... 441
9.5.4. Podkładki formujące ... 441
9.5.5. Pierścienie ceramiczne ... 443
9.5.6. Mieszanki termitowe ... 443
9.6. Materiały pomocnicze ... 444
9.6.1. Materiały do czyszczenia przed spawaniem ... 444
9.6.2. Środki ochronne przed odpryskami ... 444
9.6.3. Materiały termoizolacyjne ... 445
9.6.4. Kredki termoindykatorowe ... 445
9.6.5. Środki trawiące po spawaniu ... 445
Literatura ... 446

10

Dobór materiałów na konstrukcje spawane 448

10.1. Zalecenia ogólne ... 448
10.2. Charakterystyki mechaniczne stali na konstrukcje spawane ... 450
10.3. Wybór kategorii wytrzymałości stali ... 458
10.4. Dobór stali ze względu na pękanie kruche ... 461
10.5. Dobór stali do pracy w podwyższonych temperaturach ... 465
10.6. Stale trudno rdzewiejące ... 468
10.7. Dobór stali na konstrukcje obciążone zmęczeniowo ... 470
10.8. Charakterystyka i dobór stopów aluminium na konstrukcje spawane ... 472
Literatura ... 477

11

Materiały dodatkowe do spawania stali stosowanych na konstrukcje spawane 479

11.0. Wstęp ... 479
11.1. Materiały dodatkowe do spawania stali niestopowych i drobnoziarnistych ... 480
11.1.1. Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego ... 481
11.1.2. Druty elektrodowe do spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazów i ich stopiwo ... 484
11.1.3. Pręty i druty do spawania łukowego w osłonie gazów elektrodą wolframową (TIG) oraz ich stopiwo ... 485

11.1.4. Druty elektrodowe i kombinacje drut-topnik do spawania łukiem krytym ... 487
11.1.5. Druty proszkowe do spawania łukowego w osłonie i bez osłony gazowej ... 488
11.1.6. Pręty do spawania tlenowo-gazowego ... 491
11.1.7. Druty i kombinacje drut-topnik do spawania elektrożużlowego ... 492
11.2. Materiały dodatkowe do spawania stali o wysokiej wytrzymałości ... 492
11.2.1. Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego ... 493
11.2.2. Druty elektrodowe, druty i pręty do spawania łukowego w osłonie gazów oraz ich stopiwo ... 496
11.2.3. Druty elektrodowe i kombinacje drut-topnik do spawania łukiem krytym ... 499
11.2.4. Druty proszkowe do spawania łukowego w osłonie gazowej ... 499
11.3. Materiały dodatkowe do spawania stali żarowytrzymałych ... 501
11.3.1. Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego ... 501
11.3.2. Druty elektrodowe, druty i pręty do spawania łukowego oraz ich stopiwo ... 504
11.3.3. Druty proszkowe do spawania łukowego w osłonie gazowej ... 506
11.3.4. Pręty do spawania tlenowo-gazowego ... 508
11.4. Materiały dodatkowe do spawania stali nierdzewnych i żaroodpornych ... 509
11.4.1. Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego ... 509
11.4.2. Druty elektrodowe, druty i pręty do spawania łukowego ... 513
11.4.3. Druty proszkowe do spawania łukowego w osłonie i bez osłony gazowej ... 517
Literatura ... 520

12

Materiały dodatkowe do spawania metali nieżelaznych stosowanych na konstrukcje spawane 522

12.0. Wstęp ... 522
12.1. Materiały do spawania niklu i jego stopów ... 523
12.1.1. Spoiwa niklowe ... 524
12.1.2. Gazy osłonowe ... 533
12.1.3. Topniki ... 534
12.2. Materiały do spawania miedzi i jej stopów ... 536
12.2.1. Spoiwa ... 537
12.2.2. Gazy osłonowe ... 543
12.2.3. Topniki ... 543
12.3. Materiały do spawania aluminium i jego stopów ... 544
12.3.1. Spoiwa aluminiowe ... 544

12.3.2. Gazy osłonowe ... 551
12.3.3. Topniki ... 551
12.4. Materiały do spawania magnezu i jego stopów ... 552
12.4.1. Spoiwa ... 552
12.4.2. Gazy osłonowe ... 553
12.5. Materiały do spawania metali reaktywnych i ich stopów ... 554
12.5.1. Materiały do spawania tytanu i jego stopów ... 554
12.5.2. Materiały do spawania cyrkonu i berylu oraz ich stopów ... 555
12.6. Materiały do spawania metali wysokotopliwych i ich stopów ... 555
12.7. Materiały do spawania metali szlachetnych i ich stopów ... 556
12.8. Materiały do spawania metali niskotopliwych i ich stopów ... 556
12.8.1. Materiały do spawania cynku i jego stopów ... 556
12.8.2. Materiały do spawania ołowiu i jego stopów ... 557
Literatura ... 558

13

Naprężenia i odkształcenia spawalnicze 559

13.1. Cieplno-mechaniczne właściwości metali i stopów ... 559
13.2. Powstawanie naprężeń własnych ... 563
13.3. Rozkłady naprężeń własnych ... 568
13.4. Odkształcenia spawalnicze ... 572
13.4.1. Odkształcenia poprzeczne ... 573
13.4.2. Odkształcenia podłużne ... 574
13.4.3. Odkształcenia kątowe ... 577
13.5. Zasady minimalizacji naprężeń i odkształceń spawalniczych ... 580
13.6. Odprężanie mechaniczne ... 587
13.7. Stabilność wymiarowa konstrukcji ... 592
13.8. Stabilizacja wibracyjna ... 594
Literatura ... 597

14

Projektowanie połączeń spawanych 598

14.1. Charakterystyka złączy i spoin ... 598
14.2. Przygotowanie brzegów złączy do spawania ... 605
14.3. Oznaczanie i wymiarowanie spoin na rysunkach ... 608
14.3.1. Postanowienia ogólne ... 608
14.3.2. Znaki spoin ... 609
14.3.3. Umiejscowienie znaków spoin na rysunkach ... 609
14.3.4. Oznaczenia uzupełniające ... 612
14.4. Wymiarowanie spoin ... 613

14.5. Technologiczność konstrukcji spawanych 615
14.6. Projektowanie połączeń spawanych – zalecenia ogólne 616
Literatura 635

15
Wytrzymałość połączeń spawanych 636

15.1. Obliczenia statyczne 636
15.2. Obliczanie wytrzymałości zmęczeniowej 647
15.3. Obliczanie odporności na kruche pękanie 661
Literatura 669

16
Klasyfikacja i certyfikacja w spawalnictwie 670

16.1. Klasyfikacja wytwórców wyrobów spawanych 670
16.1.1. Klasyfikacja zakładów przemysłowych na podstawie PN-87/M-69009 670
16.1.2. Klasyfikacja zakładów przemysłowych przez niektóre krajowe organizacje nadzorcze (UDT i PRS) 672
16.1.3. Klasyfikacja zakładów przemysłowych w normach i przepisach europejskich 675
16.2. Szkolenie i kwalifikowanie personelu spawalniczego 677
16.2.1. System szkolenia i kwalifikowania personelu spawalniczego w Polsce 677
16.2.2. Europejski system szkolenia i kwalifikowania personelu spawalniczego 680

17
Zapewnienie jakości w spawalnictwie 699

17.1. Zarządzanie przez jakość 699
17.2. Systemy zapewnienia jakości 700
17.2.1. System zapewnienia jakości według norm serii PN-ISO 9000:1996 701
17.2.2. System zapewnienia jakości według norm serii PN-EN ISO 9000:2001 703
17.2.3. Systemy zarządzania środowiskowego 711
17.2.4. Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy 713
17.2.5. Systemy zapewnienia jakości według normy PN-EN 729 713
17.3. Procedura oceny zgodności wyrobu 723
17.3.1. Moduły stosowane w ocenie zgodności wyrobu 723
17.3.2. Dokumentacja techniczna 726

17.3.3. Deklaracja zgodności ... 727
17.3.4. Jednostki notyfikowane ... 729
17.3.5. Znakowanie CE ... 730
17.4. Certyfikacja w spawalnictwie ... 731
17.4.1. Certyfikacja wyrobów spawalniczych ... 731
17.4.2. Certyfikacja personelu ... 732
17.4.3. Certyfikacja systemów jakości ... 734
17.4.4. Instytut Spawalnictwa jako jednostka certyfikująca ... 735
17.5. Przebieg procesu certyfikacji systemu jakości ... 738
17.6. Jednostki akredytujące i autoryzujące ... 747
17.6.1. Polskie Centrum Akredytacji ... 747
17.6.2. Europejska Federacja Spawalnicza ... 748
17.6.3. Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa ... 750
Literatura ... 754

18

Niezgodności spawalnicze złączy spawanych, zgrzewanych i lutowanych 757

18.0. Wstęp ... 757
18.1. Niezgodności spawalnicze złączy spawanych ... 760
18.1.1. Pustki gazowe ... 760
18.1.2. Wtrącenia stałe ... 768
18.1.3. Przyklejenia ... 775
18.1.4. Brak przetopu ... 777
18.1.5. Pęknięcia ... 780
18.1.6. Niezgodności spawalnicze dotyczące kształtu złączy spawanych ... 794
18.2. Niezgodności spawalnicze złączy zgrzewanych ... 802
18.3. Niezgodności spawalnicze złączy lutowanych ... 810
Literatura ... 813

19

Kontrola jakości w spawalnictwie 816

19.1. Zakres kontroli procesów spawalniczych ... 816
19.2. Nieniszczące metody badań połączeń spajanych ... 820
19.2.1. Badania wizualne ... 822
19.2.2. Badania szczelności ... 825
19.2.3. Badania penetracyjne ... 830
19.2.4. Badania magnetyczno-proszkowe ... 835
19.2.5. Badania prądami wirowymi ... 844
19.2.6. Badania radiologiczne ... 845

19.2.7. Badania ultradźwiękowe 866
19.3. Niszczące metody badań 878
19.3.1. Badania mechaniczne 878
19.3.2. Badania metalograficzne 891
Literatura 898

20

Dokumentacja procesów spawalniczych 914

20.1. System jakości w spawalnictwie 914
20.2. Opracowanie dokumentacji systemu jakości w spawalnictwie 915
20.3. Warunki techniczne przygotowania produkcji 921
20.3.1. Analiza dokumentacji technicznej 921
20.3.2. Technologiczny plan spawania 922
20.4. Kwalifikowanie procedur spawalniczych 925
20.4.1. Wstępna instrukcja technologiczna spawania pWPS 925
20.4.2. Instrukcja technologiczna spawania WPS 925
20.5. Uznawanie technologii spawania 928
20.5.1. Uznawanie technologii spawania na podstawie badań technologii spawania 929
20.5.2. Uznawanie technologii spawania na podstawie stosowanych uznanych materiałów dodatkowych do spawania 934
20.5.3. Uznanie technologii spawania na podstawie uzyskanego doświadczenia 936
20.5.4. Uznanie technologii spawania na podstawie standardowej technologii spawania łukowego 936
20.5.5. Uznanie technologii spawania na podstawie badania przedprodukcyjnego spawania 937
20.5.6. Uznanie technologii spawania lądowych i pozabrzeżnych rurociągów przesyłowych 937
20.5.7. Protokół uznania technologii spawania WPAR 937
20.6. Technologiczny plan spawania belek dwuteowych mostu drogowego 937
Literatura 954

21

Ekonomika wytwarzania konstrukcji spawanych 956

21.1. Wstęp 956
21.2. Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych na koszty spawania 957
21.3. Przygotowanie konstrukcji do spawania 963

21.4. Organizacja produkcji ... 965
21.5. Podstawowe wskaźniki wpływające na ekonomikę spawania ... 965
21.5.1. Techniczna norma czasu spawania T_n ... 966
21.5.2. Współczynnik czasu jarzenia się łuku W_j ... 967
21.5.3. Współczynnik stapiania i wydajność stapiania ... 968
21.5.4. Masa spoin ... 971
21.5.5. Wskaźnik uzysku stopiwa U_c ... 974
21.6. Koszty spawania ... 974
21.6.1. Charakterystyka kosztów spawania ... 974
21.6.2. Koszt materiałów dodatkowych do spawania ... 975
21.6.3. Koszy robocizny bezpośredniej K_R ... 976
21.6.4. Koszt energii elektrycznej K_{EL} ... 977
21.6.5. Koszt urządzeń K_U ... 978
21.6.6. Koszt remontów K_R ... 979
21.6.7. Koszt powierzchni produkcyjnej K_P ... 979
21.6.8. Wzory na obliczanie kosztów bezpośrednich spawania poszczególnymi metodami ... 979
21.6.9. Struktura kosztów spawania ... 980
21.7. Możliwości obniżki kosztów spawania ... 981
21.8. Efektywność ekonomiczna stosowanych metod spawania ... 982
21.9. Koszty jakości ... 983
Literatura ... 984

22

Technika komputerowa w spawalnictwie 985

22.1. Wstęp ... 985
22.2. Spawalnicze bazy danych ... 986
22.3. Komputerowe wspomaganie projektowania technologii spajania ... 988
22.4. Komputerowe wspomaganie projektowania konstrukcji spawanych ... 991
22.5. Modularne pakiety programowe ... 991
22.6. Komputerowe wspomaganie projektowania stanowisk spawalniczych ... 993
22.7. Komputerowe sterowanie procesami technologicznymi ... 993
22.8. Komputerowe wspomaganie zapewnienia jakości ... 994
22.9. Komputerowe wspomaganie obliczeń ekonomicznych ... 996
22.10. Komputerowe wspomaganie ochrony zdrowia i środowiska ... 996
22.11. Komputerowe wspomaganie w szkoleniu i egzaminowaniu ... 997
22.12. Komputerowe wspomaganie badań w spawalnictwie ... 997

22.13. Komputerowe wspomaganie w informacji naukowo-technicznej ... 999
22.14. Spawalnictwo w Internecie ... 1000
22.15. Kryteria oceny i wyboru oprogramowania ... 1001
Literatura ... 1002

23

Bezpieczeństwo i higiena prac spawalniczych 1004

23.1. Zagrożenia zdrowia i bezpieczeństwa występujące przy pracach spawalniczych ... 1004
23.1.1. Zanieczyszczenia pyłowe i gazowe ... 1004
23.1.2. Promieniowanie łuku spawalniczego ... 1013
23.1.3. Hałas ... 1016
23.1.4. Pole elektromagnetyczne ... 1018
23.2. Wymagania bezpieczeństwa i higieny pracy podczas prac spawalniczych ... 1021
23.2.1. Wymagania bezpieczeństwa w organizacji spawalni i stanowiska spawalniczego ... 1021
23.2.2. Wymagania bezpieczeństwa podczas użytkowania urządzeń spawalniczych i osprzętu oraz podczas wykonywania prac spawalniczych ... 1024
23.3. Środki ochrony zbiorowej i indywidualnej stosowane na stanowiskach spawalniczych ... 1026
23.3.1. Środki ochrony zbiorowej. Wentylacja ... 1026
23.3.2. Środki ochrony indywidualnej. Ochrony oczu i twarzy ... 1027
23.3.3. Środki ochrony indywidualnej. Odzież ochronna ... 1031
Literatura ... 1033

24

Spis spawalniczych przepisów krajowych i zagranicznych 1035

Skorowidz 1061

Przedmowa

We wszystkich krajach spawalnictwo jest podstawową technologią przetwarzania, zwłaszcza łączenia materiałów metalicznych, a ostatnio również tworzyw sztucznych. Konstrukcje i wyroby spawane występują we wszystkich dziedzinach życia: od olbrzymich supertankowców po elementy mikroelektroniki, od przestrzeni kosmicznej po budowle podwodne, od budownictwa przemysłowego po zastosowania w gospodarstwach domowych i medycynie. Różnorodność technologii i metod spawalniczych, przetwarzanych i łączonych materiałów, urządzeń spawalniczych oraz problemów badawczych związanych ze spawalnictwem jest przeogromna i wymaga zaangażowania różnych specjalistów: od osób bezpośrednio zatrudnionych w wytwarzaniu, przez badaczy i naukowców, nauczycieli akademickich i zawodowych, inspektorów i instruktorów do wykwalifikowanych spawaczy, dostawców i serwisantów.

Zapotrzebowanie na wiedzę spawalniczą jest ogromne. Wydawane są liczne książki, skrypty i monografie, ukazuje się kilkadziesiąt czasopism. Brakuje jednak opracowania, w którym zawarta byłaby cała wiedza spawalnicza. Stąd powstał pomysł opracowania dzieła pt. „Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo".

W 1962 roku ukazało się pierwsze wydanie „Poradnika Spawalniczego" (w nakładzie 6000 egz.). Był on później dwukrotnie uzupełniany i rozszerzany. Wydanie II (w nakładzie 10 000 egz.) ukazało się w 1967 roku, natomiast wydanie III (w nakładzie 20 200 egz.) w 1970 roku.

W latach 80. ubiegłego wieku Wydawnictwa Naukowo-Techniczne podjęły trud wydania cyklu poradników inżynierskich z zakresu technologii mechanicznych. Pierwszym z tego cyklu był „Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo", poprzedzający późniejsze inne poradniki o tematyce: odlewnictwo, obróbka skrawaniem, obróbka plastyczna. Całkowicie zmienione i powiększone (do 2 tomów) I wydanie „Poradnika Inżyniera. Spawalnictwo" (w nakładzie 25 220 egz.) oddano do rąk Czytelników w 1983 roku.

Obecnie po prawie 20 latach ukazuje się całkiem nowe 3-tomowe wydanie „Poradnika Inżyniera. Spawalnictwo".

Obydwa zespoły, autorski i wydawniczy, włożyły olbrzymi wysiłek w przygotowanie, opracowanie i wydanie poradnika. Oddając go do rąk Czytelników, liczymy na życzliwe jego przyjęcie, duże zainteresowanie, ale również na cenne uwagi, które będą mogły być w przyszłości wykorzystane. Mamy wielką nadzieję, że „Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo" spełni swoje zadanie i będzie pomocny w nauczaniu w uczelniach, szkołach i ośrodkach szkoleniowych, w produkcji spawalniczej w dużych przedsiębiorstwach, średnich zakładach i małych warsztatach oraz w zawodowym życiu licznych osób zajmujących się i interesujących spawalnictwem.

prof. dr hab. inż. JAN PILARCZYK

O zespole autorskim

Specjalizacja w spawalnictwie posunęła się dzisiaj tak daleko, że niemożliwe jest samodzielne pisanie w sposób wyczerpujący, jasny i obiektywny o wielu jego dziedzinach. Mając to na uwadze, do opracowania bardzo różnorodnego tematycznie i obszernego objętościowo dzieła, jakim jest PORADNIK INŻYNIERA. SPAWALNICTWO, dobrano zespół najlepszych specjalistów w poszczególnych dziedzinach spawalnictwa.

Trzon zespołu autorskiego stanowią doświadczeni, długoletni pracownicy Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach. Doc. dr inż. Jerzy Brózda, dr inż. Marian Zeman, dr inż. Mirosław Łomozik i dr inż. Marek Banasik mają rozległą wiedzę z zakresu materiałoznawstwa, a zwłaszcza spawalności materiałów na konstrukcje spawane. Mgr inż. Tadeusz Kuzio, dr inż. Jerzy Niagaj i dr inż. Andrzej Winiowski zajmują się materiałami dodatkowymi do spawania stali i materiałów nieżelaznych. Prof. dr hab. inż. Jan Pilarczyk jest specjalistą w dziedzinie metaloznawstwa spawalniczego, spawalności materiałów i metalurgii procesów spawania. Mgr inż. Stanisław Dziuba specjalizuje się w zagadnieniach łączenia tworzyw termoplastycznych. Dr inż. Piotr Sędek zajmuje się wytrzymałością połączeń spawanych oraz naprężeniami i odkształceniami spawalniczymi. Dr inż. Edward Dobaj jest specjalistą od elektrotechniki i elektrycznych urządzeń spawalniczych. Dr inż. Eugeniusz Turyk interesuje się wykorzystaniem techniki komputerowej w spawalnictwie. Dr inż. Eugeniusz Szczok prowadzi sprawy jakości i certyfikacji w spawalnictwie, po zmarłym przedwcześnie dr. inż. Eugeniuszu Dębskim. Mgr inż. Bolesław Kurpisz i dr inż. Jacek Słania zajmują się szkoleniem i kwalifikowaniem personelu spawalniczego oraz kwalifikowaniem zakładów wytwarzających konstrukcje i wyroby spawane. Mgr inż. Jolanta Matusiak specjalizuje się w zagadnieniach bezpieczeństwa i higieny prac spawalniczych. Mgr Wanda Zeman zajmuje się ekonomiką wytwarzania konstrukcji spawanych.

Do zespołu autorskiego zaproszono wybitnych specjalistów: prof. dr. hab. Władysława Włosińskiego z Politechniki Warszawskiej, w dziedzinie wy-

twarzania i łączenia materiałów ceramicznych i kompozytów metalowych, prof. dr. hab. inż. Andrzeja Klimpla z Politechniki Śląskiej, w dziedzinie kontroli jakości połączeń spawanych, prof. dr. hab. inż. Piotra Adamca z Politechniki Śląskiej, zajmującego się teorią cieplnych procesów spawalniczych, dr. inż. Kazimierza Ferenca z Politechniki Warszawskiej, w dziedzinie projektowania konstrukcji spawanych, oraz dr. inż. Andrzeja Szymańskiego z Politechniki Śląskiej, w dziedzinie kontroli jakości w spawalnictwie.

Opiekę merytoryczną i organizacyjną nad całością prac sprawował prof. dr hab. inż. Jan Pilarczyk, znany specjalista w dziedzinie spawalnictwa, doskonale znający polskie środowisko spawalnicze, badacz, naukowiec i wykładowca w Instytucie Spawalnictwa i na wielu uczelniach, a jednocześnie Dyrektor Instytutu Spawalnictwa, Prezydent European Federation for Welding, Joining and Cutting, były Wiceprezydent International Institute of Welding, Redaktor Naczelny Przeglądu Spawalnictwa oraz autor wielu publikacji i organizator licznych imprez spawalniczych w kraju i za granicą.

1

Klasyfikacja i charakterystyka procesów spawania i pokrewnych

Autor
dr inż. Jacek Słania

W rozdziale 1 przedstawiono klasyfikację i charakterystykę:

- metod spawania, zgrzewania i lutowania,
- procesów pokrewnych spawaniu,
- metod łączenia tworzyw termoplastycznych.

Do klasyfikacji metod spawania, zgrzewania i lutowania skorzystano z normy PN-EN 24063:1993 (ISO 4063:1990). Norma ta ustala nazwy metod spawania, zgrzewania i lutowania oraz ich oznaczenia numeryczne. Każda metoda jest identyfikowana przez oznaczenie numeryczne. Oznaczenia te są stosowane głównie do umownego przedstawiania połączeń spawanych, zgrzewanych i lutowanych na rysunkach.

0 Spawanie
Odmiana spajania realizowana przez lokalne stopienie łączonych elementów bez wywarcia docisku.

1 Spawanie łukowe
Spawanie, w którym źródłem ciepła jest łuk elektryczny.

101 Spawanie łukowe elektrodą metalową
Spawanie łukowe elektrodą metalową, która stapiając się w tym procesie, służy jako spoiwo.

11 Spawanie łukowe elektrodą metalową bez osłony gazów
Spawanie, w którym łuk jarzy się między gołym drutem elektrodowym a przedmiotem spawanym bez jakiejkolwiek osłony zewnętrznej.

111 Spawanie łukowe elektrodą otuloną; spawanie łukowe elektrodą metalową ręczne
Spawanie łukowe z użyciem otulonej elektrody topliwej.

112 Spawanie łukowe grawitacyjne
Spawanie łukowe z użyciem elektrody otulonej zamocowanej w przyrządzie,

który umożliwia jej grawitacyjne opadanie i przemieszczanie się łuku wzdłuż styku.

113 Spawanie łukowe elektrodą nieotuloną
Spawanie, w którym spoiwem jest drut połączony z jednym z biegunów zasilacza łuku spawalniczego.

114 Spawanie łukowe drutem elektrodowym proszkowym samoosłonowym
Spawanie, w którym stapiający się proszkowy drut elektrodowy wytwarza gazową osłonę jeziorka spawalniczego.

115 Spawanie łukowe elektrodą oplataną
Spawanie elektrodą otuloną dodatkowo oplataną drutem lub siatką.

118 Spawanie łukowe elektrodą leżącą
Spawanie łukowe, w którym nieruchomą elektrodę otuloną układa się wzdłuż brzegów podlegających spawaniu, a łuk przemieszcza się w miarę stapiania się elektrody.

12 Spawanie łukiem krytym
Spawanie łukowe, w którym łuk lub łuki są przykryte topnikiem proszkowym, którego część stapia się, tworząc na spoinie usuwalną warstwę żużla.

121 Spawanie łukiem krytym drutem elektrodowym
Spawanie łukiem krytym z użyciem gołego drutu.

122 Spawanie łukiem krytym elektrodą taśmową
Spawanie łukiem krytym z użyciem elektrody taśmowej.

13 Spawanie łukowe w osłonie gazów ochronnych
Spawanie, w którym łuk i jeziorko spawalnicze są chronione przed otaczającą atmosferą osłoną gazową pochodzącą z zewnętrznego źródła.

131 Spawanie łukowe w osłonie gazu obojętnego elektrodą topliwą; spawanie metodą MIG
Spawanie łukowe w osłonie gazów obojętnych topliwym drutem elektrodowym.

135 Spawanie łukowe w atmosferze gazu aktywnego elektrodą topliwą; spawanie metodą MAG
Spawanie łukowe w osłonie gazów aktywnych topliwym drutem elektrodowym.

136 Spawanie łukowe drutem elektrodowym proszkowym w atmosferze gazu aktywnego
Spawanie łukowe drutem proszkowym, w którym łuk spawalniczy i jeziorko są osłaniane gazem aktywnym.