



Poradnik **INŻYNIERA**

2

Spawalnictwo

Wydawnictwo WNT



W tomie 2 poruszono następujące tematy:

- spawanie ręczne łukowe elektrodami otulonymi,
- spawanie MIG/MAG,
- spawanie łukowe drutami z rdzeniem proszkowym,
- spawanie TIG, w tym spawanie metodą A-TIG,
- spawanie łukiem krytym,
- spawanie plazmowe,
- spawanie elektronowe i laserowe,
- spawanie gazowe, spawanie łukowo-wodorowe, spawanie elektrodą węglową, spawanie elektrożuźlowe, spawanie elektrogazowe, spawanie termitowe,
- zgrzewanie rezystancyjne,
- zgrzewanie tarciove,
- zgrzewanie dyfuzyjne, zgrzewanie łukiem wirującym, zgrzewanie prądami wielkiej częstotliwości, zgrzewanie ultradźwiękowe, zgrzewanie wybuchowe, zgrzewanie zgniotowe, łukowe zgrzewanie kołków metalowych,
- lutowanie,
- cięcie tlenowe, cięcie plazmowe, cięcie laserowe,
- spawalnicze metody nanoszenia warstw: napawanie, natryskiwanie cieplne, napawanie indukcyjne, platerowanie wybuchowe, nanoszenie powłok metodą przygrzewania rezystancyjnego, napawanie tarciove, napawanie termitowe, napawanie łukowe przy użyciu past, kwalifikowanie technologii napawania i natryskiwania,
- inne procesy pokrewne spawaniu: zgrzewanie tworzyw sztucznych termoplastycznych, spajanie nowoczesnych materiałów (ceramicznych, kompozytów, stopów na podstawie faz międzymetalicznych), klejenie materiałów.

Poradnik
INŻYNIERA

2

Spawalnictwo

Autorzy

prof. dr hab. inż. Piotr Adamiec

dr inż. Marek Banasik

dr inż. Bogusław Czwóróg

mgr inż. Jerzy Dworak

mgr inż. Stanisław Dziuba

prof. dr hab. inż. Jerzy Dziubiński

dr inż. Wojciech Gawrysiuk

prof. dr hab. inż. Andrzej Klimpel

mgr inż. Tadeusz Kuzio

dr inż. Krzysztof Madej

dr hab. inż. Zbigniew Mirski

mgr inż. Janusz Mrowiec

dr inż. Jerzy Niagaj

dr inż. Hubert Papkala

dr inż. Tomasz Pfeifer

dr inż. Adam Pietras

dr inż. Sebastian Stano

dr inż. Eugeniusz Turyk

dr inż. Andrzej Winiowski

prof. dr hab. inż. Władysław Włosiński

mgr inż. Leszek Zadroga

Poradnik **INŻYNIERA**

2

Spawalnictwo

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

Wydanie pierwsze

Wydawnictwo WNT 

Redaktor: *mgr inż. Marek Kośnik*
Projekt okładki i stron tytułowych: *Grafos*
Redaktor techniczny: *Barbara Chojnacka-Flisiuk*
Korekta: *Zespół*
Skład i łamanie: *Ango*
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 2005
Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2017

ISBN 978-83-01-19180-1 (całość)
ISBN 978-83-01-19182-5 (tom 2)

Wydanie I – 1 dodruk (PWN)
Warszawa 2017

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	15
O zespole autorskim	17

1

Spawanie ręczne łukowe elektrodą otuloną **19**

1.1.	Wstęp	19
1.2.	Charakterystyka metody	19
1.3.	Parametry spawania	25
1.3.1.	Rodzaj prądu spawania	25
1.3.2.	Natężenie prądu spawania	27
1.3.3.	Napięcie łuku	28
1.3.4.	Prędkość spawania	28
1.3.5.	Średnica elektrody otulonej	29
1.3.6.	Pochylenie elektrody	29
1.4.	Podstawowe wyposażenie stanowiska do spawania elektrodami otulonymi	32
1.5.	Zalecenia technologiczne i techniki spawania elektrodami otulonymi	34
1.6.	Zastosowanie spawania elektrodami otulonymi	42
	Literatura	50

2

Spawanie metodą MIG/MAG **53**

2.1.	Ogólna charakterystyka spawania metodą MIG/MAG	53
2.2.	Spawalniczy łuk elektryczny	56
2.2.1.	Charakterystyka statyczna i dynamiczna łuku spawalniczego	56
2.2.2.	Charakterystyka statyczna i dynamiczna źródła prądu, samoregulacja łuku spawalniczego	57

2.2.3.	Formowanie się kropli metalu elektrodowego	60
2.2.4.	Przenoszenie metalu w łuku spawalniczym	64
2.2.5.	Łuk pulsujący	69
2.3.	Parametry spawania metodą MIG/MAG	69
2.4.	Technika spawania metodą MIG/MAG	74
2.4.1.	Przygotowanie brzegów do spawania	74
2.4.2.	Wykonywanie spoin czołowych	78
2.4.3.	Wykonywanie spoin pachwinowych	81
2.5.	Technologia spawania	81
2.5.1.	Technologia spawania stali niestopowych i stopowych	82
2.5.2.	Technologia spawania stali typu duplex	88
2.6.	Odmiany procesu spawania MIG/MAG	92
2.6.1.	Proces STT	92
2.6.2.	Spawanie z impulsowym podawaniem drutu elektrodowego	93
2.6.3.	Spawanie punktowe	95
2.6.4.	Spawanie wąskoszczelinowe	97
2.6.5.	Spawanie elektrodą wahlwią	98
2.6.6.	Spawanie orbitalne	99
2.6.7.	Lutospawanie metodą MIG/MAG	100
2.6.8.	Spawanie z dużą wydajnością	101
2.7.	Zakłócenia procesu spawania MIG/MAG	111
2.8.	Normowanie prac spawalniczych przy spawaniu metodą MIG/MAG	115
	Literatura	117

3

Spawanie łukowe drutami z rdzeniem proszkowym 121

3.1.	Spawanie łukowe drutem proszkowym w osłonie gazowej	121
3.1.1.	Charakterystyka metody	121
3.1.2.	Parametry spawania	126
3.1.3.	Technologia i technika spawania	140
3.2.	Spawanie łukowe drutem proszkowym samoosłonowym	146
3.2.1.	Charakterystyka metody	146
3.2.2.	Parametry spawania	150
3.2.3.	Technologia i technika spawania	156
	Literatura	169

4

Spawanie TIG 173

4.1.	Ogólna charakterystyka procesu	173
4.2.	Urządzenia spawalnicze	175
4.3.	Elektrody wolframowe	179
4.4.	Materiały dodatkowe do spawania	182

4.4.1.	Gazy osłonowe	182
4.4.2.	Spoiwa	184
4.5.	Konstrukcja złączy spawanych	184
4.6.	Technologia spawania	186
4.6.1.	Rodzaj prądu i biegunowość	186
4.6.2.	Przygotowanie do spawania	189
4.6.3.	Przepływ gazu osłonowego	190
4.6.4.	Ośłona grani	192
4.6.5.	Przebieg spawania	193
4.6.6.	Technika spawania	195
4.7.	Spawanie zmechanizowane	197
4.8.	Odmiany spawania TIG	198
4.8.1.	Spawanie łukiem zanurzonym	198
4.8.2.	Spawanie punktowe	199
4.8.3.	Spawanie wąskoszczelinowe	199
4.8.4.	Spawanie w komorze	200
4.8.5.	Inne odmiany spawania	201
4.9.	Spawanie metodą A-TIG	202
4.10.	Zakres stosowania spawania TIG	206
	Literatura	207

5

Spawanie łukiem krytym 209

5.1.	Ogólna charakterystyka metody spawania łukiem krytym	209
5.2.	Wyposażenie stanowiska spawalniczego.....	211
5.3.	Spawalnicze materiały dodatkowe	213
5.4.	Technika spawania łukiem krytym	214
5.4.1.	Przygotowanie brzegów do spawania	218
5.4.2.	Stosowanie podpawania i podkładek technologicznych	218
5.4.3.	Zাজারanie łuku.....	222
5.4.4.	Wykonywanie spoin czołowych w pozycji podolnej	223
5.4.5.	Wykonywanie spoin pachwinowych w pozycji podolnej i nabocznej	225
5.4.6.	Spawanie w pozycjach przymusowych.....	227
5.5.	Odmiany procesu spawania łukiem krytym	229
5.5.1.	Spawanie wieloelektrodowe i wielołukowe	229
5.5.2.	Spawanie wąskoszczelinowe łukiem krytym	232
5.5.3.	Spawanie drutem proszkowym	234
5.5.4.	Spawanie taśmą elektrodową	234
5.5.5.	Spawanie z dodatkowym materiałem proszkowym	235
5.5.6.	Spawanie łukiem krytym prądem pulsującym	235
5.5.7.	Spawanie z elektromagnetycznym oddziaływaniem	236
5.5.8.	Spawanie drutem gorącym	237

5.6.	Typowe niezgodności spawalnicze, przyczyny ich powstawania, zapobieganie	237
5.6.1.	Pęcherze gazowe	237
5.6.2.	Pęknięcia	238
5.6.3.	Wtrącenia żużla	240
5.6.4.	Przyklejenie i brak przetopu	241
5.6.5.	Niezgodności spawalnicze dotyczące kształtu i wymiarów	241
5.7.	Normowanie prac spawalniczych przy spawaniu łukiem krytym	243
	Literatura	244

6

Spawanie plazmowe 247

6.1.	Wstęp	247
6.2.	Charakterystyka metody	248
6.3.	Przygotowanie złączy	251
6.4.	Techniki spawania plazmowego	252
6.5.	Zastosowanie spawania plazmowego	255
6.6.	Odmiany spawania plazmowego	258
6.6.1.	Spawanie plazmowo-proszkowe	258
6.6.2.	Spawanie plazmowe MIG	259
	Literatura	260

7

Spawanie elektronowe i laserowe 261

7.1.	Spawanie elektronowe	261
7.1.1.	Ogólna charakterystyka metody	261
7.1.2.	Oddziaływanie wiązki elektronów na powierzchnię materiału spawanego	262
7.1.3.	Proces formowania się spoiny	263
7.1.4.	Zalety technologii spawania wiązką elektronów	266
7.1.5.	Parametry technologiczne procesu	267
7.1.6.	Charakterystyka podstawowych rodzajów złączy stosowanych przy spawaniu elektronowym	276
7.1.7.	Projektowanie elementów przeznaczonych do spawania elektronowego	280
7.1.8.	Dokładność obróbki mechanicznej elementów przeznaczonych do spawania wiązką elektronów	284
7.1.9.	Pasowania elementów o symetrii obrotowej	285
7.1.10.	Inne uwarunkowania procesu spawania elektronowego	286
7.1.11.	Przygotowanie powierzchni do spawania	287
7.1.12.	Podstawowe uwarunkowania spawalności wiązką elektronów typowych materiałów konstrukcyjnych	288
7.1.13.	Dokumentacja procesu spawania wiązką elektronów	292

7.2.	Spawanie laserowe	293
7.2.1.	Spawanie laserowe – charakterystyka podstawowych metod	293
7.2.2.	Spawanie z wykorzystaniem różnych typów laserów	301
7.2.3.	Parametry procesu i możliwości technologiczne metody	307
7.2.4.	Rozwiązania konstrukcyjne i przygotowanie złączy do spawania laserowego	317
7.2.5.	Obszar zastosowań spawania laserowego	319
	Literatura	321

8

Inne metody spawania 323

8.1.	Spawanie gazowe	323
8.1.1.	Charakterystyka ogólna procesu	323
8.1.2.	Gazy stosowane do spawania	325
8.1.3.	Spoiwa	325
8.1.4.	Płomień spawalniczy	325
8.1.5.	Konstrukcja złączy spawanych	327
8.1.6.	Technologia spawania	329
8.2.	Spawanie łukowo-wodorowe	334
8.3.	Spawanie elektrodą węglową	335
8.4.	Spawanie elektrodużłowe	337
8.5.	Spawanie elektrogazowe	341
8.6.	Spawanie termitowe	343
	Literatura	345

9

Technologia zgrzewania rezystancyjnego 347

9.1.	Wiadomości ogólne	347
9.2.	Technologia zgrzewania doczołowego zwarciovego	351
9.2.1.	Zasada zgrzewania	351
9.2.2.	Zakres zastosowania	352
9.2.3.	Parametry zgrzewania	353
9.2.4.	Jakość zgrzewania	356
9.3.	Technologia zgrzewania doczołowego iskrowego	359
9.3.1.	Zasada zgrzewania	359
9.3.2.	Zakres zastosowania	361
9.3.3.	Zalecenia ogólne	362
9.3.4.	Parametry zgrzewania	367
9.3.5.	Jakość zgrzewania	371
9.4.	Technologia zgrzewania punktowego	375
9.4.1.	Zasada zgrzewania	375
9.4.2.	Zakres zastosowania	381

9.4.3.	Zalecenia ogólne	383
9.4.4.	Programy i parametry zgrzewania	389
9.4.5.	Charakterystyka połączeń	418
9.5.	Technologia zgrzewania garbowego	421
9.5.1.	Zasada zgrzewania	421
9.5.2.	Zakres zastosowania	424
9.5.3.	Zalecenia ogólne	426
9.6.	Technologia zgrzewania liniowego	445
9.6.1.	Zasada zgrzewania	445
9.6.2.	Zakres zastosowania	453
9.6.3.	Zalecenia ogólne	454
9.6.4.	Parametry zgrzewania	458
9.6.5.	Charakterystyka połączeń	462
	Literatura	466

10

Zgrzewanie tarciove 469

10.1.	Zasada zgrzewania	469
10.2.	Zalecenia ogólne	474
10.3.	Parametry zgrzewania	480
10.4.	Zakres zastosowania zgrzewania tarciovego	486
10.5.	Charakterystyka połączeń	488
10.6.	Zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału zgrzeiny – FSW	493
10.6.1.	Proces FSW	493
10.6.2.	Narzędzia do zgrzewania	497
10.6.3.	Parametry zgrzewania	500
	Literatura	502

11

Inne metody zgrzewania 509

11.1.	Technologia zgrzewania dyfuzyjnego	509
11.1.1	Zasada zgrzewania	509
11.1.2	Zalecenia ogólne	512
11.1.3	Parametry zgrzewania	514
11.1.4	Zakres zastosowania	517
11.1.5	Charakterystyka połączeń	517
11.2.	Technologia zgrzewania łukiem wirującym	518
11.2.1	Zasada zgrzewania	518
11.2.2	Zakres zastosowania	520
11.2.3	Parametry zgrzewania	522
11.2.4	Charakterystyka połączeń	524

11.3.	Technologia zgrzewania prądami wielkiej częstotliwości	524
11.3.1	Zasada zgrzewania	524
11.3.2	Charakterystyka technologiczna sposobów zgrzewania	525
11.3.3	Zgrzewanie prądami wielkiej częstotliwości stali nierdzewnych oraz materiałów nieżelaznych	530
11.3.4.	Ocena jakości zgrzewania	531
11.4.	Technologia zgrzewania ultradźwiękowego	533
11.4.1.	Zasada zgrzewania	533
11.4.2.	Zalecenia ogólne	536
11.4.3.	Parametry zgrzewania	537
11.4.4.	Charakterystyka złączy	540
11.4.5.	Zakres zastosowania	541
11.5.	Technologia zgrzewania wybuchowego	542
11.5.1.	Zasada zgrzewania	542
11.5.2.	Zalecenia ogólne	544
11.5.3.	Parametry zgrzewania	545
11.5.4.	Charakterystyka złączy	548
11.5.5.	Zakres zastosowania	549
11.6.	Technologia zgrzewania zgniotowego	551
11.6.1.	Zasada zgrzewania	551
11.6.2.	Zakres zastosowania	553
11.6.3.	Ogólne zalecenia	553
11.6.4.	Parametry zgrzewania	556
11.6.5.	Charakterystyka połączeń	558
11.7.	Łukowe zgrzewanie kołków metalowych	559
11.7.1.	Zasada procesu	559
11.7.2.	Zalecenia ogólne	561
11.7.3.	Parametry zgrzewania	561
11.7.4.	Badania złączy i kwalifikowanie technologii	562
11.7.5.	Zakres stosowania	562
	Literatura	562

12

Lutowanie

565

12.1.	Charakterystyka, podstawowe pojęcia i definicje	565
12.2.	Fizyczno-chemiczne podstawy lutowania	569
12.3.	Klasyfikacja i charakterystyka metod lutowania	576
12.4.	Materiały dodatkowe do lutowania	581
12.4.1.	Spoiva do lutowania	582
12.4.2.	Topniki do lutowania	600
12.4.3.	Atmosfery kontrolowane do lutowania	611
12.5.	Konstrukcja i wytrzymałość połączeń	618
12.6.	Przygotowanie elementów do lutowania	621

12.7. Technologia lutowania podstawowych materiałów konstrukcyjnych ..	622
12.7.1. Lutowanie żelaza i jego stopów	622
12.7.2. Lutowanie miedzi i jej stopów	627
12.7.3. Lutowanie materiałów narzędziowych	629
12.7.4. Lutowanie niklu oraz stopów niklu i kobaltu	631
12.7.5. Lutowanie metali lekkich	632
12.7.6. Lutowanie metali reaktywnych i ich stopów	636
12.7.7. Lutowanie metali wysokotopliwych i ich stopów	638
12.7.8. Lutowanie metali szlachetnych i ich stopów	641
12.7.9. Lutowanie metali niskotopliwych	642
12.7.10. Uznawanie technologii lutowania	643
Literatura	644

13

Technologia cięcia tlenowego 647

13.1. Podstawy procesu cięcia tlenowego	647
13.2. Uwarunkowania procesu	649
13.3. Technika cięcia	653
13.3.1. Cięcie ręczne	653
13.3.2. Cięcie zmechanizowane	656
13.3.3. Plany cięcia	658
13.3.4. Ukosowanie	660
13.4. Jakość cięcia tlenowego	661
13.4.1. Zmiany w strefie wpływu ciepła	661
13.4.2. Deformacje materiału ciętego	661
13.4.3. Jakość cięcia	662
13.4.4. Zalecenia praktyczne	663
Literatura	664

14

Cięcie plazmowe 665

14.1. Wstęp	665
14.2. Charakterystyka metody	665
14.3. Parametry cięcia	666
14.4. Gazy plazmowe	668
14.5. Elektrody i dysze	671
14.6. Jakość cięcia plazmowego	672
14.7. Bezpieczeństwo i higiena pracy przy cięciu	675
14.8. Odmiany cięcia plazmowego	677
Literatura	681

15**Cięcie laserowe 683**

15.0.	Wstęp	683
15.1.	Cięcie laserowe – charakterystyka metody	683
15.2.	Typy laserów wykorzystywanych do cięcia	686
15.3.	Możliwości technologiczne metody i parametry procesu	692
15.4.	Technika i optymalizacja procesu cięcia laserowego	699
15.5.	Jakość cięcia	706
15.6.	Przemysłowe zastosowania cięcia laserowego	708
	Literatura	710

16**Spawalnicze metody nanoszenia warstw 713**

16.0.	Wstęp	713
16.1.	Napawanie	717
16.1.1.	Ogólna charakterystyka napawania	717
16.1.2.	Materiały dodatkowe do napawania	719
16.1.3.	Technologie napawania ręcznego i zmechanizowanego	746
16.1.4.	Problemy spawalności i zabiegi cieplne przy napawaniu	763
16.1.5.	Odształcenia w czasie napawania	767
16.1.6.	Jakość warstw napawanych	768
16.1.7.	Trwałość zmęczeniowa i kontaktowa napawanych elementów maszyn	771
16.1.8.	Ekonomiczna efektywność napawania	782
16.1.9.	Przykłady zastosowań napawania prewencyjnego i regeneracyjnego ..	787
16.2.	Natryskiwanie cieplne	795
16.2.1.	Ogólna charakterystyka natryskiwania	795
16.2.2.	Materiały dodatkowe do natryskiwania	798
16.2.3.	Technologie natryskiwania powłok	806
16.2.4.	Obecne i perspektywiczne obszary zastosowania natryskiwania ciepłego	817
16.3.	Inne metody nanoszenia warstwy wierzchniej	822
16.3.1.	Napawanie indukcyjne	822
16.3.2.	Platerowanie wybuchowe	824
16.3.3.	Nanoszenie powłoki metodą przegrzewania rezystancyjnego	825
16.3.4.	Napawanie tarciove	826
16.3.5.	Napawanie termitowe	827
16.3.6.	Napawanie łukowe z użyciem past	828
16.4.	Kwalifikowanie technologii napawania i natryskiwania	828
	Literatura	831

17**Procesy pokrewne spajaniu metali 841**

17.1.	Zgrzewanie tworzyw sztucznych termoplastycznych	841
17.1.1.	Zgrzewanie doczołowe	842
17.1.2.	Zgrzewanie mufowe (polifuzyjne)	848
17.1.3.	Zgrzewanie elektrooporowe	850
17.1.4.	Zgrzewanie gorącym klinem	853
17.1.5.	Zgrzewanie tarciove	853
17.1.6.	Zgrzewanie w polu elektrycznym wielkiej częstotliwości	854
17.1.7.	Zgrzewanie ultradźwiękowe	860
17.1.8.	Zgrzewanie promieniami podczerwonymi	864
17.2.	Spawanie tworzyw sztucznych termoplastycznych	866
17.2.1.	Spawanie gorącym powietrzem	867
17.2.2.	Spawanie ekstruzyjne	872
17.2.3.	Spawanie laserowe	878
17.3.	Spajanie nowoczesnych materiałów	882
17.3.1.	Materiały ceramiczne	882
17.3.2.	Kompozyty	890
17.3.3.	Stopy na osnowie faz międzymetalicznych	893
17.4.	Klejenie materiałów	899
17.4.1.	Wprowadzenie	899
17.4.2.	Historia klejenia	900
17.4.3.	Zjawiska fizykochemiczne występujące podczas klejenia	901
17.4.4.	Zalety i wady klejenia	903
17.4.5.	Czynniki wpływające na powstanie połączeń klejowych	905
17.4.6.	Wytwarzanie połączeń klejowych	909
17.4.7.	Podział klejów	912
17.4.8.	Kleje reaktywne (utwardzające się chemicznie)	913
17.4.9.	Kleje utwardzające się w wyniku procesów fizycznych	918
17.4.10.	Klejenie ważniejszych materiałów	920
17.4.11.	Naprawy za pomocą klejenia	924
17.4.12.	Badania połączeń klejowych	925
	Literatura	927

Skorowidz 935

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 budowlę 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

W nowoczesnym spawalnictwie występuje wyjątkowo dużo różnorodnych problemów, którymi zajmują się specjaliści, mający, każdy w swojej dziedzinie, rozległą i dogłębną znajomość literatury, własne doświadczenia badawcze oraz wiedzę płynącą z praktyki, zwłaszcza przemysłowej. Pisanie jednocześnie o wszystkich problemach spawalnictwa, w sposób wyczerpujący, jasny i obiektywny, przez jednego autora nie jest możliwe. Mając to na uwadze, do opracowania bardzo różnorodnego tematycznie i obszernego objętościowo dzieła, jakim jest PORADNIK INŻYNIERA. SPAWALNICTWO, starannie dobrano zespół autorski najlepszych specjalistów w poszczególnych dziedzinach spawalnictwa.

Trzon zespołu autorskiego stanowią doświadczeni pracownicy Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, legitymujący się długoletnimi stażami pracy. Autorzy: dr inż. Bogusław Czwornóg i dr inż. Eugeniusz Turyk zajmują się opracowywaniem i wdrażaniem technologii spawania konstrukcji spawanych oraz napawaniem i regeneracją elementów maszynowych i części konstrukcji. Dr inż. Krzysztof Madej, dr inż. Wojciech Gawrysiuk i dr inż. Tomasz Pfeifer są specjalistami w dziedzinie łukowych metod spawania i cięcia metali. Mgr inż. Tadeusz Kuzio, dr inż. Jerzy Niagaj i dr inż. Andrzej Winiowski zajmują się materiałami dodatkowymi do spawania stali i materiałów nieżelaznych oraz technikami lutowania miękkiego i twardego. Dr inż. Marek Banasik i mgr inż. Jerzy Dworak są specjalistami w zakresie spawania elektronowego oraz spawania i cięcia laserowego. Mgr inż. Janusz Mrowiec zajmuje się cięciem tlenowym. Dr inż. Hubert Papkala, dr inż. Adam Pietras i mgr inż. Leszek Zadroga mają olbrzymie doświadczenie z zakresu zgrzewania rezystancyjnego, zgrzewania tarcowego oraz specjalnych metod zgrzewania. Mgr inż. Stanisław Dziuba i dr inż. Sebastian Stano zajmują się łączeniem tworzyw termoplastycznych.

Do zespołu autorskiego zaproszeni zostali: prof. dr hab. inż. Władysław Włosiński z Politechniki Warszawskiej, specjalista w dziedzinie wytwarzania i łączenia materiałów ceramicznych i kompozytów metalowych, prof. dr hab. inż. Andrzej Klimpel z Politechniki Śląskiej, specjalista w dziedzinie

spawania drutami proszkowymi, prof. dr hab. inż. Piotr Adamiec i prof. dr hab. inż. Jerzy Dziubiński z Politechniki Śląskiej, zajmujący się napawaniem i nanoszeniem warstw metodami spawalniczymi, oraz dr hab. inż. Zbigniew Mirski z Politechniki Wrocławskiej, specjalista w zakresie lutowania i klejenia metali.

Opiekę merytoryczną i organizacyjną nad całością prac sprawował prof. dr hab. inż. Jan Pilarczyk, znany specjalista w dziedzinie spawalnictwa, znający doskonale pracowników Instytutu Spawalnictwa i polskie środowisko spawalnicze w całym kraju, badacz, naukowiec i wykładowca w Instytucie Spawalnictwa i na wielu uczelniach, Dyrektor Instytutu Spawalnictwa, były 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.

Spawanie ręczne łukowe elektrodą otuloną

Autor

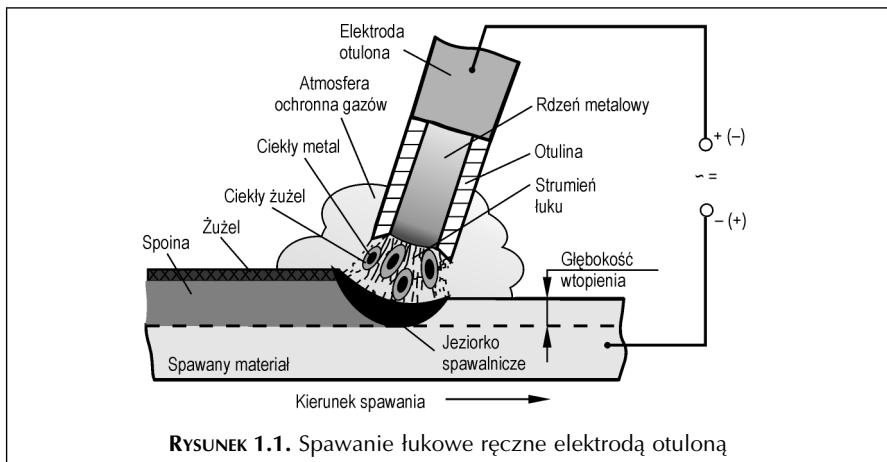
dr inż. Wojciech Gawrysiuk

1.1. Wstęp

Spawanie elektrodą otuloną jest jedną z najstarszych i najczęściej stosowanych metod spawania łukowego. Historia spawania łukowego, a zwłaszcza spawania elektrodami prętowymi, sięga 1885 roku, kiedy to Rosjanin Bernardos i Polak Olszewski opatentowali sposób spawania łukowego nietopliwą elektrodą węglową. Łuk spawalniczy, zasilany prądem stałym, wytworzonym w specjalnych prądnicach o mocy 30 ÷ 50 kW, stapiał łączony materiał i spoiwo wprowadzane dodatkowo do strefy łuku w postaci pręta lub sztabki. W 1890 roku Rosjanin Sławianow zastąpił nietopliwą elektrodę węglową prętem stalowym stapiającym się w łuku elektrycznym. Wadą obu tych metod spawania było jarzenie się łuku elektrycznego w powietrzu, bez dodatkowej osłony, przez co jezioro spawalnicze było narażone na silne utlenianie i naazotowanie. Tak wykonane spoiny miały zatem znacznie obniżone właściwości w stosunku do materiału spawanego, a zwłaszcza właściwości plastyczne. Sposób na usunięcie tej niedogodności odkrył w 1907 roku Szwed Oskar Kiellberg, wynalazca elektrody prętowej otulonej. Pokrył on pręt stalowy warstwą otuliny, składającej się z substancji mineralnych. Podczas stapiania otuliny w łuku elektrycznym powstawały gazy i żużel chroniące ciekłe jezioro przed dostępem powietrza. Od wynalazku Kiellberga rozpoznał się burzliwy rozwój spawania elektrodami otulonymi. Obecnie spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną, dzięki dużej uniwersalności technicznej i technologicznej, możliwości wykonania połączeń o wysokich właściwościach eksploatacyjnych wielu metalowych materiałów konstrukcyjnych w dowolnych pozycjach i trudno dostępnych miejscach, nadal zajmuje czołową pozycję w wykonywaniu konstrukcji spawanych.

1.2. Charakterystyka metody

Spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną jest procesem, w którym trwałe połączenie uzyskuje się w wyniku stopienia ciepłem łuku elektrycznego topliwej elektrody otulonej i materiału spawanego (rys. 1.1). Łuk elektryczny



RYСУNEK 1.1. Spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną

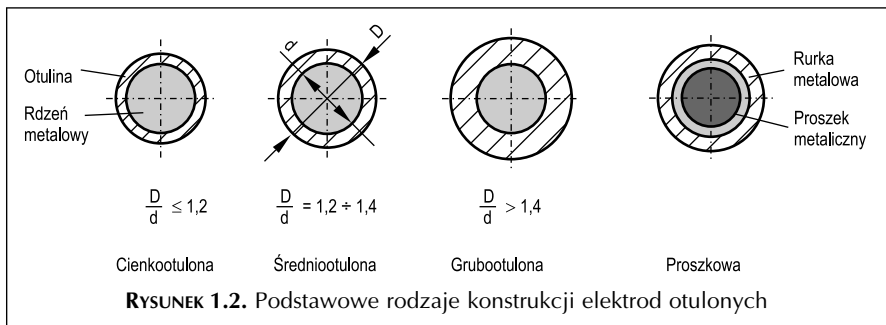
jarzy się między rdzeniem elektrody pokrytym otuliną i spawanym materiałem. Ustawiona pod odpowiednim kątem względem złącza elektrody otulonej jest przesuwana ręcznie przez operatora wzdłuż linii spawania. Spoinę złącza tworzą stopione ciepłem łuku: rdzeń metaliczny elektrody, składniki metaliczne otuliny elektrody oraz nadtopione brzegi materiału spawanego (rodzimego). Udział materiału rodzimego w spoinie, w zależności od rodzaju spawanego metalu i techniki spawania, może wynosić 10 ÷ 40%.

Łuk spawalniczy może być zasilany prądem przemiennym lub stałym z biegunowością ujemną lub dodatnią. Osłonę łuku stanowią gazy i ciekły żużel powstałe w wyniku rozpadu otuliny elektrody pod wpływem ciepła łuku. Skład osłony gazowej, w zależności od składu chemicznego otuliny, to: CO_2 , CO , H_2O oraz produkty ich rozpadu.

Spawanie rozpoczyna się po zajarzeniu łuku między elektrodą otuloną a spawanym przedmiotem, intensywne ciepło łuku, o temperaturze dochodzącej w środku łuku do 6000 K, stapia elektrodę, której metal jest przenoszony do jeziorka spoiny. Przenoszenie metalu rdzenia elektrody otulonej w łuku spawalniczym, w zależności od rodzaju otuliny, może odbywać się: grubokropłowo, drobnokropłowo lub nawet natryskowo.

Ilość tworzącego się gazu i żużla osłaniających łuk oraz ich skład chemiczny zależą od rodzaju otuliny elektrody i jej grubości (rys. 1.2). Stosuje się otuliny o różnej grubości w stosunku do średnicy rdzenia, a ich nazwy: rutyłowe, kwaśne, zasadowe, fluorkowe, cyrkonowe, rutyłowo-zasadowe, celulozowe itd. są zależne od właściwości chemicznych składników otuliny. Typowe składniki zawarte w otulinie elektrod i ich funkcje przedstawiono w tabl. 1.1.

Elektrody są zwykle produkowane o średnicach rdzeni 1,6 ÷ 16,0 mm i długości 250 ÷ 450 mm.



TABLICA 1.1. Podstawowe składniki wchodzące w skład otuliny elektrod i ich zadania

Składnik otuliny	Funkcje składnika otuliny	
	podstawowe	dodatkowe
Celuloza	osłona gazowa	–
Węglan wapniowy	osłona gazowa	topnik
Fluoryt	osłona gazowa	topnik
Dolomit	osłona gazowa	topnik
TiO ₂ (rutyl)	tworzenie żużla	stabilizacja łuku
Tytanian potasu	stabilizacja łuku	tworzenie żużla
Szpat polny	tworzenie żużla	stabilizator
Mika	wyciskanie masy otuliny	stabilizator
Glina	wyciskanie masy otuliny	tworzenie żużla
Krzemionka (SiO ₂)	tworzenie żużla	–
Tlenek manganu	tworzenie żużla	składnik stopowy
Tlenek żelaza	tworzenie żużla	–
Sproszkowane żelazo	zwiększa współczynnik stopiania	–
Żelazokrzem	odtleniacz	–
Żelazomangan	składnik stopowy	odtleniacz
Krzemian sodowy	lepiszcze	topnik
Krzemian potasowy	stabilizacja łuku	lepiszcze

Zasadnicze funkcje otuliny to:

- osłona łuku przed dostępem atmosfery,
- łatwe zajarzanie łuku spawalniczego,
- stabilizacja łuku spawalniczego,
- wprowadzenie do obszaru spawania pierwiastków odtleniających, wiążących azot i rafinujących ciekły metal spoiny,
- wytworzenie żuźla, wpływającego na:
 - wielkość przenoszonych kropeł stopiwa,
 - zabezpieczenie kropli ciekłego metalu stopiwa i jeziorka spawalniczego przed dostępem gazów z atmosfery,
 - ochronę i formowanie krzepnącego ściegu spoiny i opóźnienie jego stygnięcia,
 - regulacja składu chemicznego spoiny.

Elektrody o otulinie kwaśnej (A). Otulina tych elektrod zawiera dużą ilość tlenków żelaza i odtleniaczy. Powstający podczas spawania kwaśny żużel przyczynia się do drobnokropłowego (natryskowego) przechodzenia metalu w łuku i uzyskania spoin o płaskim i gładkim licu. Elektrodami o otulinie kwaśnej można spawać w pozycji podolnej, nabocznej i w ograniczonym zakresie w pozycjach przymusowych. Stopiwo elektrod o otulinie kwaśnej w stosunku do pozostałych rodzajów elektrod wykazuje większą tendencję do powstawania pęknięć krystalizacyjnych. Elektrody kwaśne zazwyczaj nie wymagają suszenia, jeżeli jednak są widoczne białe wykwyty na otulinie i podczas spawania łuk jarzy się niestabilnie, występuje nadmierny rozprysk i porowatość spoin, to zaleca się suszenie elektrod przez ok. 1 h w temperaturze $100 \div 150^{\circ}\text{C}$. Elektrodami otulonymi kwaśnymi spawa się zazwyczaj prądem przemiennym lub prądem stałym z biegunowością ujemną na elektrodzie.

Elektrody o otulinie zasadowej (B). W otulinie tych elektrod są zawarte przede wszystkim węglany wapnia i magnezu oraz fluoryt. Elektrody te charakteryzują się wysoką plastycznością stopiwa, również w niskich temperaturach, oraz wysoką odpornością na pękanie zimne i gorące. Mała skłonność stopiwa do powstawania pęknięć gorących wynika z dużej czystości metalurgicznej stopiwa, natomiast pęknięć zimnych – z małej zawartości wodoru w stopiwie i dużej udurowienia stopiwa. Aby utrzymać małą zawartość wodoru w stopiwie ($< 15 \text{ ml}/100 \text{ g}$ stopiwa), elektrody zasadowe należy bezwzględnie suszyć przed spawaniem, zazwyczaj w temperaturze $300 \div 350^{\circ}\text{C}$ przez ok. $1 \div 3 \text{ h}$, a następnie przechowywać w specjalnych termosach. W takich warunkach elektrody mogą być przechowywane przez jedną zmianę ($8 \div 10 \text{ h}$), po czym powinny być ponownie wysuszone. Jeżeli elektrody są przechowywane w zwykłych pojemnikach, wymagane jest ponowne suszenie już po ok. 4 h. Elektrodami zasadowymi można spawać we wszystkich pozycjach oprócz pozycji z góry na dół, do której są stosowane elektrody zasadowe o zmodyfikowanym składzie otuliny. Elektrodami otulonymi zasadowymi spawa

się prądem stałym z biegunowością dodatnią na elektrodzie, a przejście metalu w łuku do jeziorka spawalniczego odbywa się zazwyczaj grubokropłowo.

Elektrody o otulinie celulozowej (C). Są one powszechnie stosowane do wykonywania prac spawalniczych i montażowych pod gołym niebem, szczególnie do spawania rurociągów przesyłowych. Zastosowanie elektrod celulozowych w trudnych warunkach montażowych wynika z:

- możliwości spawania we wszystkich pozycjach, szczególnie w pozycji pionowej z góry na dół,
- łatwości wykonywania warstwy graniowej,
- możliwości wykonania ściegów przetopowych elektrodami o średnicy 4 mm i większej,
- mniejszej wrażliwości na dokładność przygotowania złącza,
- małej wrażliwości na panujące warunki atmosferyczne,
- wysokiej wydajności spawania.

Elektrod celulozowych nie suszy się, ponieważ najkorzystniejsze właściwości spawalnicze elektrody są wówczas, gdy zawartość wody w otulinie wynosi co najmniej 3%. Elektrodami otulonymi celulozowymi spawa się zazwyczaj prądem przemiennym lub prądem stałym z biegunowością dodatnią na elektrodzie.

Elektrody o otulinie rutyłowej (R). Są to elektrody o uniwersalnym zastosowaniu, zawierające w otulinie rutył (TiO_2) oraz odtleniacze: żelazomangan i żelazokrzem. Często w celu zwiększenia wydajności spawania do otuliny wprowadza się proszek żelaza. Ze względu na przenoszenie kropel metalu w łuku (średniokropłowe i drobnokropłowe) elektrody te są często przydatne do spawania cienkich elementów. Elektrodami rutyłowymi można bez problemów spawać we wszystkich pozycjach z wyjątkiem pozycji pionowej z góry na dół, spawanie jest bowiem utrudnione. Po spawaniu otrzymuje się ładną spoinę z licem o drobnej łuskowatości. Zazwyczaj nie wymagają one suszenia. Jeżeli jednak są widoczne białe wykwyty na otulinie i podczas spawania łuk jarzy się niestabilnie, występuje nadmierny rozprysk i porowatość spoin, to zaleca się suszenie elektrod przez ok. 1 h w temperaturze $100 \div 150^\circ\text{C}$. Elektrodami otulonymi rutyłowymi spawa się zazwyczaj prądem przemiennym lub prądem stałym z biegunowością ujemną na elektrodzie.

Ponadto istnieją kombinacje wymienionych elektrod, np. elektrody o otulinie rutyłowo-kwaśnej (RA), rutyłowo-zasadowej (RB), rutyłowo-celulozowej (RC) itd.

Charakter przechodzenia ciekłego metalu w łuku w zależności od rodzaju otuliny elektrod przedstawiono na rys. 1.3.

Wskaźniki określające charakterystyki topienia elektrod przedstawiono w normie PN-EN 22401:1997 *Elektrody otulone – Określenie uzysku stopiwa, wydajności topienia i współczynnika topienia*: