



# 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

[Kup książkę](#)

## **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 

[Kup książkę](#)

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](http://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](mailto:pwn@pwn.com.pl); [reklama@pwn.pl](mailto:reklama@pwn.pl)  
[www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)

Druk i oprawa: ELPIL, Siedlce

**Kup książkę**

# Spis treści

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| <b>Przedmowa</b>           | <b>15</b> |
| <b>O zespole autorskim</b> | <b>17</b> |

## 1

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>Spawanie ręczne łukowe elektrodą otuloną</b> | <b>19</b> |
|-------------------------------------------------|-----------|

|        |                                                                              |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 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<br>otulonymi ..... | 32 |
| 1.5.   | Zalecenia technologiczne i techniki spawania elektrodami otulonymi .....     | 34 |
| 1.6.   | Zastosowanie spawania elektrodami otulonymi .....                            | 42 |
|        | Literatura .....                                                             | 50 |

## 2

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| <b>Spawanie metodą MIG/MAG</b> | <b>53</b> |
|--------------------------------|-----------|

|        |                                                                                                |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 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,<br>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 wahlwą .....                                  | 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. | Zajarzanie łuku.....                                                   | 222 |
| 5.4.4. | Wykonywanie spoin czołowych w pozycji podolnej .....                   | 223 |
| 5.4.5. | Wykonywanie spoin pachwinowych w pozycji podolnej<br>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<br>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<br>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<br>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 przysuszania 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.

[Kup książkę](#)

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 Czwórnóg 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 tarciovowego 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

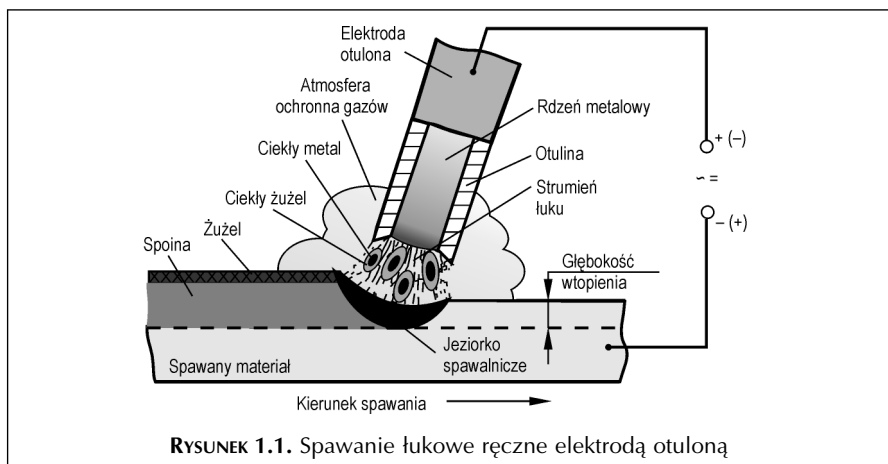
dr inż. Wojciech Gawrysiuk

## 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  $30 \div 50$  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



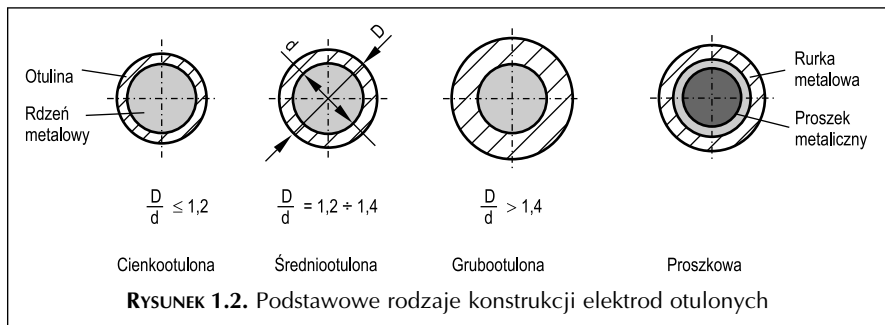
jarzy się między rdzeniem elektrody pokrytym otuliną i spawanym materiałem. Ustawiona pod odpowiednim kątem względem linii złącza elektroda otulona jest przesuwana ręcznie przez operatora wzdłuż linii spawania. Spoinę złącza tworzą stopione ciepłem łuku: rdzeń metaliczny elektrody, składniki metaliczne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

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:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  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 jeziora spoiny. Przenoszenie metalu rdzenia elektrody otulonej w łuku spawalniczym, w zależności od rodzaju otuliny, może odbywać się: grubokroplowo, drobnokroplowo 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  $1,6 \div 16,0$  mm i długości  $250 \div 450$  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 <sub>2</sub> (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 <sub>2</sub> ) | tworzenie żużla                 | –                 |
| Tlenek manganu                 | tworzenie żużla                 | składnik stopowy  |
| Tlenek żelaza                  | tworzenie żużla                 | –                 |
| Sproszkowane żelazo            | zwiększa współczynnik stapiania | –                 |
| 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 żużła, 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 uduwności 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 rutil ( $\text{TiO}_2$ ) 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*: