

INŻYNIERIA MATERIAŁOWA POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

Marek
Blicharski

Jan
Sieniawski



 PWN

Projekt okładki i stron tytułowych **Przemysław Spiechowski**

Ilustracja na okładce **Danil Evskiy/Shutterstock**

Wydawca **Adam Filutowski**

Koordynator ds. redakcji **Adam Kowalski**

Redaktor **Maria Kasperska**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Dział reklamy **Magdalena Bystrzycka** (magdalena.lewocka@pwn.pl)

Urszula Obrycka (urszula.obrycka@pwn.pl)

Dział marketingu **marketing.pwn@pwn.pl**

Skład i tamanie **Marta Jeczen-Bańkowska**

Afiliacja Autorów **Marek Blicharski**

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza Wydział Inżynierii Metali i Informatyki przemysłowej

Jan Sieniawski

Politechnika Rzeszowska Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Jarosław Mizera

Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż., IWE Jerzy Nowacki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

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 Naukowe PWN SA
Warszawa 2025

ISBN 978-83-01-24011-0

<https://doi.org/10.53271/2024.149>

Wydanie I

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 **OSDW Azymut Sp. z o. o.**



15.835

Spis treści

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

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

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

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

Wstęp

Konstrukcje inżynierskie: mosty, wysokie budynki, ropo- i gazociągi, centra magazynowe i handlowe, pojazdy do transportu ciężkich ładunków, okręty, platformy wiertnicze i wydobywcze ropy i gazu ziemnego, kotły energetyczne, aparatura i instalacje w zakładach chemicznych i petrochemicznych składają się z wielu elementów i podzespołów wytworzonych z metali (głównie ze stali) i połączonych w procesie spawania. W konstrukcjach tych, podobnie jak w większości innych konstrukcji przenoszących obciążenia mechaniczne i cieplne, podstawowymi parametrami charakteryzującymi ich materiały są właściwości mechaniczne. Zwykle stosowanymi przez projektantów i konstruktorów kryteriami doboru materiałów w procesie projektowania tych konstrukcji nośnych są wciąż ich granica plastyczności lub wytrzymałość na rozciąganie oraz odporność na pękanie.

Relacje pomiędzy składem chemicznym stopów metali a ich procesami wytwarzania, mikrostrukturą i właściwościami fizycznymi, chemicznymi i mechanicznymi są dobrze poznane. Stąd wiele technik wytwarzania elementów metalowych konstrukcji cechuje się możliwością kształtowania mikrostruktury zapewniającej optymalne ich właściwości użytkowe – dużą granicę plastyczności i wystarczającą odporność na pękanie. W procesach wytwarzania połączeń tych elementów w podzespoły i zespoły konstrukcyjne, najczęściej poprzez spawanie, występuje jednak konieczność nagrzewania krawędzi łączonych elementów do temperatury ich topnienia. Dlatego w połączeniach spawanych wyraźnie makroskopowo wyodrębniona jest spoina, która uzyskana jest ze stopionych krawędzi materiału spawanego oraz zwykle spoiwa. Mikrostruktura spoiny jest charakterystyczna dla odlewu po szybkiej jego krystalizacji. W złączy spawanym oprócz spoiny wyodrębnia się także strefę wpływu ciepła oraz materiał elementów spawanych. Stąd w złączach spawanych występuje duża zmiana mikrostruktury oraz niejednorodność składu chemicznego. Powoduje to również gwałtowne zmiany ich właściwości mechanicznych, także zmniejszenie odporności na korozję, ze względu na wytworzoną w nich zarówno niejednorodność składu chemicznego, jak również mikrostruktury oraz występujące naprężenia własne.

W większości konstrukcji metalowych, zgodnie z „teorią tańcucha”, o jej zdolności do przenoszenia obciążeń zewnętrznych decyduje najszabsze „ogniwo”. Stąd poznanie zależności pomiędzy składem

chemicznym a mikrostrukturą materiału spawanego oraz spoiny, także warunkami procesu spawania i mikrostrukturą złącza jest niezbędne do uzyskania połączenia spawanego zapewniającego optymalne właściwości użytkowe podzespołu konstrukcji lub pełnej konstrukcji.

Przedstawione opracowanie ma na celu w sposób przystępny scharakteryzować rezultaty prowadzonej analizy w zakresie ustalenia wpływu składu chemicznego spawalnych stopów metali, procesów ich wytwarzania i kształtowania na ich mikrostrukturę, a przez to na właściwości użytkowe uzyskanych wyrobów. Rozważania ograniczono, ze względu na zakres opracowania, do podstawowych i najczęściej spawalnych stopów: stali niestopowej i niskostopowej, stali odpornej na korozję oraz stopów aluminium i nadstopów niklu. Scharakteryzowane zagadnienia w treści podręcznika wyodrębniono w pięciu głównych jego częściach.

Rozdziały pierwszy, drugi i trzeci dotyczą wprowadzenia do tematyki procesów łączenia elementów metalowych, również określenia reakcji chemicznych występujących w procesach spawania.

W rozdziale czwartym omówiono zagadnienia kształtowania mikrostruktury metali w głównych procesach ich wytwarzania oraz mechanizmy ich umocnienia – także ich wpływ na właściwości wytrzymałościowe i plastyczne wyrobów. Przedstawiono podstawowe wykresy fazowe stopów metali. Rozpatrzono zarodkowanie i wzrost w procesie krystalizacji ciekłego metalu. Również opisano główne techniki wytwarzania półwyrobów i wyrobów metalowych – procesy odlewnicze oraz procesy odkształceniowe, także przemiany i zmiany fazowe zachodzące w wyrobach kształtowanych na gorąco. Szczególnie uwzględniono wpływ rodzaju materiału i warunków realizacji procesów wytwarzania na mikrostrukturę wyrobów.

W rozdziałach piątym, szóstym i siódmym wyodrębniono główne grupy stali i stopów aluminium stosowanych na konstrukcje spawane: stal niestopową i niskostopową o podwyższonej wytrzymałości i do pracy w podwyższonej temperaturze oraz stal odporną na korozję – ferrytyczną, austenityczną, martenzytyczną i ferrytyczno-martenzytyczną. Omówiono wykresy fazowe Fe-Cr i Fe-Ni oraz Fe-Cr-Ni. Scharakteryzowano kruchość 475 stali oraz spowodowaną fazą σ . W tej części opracowania przedstawiono również mechanizmy korozji stali uczulonej odpornej na korozję z uwzględnieniem mikrostruktury złącza spawanego. Podano przykłady stopów Al stosowanych na konstrukcje spawane. Skomentowano procesy wydzieleniowe prowadzące do umocnienia stopów Al i nadstopów Ni.

W rozdziałach ósmym i dziewiątym scharakteryzowano połączenia spawane oraz rozcieńczenie spoina przez materiał spawany. Wyodrębniono makroskopowe i mikroskopowe strefy złącza spawanego. Wskazano na występujące przemiany fazowe *ciekły metal – ciało stałe* w procesie krystalizacji spoiny. Poddano analizie mikrostrukturę strefy wpływu ciepła. Określono strefę wpływu ciepła połączenia spawanego stali niskostopowej i niestopowej oraz stali o średniej zawartości węgla, także stali odpornej na korozję austenitycznej oraz stopów aluminium i nadstopów niklu.

Rozdziały dziesiąty i jedenasty dotyczą z kolei kształtowania mikrostruktury spoiny i powstawania pęknięć w złączach spawanych. Wyjaśniono podstawy krystalizacji ciekłego metalu spoiny

w procesach spawania – rozdział pierwiastków rozpuszczonych na froncie krystalizacji oraz wpływ szybkości dyfuzji pierwiastka rozpuszczonego w ciekłym metalu i w tworzącym się roztworze stałym na niejednorodność składu chemicznego w spoinie. Scharakteryzowano mikrostrukturę spoiny i wskazano na powstającą w spoinie: makro- i mikrosegregację, wzrost ziarn oraz na zależność kształtu ziarn od parametrów procesu spawania. Przedstawiono wpływ przechłodzenia stężeniowego na kształtowanie mikrostruktury spoiny oraz wskazano na rolę parametrów procesu spawania na kształt frontu krystalizacji. Omówiono w tej części opracowania (rozdz. 11) tendencję do powstawania pęknięć w złączach spawanych charakterystycznych dla unikatowych warunków procesu krystalizacji ciekłego metalu spoiny. Wyodrębniono w spoinie pęknięcia gorące – krystalizacyjne i likwacyjne – powstające w końcowym stadium jej krystalizacji oraz pęknięcia cieplne tworzące się już całkowicie w stanie stałym materiału spoiny. Spośród pęknięć cieplnych rozpatrzono: pęknięcia powstające w zakresie zmniejszonej plastyczności, pęknięcia ponownego nagrzewania oraz pęknięcia starzeniowo-odkształceniowe. Szczególną uwagę zwrócono na pęknięcia zimne tworzące się głównie w stali i powodowane przez wodór. Wskazano na szczególnie wpływ wodoru w stali oraz rolę usztywnienia złączy w spawanych konstrukcjach w zapobieganiu powstawaniu pęknięć zimnych. Uwzględniono także tworzenie się pęknięć w heterogenicznych połączeniach spawanych.

Autorzy serdecznie dziękują Recenzentom Panom Profesorom: Jarosławowi Mizerze i Jerzemu Nowackiemu za rzeczowe i wnikliwe recenzje, które nadały końcowy układ treści niniejszej książki. Kierujemy również wyrazy wdzięczności dla wszystkich osób z Katedry Inżynierii Powierzchni i Analiz Materiałów Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH, które umożliwiły prowadzenie badań i pomogły w realizacji tej pracy.



Autorami książki są **prof. dr hab. inż. Marek Blicharski**, który specjalizuje się w inżynierii materiałowej, a zwłaszcza w chemicznych i fizycznych podstawach zjawisk zachodzących w procesie wytwarzania materiałów i ich przetwarzania oraz **prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski**, który w swojej działalności naukowej koncentruje się głównie na materiałach stosowanych w technice lotniczej, szczególnie na kinetyce procesu rozpadu przesyconych roztworów stałych.

W tej unikatowej w skali kraju książce wybitni znawcy tematu przybliżają i tłumaczą Czytelnikowi takie zagadnienia jak:

- **procesy spajania** (np. spawanie gazowe OAW, spawanie plazmowe PAW)
- **metale – procesy – mikrostruktura** (np. umocnienie metali, procesy wytwarzania odkształceniowego)
- **stal na konstrukcje spawane**
- **stal odporna na korozję**
- **pęknięcia w złączach spawanych**

Prof. dr hab. inż. Marek Blicharski i prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski – wychowawcy wielu pokoleń studentów, doktorantów i naukowców – opracowali książkę pt. *Inżynieria materiałowa połączeń spawanych*. Jest ona kompendium wiedzy pozwalającym poznać i zrozumieć problemy procesów spawania materiałów metalicznych z uwzględnieniem zagadnień inżynierii materiałowej.

Każdy z Czytelników wyłuska z tej książki wiedzę ekwiwalentną do swoich potrzeb i postrzegania zjawisk występujących w procesach spawania metali. Przeznaczona jest nie tylko dla inżynierów materiałowych czy inżynierów mechaników i inżynierów zbliżonych specjalności, lecz także dla studentów i miłośników wiedzy o materiałach. Każdy z nich znajdzie w niej interesujące go zagadnienia.

Fragment recenzji prof. dr hab. inż. Jarosława Mizery

Partnerzy wydania:



Zakład Metalurgiczny
„WSK Rzeszów” Sp. z o.o.



RESPAK Sp. z o.o.

Patroni medialni:



Łukasiewicz
Górnośląski Instytut Technologiczny



SPAWALNICZY.PL

Dostępne formaty: e-book • książka online
Skupaj w: ksiegarnia.pwn.pl • libra.ibuk.pl • ibuk.pl



**Wydawnictwo
Naukowe PWN SA**
pwn.pl

ISBN 978-83-01-24011-0



9 788301 240110