

**Jerzy
Łabanowski**

**STALE ODPORNE NA KOROZJĘ
I ICH SPAWALNOŚĆ**

Gdańsk 2018

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

RECENZENCI

Jan Pilarczyk

Edmund Tasak

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog>
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.edu.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018

ISBN 978-83-7348-756-7

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
WSTĘP	7
1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA STALI ODPORNYCH NA KOROZJĘ	9
2. SPAWALNOŚĆ STALI ODPORNYCH NA KOROZJĘ	17
3. METODY SPAWANIA STALI ODPORNYCH NA KOROZJĘ	23
3.1. Spawanie łukowe elektrodą otuloną	23
3.2. Spawanie łukiem krytym	25
3.3. Spawanie łukowe w osłonach gazów	27
4. MARTENZYTYCZNE STALE NIERDZEWNE	35
4.1. Typy martenzytycznych stali nierdzewnych	36
4.2. Metalurgia martenzytycznych stali nierdzewnych	38
4.3. Spawalność martenzytycznych stali nierdzewnych	40
5. FERRYTYCZNE STALE NIERDZEWNE	45
5.1. Typy ferrytycznych stali nierdzewnych	46
5.2. Odporność stali ferrytycznych na korozję	48
5.3. Metalurgia ferrytycznych stali nierdzewnych	49
5.4. Spawalność ferrytycznych stali nierdzewnych	55
6. AUSTENITYCZNE STALE NIERDZEWNE	57
6.1. Typy nierdzewnych stali austenitycznych	62
6.2. Struktura złączy austenitycznych stali nierdzewnych	64
6.3. Spawalność austenitycznych stali nierdzewnych	70
6.4. Właściwości mechaniczne złączy austenitycznych stali nierdzewnych	75
6.5. Spawanie austenitycznych stali nierdzewnych	77
6.6. Odporność na korozję austenitycznych stali nierdzewnych	79
6.7. Przebarwienia powierzchni złączy spawanych stali austenitycznych	91
6.8. Zagrożenia eksploatacyjne instalacji wykonanych ze stali austenitycznych	96
7. FERRYTYCZNO-AUSTENITYCZNE STALE NIERDZEWNE (DUPEKS)	109
7.1. Typy ferrytyczno-austenitycznych stali nierdzewnych	110
7.2. Metalurgia ferrytyczno-austenitycznych stali nierdzewnych	113
7.3. Właściwości mechaniczne i fizyczne ferrytyczno-austenitycznych stali nierdzewnych	127
7.4. Spawalność ferrytyczno-austenitycznych stali nierdzewnych	130
7.5. Spawanie stali dupleks i właściwości mechaniczne spoin	141
7.6. Spawalność stali dupleks w warunkach podwodnych	144
7.7. Odporność korozyjna stali ferrytyczno-austenitycznych	148
7.8. Zastosowanie stali dupleks	157

8. STALE NIERDZEWNE UTWARDZANE WYDZIELENIOWO	161
8.1. Metalurgia stali utwardzanych wydzieleniowo	161
8.2. Spawalność stali utwardzanych wydzieleniowo	164
9. RÓŻNOIMIENNE ZŁĄCZA STALI ODPORNYCH NA KOROZJĘ	167
BIBLIOGRAFIA	181

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

α	– ferryt
γ	– austenit
γ_2	– austenit wtórny
η	– współczynnik sprawności cieplnej procesu
σ	– faza sigma
A	– wydłużenie bezwzględne
AOD	– (Argon-Oxygen Decarburization) odwęglanie argonowo-tlenowe
AISI	– American Iron and Steel Institute
ASTM	– American Society for Testing and Materials
CCT	– (Critical Crevice Temperature) krytyczna temperatura, powyżej której wystąpi korozja szczelinowa
CPT	– (Critical Pitting Temperature) krytyczna temperatura, powyżej której wystąpi korozja wżerowa
CTP	– wykres czas–temperatura–przemiana
D	– współczynnik dyfuzji
DC (+)	– prąd stały o biegunowości dodatniej
EDS	– Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
F_m	– siła zrywająca
FCAW	– (Flux Cored Arc Welding) spawanie łukowe półautomatyczne drutem proszkowym w osłonie gazu
FN	– (Ferrite Number) liczba ferrytowa
GMAW	– (Gas Metal Arc Welding) spawanie łukowe półautomatyczne drutem litym w osłonach gazowych
GTAW	– (Gas Tungsten Arc Welding) spawanie łukowe elektrodą wolframową
HE	– indeks intensywności kruchości wodorowej
HEDE	– (Hydrogen Enhanced Decohesion) teoria dekohezji niszczenia wodorowego
HELP	– (Hydrogen Enhanced Local Plasticity) teoria dyslokacyjna niszczenia wodorowego
I	– natężenie prądu spawania
KN	– korozja naprężeniowa
LKS	– metoda spawania podwodnego za pomocą lokalnej komory suchej
LM	– mikroskopia świetlna
MIG	– (Metal Inert Gas) spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych
MAG	– (Metal Active Gas) spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych
MMA	– (Metal Manual Arc) spawanie ręczne elektrodami otulonymi
MR	– materiał rodzimy

M_D	– najwyższa temperatura, przy której powstaje określona ilość martenzytu w mikrostrukturze stali Cr-Ni pod wpływem określonego stopnia zgniotu
M_s	– temperatura początku przemiany martenzytycznej
M_f	– temperatura końca przemiany martenzytycznej
PAW	– (Plasma Arc Welding) spawanie plazmowe
PH	– (Precipitation-Hardening) stale umacniane wydzieleniowo
PRE_N	– (Pitting Resistance Equivalent Number) indeks odporności na korozję wżerową
PRE_W	– indeks odporności na korozję wżerową z uwzględnieniem wpływu wolframu
Q	– ilość wprowadzonego ciepła
R_{Ni}	– równoważnik niklu
R_{Cr}	– równoważnik chromu
R_m	– wytrzymałość na rozciąganie
RPC	– struktura regularna przestrzennie centrowana
RSC	– struktura regularna ściennie centrowana
SAW	– (Submerged Arc Welding) spawanie automatyczne łukiem krytym pod topnikiem
SEM	– (Scanning Electron Microscope) skaningowa mikroskopia elektronowa
SMAW	– (Shielded Manual Arc Welding) spawanie łukowe elektrodą otuloną
SSRT	– (Slow Strain Rate Testing) badania z małą prędkością odkształcenia
SWC	– strefa wpływu ciepła
T	– temperatura
$t_{1200/800}$	– czas stygnięcia SWC w zakresie $1200 \div 800^\circ\text{C}$
TEM	– (Transmission Electron Microscopy) transmisyjna mikroskopia elektronowa
TIG	– (Tungsten Inert Gas) spawanie łukowe elektrodą nietopliwą
U	– napięcie łuku
UNS	– (Unified Numbering System) zunifikowany system numerowania
WPS	– (Welding Procedure Specification) instrukcja technologiczna spawania
v_s	– prędkość spawania
VOD	– (Vacuum Oxygen Decarburization) odwęglanie próżniowo-tlenowe
Z	– przewężenie bezwzględne

WSTĘP

Stale odporne na korozję stanowią ważną grupę materiałów konstrukcyjnych stosowanych do wytwarzania konstrukcji i urządzeń przemysłowych, eksploatowanych w warunkach agresywnych środowisk korozyjnych, a także różnych obciążeń cieplnych. Podstawową technologią wytwarzania konstrukcji z tej grupy stali jest spawanie. Powszechnie przyjmowany pogląd, że stale te są bezwarunkowo odporne na korozję i dobrze spawalne należy traktować z dystansem. Praktyka bowiem wskazuje, że spawalniczy cykl cieplny może istotnie pogorszyć odporność korozyjną stali i/lub właściwości mechaniczne w wyniku nieumiejętnego stosowania technik spawalniczych. Odnosi się to szczególnie do nowych gatunków wysokostopowych stali, charakteryzujących się wysoką odpornością korozyjną. Dobór materiałów i technologii spawania powinien być uwarunkowany znajomością przemian fazowych zachodzących w obrębie złącza spawanego, które decydują o końcowej mikrostrukturze i właściwościach tych stali.

W monografii przedstawiono charakterystykę podstawowych grup stali odpornych na korozję, a zwłaszcza stali nierdzewnych, oraz szczegółowe analizy wpływu cykli cieplnych spawania na strukturę i właściwości złączy w aspekcie spawalności metalurgicznej, technologicznej i konstrukcyjnej stali. Poza analizą dostępnej literatury, w monografii zawarto opis doświadczeń Autora dotyczących badań spawalności stali austenitycznych oraz stali typu dupleks, w tym w specyficznych warunkach, pod wodą. Ponadto, na podstawie wykonanych prac badawczych oraz ekspertyz dla przemysłu, przedstawiono praktyczne problemy związane z eksploatacją stali nierdzewnych i ich złączy spawanych.

Wobec dużej liczby gatunków stali nierdzewnych, metod i procedur ich spawania oraz różnych metod oceny spawalności, całościowe ujęcie tematu nie zmieściło się w przyjętej objętości monografii. Konieczne było wprowadzenie pewnych ograniczeń. Pominięto spawanie plazmowe i laserowe oraz wszystkie rodzaje zgrzewania i lutowania. Informacje o składach chemicznych i właściwościach ograniczono do podania typu stali, zakresów składu chemicznego i ich właściwości, wskazując normy i inne dokumenty, w których znajdują się szczegółowe informacje.

Monografia może stanowić cenne źródło informacji dla inżynierów i technologów zajmujących się produkcją spawalniczą. Może być również wykorzystana przez pracowników naukowych, doktorantów i studentów wydziałów mechanicznych i budownictwa wyższych uczelni technicznych.

Autor