

Maria Głowacka

Jerzy Łabanowski

Michał Landowski

WSPÓŁCZESNE MATERIAŁY INŻYNIERSKIE WYBRANE GRUPY MATERIAŁÓW

Gdańsk 2023

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

RECENZENT

Grzegorz Golański

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI

Ireneusz Jelonek

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

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

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2023

ISBN 978-83-7348-842-7

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Druk II wyd. Ark. wyd. 16,0, ark. druku 18,75, 1292/1235

Druk i oprawa: Volumina.pl sp. z o.o.

ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	7
WSTĘP	9
1. STALE KONSTRUKCYJNE SPAWALNE	11
1.1. Wprowadzenie	11
1.2. Podział stali konstrukcyjnych spawalnych	17
1.3. Stale spawalne o normalnej wytrzymałości	19
1.4. Stale spawalne o podwyższonej wytrzymałości	21
1.5. Stale spawalne o wysokiej i ultrawysokiej wytrzymałości	31
2. METALOGRAFIA ZŁĄCZY SPAWANYCH STALI KONSTRUKCYJNYCH ...	48
2.1. Makrostruktura złącza spawanego	48
2.2. Mikrostruktury złączy spawanych stali konstrukcyjnych	50
2.3. Twardość złączy spawanych	61
3. STALE NIERDZEWNE	64
3.1. Charakterystyka stali nierdzewnych, podział i znakowanie	64
3.2. Stale nierdzewne ferrytyczne	72
3.3. Stale nierdzewne martenzytyczne	78
3.4. Stale nierdzewne umacniane wydzieleniowo	81
3.5. Stale nierdzewne austenityczne chromowo-niklowe	82
3.6. Stale nierdzewne ferrytyczno-austenityczne (dupleks)	97
4. USZKODZENIA EKSPLOATACYJNE NIERDZEWNYCH STALI AUSTENITYCZNYCH	109
4.1. Korozja wżerowa/podosadowa rurociągu wody pitnej	109

4.2.	Korozja szczelinowa/podosadowa w wodzie naturalnej	111
4.3.	Uszkodzenie węzownicy z wytownicy pary	113
4.4.	Korozja stali AISI 304 wywołana przez osadzenie się cząstek stali niestopowej na powierzchni stali nierdzewnej	116
4.5.	Badanie odporności na korozję międzykrystaliczną wyrobów z nierdzewnych stali austenitycznych	117
5.	STALE DO PRACY W PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE	120
5.1.	Wprowadzenie	120
5.2.	Stale niestopowe i niskostopowe do pracy w podwyższonej temperaturze	125
5.3.	Procesy degradacji stali eksploatowanych w podwyższonej temperaturze	132
5.4.	Degradacja struktury stali niskostopowych w podwyższonej temperaturze	134
5.5.	Stale wysokostopowe do pracy w podwyższonej temperaturze	139
6.	STOPY ŻAROODPORNE I ŻAROWYTRZYMAŁE	146
6.1.	Wprowadzenie	146
6.2.	Żaroodporność	146
6.3.	Żaroodporne stopy żelaza, niklu i kobaltu	150
6.4.	Żarowytrzymałość	156
6.5.	Wysokostopowe stale żarowytrzymałe	159
6.6.	Nadstopy żarowytrzymałe	161
7.	EKSPLOATACYJNE NISZCZENIE STOPÓW ŻAROODPORNYCH I ŻAROWYTRZYMAŁYCH	174
7.1.	Procesy niszczenia stali żaroodpornych	174
7.2.	Degradacja mikrostruktury stopów żarowytrzymałych	177
7.3.	Degradacja żarowytrzymałych stali martenzytycznych	178
7.4.	Degradacja żarowytrzymałych stopów austenitycznych	181
8.	MATERIAŁY ODPORNE NA ZUŻYCIE ŚCIERNE	188
8.1.	Niszczenie materiałów w warunkach tarcia	188
8.2.	Rodzaje zużycia tribologicznego	192
8.3.	Charakterystyka materiałowa stopów przeznaczonych do pracy w warunkach tarcia ściernego	194
8.4.	Porównanie odporności na ścieranie różnych grup stopów żelaza	196
8.5.	Charakterystyka wybranych materiałów metalowych odpornych na ścieranie	199
8.6.	Materiały cierne – przykłady	218

8.7. Sposoby ograniczenia zużycia ściernego	219
8.8. Badania tribologiczne	224
9. ALUMINIUM I STOPY ALUMINIUM	227
9.1. Wprowadzenie	227
9.2. Charakterystyka aluminium	227
9.3. Stopy aluminium	229
9.4. Stopy aluminium do przeróbki plastycznej	234
9.5. Odlewnicze stopy aluminium	240
9.6. Obróbka cieplna stopów aluminium	247
9.7. Żarowytrzymałe stopy aluminium	248
9.8. Spawalność stopów aluminium	252
9.9. Odporność na korozję stopów aluminium	255
10. KOMPOZYTY METALOWE	258
10.1. Charakterystyka materiałów kompozytowych	258
10.2. Czynniki wpływające na własności materiałów kompozytowych	263
10.3. Kompozyty o osnowie metalowej – technologie wytwarzania	271
10.4. Przykłady kompozytów metalowych i ich zastosowanie	288
BIBLIOGRAFIA	291

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

A	– wydłużenie procentowe próbki po zerwaniu
AC	– przyspieszone chłodzenie (<i>accelerated cooling</i>)
AHSS	– zaawansowane stale wysokowytrzymałe (<i>advanced high strength steels</i>)
AISI	– American Iron and Steel Institute
API	– American Petroleum Institute
ASTM	– American Society for Testing and Materials
C_c (CEV)	– równoważnik węgla
CR	– kontrolowane walcowanie (<i>controlled rolling</i>)
CTP	– wykres czas–temperatura–przemiana
DQ	– bezpośrednio hartowanie (<i>direct quenching</i>)
E	– moduł Younga sprężystości wzdłużnej
EDS	– spektroskop rentgenowski dyspersji energii (<i>energy dispersive X-ray spectroscopy</i>)
EWV	– eksploatacyjna warstwa wierzchnia
FATT	– temperatura przejścia w stan kruchy (<i>fracture appearance transition temperature</i>)
F_m	– siła zrywająca
HIC	– pękanie indukowane wodorem (<i>hydrogen induced cracking</i>)
HSLA	– stale o podwyższonej wytrzymałości (<i>high strength low alloy</i>)
IADS	– międzynarodowy system oznaczania stopów (<i>International Alloy Designation System</i>)
KN	– korozja naprężeniowa
KV	– praca łamania
LM	– mikroskopia świetlna
M_f	– temperatura końca przemiany martenzytycznej

MP	– materiał podstawowy
M_s	– temperatura początku przemiany martenzytycznej
PRE_N	– współczynnik odporności na korozję wżerową (<i>pitting resistance equivalent number</i>)
P_{cm}	– parametr charakteryzujący skłonność stali do tworzenia zimnych pęknięć w SWC (<i>critical metal parameter</i>)
R_{Cr}	– równoważnik chromu
R_e	– wyraźna granica plastyczności
R_{eH}	– górna granica plastyczności
R_{eL}	– dolna granica plastyczności
R_m	– wytrzymałość na rozciąganie
R_{Ni}	– równoważnik niklu
$R_{p0.2}$	– umowna granica plastyczności
RPC (A2)	– struktura regularna przestrzennie centrowana
RSC (A1)	– struktura regularna ściennie centrowana
SEM	– elektronowa mikroskopia skaningowa (<i>scanning electron microscope</i>)
SWC	– strefa wpływu ciepła
T	– temperatura
TEM	– elektronowa mikroskopia transmisyjna (<i>transmission electron microscopy</i>)
T_k	– temperatura przejścia w stan kruchy
TMCP	– kontrolowane walcowanie z przyspieszonym chłodzeniem (<i>thermo-mechanical controll process</i>)
T_R	– temperatura rekrytalizacji
TRIP	– stale o plastyczności indukowanej przez przemianę (<i>transformation-induced plasticity</i>)
TWW	– technologiczna warstwa wierzchnia
UNS	– zunifikowany system numerowania (<i>Unified Numbering System</i>)
Z	– przewężenie bezwzględne
α	– ferryt
γ	– austenit
γ_2	– austenit wtórny
δ albo $\alpha(\delta)$	– ferryt wysokotemperaturowy albo ferryt delta
σ	– faza sigma

WSTĘP

Stopy metali są najważniejszymi materiałami inżynierskimi stosowanymi powszechnie w budownictwie, urządzeniach przemysłowych, środkach transportu i maszynach, eksploatowanych w zróżnicowanych warunkach obciążeń mechanicznych, cieplnych i środowiskowych. Coraz bardziej ekstremalne warunki zastosowania – wzrost temperatury eksploatacji, wyższe obciążenia, skażenie środowiska – wymuszają postęp w konstrukcjach i technologiach materiałowych.

Postęp w dziedzinie materiałów mierza w dwóch kierunkach. Pierwszym jest modyfikacja istniejących materiałów w celu polepszenia ich własności użytkowych, przy zmniejszonym zużyciu surowców i zredukowanej energochłonności wytwórczych technologii przemysłowych oraz ograniczonym skażeniu ekologicznym środowiska. Drugi kierunek obejmuje projektowanie i wytwarzanie nowych materiałów, zwłaszcza zaawansowanych, o szczególnych własnościach fizycznych, termicznych i innych. Sprostanie tym założeniom wymaga ciągłego gromadzenia doświadczeń eksploatacyjnych, przede wszystkim we współpracy z zainteresowanymi zespołami inżynierskimi z poszczególnych gałęzi przemysłu, oraz prowadzenia ciągłych badań naukowych. Działania te znajdują odbicie we wszystkich rodzajach współczesnych materiałów.

Tematyka niniejszego podręcznika dotyczy wybranych grup materiałów, takich jak: stale konstrukcyjne spawalne, stale nierdzewne, stale do pracy w podwyższonej temperaturze, stopy żaroodporne i żarowytrzymałe, stopy odporne na zużycie ścierne, stopy aluminium i kompozyty metalowe. Wyboru analizowanych grup materiałów dokonano na podstawie wielu prac badawczych realizowanych przez pracowników Zespołu Inżynierii Spajania Katedry Inżynierii Materiałowej i Spajania na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.

Podręcznik jest przeznaczony dla studentów kierunków *mechanika i budowa maszyn, inżynieria materiałowa, energetyka* oraz kierunków pokrewnych, realizujących pro-

gram przedmiotu *współczesne materiały inżynierskie*, który bazuje na podstawach materiałoznawstwa, inżynierii materiałowej i technologii materiałowych. Książka może być też przydatna dla inżynierów pracujących w przemyśle i w biurach projektowych.

Autorzy