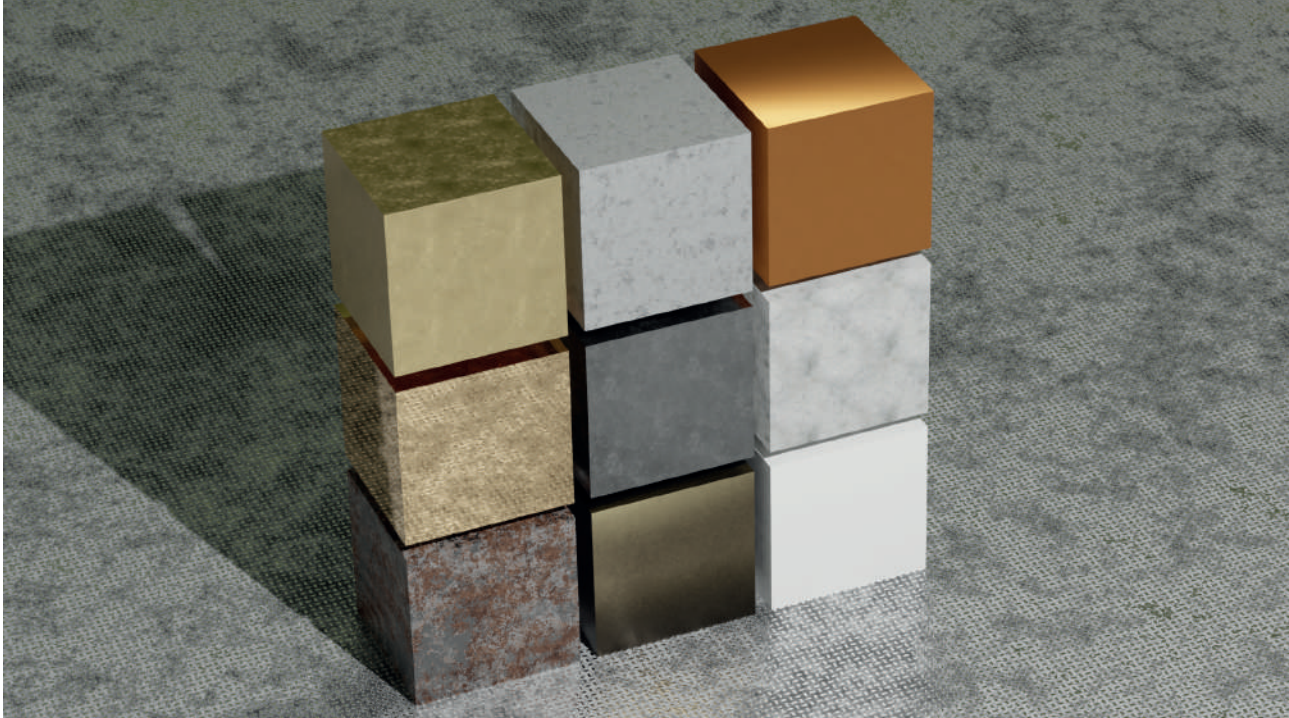
Maria Głowacka | Jerzy Łabanowski | Michał Landowski

WSPÓŁCZESNE MATERIAŁY INŻYNIERSKIE

WYBRANE GRUPY MATERIAŁÓW



Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Dariusz Mikielewicz

RECENZENT
Grzegorz Golański

REDAKCJA JĘZYKOWA
Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI
Ireneusz Jelonek

SKŁAD
Wioleta Lipska-Kamińska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

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

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

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2026

ISBN 978-83-7348-970-7 (e-book)

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie III. Ark. wyd. 16,0, ark. drukarskich 18,75

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 wężownicy z wytwornicy 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 – przyśpieszone chłodzenie (*accelerated cooling*)
AHSS – zaawansowane stale wysokowytrzymałe (*advanced high strength steels*)
AISI – American Iron and Steel Institute
API – American Petroleum Institute
ASTM – American Society for Testing and Materials
C_e (*CEV*) – równoważnik węgla
CR – kontrolowane walcowanie (*controlled rolling*)
CTP – wykres czas–temperatura–przemiana
DQ – bezpośrednie hartowanie (*direct quenching*)
E – moduł Younga sprężystości wzdłużnej
EDS – spektroskop rentgenowski dyspersji energii (*energy dispersive X-ray spectroscopy*)
EWW – eksploatacyjna warstwa wierzchnia
FATT – temperatura przejścia w stan kruchy (*fracture appearance transition temperature*)
F_m – siła zrywająca
HIC – pękanie indukowane wodorem (*hydrogen induced cracking*)
HSLA – stale o podwyższonej wytrzymałości (*high strength low alloy*)
IADS – międzynarodowy system oznaczania stopów (*International Alloy Designation System*)
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 (*pitting resistance equivalent number*)
P_{cm} – parametr charakteryzujący skłonność stali do tworzenia zimnych pęknięć w SWC (*critical metal parameter*)
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 (*scanning electron microscope*)
SWC – strefa wpływu ciepła
T – temperatura
TEM – elektronowa mikroskopia transmisyjna (*transmission electron microscopy*)
T_k – temperatura przejścia w stan kruchy
TMCP – kontrolowane walcowanie z przyspieszonym chłodzeniem (*thermo-mechanical controll process*)
T_R – temperatura rekrystalizacji
TRIP – stale o plastyczności indukowanej przez przemianę (*transformation-induced plasticity*)
TWW – technologiczna warstwa wierzchnia
UNS – zunifikowany system numerowania (*Unified Numbering System*)
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 zmierza 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