

# Materiały lotnicze

---

*notatki z wykładu*

Grzegorz Dorosz  
Łukasz Kusek

Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie

**15 lutego 2010**

Copyright © 2009 Grzegorz Dorosz, Łukasz Kusek.  
Wszelkie prawa zastrzeżone.

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wymagania stawiane materiałom stosowanym w lotnictwie</b>	<b>7</b>
1.1	Rodzaje wyznaczanych własności	9
1.2	Przewodność cieplna	9
1.3	Pojemność cieplna	9
1.4	Rozszerzalność temperaturowa	9
1.5	Własności magnetyczne	9
1.6	Własności elektryczne	9
1.7	Wytrzymałość	10
1.8	Plastyczność	10
1.8.1	Wytrzymałość na rozciąganie i granica plastyczności	10
1.8.2	Wytrzymałość na ściskanie i granica plastyczności	10
1.9	Twardość	10
1.10	Udarność	11
1.11	Zmęczenie	11
1.12	Pelzanie	11
1.13	Korozja	11
1.13.1	Podstawowy podział	11
1.14	Zużycie trybologiczne	11
<b>2</b>	<b>Budowa materiału</b>	<b>13</b>
2.1	Wiązania	13
2.1.1	Wiązania jonowe	13
2.1.2	Wiązania atomowe (kwalencyjne)	13
2.1.3	Wiązania metaliczne	14
2.1.4	Wiązania wtórne lub siłami Van der Waalsa	14
2.2	Kryształy	15
2.2.1	Monokryształy. Polikryształy	15
2.3	Sieci krystaliczne	16
2.4	Defekty struktur krystalicznych	17
<b>3</b>	<b>Stopy metali i fazy</b>	<b>19</b>
3.1	Stopy metali	19
3.2	Sposoby stapiania	19
3.3	Fazy	19
3.4	Wyniki krystalizacji	20
3.5	Pojęcie roztworu	20
3.6	Roztwory stałe	21
3.6.1	Czynniki decydujące o tworzeniu roztworów stałych	21

3.6.2	Roztwory stałe o ograniczonej rozpuszczalności . . . . .	21
3.6.3	Roztwory stałe międzywęzłowe . . . . .	22
3.6.4	Roztwory stałe różnowęzłowe . . . . .	22
3.7	Fazy międzymetaliczne . . . . .	22
3.7.1	Roztwory stałe wtórne . . . . .	23
3.7.2	Kryteria klasyfikacji faz międzymetalicznych . . . . .	23
3.7.3	Fazy międzywęzłowe o strukturach prostych i złożonych . . . . .	24
3.8	Mieszaniny faz . . . . .	25
3.8.1	Klasyfikacja miesznin faz . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Układy równowagi fazowej</b>	<b>27</b>
4.1	Stan równowagi termodynamicznej . . . . .	27
4.2	Reguła faz W. Gibbsa . . . . .	27
4.3	Wykresy równowagi faz stopów . . . . .	28
4.4	Badanie krystalizacji stopów . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Układ równowagi fazowej żelazo-węgiel</b>	<b>29</b>
5.1	Żelazo i jego własności . . . . .	29
5.1.1	Ogólna charakterystyka . . . . .	29
5.1.2	Odmiany alotropowe żelaza . . . . .	29
5.2	Wykresy równowagi układu żelazo-węgiel . . . . .	30
5.2.1	Składniki strukturalne wykresu żelazo-cementyt . . . . .	30
<b>6</b>	<b>Stal, jako stop żelaza i węgla</b>	<b>31</b>
6.1	Podział stali . . . . .	31
6.2	Stale niestopowe . . . . .	32
6.2.1	Stale niestopowe podstawowe . . . . .	32
6.2.2	Stale niestopowe jakościowe . . . . .	32
6.2.3	Stale niestopowe specjalne . . . . .	33
6.2.4	Klasyfikacja stali niestopowych jakościowych i specjalnych . . . . .	34
6.3	Stale stopowe . . . . .	34
6.3.1	Stale stopowe jakościowe . . . . .	34
6.3.2	Stale stopowe specjalne . . . . .	35
6.4	Stale nierdzewne . . . . .	35
<b>7</b>	<b>Aluminium i jego stopy</b>	<b>37</b>
7.1	Czysty glin . . . . .	37
7.1.1	Zastosowanie . . . . .	37
7.2	Aluminium . . . . .	37
7.2.1	Własności . . . . .	37
7.2.2	Zastosowanie . . . . .	38
7.2.3	Podział ze względu na wytwarzanie . . . . .	38
7.3	Stop aluminium z miedzią i magnezem (Duraluminium) . . . . .	38
7.3.1	Obróbka cieplna . . . . .	39
7.3.2	Starzenie samorzutne . . . . .	39
7.3.3	Zastosowanie . . . . .	39

<b>8 Magnez i jego stopy</b>	<b>41</b>
8.1 Własności . . . . .	41
8.2 Otrzymywanie . . . . .	41
8.3 Stopy magnezu . . . . .	42
8.3.1 Stopy magnezu z <i>Al</i> . . . . .	42
8.3.2 Zastosowanie . . . . .	42
8.3.3 Podział ze względu na obróbkę . . . . .	42
<b>9 Materiały w lotnictwie</b>	<b>43</b>
9.1 Żaroodporność . . . . .	44
9.1.1 Pierwiastki wpływające na żaroodporność . . . . .	44
9.1.2 Stale żaroodporne . . . . .	44
9.2 Żarowytrzymałość . . . . .	45
9.2.1 Pierwiastki wpływające na żarowytrzymałość . . . . .	45
9.3 Stale i stopy stosowane przy budowie płatowca . . . . .	45
9.3.1 Stale stopowe do pracy w podwyższonej temperaturze . . . . .	45
9.4 Stale i stopy stosowane przy budowie płatowca . . . . .	46
9.5 Materiały do produkcji silników lotniczych . . . . .	47
<b>10 Obróbka cieplna</b>	<b>49</b>





## Rozdział 1

# Wymagania stawiane materiałom stosowanym w lotnictwie

Ogólne	względny koszt gęstość
Mechaniczne	moduł sprężystości granica plastyczności udarność wytrzymałość odporność na pękanie wskaźnik zmęzeniowy
Ciepłne	przewodność cieplna dyfuzyjność pojemność cieplna temperatura topnienia temperatura zeszklenia współczynnik rozszerzalności cieplnej odporność na udary cieplne odporność na pękanie
Własności magnetyczne	diamagnetyczne paramagnetyczne ferromagnetyki
Własności elektryczne	przewodniki półprzewodniki izolatory
Zużycie	wskaźnik zużycia
Korozja	wskaźnik korozyjny



## 1.1 Rodzaje wyznaczanych własności

- własności **statyczne** - przy wolno wzrastającym obciążeniu
- własności **dynamiczne** - przy obciążeniu działającym gwałtownie
- własności **zmęzeniowe** - przy obciążeniach cyklicznych
- własności przy **obciążeniu stałym i długotrwałym**.

## 1.2 Przewodność cieplna

**Przewodność cieplna** - ilość ciepła, która przepływa przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu.

## 1.3 Pojemność cieplna

**Pojemność cieplna** - ilość ciepła potrzebna do podniesienia temperatury materiału o  $1^{\circ}\text{C}$ .

## 1.4 Rozszerzalność temperaturowa

**Rozszerzalność temperaturowa** - rozszerzalność materiału następuje w wyniku drgań atomów w sieci krystalicznej co doprowadza do przebudowy sieci krystalicznej

## 1.5 Własności magnetyczne

Własności magnetyczne

- **diamagnetyczne** - prostopadle do kierunku linii sił pola magnetycznego
- **paramagnetyczne** - równoległe do kierunku linii sił pola magnetycznego
- **ferromagnetyki** - ulegają namagnesowaniu

## 1.6 Własności elektryczne

Własności elektryczne (oporność właściwa w temp. pokojowej  $19^{\circ}\text{C}$ )

- **przewodniki** -  $< 1\Omega$
- **półprzewodniki** - od  $1\Omega$  do  $10\Omega$
- **izolatory** -  $\gg 10\Omega$

## 1.7 Wytrzymałość

**Wytrzymałość** - odporność materiału na niszczące działanie czynników mechanicznych, czyli obciążeń

Ze względu na sposób obliczeń inżynierskich, **wytrzymałość** przyjęto jako

- granicę plastyczności - dla metali i polimerów
- wytrzymałość na ściskanie - dla materiałów ceramicznych
- wytrzymałość na rozdarcie - dla elastomerów
- wytrzymałość na rozciąganie - dla materiałów kompozytowych

## 1.8 Plastyczność

**Plastyczność** - zdolność do trwałego odkształcenia pod wpływem obciążeń bez powodowania uszkodzeń

### 1.8.1 Wytrzymałość na rozciąganie i granica plastyczności

**Wytrzymałość na rozciąganie** - stosunek największej siły rozciągającej do pola powierzchni przekroju początkowego próbki.

**Granica plastyczności** - naprężenie rozciągające w próbce, przy osiągnięciu którego następuje wyraźny wzrost jej wydłużenia

### 1.8.2 Wytrzymałość na ściskanie i granica plastyczności

**Granica plastyczności** - naprężenie odpowiadające sile, przy której próbka ulega skróceniu bez wzrostu obciążenia

**Wytrzymałością na ściskanie** - naprężenie odpowiadające maksymalnej sile ściskającej.

## 1.9 Twardość

**Twardość** - miara odporności materiału na odkształcenia trwałe, powstające w wyniku wciskania wgłębnika

## 1.10 Udarność

**Próba udarności (zginania udarowego)** polega na złamaniu jednym uderzeniem młota wahadłowego Charpy'ego próbki podpartej swobodnie na obu końcach i pomiarze pracy jej złamania.

## 1.11 Zmęczenie

**Zmęczenie** - zmiany zachodzące w materiale inżynierskim pod wpływem **zmien-nych**, niekiedy okresowo, **naprężeń** lub **odkształceń**, ujawniające się albo przez **zmniejszenie wytrzymałości i trwałości**, albo przez **zniszczenie w wyniku pęknięcia**.

## 1.12 Pełzanie

**Pełzanie** - proces **odkształcenia plastycznego** związany z **bardzo małą szybkością** odkształcenia. Podczas pełzania w stałej, wysokiej temperaturze metal ulega odkształceniu plastycznemu pod działaniem prawie stałego naprężenia lub stałego obciążenia.

## 1.13 Korozja

**Korozją** jest nazywane **oddziaływanie fizykochemiczne i elektrochemiczne** między **materiałem metalowym** a otaczającym **środowiskiem**, w wyniku którego następuje uszkodzenie korozyjne powodujące zmniejszenie własności metalu.

### 1.13.1 Podstawowy podział

ze względu na typ reakcji powodujących zniszczenie metalu

- korozja *elektrochemiczna*
- korozja *chemiczna*

## 1.14 Zużycie trybologiczne

**Zużycie trybologiczne** - rodzaj **zużycia** spowodowanego **procesami tarcia**, w którym **następuje zmiana masy** oraz **struktury i fizycznych własności warstw wierzchnich** obszarów styków.

Intensywność zużycia trybologicznego zależy od odporności obszarów tarcia warstw wierzchnich oraz od rodzaju oddziaływania.



## Rozdział 2

# Budowa materiału

### 2.1 Wiązania

- wiązania *pierwotne*
  - wiązania **jonowe**
  - wiązania **atomowe** (kowalencyjne)
  - wiązania **metaliczne**
- wiązania *wtórne* (siłami *Van der Waalsa*)
  - wiązania **między chwilowymi dipolami**
  - wiązania **siłami Londona**
  - wiązania **wodorowe**

#### 2.1.1 Wiązania jonowe

(elektrostatyczne przyciąganie się **różnoimiennych jonów**)

Gdy **elektrony walencyjne** jednego **atomu elektrododatniego** są **przyłączone** przez drugi **atom elektroujemny**, powstaje **wiązanie jonowe**. W wyniku utraty elektronów walencyjnych przez jeden atom i przyłączenia tych elektronów przez drugi, oba atomy uzyskują oktetowe konfiguracje elektronowe, takie jakimi charakteryzują się gazy szlachetne. Wiązania jonowe są tworzone przez atomy, w których występuje odpowiednio brak i nadmiar jednego lub dwóch elektronów walencyjnych.

#### 2.1.2 Wiązania atomowe (kowalencyjne)

(jednakowe atomy, wspólne pary elektronów)

W przypadku **atomów pierwiastków elektroujemnych** - zwykle gazów - **elektrony walencyjne** pierwotnie różnych atomów tworzą **pary elektronów**

należące **wspólnie do jąder dwóch atomów**. Wiązania tworzone przez takie uwspólnione elektrony są nazywane atomowymi czyli kowalencyjnymi. Wiązania atomowe, poza gazami, występują także w substancjach stałych, takich jak np. *Si*, *Ge* i diament.

### 2.1.3 Wiązania metaliczne

(skondensowane stany skupienia)

Wiązanie metaliczne występuje w **dużych skupiskach atomów pierwiastków metalicznych**, które po zbliżeniu się na wystarczająco małą odległość, charakterystyczną dla stałego stanu skupienia, **oddają swoje elektrony walencyjne** na rzecz całego **zbioru atomów**. Elektrony walencyjne **przemieszczają się swobodnie** pomiędzy **rdzeniami atomowymi** (jonami dodatnimi), tworząc tzw. **gaz elektronowy**, charakterystyczny dla wiązania metalicznego

### 2.1.4 Wiązania wtórne lub siłami Van der Waalsa

(nietrwałe, gazy, słabe siły elektrostatyczne)

**Wiązania wtórne** występują między **wszystkimi atomami** lub **cząsteczkami**, lecz ich obecność może być stwierdzona, jeżeli występuje choć jedno z trzech wiązań pierwotnych. Wiązania wtórne są ewidentne między atomami gazów szlachetnych, które mają stabilną strukturę elektronową, a ponadto między cząsteczkami utworzonymi w wyniku wiązań kowalencyjnych. **Siły van der Waalsa występują między dipolami** cząsteczek lub atomów. Elektryczne dipole występują w przypadku rozdzielania ładunków dodatnich i ujemnych w atomie lub cząsteczce. **Wiązanie van der Waalsa** jest wynikiem przyciągania **siłami Coulomba** między **dodatnim końcem** jednego a **ujemnym końcem** drugiego **dipola**. Oddziaływania takie występują między:

- dipolami wyindukowanymi,
- dipolami wyindukowanymi i cząsteczkami spolaryzowanymi (które wykazują dipole okresowo),
- cząsteczkami spolaryzowanymi.

#### Wiązania między chwilowymi dipolami

Wiązania międzycząsteczkowe powstają w wyniku przyciągania siłami van der Waalsa, które występują między chwilowymi dipolami elektrycznymi, utworzonymi z atomów na skutek nierównomiernego rozkładu ładunków w ich chmurach elektronowych. Siły te powodują skraplanie gazów szlachetnych oraz łączą w stan stały cząsteczki, np.  $H_2$ ,  $F_2$ ,  $Cl_2$ ,  $N_2$ , powstałe w wyniku wiązania atomowego.

### Wiązania siłami Londona

Dipole elektryczne mogą być wykreowane lub wyindukowane w atomach lub cząsteczkach, które normalnie są elektrycznie obojętne. Siły Londona mogą wystąpić między cząsteczkami w przypadku okresowych zmian ładunku w cząsteczkach, powodując ich przyciąganie.

### Wiązania wodorowe

Wiązanie wodorowe jest najsilniejszym specjalnym wiązaniem wtórnym między spolaryzowanymi cząsteczkami. Występuje ono między cząsteczkami, w których wodór jest kowalencyjnie związany z fluorem ( $HF$ ), tlenem ( $H_2O$ ) lub azotem ( $NH_3$ ). W każdym wiązaniu  $H - F$ ,  $H - O$  lub  $H - N$  pojedynczy elektron wodoru jest uwspólniony z innym atomem. Wodorowy koniec wiązania jest dodatnio naładowany przez obnażony proton, który nie jest ekranowany przez żaden elektron. Ten silnie dodatnio naładowany koniec cząsteczki jest przyciągany przez przeciwny, ujemnie naładowany, koniec innej cząsteczki.

## 2.2 Kryształy

Elementami sieci przestrzennej:

- **płaszczyzny sieciowe**,
  - **proste sieciowe**, będące śladami przecięcia płaszczyzn sieciowych,
  - **węzły sieci**, stanowiące punkty przecięcia prostych sieciowych; węzły sieci prymitywnej odpowiadają położeniu środków atomów kryształu
- 
- **jonowe** (przezroczyste, nie przewodzą prądu)
  - **walencyjne** (przezroczyste, nie przewodzą prądu)
  - **molekularne** (gazy szlachetne, siły Wan der Waalsa)
  - **metaliczne** (przewodzą prąd i ciepło, cechy te maleją jednak wraz ze wzrostem temperatury, dobra plastyczność)

### 2.2.1 Monokryształy. Polikryształy

Metale w stanie stałym mogą występować jako:

- monokryształy,
- polikryształy.

### Monokryształy

**Monokryształy** charakteryzują się **prawidłowym rozmieszczeniem przestrzennym atomów** z zachowaniem jednakowej orientacji wszystkich elementarnych komórek sieciowych w całej objętości kryształu.

Metale **rzadko wykazują** strukturę **monokryształów**.

### Polikryształy

**Polikryształy** - składają się z **ziarn**, z których **każde** ma w przybliżeniu **prawidłową strukturę krystaliczną**

**Metale techniczne** otrzymywane konwencjonalnymi metodami metalurgicznymi są zwykle **polikryształami**.

## 2.3 Sieci krystaliczne

- Trójskośna prymitywna
- Jednoskośne
  - prymitywna
  - centrowana na podstawach
- Rombowe
  - prymitywna
  - centrowana na podstawach
  - przestrzennie centrowana
  - ściennie centrowana
- Heksagonalna
- Romboedryczna
- Tetragonalne
  - prymitywna
  - przestrzennie centrowana
- Regularne
  - prymitywna
  - przestrzennie centrowana
  - ściennie centrowana

TODO rysunek str 116



## 2.4 Defekty struktur krystalicznych

Podział ze względu na cechy geometryczne wad

- punktowe,
- liniowe,
- powierzchniowe.

Do **wad punktowych**, cechujących się niewielkimi wymiarami we wszystkich kierunkach, należą **wakanse**, tj. **wolne węzły w sieci krystalicznej**, oraz **atomy międzywęzłowe**, które **zajęły pozycje w lukach**, opuszczając węzły sieci na skutek drgań cieplnych. Obecność zarówno wakansów, jak i atomów międzywęzłowych, powoduje wokół nich lokalne odkształcenie sieci przestrzennej kryształu, zwane odpowiednio **kontrakcją** lub **ekspansją**.

TODO rysunek str 127



## Rozdział 3

# Stopy metali i fazy

### 3.1 Stopy metali

**Stopy** są substancjami **dwu-** lub **wieloskładnikowymi**, **makroskopowo** wykazującymi **własności metaliczne**. Co **najmniej jeden** z głównych składników stopu jest **metalem**. Składnikami stopów są substancje proste, np. pierwiastki, lub złożone - np. związki nie ulegające przemianom.

Stopy metali charakteryzują się **wiązaniem metalicznym** jako jedynym lub występującym oprócz innych rodzajów wiązań.

Skład chemiczny stopów jest wyrażany przez:

- **stężenie masowe** składników (Stosunek masy danego składnika do całej masy stopu podany w procentach),
- **stężenie atomowe** składników (Udział atomów składnika w ogólnej liczbie atomów stopu wyrażony procentowo).

### 3.2 Sposoby stapiania

- Elektroliza
- Sublimacja
- Spiekanie

### 3.3 Fazy

Stopy mogą mieć strukturę jedno- lub wielofazową.

**Faza** to **jednorodna część** stopu, oddzielona od pozostałej jego części **granicą międzyfazową**.

Poszczególne fazy stopu zwykle dość znacznie różnią się między sobą własnościami. Liczba, rodzaj i własności faz są uzależnione od składu chemicznego stopu.

**Zbiór faz** znajdujących się w stanie **równowagi termodynamicznej** jest nazywany **układem**.

### 3.4 Wyniki krystalizacji

W wyniku krystalizacji mogą powstać:

- roztwory stałe,
- fazy międzymetaliczne,
- mieszaniny faz.

### 3.5 Pojęcie roztworu

- w stanie **ciekłym** - jednorodna ciecz, w której składniki się w sobie rozpuszczają
- w stanie **stałym** - jednorodną fazą (1 typ kryształów, 1 typ sieci krystalicznej) o wiązaniu metalicznym i strukturze krystalicznej o własnościach typowo metalicznych
- **rozpuszczalnik** - metal, którego atomy występują w sieci w przewodzie
- **pierwiastek rozpuszczony** - drugi składnik

Pierwiastki tworzące stopy mogą wykazywać:

- wzajemną **nieograniczoną** rozpuszczalność w stanie **ciekłym**, to w stanie **stałym**:
  - **nieograniczoną** rozpuszczalność
  - **ograniczoną** rozpuszczalność
  - **brak** rozpuszczalności
- **ograniczoną** rozpuszczalność w stanie **ciekłym**, to w stanie **stałym**:
  - **ograniczoną** rozpuszczalność
  - **brak** rozpuszczalności
- **brak** rozpuszczalności

## 3.6 Roztwory stałe

**Roztwór stały** stanowi **jednorodną fazę** o **wiązaniu metalicznym** i strukturze krystalicznej o **własnościach** typowo **metalicznych**.

Cechą jest występowanie pierwiastków stopowych, jako **autonomicznych składników**, przy **jednoczesnej jednorodnej** sieci krystalicznej.

**Roztwory stałe** mogą być:

- **podstawowe** (rozpuszczalnikiem jest pierwiastek będący składnikiem stopu),
- **wtórne** (rozpuszczalnikiem jest faza międzymetaliczna).

Podział ze względu na **stężenie składnika rozpuszczonego**

- **graniczne** (stężenie składnika rozpuszczonego jest ograniczone w pewnym zakresie),
- **ciągłe** (nieograniczona rozpuszczalność obydwu składników w całym zakresie stężeń).

### 3.6.1 Czynniki decydujące o tworzeniu roztworów stałych

Czynniki decydujące o tworzeniu roztworów stałych:

- **elektrowartościowość ujemna** (niewielka jest różnica elektrowartościowości składników),
- **typy sieci** (ten sam typ struktury krystalicznej),
- **wielkość atomów** (stosunek promieni atomowych jest mniejszy od wartości granicznej),
- względne wartościowości.

### 3.6.2 Roztwory stałe o ograniczonej rozpuszczalności

Roztwory **stałe** o **ograniczonej** rozpuszczalności tworzą:

- Roztwory **jednofazowe** (zawartość składnika stopowego nie przekracza granicznej rozpuszczalności)
- Roztwory **dwufazowe** (złożone z mieszaniny kryształów roztworu stałego granicznego B w A i kryształów roztworu granicznego A w B)

### 3.6.3 Roztwory stałe międzywęzłowe

Roztwór **stały międzywęzłowy** - atomy pierwiastka **rozpuszczonego** są usytuowane w sposób **nieuporządkowany** w **przestrzeniach międzywęzłowych** sieci metalu **rozpuszczalnika**.

Roztwory stałe międzywęzłowe są roztworami **granicznymi**, a **rozpuszczalność graniczna** zmienia się zwykle wraz ze **zmianą temperatury**.

### 3.6.4 Roztwory stałe różnowęzłowe

Roztwór **stały różnowęzłowy** - atomy metalu **rozpuszczonego** zajmują **przypadkowo** dowolne **węzły** w sieci krystalicznej metalu **rozpuszczalnika**.

Obecność atomów innego pierwiastka w sieci krystalicznej rozpuszczalnika, w zależności od **stosunku średnic** atomów rozpuszczalnika i pierwiastka rozpuszczonego, powoduje **odkształcenie sieci**

- **ekspansję** (oddalanie węzłów)
- **kontrakcję** (zblizanie węzłów)

## 3.7 Fazy międzymetaliczne

Fazy międzymetaliczne są **połączeniami metali** lub **metali z niemetalami** i wykazują **własności metaliczne** ze względu na częściowy lub całkowity **udział wiązania metalicznego** między atomami wchodzącymi w skład fazy.

Charakterystyczne **cechy faz międzymetalicznych** opisują cztery zasady:

- **struktura** krystaliczna **faz** międzymetalicznych **różni się** od struktury **każdego ze składników**,
- **atomy** każdego ze składników wykazują **uporządkowane rozmieszczenie** w sieci krystalicznej,
- w oddziaływaniach między atomami **występuje przewaga wiązania metalicznego**,
- wzajemne **stosunki ilościowe** atomów składników **rzadko** odpowiadają **wartościowościom** chemicznym pierwiastków, jakie wykazują one w związkach chemicznych, chociaż fazom można przypisać wzory podobne do wzorów związków chemicznych.

### 3.7.1 Roztwory stałe wtórne

Fazy międzymetaliczne występują przy ściśle określonych stężeniach składników stopu, chociaż mogą występować również w pewnym zakresie stężeń i tworzyć roztwory stałe wtórne.

Roztwory te mogą być:

- różnowęzłowe,
- międzywęzłowe,
- pustowęzłowe.

W roztworach **pustowęzłowych** występuje **nadmiar atomów** jednego ze składników, a w **węzłach** sieci krystalicznej, które miałyby być obsadzone atomami drugiego składnika, powstają **wakanse**.

### 3.7.2 Kryteria klasyfikacji faz międzymetalicznych

Fazy międzymetaliczne można dzielić w zależności od:

- **stężenia elektronowego**, tj. stosunku liczby elektronów wartościowości do liczby atomów w komórce elementarnej, lub **czynnika elektrochemicznego**, uwzględniającego strukturę elektronową składników,
- **wielkości atomów**.

#### Fazy elektronowe

Fazy elektronowe to roztwory stałe wtórne o wyraźnych własnościach metalicznych. Są tworzone między metalami dwóch klas podanych (stosunek liczby elektronów walencyjnych do liczby atomów w jednej komórce strukturalnej)

Klasa metali	Metale	Liczba elektronów walencyjnych
I	Mn, Fe, Co, Ni, Rh, Pd, Pt	0
	Cu, Ag, Au	1
II	Be, Mg, Zn, Cd, Hg	2
	Al, Ga, In	3
	Si, Ge, Sn	4
	Sb	5

#### Fazy Lavesa

W przypadku gdy idealny stosunek promieni atomowych dwóch pierwiastków  $A$  i  $B$  wynosi 1,225, a w rzeczywistości gdy zawarty jest w przedziale  $1,05 \div 1,68$ , w zasadzie przy ściśle określonym stosunku stężeń atomowych mogą utworzyć się fazy Lavesa typu  $AB_2$ .

### Fazy o strukturach siatek Kagomé

W stopach **dwu- i wieloskładnikowych** metali **przejściowych**, zawierających niekiedy dodatki innych pierwiastków, np. Si, występują przy **określonych stężeniach** składników fazy  $\sigma$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $\mu$  lub  $\delta$ .

**Fazy sigma** ( $\sigma$ ) - fazy międzymetaliczne krystalizujące w sieci tetragonalnej, komórka zawiera 30 atomów Cr-Fe, V-Fe. Twarde, kruche, odporne na korozję, dobra oporność)

### 3.7.3 Fazy międzywęzłowe o strukturach prostych i złożonych

#### Klasyfikacja faz międzywęzłowych

W zależności od **stosunku promieni** atomowych **niemetalu**  $r_X$  i **metalu**  $r_M$  można dokonać (według warunku G. Hägga) **podziału** faz międzywęzłowych na:

- fazy o strukturach **prostych**, gdy  $\frac{r_X}{r_M} \leq 0,59$ ,
- fazy o strukturach **złożonych**, gdy  $\frac{r_X}{r_M} > 0,59$ .

#### Fazy międzywęzłowe o strukturach prostych

Fazy **międzywęzłowe** o strukturach **prostych**

- mają własności **metaliczne**
- **krystalizują** się w sieciach
  - *regularnej ściennie centrowanej*
  - *regularnej przestrzennie centrowanej*
  - *heksagonalnej zwartej*
  - *heksagonalnej prostej*.
- **sieć krystaliczna** zwykle **różna** od sieci **czystego** metalu.
- **węzły** są **zajęte** przez atomy któregoś **metalu przejściowego**  $M$
- **przestrzenie międzywęzłowe** - **zajęte** przez **atomy niemetalu**  $X$  o **małym promieniu** atomowym, tj. atomy **węgla**, **azotu**, **wodoru** lub **boru**
- zaliczane są: **wodorki**, **niektóre borki**, a także **niektóre węgliki** i **azotki metali przejściowych**.



**Fazy międzywęzłowe o strukturach złożonych**

Fazy międzywęzłowe o strukturach złożonych

- tworzone przez metale przejściowe i niemetale
- zwykle mają **znaczną liczbę atomów** w komórce strukturalnej.
- cechują się **własnościami metalicznymi**
- **mniej trwałe** od faz międzywęzłowych o strukturach prostych
- zaliczane są: **większość borków** oraz **niektóre azotki i węgliki żelaza kobaltu, niklu, manganu i chromu**, a także **węgliki podwójne**.

### 3.8 Mieszaniny faz

Mieszanina faz

- **stan stopu**, występujący **bardzo często**,
- w stopie znajdują się **co najmniej dwie fazy** w stanie rozdrobnienia, oddzielone od siebie **granicami międzyfazowymi**.
- **każda faza** ma przy tym określone, **właściwe sobie**
  - *skład chemiczny*,
  - *strukturę krystaliczną*,
  - *własności*.
- mają zwykle **lepsze własności wytrzymałościowe** i **mniej plastyczność** od poszczególnych faz.

#### 3.8.1 Klasyfikacja miesznin faz

Mieszaniny typu:

- **eutektycznego**
- **perytektycznego**



## Rozdział 4

# Układy równowagi fazowej

### 4.1 Stan równowagi termodynamicznej

**Stan równowagi termodynamicznej** - stan, gdy **energia swobodna** układu uzyska **minimum** lub gdy **potencjały chemiczne** składników we wszystkich fazach układu staną się **sobie równe** i **ustaje ich przepływ przez granice fazowe**.

### 4.2 Reguła faz W. Gibbsa

Równowagę faz opisuje reguła faz W. Gibbsa.

Suma

- **maksymalnej liczby faz  $f$** , które mogą **współistnieć** w układzie w stanie **równowagi**,
- oraz **liczby stopni swobody  $z$**

jest **równa**

- liczbie **niezależnych składników układu  $s$**
- powiększonej o **2**:

$$f + z = s + 2$$

**Stopniami swobody  $z$**  są **parametry** określające **stan termodynamiczny układu**, takie jak

- *temperatura*,
- *ciśnienie*,
- *stężenie składników*, które niezależnie mogą ulegać zmianom.

Liczbę składników  $s$  można przyjąć jako równą liczbie pierwiastków.

W odniesieniu do stopów dwuskładnikowych, gdy ciśnienie jest stałe, a zmianom ulegają tylko temperatura i stężenie, reguła faz przybiera postać:

$$f + z = 3$$

### 4.3 Wykresy równowagi faz stopów

Wykresy równowagi faz stopów - pokazują stan stopu w zależności od temperatury i nasycenia pierwiastkami stopowymi podczas powolnego krzepnięcia blisko równowagi termodynamicznej.

### 4.4 Badanie krystalizacji stopów

Metody

- metalograficzna
- dylatometryczna
- elektryczna
- magnetyczna
- radiograficzna

Np.

- analiza termiczna
- analiza termiczna różnicowa

## Rozdział 5

# Układ równowagi fazowej żelazo-węgiel

### 5.1 Żelazo i jego własności

#### 5.1.1 Ogólna charakterystyka

Żelazo nie występuje w przyrodzie w postaci rodzimej. Otrzymywanie żelaza chemicznie czystego, którego własności mogłyby być uznane za własności pierwiastka, jest trudne i kosztowne.

##### Techniczne odmiany żelaza

Odmiana żelaza	Metoda otrzymywania	Maks. stężenie domieszek, %
<i>Chemicznie czyste</i>	redukcja tlenków	0,007
<i>Elektrolityczne</i>	elektroliza	0,02
<i>Karbonylkowe</i>	dysocjacja pięcio-karbonylku żelaza	0,03
<i>Armco</i>	metalurgiczna	0,1

#### 5.1.2 Odmiany alotropowe żelaza

Żelazo wykazuje dwie odmiany alotropowe:

- odmiana  $\alpha$  - (Roztwory stałe w żelazie  $\alpha$  są nazywane **ferrytem**)
- odmiana  $\gamma$  - (Roztwory stałe w żelazie  $\gamma$  są nazywane **austenitem**)

Odmiana alotropowa	Temperatura
$\alpha$	$< 912^{\circ}C$
$\gamma$	$912^{\circ}C - 1394^{\circ}C$
$\alpha$	$1394^{\circ}C - 1538^{\circ}C$
$\alpha(\delta)$ lub $\delta$	$> 1538^{\circ}C$

Żelazo  $\alpha$  jest

- ferromagnetyczne -  $< 770^{\circ}C$
- paramagnetyczne -  $\geq 770^{\circ}C$

## 5.2 Wykresy równowagi układu żelazo-węgiel

Rozróżnia się dwa wykresy równowagi układu żelazo-węgiel:

- stabilny żelazo-grafit,
- metastabilny żelazo-cementyt.

### 5.2.1 Składniki strukturalne wykresu żelazo-cementyt

Składnik strukturalny	Omówienie
Roztwór ciekły	roztwór ciekły węgla w żelazie
Ferryt	roztwór <b>stały graniczny węgla</b> w żelazie $\alpha$
Austenit	roztwór <b>stały graniczny węgla</b> w żelazie $\gamma$
Cementyt	węglik złożony $Fe_3C$
pierwszorzędowy (pierwotny)	wydzielający się z roztworu <b>ciekłego</b> <b>zgodnie</b> ze zmienną <b>rozpuszczalnością</b> węgla w cieczy
drugorzędowy (wtórny)	wydzielający się w stanie <b>stałym z austenitu</b> w wyniku <b>malejącej rozpuszczalności</b> węgla w roztworze stałym $\gamma$
trzeciorzędowy	wydzielający się w stanie <b>stałym z ferrytu</b> w wyniku <b>malejącej rozpuszczalności</b> węgla w roztworze stałym $\alpha$
Perlit	mieszanina <b>ferrytu i cementytu</b> , występująca poniżej $727^{\circ}C$
Ledeburyt	mieszanina <b>austenitu i cementytu</b> , trwała w zakresie od $727^{\circ}C$ do $1148^{\circ}C$
Ledeburyt przemieniony	mieszanina <b>perlitu i cementytu</b> , utworzona w wyniku <b>przemiany</b> <b>austenitu z ledeburytu w perlit</b> trwała poniżej temperatury $727^{\circ}C$

## Rozdział 6

# Stal, jako stop żelaza i węgla

Stal jest to stop Fe i C, obrobiony plastycznie, gdzie zawartość C jest **mniejsza niż 2%**.

### 6.1 Podział stali

Klasyfikacja stali następuje zgodnie z **PN-EN 10020:2002**.

Kryterium: *skład chemiczny*.

- stale **niestopowe**

Kryterium: *jakość*.

- **podstawowe** (po wprowadzeniu PN-EN 10020:2002 włączona do stali niestopowej jakościowej)
- **jakościowe**
- **specjalne**

- stale **stopowe**

Kryterium: *jakość*.

- **jakościowe**
- **specjalne**

- stale **nierdzewne**

## 6.2 Stale niestopowe

Stężenie każdego z pierwiastków jest **mniejsze** od **wartości granicznych**.

Np.	% masowe
<i>Al</i>	0,3
<i>W</i>	0,3
<i>Cr</i>	0,3
<i>Ni</i>	0,3
<i>V</i>	0,1

### 6.2.1 Stale niestopowe podstawowe

Od wprowadzenia normy PN-EN 10020:2002U włączone do **stali niestopowych jakościowych**.

- bez wymagań jakościowych
- wymagana obecność jedynie *C*, *P*, *S*, *Mn*, *Si*
- nie przeznaczone do obróbki cieplnej

#### Zastosowanie

- Stale miękkie niskowęglowe na taśmy i blachy walcowe
- Konstrukcje walcowane na zimno do ogólnego zastosowania
- Stale do wyrobu walcówki do ciągnienia (druła)

### 6.2.2 Stale niestopowe jakościowe

- wymagania dotyczące **tylko niektórych własności** (np. ciągliwość, podatność na obróbkę plastyczną i/lub wielkość ziarna)
- poziom wymagań **niższy** niż dla stali **niestopowych specjalnych**



### 6.2.3 Stale niestopowe specjalne

Stale **niestopowe specjalne** charakteryzują się:

- **wyższym** stopniem **czystości** (niż stale jakościowe)
- **mniejszym** udziałem **wtrąceń** niemetalicznych (niż stale jakościowe)
- przeznaczone do **ulepszania cieplnego**
- przeznaczone do **hartowania powierzchniowego**

Stale niestopowe specjalne spełniają jeden lub więcej z podanych warunków:

- wymagana **praca łamania** (**udarność**) w stanie **ulepszonym cieplnie**,
- wymagana **głębokość utwardzenia powierzchniowego** lub **twardość powierzchni po hartowaniu**,
- **niski** udział **wtrąceń** niemetalicznych,
- maksymalne stężenie **fosforu i siarki**  $\leq 0,020\%$  dla analizy wytopowej i  $\leq 0,025\%$  dla analizy kontrolnej,
- minimalna **praca łamania** w  $-50^{\circ}C$ :  $KV \geq 27J$  określona na próbkach wzdłużnych lub  $\geq 16J$  ? na próbkach poprzecznych,
- **przewodność elektryczna właściwa**  $> 9S \cdot m/mm^2$ .

### 6.2.4 Klasyfikacja stali niestopowych jakościowych i specjalnych

	S. niestopowe <b>jakościowe</b>	S. niestopowe <b>specjalne</b>
	s. miękkie na taśmy i blachy	
s. konstrukcyjne	s. o stężeniu $P$ i $S \leq 0,045\%$ s. na rury	s. dla energetyki jądrowej
s. do zbrojenia betonu	s. do zbrojenia betonu i betonu wstępnie sprężonego	s. do betonu wstępnie sprężonego
s. szynowe	s. na szyny szerokostopowe i o specjalnym profilu	
s. automatowe	s. automatowe	
s. do ciągnięcia	s. na walcówkę do ciągnięcia	s. na walcówkę do ciągnięcia
s. do nawęglania		s. maszynowe do nawęglania
s. do ulepszania ciepłego	s. niestopowe maszynowe	s. niestopowe maszynowe do ulepszania ciepłego
s. sprężynowe	s. na taśmy walcowane na zimno	s. na taśmy walcowane na zimno
s. narzędziowe		s. narzędziowe
	s. o przewodności elektr. $\leq 9S \cdot m/mm^2$	s. o przewodności elektr. $> 9S \cdot m/mm^2$

## 6.3 Stale stopowe

### 6.3.1 Stale stopowe jakościowe

Dla stali **stopowych jakościowych** stosuje się **te same kryteria** klasyfikacji jak dla stali **niestopowych jakościowych**, z uwzględnieniem **dodatkowych wymagań** dotyczących stężenia pierwiastków równego lub **większego** od wartości granicznych.

Nie są przeznaczone do

- ulepszania ciepłego
- utwardzania powierzchniowego

Podział na grupy

- stale **konstrukcyjne drobnoziarniste spawalne** przeznaczone na zbiorniki i rurociągi pracujące pod ciśnieniem

- stale stopowe na **szyny, grodzice, kształtowniki na obudowy górnicze**
- stale stopowe na produkty **płaskie walcowane** na zimno lub na gorąco przeznaczone do dalszej obróbki plastycznej na zimno
- stale **elektrotechniczne** zawierające *tylko krzem i aluminium* jako *pierwiastki stopowe*
- stale **stopowe z miedzią** jako jedynym *pierwiastkiem stopowym*

### 6.3.2 Stale stopowe specjalne

- **ściśle określone** własności mechaniczne, technologiczne i użytkowe
- **dokładne regulowanie** składu chemicznego
- **dokładne sterowanie** procesem produkcyjnym

Obejmują one wszystkie gatunki stali, które nie zostały ujęte w klasie stali nierdzewnych oraz stopowych jakościowych.

Stale **stopowe specjalne** dzielą się na następujące zasadnicze **podklasy**:

- stale **maszynowe** (do budowy maszyn),
- stale na **urządzenia ciśnieniowe**,
- stale **konstrukcyjne**,
- stale **szybkotnące**,
- stale **narzędziowe** stopowe,
- stale na **łożyska toczne**,
- stale o **szczególnych własnościach fizycznych**.

## 6.4 Stale nierdzewne

Kryterium: *ze względu na stężenie Ni*.

- $< 2,5\% \text{ Ni}$
- $\geq 2,5\% \text{ Ni}$

Kryterium: *najbardziej istotna własność*.

- **odporna na korozję**
- **żaroodporna**
- **odporna na pełzanie (żarowytrzymała)**



## Rozdział 7

# Aluminium i jego stopy

### 7.1 Czysty glin

#### 7.1.1 Zastosowanie

- opakowania, pojemniki
- przewody elektryczne
- blachy, naczynia kuchenne
- zw. chem: krakowanie ropy naftowej
- horund, szmergiel - mat. ścierne, zaprawa farbiarska

### 7.2 Aluminium

#### 7.2.1 Własności

3 pierwiastek pod względem udziału w skorupie ziemskiej

ruda:	boksyt
temp. topnienia:	<b>660°C</b>
ciepło topnienia:	nieznaczne
temp. wrzenia:	2500°C
<b>gęstość:</b>	<b>2,7 g/cm<sup>3</sup></b>
wytrzymałość na <b>rozciąganie</b> :	70 – 120 MPa ( <b>mała</b> )
<b>plastyczność:</b>	<b>duża</b>
<b>przewodność elektryczna:</b>	38 MS/m ( <b>duża</b> )
<b>przewodność cieplna:</b>	<b>dobra</b>
odporność na <b>korozję</b> :	<b>duża</b> (pokrycie warstwą $Al_2O_3$ )
poprawa odporności	anodowanie
pogorszenie odporności	kwasy redukujące, woda morska

### 7.2.2 Zastosowanie

W przemyśle stosuje się aluminium A i B (w zależności od czystości). Cyfry w oznaczeniu wskazują stopień czystości.

Najczęstsze zanieczyszczenia: *Fe, Si, Cu, Zn, Ti*

- *aluminium hutnicze (o ograniczonej czystości)*
  - stopy
  - produkty codziennego użytku (*Al99*)
  - urządzenia dla przemysłu spożywczego
  - niektóre przewody elektryczne
  - niektóre wymienniki ciepła
  - w budownictwie
  - w postaci folii - na opakowania produktów spożywczych (*Al99,8H*)
- *aluminium rafinowane (o wysokiej czystości)*
  - elektronika
  - elektrotechnika
  - specjalna aparatura chemiczna (*Al99,995R*)

### 7.2.3 Podział ze względu na wytwarzanie

- *aluminium do obróbki plastycznej*
  - zgniatanie
  - wyżarzanie rekrytalizujące
  - utwardzanie wydzielinowe
- *aluminium odlewane*
  - dobra lejność
  - mały skurcz odlewniczy

## 7.3 Stop aluminium z miedzią i magnezem (Duraluminium)

4% Cu i 1% Mg oraz niewielki dodatek Mn albo Fe, lub Si

- zwiększenie Cu i Mg powoduje **wzrost wytrzymałości i zmniejszenie plastyczności**
- **mniejsza odporność na korozję**

### 7.3. STOP ALUMINIUM Z MIEDZIĄ I MAGNEZEM (DURALUMINIUM)39

#### 7.3.1 Obróbka cieplna

- wyżarzanie ujednorodniające
- wyżarzanie rekrytalizujące
- utwardzanie wydzielinowe

Przesycanie w temp.  $500^{\circ}\text{C}$  przez  $5h$  - roztwór stały na osnowie  $Al$  i wtrącenia nierozpuszczone

#### 7.3.2 Starzenie samorzutne

(związki  $Cu$  i  $Mg$  rozpuszczają się w  $Al$ )

- kilka dni w temp. pokojowej
- kilkadziesiąt godzin w temp  $170 - 190^{\circ}\text{C}$

Obróbka plastyczna na zimno przez wprowadzenie zgniotu po starzeniu samorzutnym.

#### 7.3.3 Zastosowanie

- PA6 - blachy, pręty, kształtowniki - cz. obciążone
- PA7 -                    – || –                    - cz. silnie obciążone





## Rozdział 8

# Magnez i jego stopy

### 8.1 Własności

- metal alkaliczny
- miękki
- srebrzystobiały
- bardzo pospolity
- reaktywny w postaci płynnej
- występuje w postaci mineralnej
- wchodzi w skład chlorofilu

gęstość:            **1,7 g/cm<sup>3</sup>**  
temp. topnienia: **650°C**  
temp. wrzenia:    1100°C  
twardość:           2,5

- koroduje do czasu pokrycia całej powierzchni zwartą warstwą tlenków

### 8.2 Otrzymywanie

- elektroliza roztopionego chlorku magnezu
- redukcja dolomitu krzemem (temp 1200°C)
- redukcja tlenku magnezu węglem

### 8.3 Stopy magnezu

- gęstość 1,8 g/cm<sup>3</sup> (niska)

#### 8.3.1 Stopy magnezu z *Al*

- większa wytrzymałość
- wydłużenie stopów odlewniczych *Mg*
- lepsza lejność
- mniejszy skurcz odlewniczy

#### 8.3.2 Zastosowanie

- samoloty
- przemysł motoryzacyjny
- aparatura automatyczna

#### 8.3.3 Podział ze względu na obróbkę

- stopy *odlewnicze*
  - odlewanie ciśnieniowe
  - węższe tolerancje w stosunku do wartości normalnych
  - żywotność formy jest 2,5 raza dłuższa
- stopy przeznaczone *do obróbki na ciepło i zimno*
  - krzepnięcie z dużymi szybkościami RSP - 20-krotny wzrost odporności na korozję, poprawa odporności na pełzanie

## Rozdział 9

# Materialy w lotnictwie

Ogólna charakterystyka materiałów stosowanych w budowie lotniczych zespołów napędowych i konstrukcji płatowców.

Części silników przenoszą **duże naprężenia** i poddawane są wpływowi **wysokich temperatur**  $700 - 1000^{\circ}C$ .

Stale przewidziane do wykonywania elementów konstrukcyjnych **turbin gazowych** powinny zawierać pierwiastki zwiększające **żaroodporność** i **żarowytrzymałość**.

**Największe** zastosowanie w **lotnictwie** mają stopy na osnowie **niklu**.

Stopy EI-437, EI-437B, EI-437A stosowane są głównie do **produkcji łopatek, dysków, oraz wałów turbin gazowych**.

**Kobalt** i stopy na osnowie kobaltu, zawierające **chrom, nikiel, żelazo i tytan**

- EI-416- **łopatki turbin** pracujących w temp  $800^{\circ}C$
- S-816- **łopatki turbin, odlewy części silników lotniczych**.

**Stopy kobaltowe** mają dobrą **żarowytrzymałość** w temperaturze wyższej niż  $650^{\circ}C$

Stopy na **osnowie** metali **wysokotopliwych** mogą pracować przy **dużych obciążeniach** i przy **temperaturze wyższej** niż  $1100^{\circ}C$

Stopy na osnowie

- **chromu**
- **molibdenu**
- **niobu**
- **wolframu**

znalazły zastosowanie w szeroko pojętej **produkcji lotniczej**.

## 9.1 Żaroodporność

**Żaroodporność** to **odporność stopu** na działanie **czynników chemicznych**, głównie **powietrza** oraz **spalin** i ich agresywnych składników w **temperaturze wyższej niż  $550^{\circ}C$** .

### 9.1.1 Pierwiastki wpływające na żaroodporność

**Poprawiające żaroodporność**

- **chrom**
  - ok. 5%*Cr* - żaroodporność do ok.  $600 \div 650^{\circ}C$ .
  - ok. 30%*Cr* - żaroodporność do ok.  $1100^{\circ}C$ .
- **krzem** (analogiczny wpływ co *Cr*, ale obniżenie podatności na obróbkę plastyczną)
- **aluminium** (analogiczny wpływ co *Cr*, ale obniżenie podatności na obróbkę plastyczną)

**Pogorszające żaroodporność**

- **wanad** (*V*)
- **molibden** (*Mo*)

### 9.1.2 Stale żaroodporne

- H23N18
  - Komory spalania
  - Rury żarowe
  - Aparaty kierujące turbin gazowych i sprężarek
  - Łopatki kierujące silników turbośmigłowych
- HN38WT
  - Rury żarowe
  - Komory spalania
  - Komory rozpylaczy i pokrycia
  - Bardzo plastyczna w wysokiej temperaturze i bardzo żarowytrzymała
- EP126
  - Komory rozpylaczy
  - Elementy nośne
  - Pokrycia i wręgi
  - Do kształtowania na zimno i na gorąco

## 9.2 Żarowytrzymałość

Żarowytrzymałością jest nazywana **odporność stopu na odkształcenia**, z czym wiąże się **zdolność do wytrzymywania obciążeń mechanicznych w wysokiej temperaturze** - powyżej  $550^{\circ}\text{C}$ .

Żarowytrzymałość w temperaturze wyższej od  $550^{\circ}\text{C}$  jest uzależniona głównie od **odporności na pełzanie**.

Dużą żarowytrzymałość wykazują stale o strukturze **austenitycznej** - ze względu na mniejsze współczynniki dyfuzji niż w **ferryście**.

### 9.2.1 Pierwiastki wpływające na żarowytrzymałość

Poprawa żarowytrzymałości

- **nikiel** przy stężeniu 9%, w obecności ok. 18%Cr, powoduje tworzenie trwałej struktury **austenitycznej**
- pierwiastki stopowe **zwiększające energię wiązania atomów** sieci roztworu stałego, a więc **podwyższające temperaturę topnienia i rekrytalizacji**
  - *Mo, W, V, Co,*
  - *Ti, Cr, Si.*
- umocnienie zgniotowe
- utwardzanie wydzieleniowe

## 9.3 Stale i stopy stosowane przy budowie płatownca

### 9.3.1 Stale stopowe do pracy w podwyższonej temperaturze

Ze względu na skład chemiczny stale stopowe do pracy w podwyższonej temperaturze dzieli się na:

- **niskowęglowe**, o stężeniu do 0,25%C,
- **średniowęglowe** - o stężeniu **węgla** większym niż 0,25%,
- **niskostopowe** - o **małym i średnim stężeniu węgla i łącznym stężeniu pierwiastków stopowych nieprzekraczającym 3%**,
- **średniostopowe** - o **średnim stężeniu węgla i stężeniu pierwiastków stopowych w zakresie  $3 \div 5\%$** ,
- **wysokostopowe** - o **dużym stężeniu pierwiastków stopowych**, przekraczającym 5% - w tym głównie *Cr* powyżej 10%.

## 9.4 Stale i stopy stosowane przy budowie płatowca

- Stale węglowe **konstrukcyjne o wyższej jakości**
- Stale **konstrukcyjne** stopowe zawierające **chrom, mangan, krzem i nikiel**
- Stale stopowe o **specjalnych właściwościach**

### 1. Stale **niskowęglowe** ( $0,25\%C$ )

- **Obróbka:**

- gięcie tłoczenie
- kucie na zimno

- **Zastosowanie:**

- elementy mechanizmów elektromechanicznych
- zespołów spawanych
- części kute o małej wytrzymałości
- śruby, podkładki i nakrętki

### 2. Stale **średniowęglowe** ( $0,25\% - 0,65\%C$ )

- Części obrobione mechanicznie o **niezbyt dużej wytrzymałości**

### 3. Stale **wysokowęglowe** (**powyżej** $0,65\%C$ )

- Drut ciągniony na zimno i obrabiany cieplnie
- Sprężyny i spirale

### 4. Stopy $Fe - Ni - C$ (niklowe)

Po normalizowaniu przyjmują strukturę **austeniczną**

- **inwar** ( $36\%Ni$ , ok.  $0,1\%C$ )

- **Mały** współczynnik **rozszerzalności** cieplnej
- **Wzorzec** do budowy **przyrządów pomiarowych** i części mechanizmów zegarowych

- **platynit** ( $46\%Ni$ , ok.  $0,1\%C$ )

- Tak samo **mały** współczynnik **rozszerzalności** co platyna
- Stosowany do **wtapiania w szkło żarówek**

- **kowar** ( $29\%Ni$ ,  $18\%Co$ )

- Podobne zastosowanie co platynit

- **elinwar** ( $36\%Ni$ ,  $8\%Cr$ )

- Produkcja **sprężyn zegarkowych** i przyrządów o stałych **właściwościach sprężystych**
- **Stały** współczynnik zmiany **sprężystości**

- **maraging**
  - **Duża odporność** na rozprzestrzenianie się **pęknięć**
  - Zastosowanie
    - \* Konstrukcja podwozia,
    - \* elementów złącznych,
    - \* zbiorników cienkościennych ciśnieniowych,
    - \* cylindry hydrauliczne,
    - \* układy sterowania,
    - \* koła zębate,
    - \* przewody rurowe
- 5. Stale **chromowe** (powyżej 12%Cr)
  - **Chrom** powoduje **zwiększenie twardości i wytrzymałości**
  - **Chrom** powoduje **spadek udarność**
- 6. Stale **chromowo-niklowe**
  - **Szersze zastosowanie** niż stale niklowe i stale chromowe
  - Stal po **dodaniu chromu i niklu** uzyskuje
    - **dobrą wytrzymałość**
    - **dobrą twardość**
  - przy
    - **dostatecznej ciągliwości**
    - **dostatecznej plastyczności**
- 7. Stale **wieloskładnikowe**
  - **Chromowo-niklowo-wolframowe**
  - **Chromowo-niklowo-molibdenowe**
    - Maszyny **narażone na szybkie zużycie** i ścieranie
  - **Chromowo-manganowo-krzemowe**
    - Produkcja odpowiedzialnych części kutek i spawanych
    - Półwyrób do prętów, kształtowników rur

## 9.5 Materiały do produkcji silników lotniczych

- **Główne wymagania:**
  - Znoszenie *dużych obciążeń*
  - *Żarowytrzymałość i żaroodporność*
  - *Możliwie niskie koszty produkcji*
  - Odporność na *zmęczenie cieplne, pękanie i uszkodzenia dynamiczne*
  - *Niska gęstość*

- **Udział**

- Żarowytrzymałe - 50%
- Wysokostopowe - 15%
- Tytan i jego stopy - 25%
- Stopy aluminium - 5%
- Inne - 5%



## Rozdział 10

# Obróbka cieplna



# Bibliografia

- [1] Leszek A. Dobrzański: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT