

## 9. STALE STOPOWE I STOPY SPECJALNE\*

Opracował: prof. dr hab. inż. Jerzy Pacyna

### 9.1. Wprowadzenie

Stalą stopową nazywamy taką stal, w której stężenie co najmniej jednego z pierwiastków jest równe lub większe od wartości granicznej podanej w **tabeli 9.1**.

**Tabela 9.1.** Graniczne zawartości pierwiastków dla stali niestopowych\*\*

Pierwiastek, % masowy <sup>1)</sup>																			
Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	Lanta- nowce	Mn <sup>2)</sup>	Mo	Nb	Ni	Pb	Se	Si	Te	Ti	V	W	Zr	Inne oprócz C, P, S, N
0,10	0,0008	0,10	0,10	0,30	0,40	0,05	1,65	0,08	0,06	0,30	0,40	0,10	0,50	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05
1) Klasyfikacji stali dokonujemy w oparciu o analizę wytopową lub dolną granicę zawartości danego pierwiastka podaną w normie lub warunkach dostawy. Jeżeli podane są tylko maksymalne (dopuszczalne) zawartości pierwiastków, wówczas do klasyfikacji gatunku stali należy przyjąć 70% tej maksymalnej zawartości (z wyjątkiem Mn). 2) Jeżeli dla Mn jest określona tylko maksymalna zawartość, wówczas jego graniczna zawartość wynosi 1,80% i nie stosuje się zasady 70%.																			

Dodatek stopowy to taki pierwiastek, który wprowadzany jest do stali celowo w ilości równej lub przekraczającej stężenie graniczne podane w tabeli 9.1. Powyżej tego stężenia stwierdza się wyraźny wpływ danego pierwiastka na strukturę i własności stali.

Ze względu na stężenie pierwiastków, stale stopowe dzielimy na:

1. Stale stopowe w których stężenie każdego z pierwiastków stopowych jest mniejsze niż 5%.  
Przy oznaczaniu takich stali, wg składu chemicznego, ich znak składa się z:
  - a) liczby będącej 100-krotną wymaganą średnią zawartością węgla,
  - b) symboli chemicznych pierwiastków będących dodatkami stopowymi, uszeregowanych wg malejącej zawartości pierwiastków. Jeżeli występuje identyczna zawartość dwóch pierwiastków wówczas stosuje się porządek alfabetyczny,
  - c) liczb pozwalających obliczyć średnie zawartości głównych dodatków stopowych. Każda liczba oznacza średni procent zawartości pierwiastka pomnożony przez odpowiedni współczynnik z **tabeli 9.2** i zaokrąglony do najbliższej liczby całkowitej. Liczby dotyczące poszczególnych pierwiastków należy oddzielić kreską poziomą.

**Tabela 9.2.** Współczynniki dla ustalania symboli liczbowych przy pierwiastkach stopowych w stalach zawierających poniżej 5% każdego z tych pierwiastków

Pierwiastek	Współczynnik
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

\* Na końcu tej książki zamieszczono szczegółową klasyfikację i systemy oznaczania stali wg norm europejskich (EN) mających status Polskich Norm czyli norm PN-EN.

\*\* Wg Polskiej Normy PN-EN 10027-1 ustanowionej przez Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) 15 grudnia 1994r.

Np. stal 36CrNiMo4 wg PN-EN 10027-1 zawiera średnio: 0,36% C (36:100), ok. 1% Cr (4:4). Dodatkowo stal ta zawiera około 1% Ni, około 0,2% Mo, ale głównym pierwiastkiem jest chrom.

2. Stale stopowe w których stężenie przynajmniej jednego pierwiastka stopowego jest równe lub większe od 5%.

Przy oznaczaniu takich stali, wg składu chemicznego, ich znak składa się z:

- litery X,
- liczby będącej 100-krotną wymaganą średnią zawartością węgla,
- symboli chemicznych pierwiastków będących dodatkami stopowymi, uszeregowanych wg malejącej zawartości pierwiastków. Jeżeli występuje identyczna zawartość dwóch pierwiastków wówczas stosuje się porządek alfabetyczny,
- liczb oznaczających średnie zawartości procentowe głównych dodatków stopowych zaokrąglonych do najbliższej liczby całkowitej. Liczby dotyczące poszczególnych pierwiastków należy oddzielić kreską poziomą.

Np. stal X10CrNi18-9 wg PN-EN 10027-1 zawiera 0,10% C; 18% Cr; 9% Ni lub stal X2CrMoTi17-1 wg PN-EN 10088-1 zawiera ok. 0,02% C; 17% Cr; około 1% Mo oraz 0,45% Ti, ale głównymi pierwiastkami są chrom i molibden.

3. Stale szybkotnące.

Przy oznaczaniu takich stali, wg składu chemicznego, ich znak składa się z:

- liter HS,
- liczb oznaczających średnie procentowe zawartości dodatków stopowych (bez chromu), zaokrąglonych do najbliższej liczby całkowitej, zapisanych w następującym porządku: W – Mo – V – Co. Liczby te należy oddzielić kreską poziomą.

Np. stal HS6-5-2 wg PN-EN 10027-1 zawiera średnio 6% W; 5% Mo; 2% V, jest bez kobaltu i najczęściej zawiera 0,90% C oraz 4% Cr. Jest to stal stosowana m.in. na wiertła.

W zależności od głównego pierwiastka stopowego lub kilku tych pierwiastków występujących w stalach stopowych rozróżniamy: stale manganowe, krzemowe, manganowo-krzemowe, niklowe, chromowe, chromowo-niklowe, chromowo-molibdenowe, chromowo-manganowo-krzemowe, chromowo-niklowo-molibdenowe i inne.

## 9.2. Fazy występujące w stopach żelaza

Zrozumienie wpływu pierwiastków stopowych na strukturę i własności stopów żelaza opiera się na znajomości wpływu tych pierwiastków na rodzaj tworzących się faz, własności tych faz, postać i stopień ich dyspersji.

W technicznych stopach żelaza mogą występować następujące fazy:

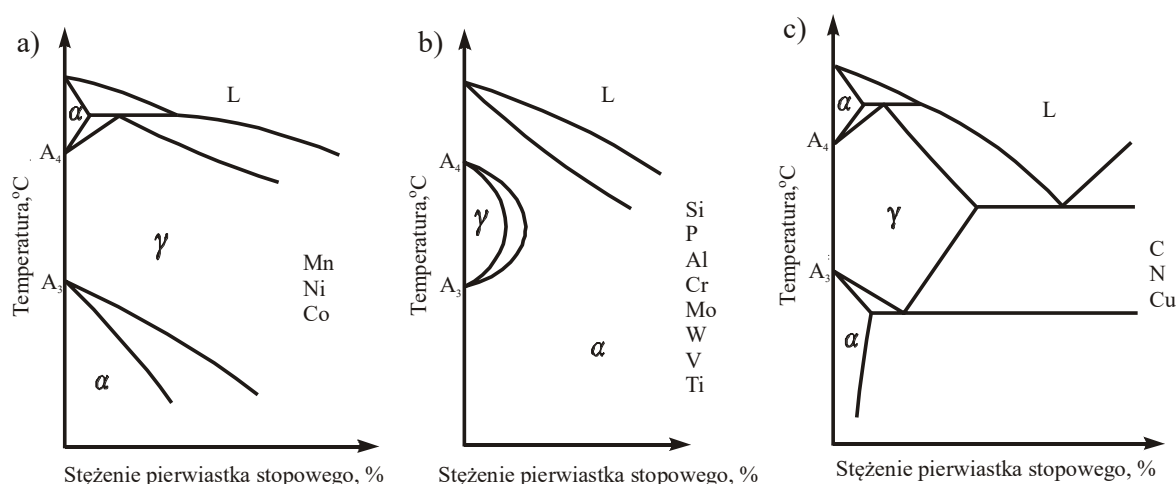
- Roztwory stałe na podstawie żelaza  $\alpha$  (ferryt) lub żelaza  $\gamma$  (austenit).
- Węglik i azotki.
- Związki międzymetaliczne.
- Wtrącenia niemetaliczne.
- Fazy obce.

### 9.2.1. Roztwory stałe na podstawie żelaza $\alpha$ lub żelaza $\gamma$

#### 9.2.1.1. Pierwiastki austenitotwórcze

Należą do nich przede wszystkim Mn, Ni, Co, które powodują rozszerzenie obszaru występowania roztworu stałego  $\gamma$ . Przy dostatecznie dużych stężeniach tych pierwiastków

austenit może występować nawet przy temperaturze otoczenia, mamy wówczas do czynienia z tzw. otwartym polem austenitu (**rys. 9.1a**).



**Rys. 9.1.** Wpływ pierwiastków stopowych na charakter wykresów równowagi żelazo – pierwiastek stopowy: a) austenitotwórczych, b) ferrytotwórczych, c) sprzyjających przemianie eutektoidalnej (schemat - wg F. Wevera).

### 9.2.1.2. Pierwiastki ferrytotwórcze

Należą do nich przede wszystkim Si, P, Al, Cr, Mo, W, V, Ti, które ograniczają w stopach żelaza zakres występowania roztworu stałego γ. Przy dostatecznie dużych stężeniach tych pierwiastków następuje zamknięcie pola austenitu i występuje struktura ferrytu α (**rys. 9.1b**) od temperatury otoczenia aż do temperatury początku nadtopień (temperatura solidus).

### 9.2.1.3. Pierwiastki sprzyjające przemianie eutektoidalnej

Należą do nich przede wszystkim C, N, Cu, które również działają austenitotwórczo, jednakże powodują, że austenit γ stabilny przy wysokich temperaturach, ulega przy chłodzeniu przemianie eutektoidalnej (**rys. 9.1c**).

## 9.2.2. Węglik

Pierwiastki tworzące węgliki w stalach są położone w układzie okresowym pierwiastków na lewo od żelaza (**rys. 9.2**). Są to pierwiastki grup IVB÷VIIB oraz żelazo z grupy VIII.


Powinowactwo pierwiastków do węgla wzrasta z malejącym numerem grupy. Kobalt i nikiel tworzą wprawdzie węgliki, ale są to związki bardziej metastabilne niż cementyt (Fe<sub>3</sub>C) wskutek czego nie występują w stopach bogatych w żelazo.

Węgliki, zgodnie z klasyfikacją Goldschmidta, dzielimy na III klasy:

Klasa I – węgliki o sieci regularnej typu NaCl odpowiadające wzorowi MC, gdzie M oznacza metal. Tworzą je pierwiastki grup IVB i VB – Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta.

Klasa II – węgliki o sieci heksagonalnej odpowiadające wzorom MC i M<sub>2</sub>C. Tworzą je pierwiastki grup VB, VIB i VIII. Z grupy VB do klasy II należą tylko węgliki odpowiadające wzorowi M<sub>2</sub>C (V<sub>2</sub>C, Nb<sub>2</sub>C, Ta<sub>2</sub>C) a z grupy VIB węgliki MC i M<sub>2</sub>C, które tworzą Mo i W. Z grupy VIII do klasy II należy węgiel Fe<sub>2</sub>C oznaczany literą ε.

Klasa III – węgliki o sieci rombowej, odpowiadające wzorowi M<sub>3</sub>C, których najważniejszym przedstawicielem jest cementyt Fe<sub>3</sub>C. Węgliki tego typu tworzą ponadto Mn, Ni, Co.

Grupa Okres	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII		
3	TiC	VC	V <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mn <sub>23</sub> C <sub>6</sub> Mn <sub>7</sub> C <sub>3</sub> Mn <sub>3</sub> C	ε-Fe <sub>2</sub> C Fe <sub>3</sub> C	[Co <sub>3</sub> C] [Ni <sub>3</sub> C]
4	ZrC	NbC	Nb <sub>2</sub> C	Mo <sub>2</sub> C MoC Mo <sub>23</sub> C <sub>6</sub> Mo <sub>6</sub> C	Sieć krystaliczna węgla:  regularna heksagonalna rombowa		
5	HfC	TaC	Ta <sub>2</sub> C	W <sub>2</sub> C WC W <sub>23</sub> C <sub>6</sub> W <sub>6</sub> C			
					[...] węgliki niestabilne		

**Rys. 9.2.** Rodzaje węglików w zależności od położenia pierwiastka węglotwórczego w układzie okresowym

Klasyfikacja Goldschmidta nie obejmuje węglików złożonych do których należy zaliczyć węgliki tworzone przez Cr, Mo, W i Mn o sieci regularnej – złożonej typu  $M_{23}C_6$ , węgliki tworzone przez Cr, Mo, W i Mn o sieci heksagonalnej – złożonej typu  $M_7C_3$ , węgiel chromu  $Cr_3C_2$  o sieci rombowej oraz węgliki tworzone przez Mo i W o sieci regularnej – złożonej typu  $M_6C$ .

Węgliki klasy I i II cechują się dużą trwałością, dlatego przy nagrzewaniu rozpuszczają się w austenicie dopiero przy wysokich temperaturach. Węgliki klasy III o sieci rombowej oraz węgliki złożone, rozpuszczają się znacznie łatwiej.

### 9.2.3. Azotki

Azotki wykazują wiele analogii z węglkami. Ponieważ jednak azot ma nieco mniejszą średnicę atomu niż węgiel, dlatego podobnie jak węgliki klasy I i II są to również fazy międzywęzłowe typu  $M_2N$  i  $MN$  mające w stalach cechy metaliczne. Fe i Mn tworzą ponadto azotki  $M_4N$ . Azotki metali przejściowych zestawiono na **rys. 9.3**. Oprócz azotków metali zamieszczonych na **rys. 9.3** w stopach żelaza spotyka się azotki aluminium, krzemu i boru.

Grupa Okres	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII		
3	TiN	VN	CrN	MnN	Fe <sub>2</sub> N	Co <sub>2</sub> N	Ni <sub>2</sub> N
	Ti <sub>2</sub> N	V <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N	Mn <sub>2</sub> N			
				Mn <sub>4</sub> N	Fe <sub>4</sub> N		
4	ZrN	NbN	Mo <sub>2</sub> N	Sieć krystaliczna			
		Nb <sub>2</sub> N	MoN				
5	HfN	TaN	W <sub>2</sub> N	<div><div></div>- regularna typu NaCl</div> <div><div></div>- heksagonalna zwarta</div> <div><div></div>- heksagonalna typu WC</div> <div><div></div>- regularna ściennie centrowana</div>			
		Ta <sub>2</sub> N	WN				

**Rys. 9.3.** Rodzaje azotków w zależności od położenia pierwiastka w układzie okresowym, wg L.A. Dobrzańskiego

#### 9.2.4. Węglikoazotki

Węgliki i azotki typu MC i MN oraz  $M_2C$  i  $M_2N$  mogą się wzajemnie w sobie rozpuszczać. W stopach wieloskładnikowych mogą zatem występować węglikoazotki typu  $M(C,N)$  i  $M_2(C,N)$ , co często opisuje się jako MX i  $M_2X$ .

#### 9.2.5. Związki międzymetaliczne

Związki międzymetaliczne występują w stalach wysokostopowych i stopach prawie nie zawierających węgla. Do najczęściej występujących związków międzymetalicznych należą:

Fazy sigma - spotykane w stopach Fe-Cr, Fe-Mo i Fe-V, które są bardzo twarde, powodujące kruchość stali i stopów.

Fazy Lawesa - o wzorze  $A_2B$ , powstające wtedy gdy iloraz średnic atomów  $d_A$  i  $d_B$  wynosi w przybliżeniu 1,2, np.  $Cu_2Mg$ ,  $Zn_2Mg$ ,  $Ni_2Mg$ .

Fazy o wzorze  $A_3B$  - które wydzielają się podczas utwardzania wydzieleniowego stali martenzytycznych lub żarowytrzymałych, np.  $Ni_3Ti$ .

#### 9.2.6. Wtrącenia niemetaliczne

W stalach wtrącenia niemetaliczne dzielimy na dwie grupy:

- a) egzogeniczne – cząstki materiałów ogniotrwałych lub żużła,
- b) endogeniczne – produkty reakcji składników stali z tlenem, siarką i azotem.

Udział objętościowy wtrąceń niemetalicznych w stali jest bardzo mały ( $0,02 \div 0,03$  % obj.) jednak wpływają one silnie na własności stali. W czasie przeróbki plastycznej niektóre wtrącenia niemetaliczne wydłużają się, powodując włóknistą strukturę stali, co jest powodem anizotropii własności mechanicznych. Odkształcalność wtrąceń zależy od ich rodzaju i temperatury. Np. tlenek aluminium  $Al_2O_3$  nie odkształca się lecz kruszy tworząc pasma (łańcuszki) drobnych cząstek. Siarczki żelaza i manganu odkształcają się stosunkowo łatwo podczas przeróbki plastycznej na gorąco. Można również wprowadzić do stali metale ziem rzadkich (lantanowce, głównie lantan i cer) dla wytworzenia sferoidalnych, drobnych, nieodkształcalnych siarczków zmniejszających anizotropię własności stali.

#### 9.2.7. Fazy obce

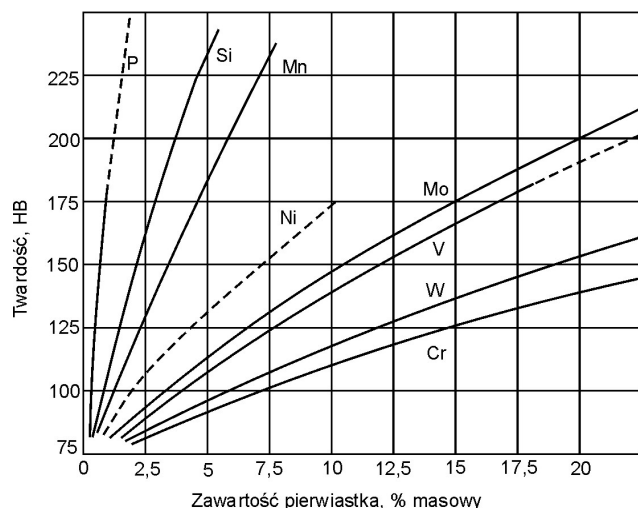
Są to wtrącenia metaliczne pierwiastka, który w ogóle nie rozpuszcza się w osnowie stali zawierającej żelazo, jak np. ołów lub rozpuszczająca tylko niewielkie ilości żelaza miedź.

### 9.3. Rola pierwiastków stopowych w stalach

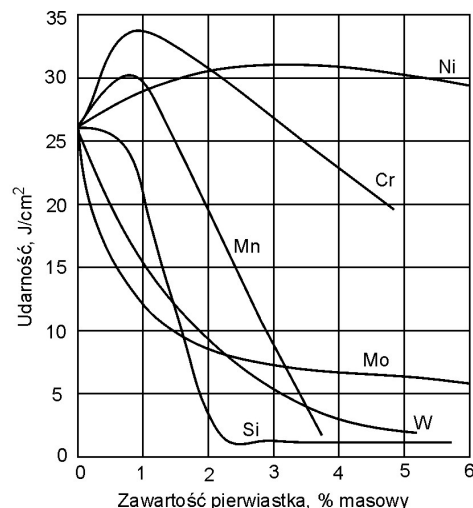
#### 9.3.1. Wpływ pierwiastków stopowych na własności ferrytu

Obecność pierwiastków stopowych w ferrycie powoduje zniekształcenie jego sieci i przez to zwiększenie twardości i wytrzymałości oraz na ogół zmniejszenie własności plastycznych tej fazy.

a)



b)



**Rys. 9.4.** Wpływ pierwiastków stopowych na własności ferrytu: a) na twardość, wg E.C. Baina i H.W. Paxtona b) na udarność, wg A.P. Gulajewa

Jak widać z **rys. 9.4**, poza fosforem, najsilniej utwardzają ferryt krzem i mangan a przy tym do zawartości ok. 0,9% Mn i 0,5% Si nie zmniejszają jego udarności – stąd ich częste wprowadzanie do składu chemicznego stali konstrukcyjnych. Korzystnym pierwiastkiem jest Ni, który dość silnie zwiększa twardość (wytrzymałość) ferrytu a równocześnie nie zmniejsza jego udarności. Jest jednak pierwiastkiem dość drogim. Pierwiastki węglotwórcze Cr, Mo, W, utwardzają ferryt słabo a przy tym (z wyjątkiem Cr) już przy małych ilościach zmniejszają udarność.

### 9.3.2. Wpływ pierwiastków stopowych na spawalność stali

Spawalność jest to zdolność materiału do uzyskiwania założonych własności mechanicznych po spawaniu. Jednym z głównych czynników wpływających na tę cechę jest tzw. spawalność metalurgiczna. Charakteryzuje ona zachowanie się stali podczas spawania oraz wpływ spawania na własności spoiny. Spawalność metalurgiczna zależy od składu chemicznego stali, który powinien być tak dobrany aby uniemożliwić w strefie wpływu ciepła (przyległej do spoiny) wytworzenie się struktur hartowania o dużej twardości i małej plastyczności, które mogłyby powodować pękanie złączy w wyniku naprężeń własnych lub eksploatacyjnych.

Skład chemiczny stali przewidzianych do spawania podlega więc ograniczeniom i jest dobierany z uwzględnieniem tzw. równoważnika węgla  $C_E$  obliczanego ze wzoru:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \% \quad (9.1)$$

gdzie: C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu – są to stężenia masowe tych pierwiastków w stali.

Jeżeli  $C_E \leq 0,45\%$  to stal jest spawalna bez żadnych ograniczeń. Stale o większym równoważniku węgla wymagają podgrzewania przed spawaniem, spowolnionego chłodzenia lub wyżarzania po spawaniu.

### 9.3.3. Tworzenie się austenitu w stalach stopowych

Austenit jest strukturą wyjściową do uzyskania martenzytu i jego cechy (skład chemiczny, wielkość ziarna, stopień ujednorodnienia) decydują o wynikach hartowania i następnego odpuszczania.

Austenit powstaje przede wszystkim wskutek reakcji pomiędzy ferrytem i węglkami gdy temperatura przekroczy  $A_{c1p}$ . W stalach stopowych zarodki austenitu powstają na granicy faz ferryt – węgiel, podobnie jak w stali niestopowej. W dalszym przebiegu przemiany występuje jednak różnica. Przemiana ta zachodzi wolniej. W stalach stopowych węgliki zawierają znaczne ilości pierwiastków stopowych. Ich rozpuszczenie w powstającym austenicie wymaga dyfuzji na większe odległości nie tylko węgla, lecz i pierwiastków stopowych, które tworząc roztwory substytucyjne dyfundują znacznie wolniej. Dlatego procesem decydującym o szybkości tworzenia się austenitu staje się dyfuzja tych pierwiastków.

Drugim sposobem tworzenia austenitu, przy równoczesnym zmniejszeniu w nim stężenia węgla, jest przemiana ferrytu stali podeutektoidalnych w austenit.

Trzecim sposobem tworzenia austenitu, przy równoczesnym wzbogaceniu go w węgiel i pierwiastki stopowe, jest rozpuszczanie węglików drugorzędowych. Istotnym czynnikiem jest wówczas powinowactwo poszczególnych pierwiastków stopowych do węgla. Im to powinowactwo jest silniejsze, tym większa jest energia wiązań w węglkach i tym wyższe są temperatury, przy których rozpuszczają się one w austenicie. Najtrudniej rozpuszczają się w austenicie węgliki typu MC o sieci NaCl, dużo łatwiej węgliki typu  $M_7C_3$  i  $M_{23}C_6$ , a najłatwiej cementyt  $M_3C$ . Nie rozpuszczone węgliki hamują rozrost ziarna austenitu.

#### 9.3.4. Wpływ pierwiastków stopowych na przemiany przechłodzonego austenitu i hartowność stali

Wpływ ten zależy od rzeczywistego stężenia pierwiastków w austenicie. Jeżeli część pierwiastków pozostaje związana (np. w węglkach), to ich stężenie w austenicie będzie mniejsze od stężenia, które wykazuje analiza chemiczna stali.

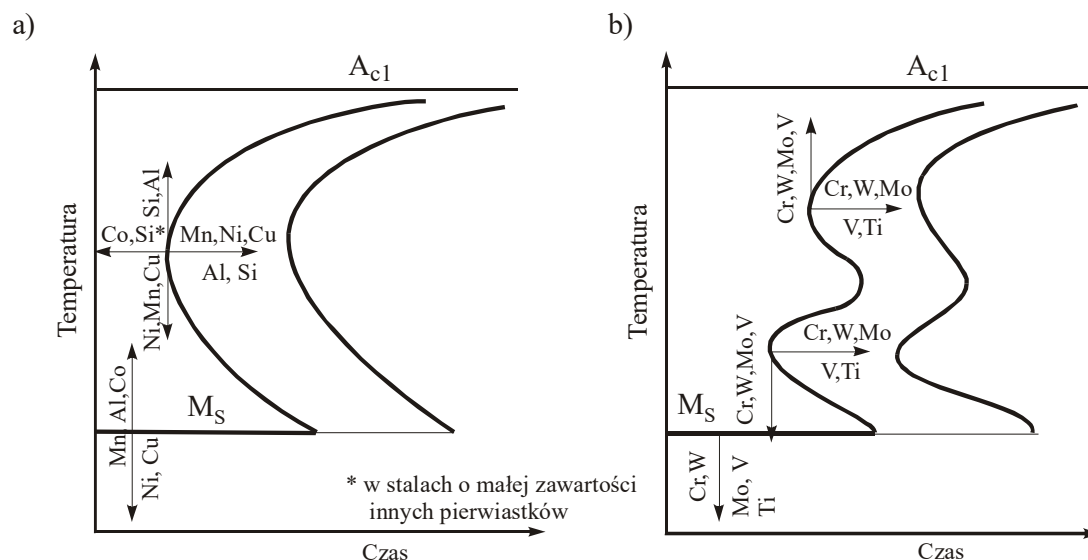
Pierwiastki nie tworzące własnych węglików w stalach, tzn. rozpuszczające się w ferrycie (np. Ni, Cu, Al, Si) lub w innych węglkach (np. Mn), opóźniają początek przemian przechłodzonego austenitu. Natomiast Co oraz Si (ale tylko w stalach o bardzo małej zawartości innych pierwiastków) przyspieszają przemianę przechłodzonego austenitu. W stalach zawierających inne pierwiastki stopowe krzem nieznacznie opóźnia przemiany przechłodzonego austenitu. Działanie pierwiastków stopowych polega także na przesunięciu zakresu najmniejszej trwałości przechłodzonego austenitu do wyższej temperatury (Si, Al) lub do temperatury niższej jak w przypadku Ni, Mn, Cu (por. **rys. 9.5a**).

W wyniku wzrostu stężenia w austenicie pierwiastków tworzących własne węgliki (Cr, W, Mo, V) pomiędzy obszarem przemian dyfuzyjnych a obszarem przemian pośrednich tworzy się zakres zwiększonej trwałości przechłodzonego austenitu (por. **rys. 9.5b**).

Pierwiastki tworzące własne węgliki (Cr, W, Mo, V, Ti) wydłużają również czas do rozpoczęcia przemiany przechłodzonego austenitu, zwłaszcza w zakresie przemian dyfuzyjnych, umożliwiając zmniejszenie krytycznej szybkości chłodzenia (zwiększenie hartowności stali).

W porównaniu ze stalami niestopowymi stale stopowe wykazują strukturę martenzytyczną w elementach o dużych przekrojach przy mniejszej szybkości chłodzenia. Umożliwia to stosowanie w czasie hartowania wolniejszego chłodzenia, np. w oleju a nawet w powietrzu, co sprzyja zmniejszaniu naprężeń hartowniczych.

Niestety, większość pierwiastków stopowych (za wyjątkiem Al i Co) obniża temperaturę początku przemiany martenzytycznej  $M_s$  co zwiększa ryzyko pęknięć elementów hartowanych.



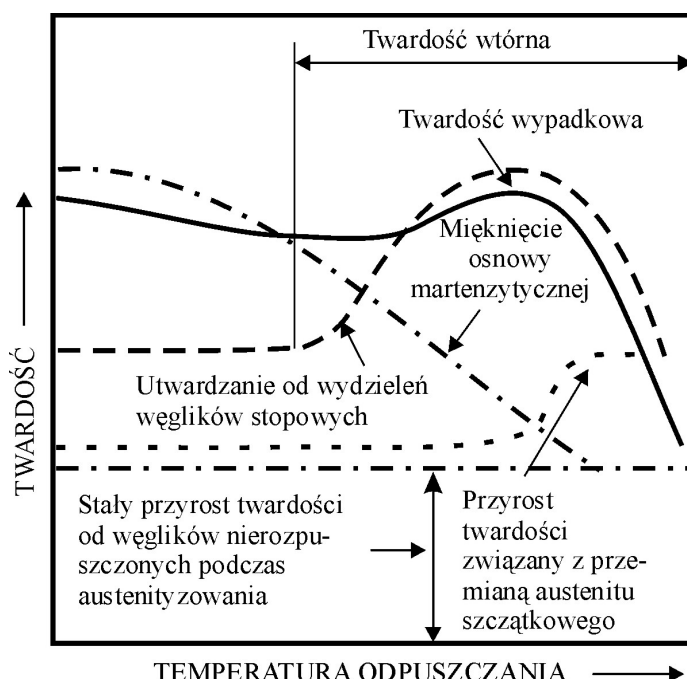
**Rys. 9.5.** Wpływu dodatków stopowych: a) rozpuszczających się w ferrycie lub w węglkach, b) tworzących własne węgliki – na charakter wykresów Czas-Temperatura-Przemiana (CTP) – schemat, wg S. Prowansa

### 9.3.5. Wpływ pierwiastków stopowych na przebieg odpuszczania

Pierwiastki stopowe na ogół opóźniają wydzielanie węglików z martenzytu i tym samym zmniejszają skłonność stali do obniżania twardości przy odpuszczaniu. Oznacza to, że po odpuszczaniu w tych samych warunkach, stale stopowe zachowują większą twardość niż stale niestopowe. Mechanizm odpuszczania stali stopowych do temperatury 450°C jest jednak analogiczny jak stali niestopowych, tzn. najpierw wydzielą się węglki  $\epsilon$ , następnie cementyt  $M_3C$  a jeżeli w strukturze jest austenit szczątkowy to ulega on przemianom w bainit, najczęściej dolny.

Przy temperaturach wyższych od 450°C szybkość dyfuzji atomów dodatków stopowych staje się na tyle duża, że mogą tworzyć się węgliki tych pierwiastków, które mają większe powinowactwo do węgla niż żelazo. Jednocześnie, metastabilny w takich warunkach cementyt ulega rozpuszczeniu lub stopniowo przemienia się w węglik innego typu. W przypadku gdy z osnowy wydzielają się dyspersyjne węgliki stopowe, a cementyt ulega w niej rozpuszczeniu, występuje zjawisko znacznego utwardzenia odpuszczonej stali, zwane twardością wtórną (rys. 9.6).





**Rys. 9.6.** Schemat wpływu przemian podczas odpuszczania na twardość stali szybkołącznych, wg G. Stevena, A. E. Nehrenberga i T. H. Philipsa

## 9.4. Wybrane przykłady stali stopowych i stopów specjalnych o symbolach wskazujących na ich skład chemiczny

### 9.4.1. Stale konstrukcyjne stopowe

Wg PN-EN10020 stale te należą do grupy stali stopowych jakościowych lub stali stopowych specjalnych.

#### 9.4.1.1. Stale niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości

Wg PN-EN10020 część tych stali należy do stali stopowych jakościowych konstrukcyjnych, część do stali stopowych specjalnych konstrukcyjnych a część do stali stopowych specjalnych maszynowych.

Zastosowanie: konstrukcje przemysłowe spawane, mosty, statki, do zbrojenia betonu.

Pierwowzorem była stal zawierająca 0,18%C i 1,6%Mn. Była ona jednak skłonna do kruchego pęknięcia ze względu na skłonność do rozrostu ziarna austenitu. Dopiero wprowadzenie do jej składu mikrododatków (ok. 0,1%) V, Ti lub Nb oraz ewentualnie azotu, pozwoliło na zahamowanie rozrostu ziarna stabilnymi węglnikami lub węglikoazotkami tych pierwiastków. Dalszą poprawę własności osiąga się przez zmniejszenie zawartości siarki i fosforu.

Przykłady: Wg PN-EN 10267: 19MnVS6.

#### 9.4.1.2. Stale konstrukcyjne do ulepszania cieplnego

Wg PN-EN są to stale stopowe specjalne maszynowe.

Zastosowanie: części maszyn, pojazdów i konstrukcji.

Obróbka cieplna tych stali polega na hartowaniu i odpuszczaniu przy 500÷550°C (ulepszanie cieplne). Struktura sorbitu jaką otrzymujemy po ulepszaniu zapewnia dużą wartość ilorazu  $R_c/R_m$  przy dużej odporności na pęknięcie (udarność).

Przykłady: Wg PN-EN 10083: 41Cr4, 36CrNiMo4.

#### 9.4.1.3. Stale do nawęglania

Wg PN-EN 10020 stale te należą do grupy stali stopowych specjalnych maszynowych lub stali stopowych specjalnych na łożyska toczne.

Zastosowanie: części maszyn o wysokiej twardości powierzchni i ciągłym rdzeniu.

Stężenie węgla w tych stalach nie przekracza 0,25% a ponadto zawierają Mn, Cr, Ni, Mo. Po nawęglaniu stosujemy hartowanie i niskie odpuszczanie.

Przykłady: Wg PN-EN 10084: 17Cr3, 16NiCr4.

#### 9.4.1.4. Stale do azotowania

Wg PN-EN 10020 stale te należą do grupy stali stopowych specjalnych maszynowych.

Zastosowanie: części maszyn o wysokiej twardości powierzchni i zwiększonej odporności korozyjnej powierzchni oraz dużej wytrzymałości rdzenia.

Ponieważ azotowanie prowadzimy przy temperaturach ok. 550°C dlatego przed tym zabiegiem stale poddaje się ulepszaniu cieplnemu, tj. hartowaniu i wysokiemu odpuszczaniu (przy ok. 600°C) gdyż podczas azotowania rdzeń azotowanej stali nie ulega już dalszemu mięknięciu. Aluminium w składzie stali do azotowania intensyfikuje nasycanie warstwy wierzchniej azotem.

Przykład: Wg PN-EN 10085: 31CrMoV9, 41CrAlMo7-10.

#### 9.4.1.5. Stale do hartowania powierzchniowego

Wg PN-EN 10020 stale te należą do grupy stali stopowych specjalnych maszynowych.

Zastosowanie: części maszyn o wysokiej twardości powierzchni oraz dobrej ciągliwości rdzenia. Gatunki stali takie jak do ulepszania cieplnego.

Przykład: Wg PN-EN 10083: 41Cr4, 51CrV4.

#### 9.4.1.6. Stale sprężynowe

Wg PN-EN 10020 stale te należą do grupy stali stopowych specjalnych maszynowych.

Zastosowanie: sprężyny, resory, drążki skrętne.

Powinny mieć wysoką granicę sprężystości i wysoką wytrzymałość zmęczeniową. Są to stale o wysokich (powyżej 0,45%C) zawartościach węgla z pierwiastkiem silnie utwardzającym ferryt, np. Si a w gatunkach o większej hartowności także Cr i V.

Przykłady: Wg PN-EN 10132-4: 48Si7, 51CrV4.

#### 9.4.1.7. Stale na łożyska toczne

Wg PN-EN 10020 stale te należą do grupy stali stopowych specjalnych na łożyska toczne.

Zastosowanie: pierścienie, kulki, wałeczki łożysk tocznych.

Stale te zawierają 0,9÷1,1%C , do 1,5%Cr oraz Mn i Si. Obróbka cieplna łożysk polega na zahartowaniu w oleju i niskim odpuszczaniu przy 150÷160°C.

Przykłady: Wg PN-EN ISO683-17: 100Cr6, 100CrMnSi6-4.

#### 9.4.1.8. Stale do pracy przy obniżonych temperaturach

Wg PN-EN 10020 stale te należą do grupy stali stopowych jakościowych konstrukcyjnych, do stali stopowych specjalnych konstrukcyjnych lub do stali stopowych specjalnych nierdzewiejących austenitycznych.

Zastosowanie: zbiorniki na ciekłe gazy, konstrukcje i rury pracujące przy obniżonych temperaturach.

Stale te muszą się charakteryzować bardzo niską temperaturą przejścia w stan kruchy. Dobre właściwości w niskich temperaturach wykazują stale niskowęglowe zawierające ok. 1%Mn. W stalach niskowęglowych dobrą ciągliwość w niskich temperaturach zapewnia również nikiel. Można również stosować stale austenityczne, które nie wykazują przejścia w stan kruchy.

Przykłady: Wg PN-EN 10028-4: 13MnNi6-3, 12Ni4, X8Ni9.

#### **9.4.1.9. Stale do pracy przy podwyższonych temperaturach**

Wg PN-EN 10020 stale te należą do grupy stali stopowych jakościowych konstrukcyjnych lub do stali stopowych specjalnych konstrukcyjnych

Zastosowanie: urządzenia energetyczne (rury kotłowe), aparatura chemiczna.

Są to niskowęglowe stale zawierające dodatek chromu i molibdenu, które utrudniają zjawisko pełzania materiału.

Przykłady: Wg PN-EN 10222-2: 16Mo3, 11CrMo4-5.

#### **9.4.2. Stale narzędziowe stopowe**

Wg PN-EN 10020 są to stale stopowe specjalne narzędziowe

##### **9.4.2.1. Stale do pracy na zimno**

Wg PN-EN 10020 są to stale stopowe specjalne narzędziowe

Narzędzia wykonane z tych stali nie powinny się nagrzewać powyżej 250°C. Obróbka cieplna tych stali polega na ich zahartowaniu w wodzie lub oleju i następnym odpuszczaniu przy temperaturze 100÷250°C.

Przykłady: Wg PN-EN ISO4957: 102Cr6, X210Cr12.

##### **9.4.2.2. Stale do pracy na gorąco**

Wg PN-EN 10020 są to stale stopowe specjalne narzędziowe

Narzędzia z tych stali narażone są nie tylko na ścieranie ale również na odpuszczające działanie ciepła. Powinny mieć dobre przewodnictwo cieplne i odporność na zmęczenie cieplne wywołane cyklicznym nagrzewaniem i chłodzeniem. Powinny też mieć dobrą odporność na pękanie.

Przykłady: Wg PN-EN ISO4957: X40CrMoV5-1, 55NiCrMoV7.

##### **9.4.2.3. Stale szybko tnące**

Wg PN-EN 10020 są to stale stopowe specjalne narzędziowe

Stosuje się na narzędzia do skrawania materiałów z dużymi prędkościami. Mogą one pracować bez utraty twardości przy 550-600°C. Ich wysoka twardość i odporność na odpuszczające działanie ciepła jest wynikiem wystąpienia efektu twardości wtórnej po odpuszczaniu przy ok. 560°C.

Stale szybko tnące zawierają 0,8÷1,4%C, ok. 4%Cr, do 19%W, do 5%V, do 10%Mo, do 10%Co. Obróbka cieplna tych stali polega na zahartowaniu od 1200÷1270°C w oleju lub w powietrzu i odpuszczaniu przy ok. 560°C na maksimum twardości wtórnej.

- stale wolframowe. Przykłady: Wg PN-EN 10027-1: HS12-0-2, HS12-0-2-5,
- stale wolframowo-molibdenowe. Przykłady: Wg PN-EN 10027-1: HS6-5-2, HS2-9-1-8.

### 9.4.3. Stale i stopy o szczególnych właściwościach chemicznych i fizycznych

Wg PN-EN 10020 są to stale stopowe jakościowe inne (elektrotechniczne), stale stopowe specjalne nierdzewiejące oraz stale stopowe specjalne o szczególnych właściwościach fizycznych

#### 9.4.3.1. Stale nierdzewiejące i kwasoodporne

Wg PN-EN 10020 są to stale stopowe specjalne nierdzewiejące.

Wprowadzenie do żelaza 10,5%Cr wywołuje wzrost (a ok. 13%Cr wywołuje silny wzrost) potencjału elektrochemicznego takiego stopu i tym samym skokowo zwiększa jego odporność na korozję.

Stale nierdzewiejące to takie od których jest wymagana odporność na działanie atmosfery powietrza, wilgoci i słabych roztworów soli lub kwasów.

Stale kwasoodporne to takie, które wykazują odporność na działanie stężonych kwasów lub ługów.

##### 9.4.3.1.1. Stale ferrytyczne

Wg PN-EN 10020 są to stale stopowe specjalne nierdzewiejące zawierające poniżej 0,18%C i poniżej 2,50%Ni.

Przy odpowiednio wysokiej zawartości Cr i bardzo niskim stężeniu C ferryt jest stabilny aż do temperatury topnienia stali. Stale takie, nazywane stalami ferrytycznymi, wykazują dobrą odporność na działanie kwasów utleniających (np. azotowego), nie są odporne na działanie kwasów redukujących (solny, siarkowy) i są spawalne.

Przykłady: Wg PN-EN 10088-1: X6Cr13, X6Cr17, X2CrMoTi18-2.

##### 9.4.3.1.2. Stale martenzytyczne

Wg PN-EN 10020 są to stale stopowe specjalne nierdzewiejące zawierające poniżej 1,20%C i poniżej 2,50%Ni.

Jeżeli stale zawierają 13%Cr i dodatek węgla co najmniej 0,1% to powyżej 950°C pojawia się w nich austenit i stale takie można hartować na martenzyt. Stale martenzytyczne nie są kwasoodporne lecz tylko nierdzewiejące.

Przykłady: Wg PN-EN 10027-1: X12Cr13, X20Cr13, X30Cr13, X39Cr13, X105CrMo17.

##### 9.4.3.1.3. Stale austenityczne

Strukturę austenitu przy temperaturze otoczenia uzyskuje się w stalach zawierających nikiel i chrom. Stężenie niklu konieczne do uzyskania struktury austenitycznej wynosi ok. 8%. Część niklu może być zastąpiona podwójną ilością manganu. Stale austenityczne są odporne na większość kwasów (za wyjątkiem solnego). Problemem w tych stalach jest korozja międzykrystaliczna wywołana wydzielaniem (na granicach ziarn) w tych stalach węglików  $M_{23}C_6$  (bogatych w chrom), których wydzielenie powoduje zmniejszenie stężenia chromu w strefach granic ziarn. Jeżeli w tych strefach stężenie chromu spadnie poniżej 10,5 %, stal ulega w tych miejscach (wzdłuż granic ziarn) korozji jak zwykła stal. Zapobiega się jej m. in. poprzez ograniczenie stężenia węgla w stali do 0,02÷0,03 % aby węgliki chromu nie mogły powstać lub przez związanie węgla pierwiastkiem silniej węglilotwórczym niż chrom, np. niobem lub tytanem.

Przykłady: Wg PN-EN 10017-1: X07CrNiTi18-9-1, X05CrNi18-9.

#### 9.4.3.2. Stale i stopy żaroodporne i żarowytrzymałe

Wg PN-EN 10020 stale z tej grupy należą do stali stopowych specjalnych nierdzewiejących.

Żaroodporność jest to odporność na działanie gazów utleniających przy temperaturach wyższych od 600°C.

Żarowytrzymałość jest to odporność na odkształcenia przy temperaturach wyższych od 600°C.

Stale te muszą charakteryzować się wysoką odpornością na pełzanie.

Przykłady: Wg PN-EN 10027-1: X09CrSiAl13-1-1 – stal żaroodporna ogólnego przeznaczenia; X50CrMnNi21-10-4 – stal na zawory silników samochodowych; X03CrAl25-5 – stal na opory grzewcze do 1300°C; X14NiCoCrAlTi59-20-15-5-1 – stop żarowytrzymały umocniony wydzieleniami związku międzymetalicznego Ni<sub>3</sub>(TiAl) zwanego fazą  $\gamma'$ , stosowany na łopatki turbin gazowych.

#### 9.4.3.3. Stale i stopy o szczególnych właściwościach magnetycznych

Wg PN-EN 10020 stale z tej grupy należą do grupy stali stopowych jakościowych innych lub do stali stopowych specjalnych o szczególnych właściwościach fizycznych.

Materiały magnetycznie miękkie – mają wąską i wysmukłą pętlę histerezy magnetycznej, co odpowiada dużej pozostałości magnetycznej i małej koercji.

Stosujemy je w technice prądów silnych:

- stale prądnicowe: 0,08%C+0,4÷3,4%Si,
- stale transformatorowe: 0,08%C+3,7÷4,2%Si,

lub w technice prądów słabych: np. permalloy: 78%Ni+22%Fe.

Materiały magnetyczne twarde mają szeroką pętlę histerezy o mniejszej pozostałości magnetycznej ale znacznie większej koercji.

Mogą to być:

- stale węglowe (0,7%C) zahartowane na martenzyt,
- stopy AlNiCo (7%Al, 18%Ni, 28%Co, 4%Cu+reszta Fe).

Materiały niemagnetyczne – mają przenikalność magnetyczną  $\mu' \approx 1$ , czyli w polu magnetycznym zachowują się obojętnie. Stosowane są na osłony wirników w generatorach i na śruby w transformatorach.

Przykłady: Wg PN-EN 10027-1: X40MnCr18-4.

#### 9.4.3.4. Stale i stopy o szczególnych współczynnikach rozszerzalności

Wg PN-EN 10020 stale z tej grupy należą do stali stopowych specjalnych o szczególnych właściwościach fizycznych.

Należą do nich:

- stopy o bardzo małym współczynniku rozszerzalności – np.: Invar Fe+36%Ni.
- stopy o bardzo dużym współczynniku rozszerzalności – np. stale austenityczne: Fe+0,5%C+25%Ni; Fe+0,2%C+20%Ni+6%Mn.
- stopy o ujemnym współczynniku rozszerzalności – np.: Fe+60%Pt.
- stopy do wtapiania w szkło – dla zachowania próżnioszczelności, np. Kovar (Fe+28%Ni+18%Co).