Charakterystyka stali nierdzewnych

Gatunki, normy i zamienniki, obróbka cieplna oraz podstawowe własności.

Politechnika Śląska w Gliwicach
Wydział Mechaniczny-Technologiczny

Politecnico di Torino
Sede di Alessandria

Dr inż. Zbigniew Brytan

Plan prezentacji

- Stale odporne na korozję
- Zasady oznaczania stali odpornych na korozję
  - Gatunki, normy i zamienniki (PN, PN-EN, AISI, UNS)
- Charakterystyka stali odpornych na korozję, obróbka cieplna i własności mechaniczne
  - Ferrytycznych,
  - Martenzytycznych,
  - Austenitycznych,
  - Ferrytyczno-austenitycznych,
  - Utwardzanych wydzieleniowo.
- Stale żaroodporne - żarowytrzymałe

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję

Gatunki, normy i zamienniki

- Normy
- PN
- PN-EN
- AISI
- Klasyfikacja UNS

Gatunki, normy i zamienniki

- Zasady oznaczania stali odpornych na korozję
- wg PN
- wg PN-EN
- wg AISI/ASTM
- wg UNS

Zgodnie z normą:
ASTM A240

304L

Zgodnie z UNS:

S30403

Zgodnie z normą: PN-H-86020:1971

00H18N10

Zgodnie z normą: PN-EN 10088 (1-2-3)
(dla produktów płaskich oraz długich)

Symbol stali	Numer stali
X2CrNi19-11	1.4306

Zgodnie z normą: PN-EN 10283
(odlewy ze stali odpornych na korozję)

Symbol stali	Numer stali
GX2CrNi19-11	1.4309

Norma wycofana

Gatunki, normy i zamienniki

- Zasady oznaczania stali odpornych na korozję wg PN *(PN-H-86020:1971 – zastąpiona przez PN-EN 10088)*
- Oznaczenia gatunków stali składają się z liter i cyfr.
- Cyfra przed pierwszą literą - zawartość węgla.

00 - ≤ 0,03 % C; 0 - od ≤ 0,05% do ≤ 0,08 %C w zależności od gatunku, 1, 2, 3 i 4 - odpowiednio 0,1, 0,2, 0,3 i 0,4 % C.

- Cyfry po kolejnych literach - zawartość dodatków stopowych.
- Jeżeli zawartość dodatku stopowego < 1 %, - brak cyfry.
- Litery odpowiadające dodatkom stopowym:

Oznaczenia dodatków stopowych w stalach nierdzewnych wg norm PN

Nazwa	Chrom	Nikiel	Molibden	Tytan	Mangan	Glin	Miedź	Niob	Azot
Pierwiastek	Cr	Ni	Mo	Ti	Mn	Al	Cu	Nb	N
Symbol w PN	H	N	M	T	G	J	Cu	Nb	A

Norma wycofana

Gatunki, normy i zamienniki

- Zasady oznaczania stali odpornych na korozję wg PN *(PN-H-86020:1971 – zastąpiona przez PN-EN 10088)*

Przykłady:

- 0H13 - stal chromowa
max. 0,08 % węgla i średnio 13 % chromu,

- 00H18N10 - stal chromowo - niklowa
max. 0,03 % węgla, średnio 18 % chromu i 10 % niklu,

- H17N13M2T - stal chromowo - niklowo - molibdenowo - tytanowa
17 % chromu, 13 % niklu, 2 % molibdenu i poniżej 1 % tytanu.

Zgodnie z normą: PN-H-86020:1971

00H18N10

Gatunki, normy i zamienniki

PN-EN 10027-1

- Zasady oznaczania stali odpornych na korozję wg PN-EN
- Normy Europejskie – system znakowy i cyfrowy oznaczania
- **System znaków** składa się z następujących liter i liczb (ilościowy skład chemiczny):
- X - oznacza, że co najmniej jeden pierwiastek stopowy występuje w ilości większej niż 5 %,
- Liczba za symbolem X - 100-krotnej średniej zawartości węgla,
- Symbole pierwiastków chemicznych określających dodatki stopowe w stali (symbole zapisuje się w kolejności malejących zawartości pierwiastków),
- Liczby za symbolami pierwiastków chemicznych określają zawartość kolejnych pierwiastków stopowych.

Zgodnie z normą: PN-EN 10088

Symbol stali	Numer stali
X2CrNi19-11	1.4306

PN-EN 10027-1

Gatunki, normy i zamienniki

- Zasady oznaczania stali odpornych na korozję wg PN-EN
- W **systemie cyfrowym** oznaczenie gatunku składa się z 5 cyfr: **1.xxnn**,
- **1** oznacza stal,
- **xx** – człon składający się z dwóch cyfr oznacza grupę stali,
- **nn** – trzeci człon dwucyfrowy, wyróżnia konkretny gatunek w grupie.

Zgodnie z normą: PN-EN 10088

Symbol stali	Numer stali
X2CrNi19-11	1.4306

PN-EN 10027-1

Gatunki, normy i zamienniki

- Zasady oznaczania stali odpornych na korozję wg PN-EN
- System cyfrowy

Znaczenie oznaczeń cyfrowych dla stali odpornych na korozję

Oznaczenie grupy	Rodzaje gatunków w klasie nr 4: stale odporne na korozję i żaroodporne	
1.40...	stale z Cr o zawartości <2,5%Ni	bez Mo, Nb lub Ti
1.41...		z Mo, bez Nb lub Ti
1.43...	stale z Cr o zawartości >2,5%Ni	bez Mo, Nb lub Ti
1.44...		z Mo, bez Nb lub Ti
1.45...	stale z Cr, Cr i Ni lub Cr, Ni i Mo z dodatkami specjalnymi pierwiastków (Cu, Nb, Ti, ...)	
1.46...		
1.47...	stale żaroodporne o zawartości <2,5%Ni	
1.48...	stale żaroodporne o zawartości >2,5%Ni	
1.49...	stale żarowytrzymałe	

Gatunki, normy i zamienniki

PN-EN 10027-1

- Zasady oznaczania stali odpornych na korozję wg PN-EN

Przykłady:

- **X20Cr13 (1.4021)** - stal o średniej zawartości węgla równej 20/100 = 0,2% i 13% stężeniu chromu.

- **X1CrNiMoCuN25-25-5 (1.4537)** – stal o średniej zawartości węgla = 0,01%, zawierająca 25 % chromu, 25 % niklu, 5 % molibdenu i poniżej 1 % miedzi i azotu.

- **X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571)** - stal odporna na korozję o średniej zawartości węgla = 0,06%, zawierająca 17 % chromu, 12 % niklu, 2 % molibdenu i poniżej 1 % tytanu.

Oznaczanie zgodnie z systemem AISI/SAE

Oznaczanie stali nierdzewnych zgodnie z systemem AISI/SAE

- **Austenityczne stale nierdzewne**
- Pierwsza cyfra to „3” – 3xx lub „2” – 2xx dla stali (Cr-Mn-Ni)
- Druga i trzecia cyfra nie są związane z jakimś procesem produkcji stali lub jej składem chemicznym. Generalnie ze wzrostem stężenia chromu ostatnie dwie cyfry rosną.
- **Martenzytyczne i ferrytyczne stale nierdzewne**
- Pierwszą cyfrą jest zawsze „4” – 4xx
- Druga i trzecia cyfra nie są związane z jakimś procesem produkcji stali lub jej składem chemicznym. Generalnie ze wzrostem stężenia chromu ostatnie dwie cyfry rosną.
- **Utwardzane wydzieleniowo stale nierdzewne**
- Pierwszą cyfrą jest „6” – 6xx
  - System oznaczeń ASTM zbieżny z SAE

Klasyfikacja UNS „Unified Numbering System” - Zunifikowany System Numerowania

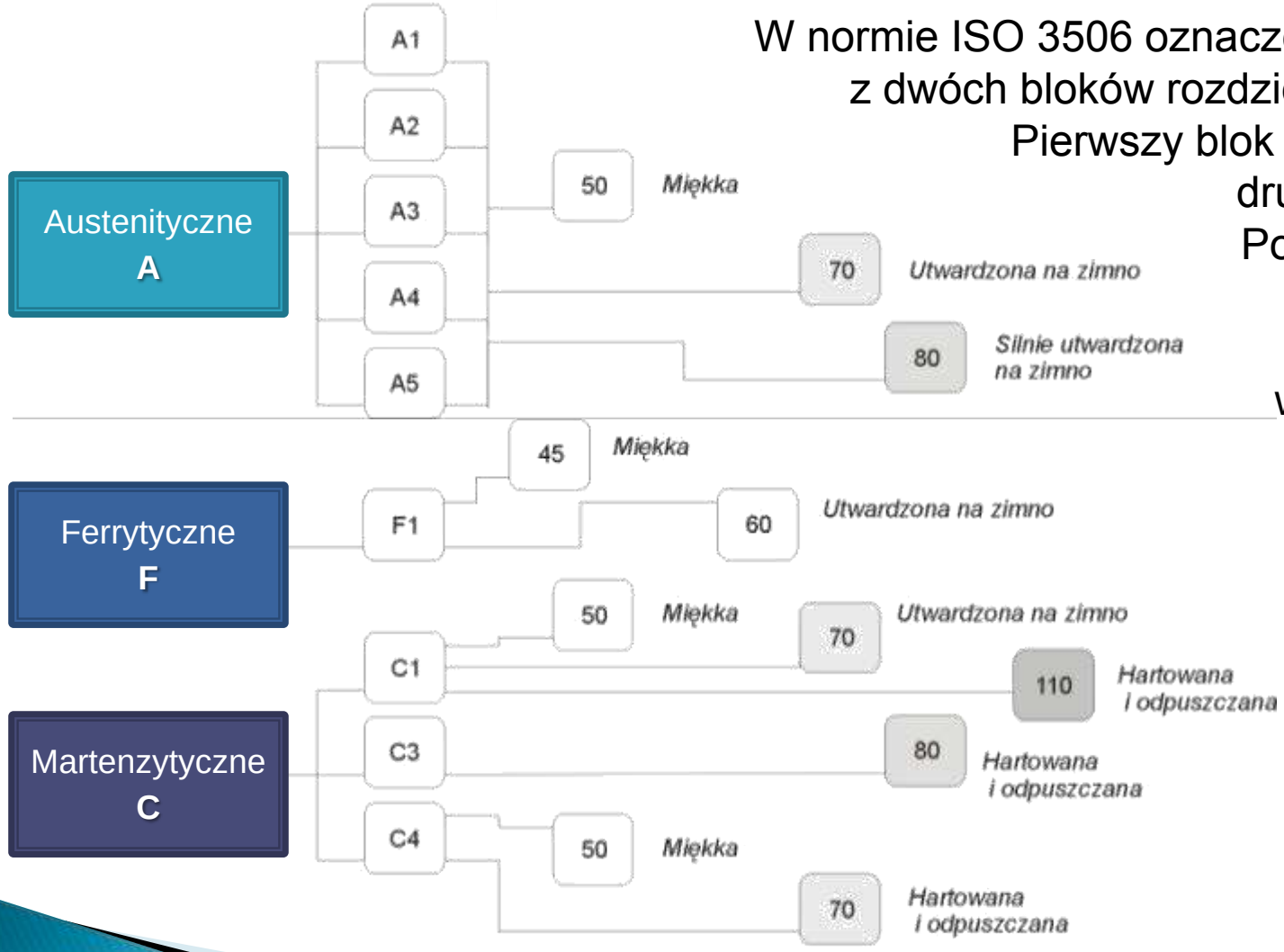
- System oznaczania stali według systemu (AISI) jest szeroko stosowany w USA lecz nie obejmuje wszystkich materiałów metalowych.
- Dwie organizacje normalizacyjne ASTM i SAE opracowały nowy system oznaczania materiałów – **UNS**
- Materiały podzielono na 18 grup, każda posiada odmienną literę, dla stali nierdzewnych – S
  Opis materiału za pomocą 6 znaków **SXXXXX**.
  Każdy materiał posiada odmienny numer.
  Pierwsze trzy cyfry oznaczenia zaczerpnięto z poprzednich klasyfikacji wg AISI, ASTM i SAE.

- Oznaczenie **UNS** „**S31600**” odpowiada stali **AISI/SAE 316**

Elementy złączne

- PN-EN ISO 3506, Własności mechaniczne części złącznych ze stali nierdzewnych, odpornych na korozję
- Część 1: Śruby i śruby dwustronne
- Część 2: Nakrętki
- Część 3: Śruby bez łba z gwintem na całej długości oraz podobne części złączne niepodlegające rozciąganiu
- Część 4: Wkręty samogwintujące

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję – Elementy złączne PN-EN ISO 3506



W normie ISO 3506 oznaczenie stali składa się z dwóch bloków rozdzielonych łącznikiem. Pierwszy blok określa rodzaj stali, drugi klasę własności. Po symbolu materiału cyfra wskazująca skład chemiczny w danej grupie stali.

Ferrytyczno-austenityczne Duplex
FA

Nie wyszczególnione w PN-EN ISO 3506

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję – Elementy złączne PN-EN ISO 3506

Gatunki austenityczne

Stale grupy A – austenityczne:

- Pięć głównych rodzajów stali austenitycznych od A1 do A5.
- Nie mogą być one hartowane i zwykle są niemagnetyczne.
- W celu zmniejszenia podatności na utwardzanie, do stali rodzajów od A1 do A5 można wprowadzić dodatek Cu.
- W przypadku stali niestabilizowanych rodzajów A2 i A4 ograniczono stężenie węgla.
- Stale rodzaju A3 i A5 są stabilizowane dodatkami Ti, Nb lub Ta.
- Dla zastosowań morskich oraz im podobnych zalecane są stale o zawartości około 20% Cr i 4,5 % Ni i do 6,5% Mo.

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję – Elementy złączne PN-EN ISO 3506

Gatunki austenityczne

Norma PN-EN ISO 3506	Norma AISI/ ASTM	Norma Europejska EN 10088	
		Symbol stali	Numer stali
A2	304	X5CrNi18-10	1.4301
	305	X4CrNi18-12	1.4303
A2L	304L	X2CrNi19-11	1.4306
A4	316	X5CrNiMo17-12-2	1.4401
	316L	X2CrNiMo17-12-2	1.4404
A4L	316L	X2CrNiMo18-14-3	1.4435
A1	303	X8CrNiS18-9	1.4305
A3	321	X6CrNiTi18-10	1.4541
	347	X6CrNiNb18-10	1.4550
A5	316	X3CrNiMo17-13-3	1.4436
	316Ti	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571
	316Cb	X6CrNiMoNb17-12-2	1.4580

Gdy C ≤ 0,03% dodatkowe oznaczenie **L**

Mo

Dodatek S

Dodatek Ti, Nb

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję – Elementy złączne PN-EN ISO 3506

Własności mechaniczne elementów złącznych z austenitycznych grup stali

Gatunek stali	Klasa wytrzymałości	Zakres średnic	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [1)] N/mm² min.	Granica plastyczności $R_{p\,0,2}$ [1)] N/mm² min.	Wydłużenie przy zerwaniu A [2)] mm min.
A1, A2, A3, A4, A5	50	< M 39	500	210	0,6d
	70	< M 24 [3)]	700	450	0,4d
	80	< M 24 [3)]	800	600	0,3d

[1)] Naprężenie rozciągające jest obliczane w odniesieniu do pola przekroju;
[2)] Wydłużenie przy zerwaniu powinno być określone na rzeczywistej długości śruby a nie dla przygotowanej próbki do badań; d - jest średnicą nominalną gwintu;
[3)] Dla elementów złącznych o średnicy nominalnej gwintu d większej niż 24mm, własności mechaniczne powinny być uzgodnione pomiędzy użytkownikiem i producentem. Muszą być one oznaczone gatunkiem stali i klasą wytrzymałości według niniejszej tabeli;

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję – Elementy złączne PN-EN ISO 3506

Stale grupy F – ferrytyczne:

- W normie ISO 3506 zawarto jeden rodzaj stali ferrytycznych (F1). Stale rodzaju F1 nie powinny być normalizowane i nie powinny być hartowane, nawet, jeżeli jest to możliwe w niektórych przypadkach.
- Stale F1 są magnetyczne.

Norma PN-EN ISO 3506	Norma AISI/ ASTM	Norma Europejska EN 10088	
		Symbol stali	Numer stali
F1	430 434	X6Cr17 X6CrMo17-1	1.4016 1.4113

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję – Elementy złączne PN-EN ISO 3506

Własności mechaniczne elementów złącznych z ferrytycznych grup stali

Gatunek stali	Klasa wytrzymałości	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [1] N/mm² min.	Granica plastyczności $R_{p\,0,2}$ [1] N/mm² min.	Wydłużenie przy zerwaniu A [2] mm, min.	Twardość	
					HB	HV
F1 [3]	45	450	250	0,2d	128-209	135-220
	60	600	410	0,2d	171-271	180-285

[1] Naprężenie rozciągające jest obliczone w odniesieniu do pola przekroju;
[2] Wydłużenie przy zerwaniu powinno być określone na rzeczywistej długości śruby a nie dla przygotowanej próbki do badań; d- nominalna średnica gwintu;
[3] Nominalna średnica gwintu d mniejsza równa 24mm;

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję – Elementy złączne PN-EN ISO 3506

Stale grupy C – martenzytyczne:

- W normie ISO 3506 podano trzy rodzaje stali martenzytycznych C1, C3 i C4.
- Mogą być hartowane są magnetyczne.

Norma PN-EN ISO 3506	Norma AISI/ ASTM	Norma Europejska EN 10088	
		Symbol stali	Numer stali
C1	410 420 420	X12Cr13 X20Cr13 X30Cr13	1.4006 1.4021 1.4028
C3	431	X17CrNi16–2	1.4057
C4	430F	X14CrMoS17	1.4104

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję – Elementy złączne PN-EN ISO 3506

Własności mechaniczne elementów złącznych z martenzytycznych grup stali

Gatunek stali	Klasa wytrzymałości	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [1)] N/mm² min.	Granica plastyczności $R_{p\,0,2}$ [1)] N/mm² min.	Wydłużenie przy zerwaniu A [2)] mm, min.	Twardość		
					HB	HRC	HV
C1	50	500	250	0,2d	147-209	-	155-220
	70	700	410	0,2d	209-314	20-34	220-330
	110[3)]	1100	820	0,2d	-	36-45	350-440
C3	80	800	640	0,2d	228-323	21-35	240-340
C4	50	500	250	0,2d	147-209	-	155-220
	70	700	410	0,2d	209-314	20-34	220-330

[1)] Naprężenie rozciągające jest obliczone w odniesieniu do pola przekroju;
[2)] Wydłużenie przy zerwaniu powinno być określone na rzeczywistej długości śruby a nie dla przygotowanej próbki do badań; d- nominalna średnica gwintu;
[3)] Hartowane i odpuszczane w temperaturze początkowej minimum 275°C;

Zasady oznaczania stali odpornych na korozję – Elementy złączne PN-EN ISO 3506

Gatunki duplex

Nie wyszczególnione w PN-EN ISO 3506

Stale grupy FA – ferrytyczno-austenityczne:

- W złączniku E norma ta wskazuje: "Ryzyko zniszczenia śrub i śrub dwustronnych przez chlorki powodujące korozję naprężeniową może być zmniejszone przez zastosowanie stali 1.4439, 1.4539, 1.4529, **1.4462**".

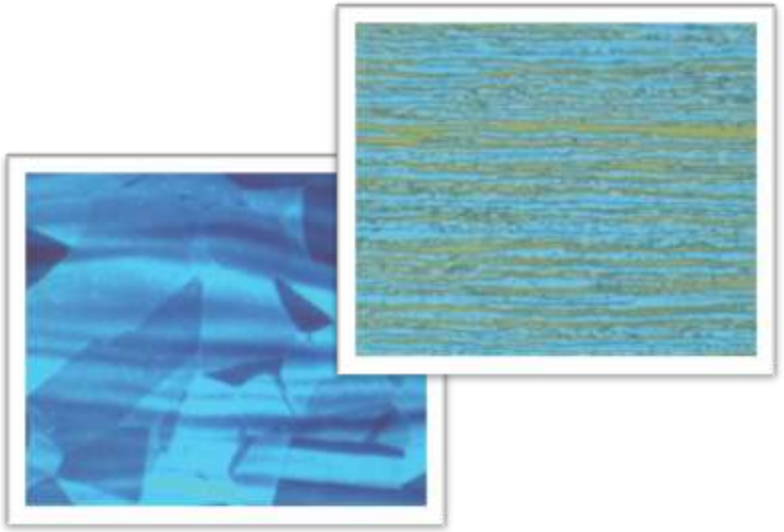
Typ stali	Norma AISI/ ASTM	Norma Europejska EN 10088	
		Symbol stali	Numer stali
Ferrytyczno-austenityczna	2205	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462
Austenityczna	317LMN	X2CrNiMoN17-13-5	1.4439
	904L	X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539
	(N08926)	X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529

Gatunki, normy i zamienniki

- Wybrane międzynarodowe organizacje normalizacyjne i systemy standaryzacji stopów metali

AISI American Iron and Steel Institute - www.steel.org
AMS Alloys, Metals and Steel Resource Specialists - www.amsresources.com
ASME American Society of Mechanical Engineers – www.asme.org
ASTM American Society for Testing and Materials - www.astm.org
AWS American Welding Society – www.aws.org
BS British Standards - www.bsonline.bsi-global.com
DIN Deutsches Institut für Normung - www.din.de
ISO International Organization for Standaryzation - www.iso.org
MIL United States Government Military Standards - www.mil-standards.com
SAE Society of Automotive Engineers - www.sae.org
UNS Unified Numbering System - www.materialsengineer.com/E-UNS-designations.htm
PKN Polski Komitet Normalizacyjny - www.pkn.pl
CEN Europejski Komitet Normalizacyjny - www.cen.eu

Charakterystyka stali odpornych na korozję



Stale odporne na korozję

- Definicja

  Według definicji stali odpornych na korozję, podanej w normie europejskiej PN-EN 10088-1:2005, „za stale odporne na korozję uważa się stale, zawierające co najmniej 10,5 % Cr i maksymalnie 1,2 % C”.

- **Chrom**
  - Zapewnia powstanie pasywnej warstwa tlenków na powierzchni (spontanicznie w obecności tlenu)
  - Warstwa pasywna zapewnia odporność korozyjną
- **Molibden**
  - Podwyższa odporność na korozję wżerową, szczelinową
- **Nikiel**
  - Zapewnia ciągliwość stali nierdzewnej (przez stabilizację struktury austenitycznej).
  - Wspomaga w zapobieganiu propagacji zjawisk korozji miejscowej (na przykład korozji szczelinowej).
- **Mangan**
  - Zastępuje Ni – Stale Cr-Mn-Ni

- **C, Cu**
- **Ti, Nb, Zr**
- **N**
- **Si, Al**

Stale odporne na korozję

- Podział ze względu na główne własności
  - Nierdzewne
  - Żaroodporne
  - Żarowytrzymałe

- Podział ze względu na strukturę:
- Austenityczne
- Ferrytyczne
- Austenityczno – ferrytyczne
- Martenzytyczne
- Utwardzane wydzieleniowo

- Podział ze względu na skład chemiczny:
- Cr,
- Cr-Ni
- Cr-Ni-Mo
- Cr-Mn-Ni

Skład chemiczna a struktura stali

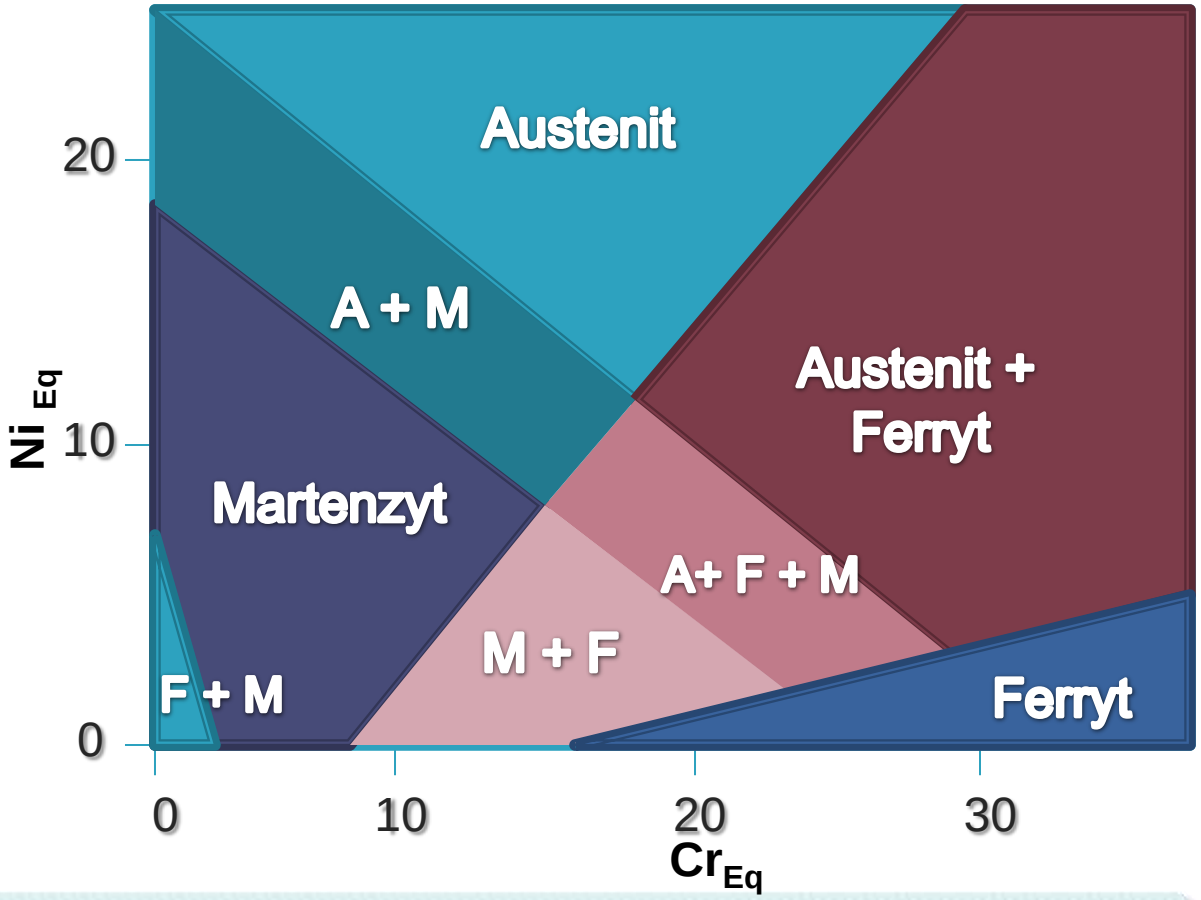
Równoważnik chromu **Cr_{Eq}** i niklu **Ni_{Eq}**

Cr_{Eq}= %Cr + %Mo + 1,5%Si + 0,5%Nb

Ni_{Eq}= %Ni+0,5%Mn+30 (%C + %N)

- Wykres *Schaefflera*
- *DeLong* - udoskonalił wykres uwzględniając azot jako silny pierwiastek austenitotwórczy,
- Kotecki i Siewert
  - Dalsze modyfikacje, uwzględnienie miedzi jako składnika austenitotwórczego. Wykres *WRC-1992*

Wykres Schaefflera



Odporność korozyjna

- Najbardziej znaną własność
- Wszystkie stale nierdzewne wykazują wysoką odporność na korozję, zarówno korozję w roztworach wodnych jak i w ośrodkach gazowych (korozja wysokotemperaturowa).
- Wynika to z obecności na powierzchni stali bogatej w chrom warstwy tlenków – warstwa pasywna.
- Samoczynnie odbudowuje się w obecności tlenu.

- Najbardziej powszechnym środowiskiem powodującym korozję stali nierdzewnych jest środowisko zawierające chlorki (środowisko wilgotne zawierające sole).
- PRE = %Cr + 3,3 %Mo + 16 %N

Ferrytyczne stale nierdzewne

- Zawierają chrom w stężeniu 11-18%Cr (30%), 0-4%Mo, (brak Ni)
- Chrom stabilizuje fazę ferrytyczną ograniczając występowanie austenitu
- Odporność korozyjna ściśle uzależniona od stężenia Cr i Mo
- Ferrytyczne stale nierdzewne
- Ferrytyczne
- Pół-ferrytyczne (F +A)
- Super-ferrytyczne
- Pół-ferrytyczne stopy o stężeniu 17%Cr charakteryzują się występowaniem obszaru dwufazowego austenit + ferryt w temp. 850-1100ºC - wzrost kruchości.
- Stabilizowane dodatkami Ti = Ti x 5(C +N), Nb, Zr, dodatek Al
  - W normach ASTM gatunki ferrytyczne stali nierdzewnych są sklasyfikowane grupie 400

Ferrytyczne stale nierdzewne

Ferrytyczne stale nierdzewne

Skład chemiczny ferrytycznych stali nierdzewnych

EN		ASTM	Skład chemiczny, %				
Znak	Numer		C	Cr	Ni	Mo	Inne
X6Cr13	1.4000	403	0,08	13,0	-	-	
X6CrAl13	1.4002	405	0,08	13,0	-	-	Al
X2CrNi12	1.4003	-	0,03	11,5	1		N
X6Cr17	1.4016	430	0,08	17,0	-	-	-
X3CrTi17	1.4510	439	0,05	17,0	-	-	Ti
X6CrMo17-1	1.4113	434	0,08	17,0	-	1,2	-
X6CrNiTi12	1.4516	414	0,08	11,5	1,25	-	Ti
X2CrMoTi18-2	1.4521	444	0,03	18,0	-	2	-
X2CrMoTi29-4	1.4592	-	0,02	28,0	-	4	Ti

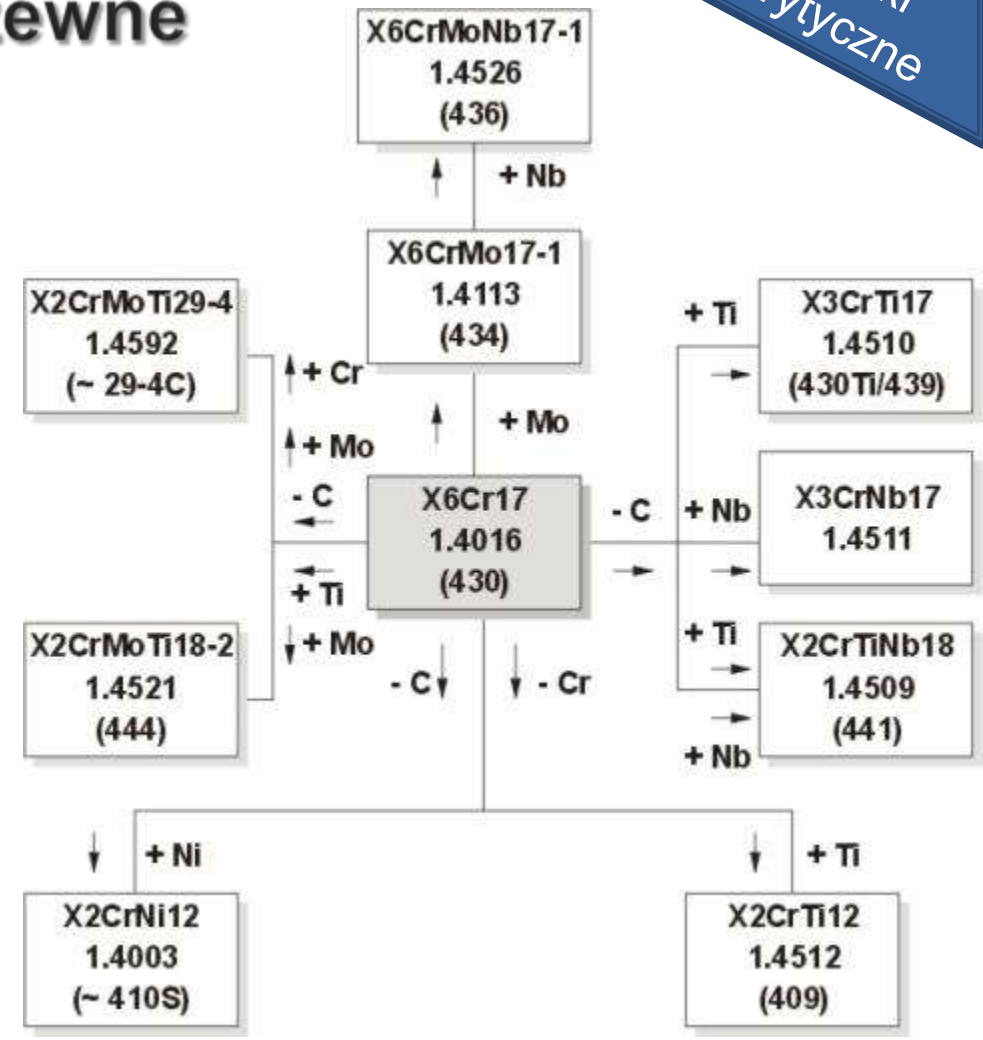
Ferrytyczne

Pół-ferrytyczne

Super-ferrytyczne

Ferrytyczne stale nierdzewne

- Umiarkowana lub dobra odporność korozyjna
- Odporność na korozję naprężeniową
- Dobra ciągliwość
- Dobra podatność na kształtowanie (obr. plast.)
- Magnetyczne
- Dostateczna wytrzymałość
- Słaba udarność
- Niska spawalność



Główne gatunki ferrytycznych stali nierdzewnych pochodne od gatunku X6Cr17 (AISI 430)

Ferrytyczne stale nierdzewne

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

- Poddaje się wyżarzaniu w temperaturze 680-1050°C z chłodzeniem w powietrzu lub wodzie, aby uniknąć tworzenia się austenitu.

- **Własności mechaniczne**

$R_{p0,2}$ MPa	• **200 - 420**
R_m MPa	• **380 - 750**
A%	• **15 - 25**

Szybkie chłodzenie w zakresie temperatury 400-500ºC (kruchość 475ºC)

- **Wyżarzanie**

• Plastyczność oraz odporność na korozję stopów pół-ferrytycznych może być przywrócona na drodze obróbki cieplnej w zakresie 750-850ºC przez czas zależnym od grubości elementu (zaleca się czas 2 min./mm).

Ferrytyczne stale nierdzewne

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

EN		ASTM	Temperatura wyżarzania, ^{o}C	$R_{p0,2}$MPa	R_m MPa	A%
Znak	Numer					
X6Cr13	1.4000	403	750 - 800	230	400 - 630	20
X6CrAl13	1.4002	405	750 - 810	230	400 - 600	17
X2CrNi12	1.4003	-	680 - 740	260	450 - 600	20
X6Cr17	1.4016	430	750 - 850	240	400 - 630	20
X3CrTi17	1.4510	439	770 - 830	230	420 - 600	23
X6CrMo17-1	1.4113	434	820 - 880	200	400 - 550	23
X6CrNiTi12	1.4516	414	790 - 850	280	450 - 650	23
X2CrMoTi18-2	1.4521	444	820 - 880	300	420 - 640	20
X2CrMoTi29-4	1.4592	-	900 - 1000	430	550 - 700	20

Zgodnie z normą: PN-EN 10088

Ferrytyczne stale nierdzewne

Zastosowania

- Układy wydechowe pojazdów samochodowych
- Okucia budowlane, zastosowania gospodarcze,
- Elementy ozdobne dla budownictwa i przemysłu motoryzacyjnego,
- Systemy mocowań rurociągów, płyty wyłożenia podług, elementy,
- Elementy wagonów transportu węgla i rud, przenośniki łańcuchowe.

Ograniczenia

- Słaba spawalność – opracowano gatunek 3CR12 (EN 1.4003) o polepszonej spawalności
- Wysokostopowe stale „super ferrytyczne” o wysokiej odporności na korozje wżerową i szczelinową.

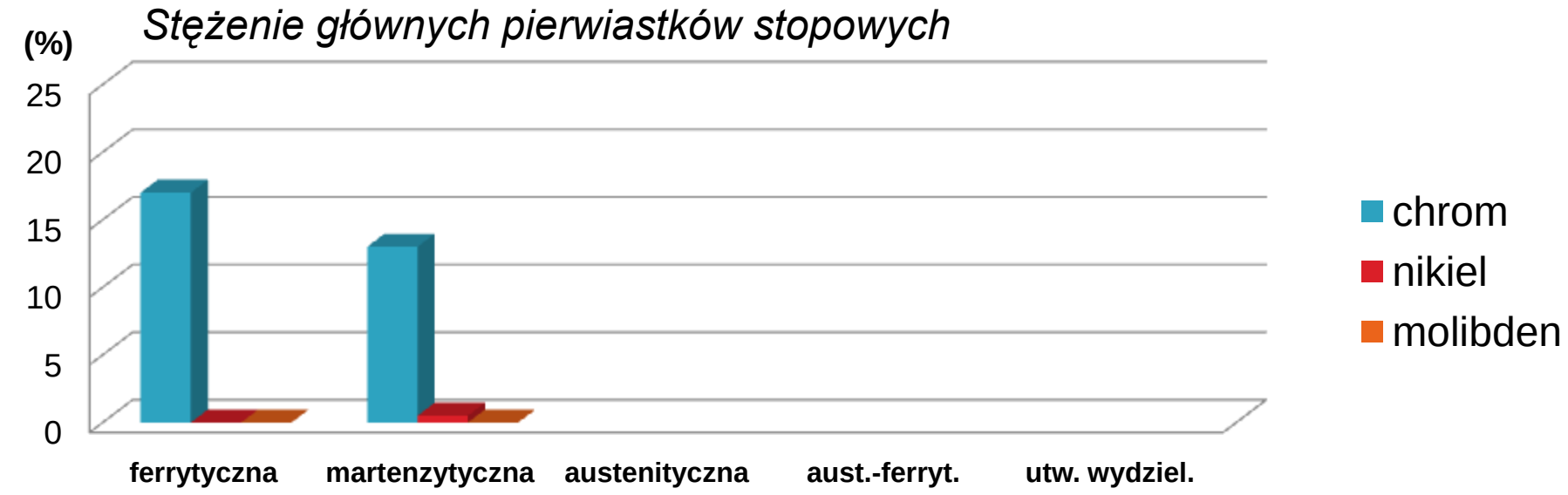
Martenzytyczne stale nierdzewne

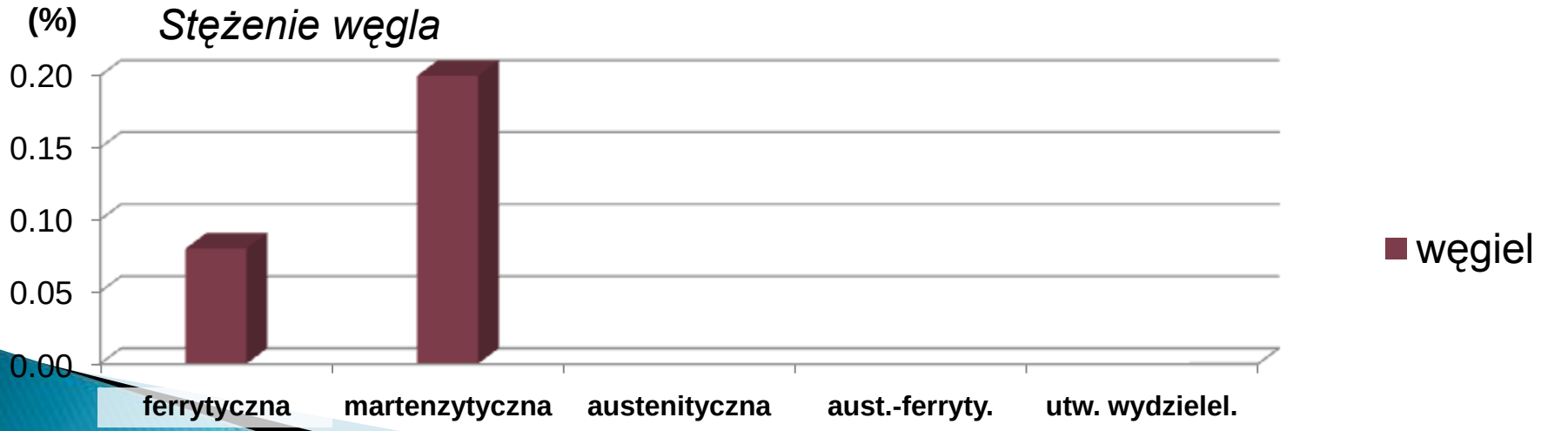
- Grupa stali podobna pod względem składu chemicznego do ferrytycznych stali nierdzewnych z wyjątkiem stężenia węgla, - wyższe w martenzytycznych stalach nierdzewnych
- Wyższe %C – wyższa twardość martenzytu

- Stale martenzytyczne
- Stale „martenzytyczno-ferrytyczne” lub „półferrytyczne”
- Stale „martenzytyczne niklowe” lub „martenzytyczno-austenityczne”
- Stale „supermartenzytyczne”

- W normach ASTM martenzytyczne gatunki stali nierdzewnych są sklasyfikowane w grupie 400.

Martenzytyczne stale nierdzewne





Martenzytyczne stale nierdzewne

Skład chemiczny martenzytycznych stali nierdzewnych

EN		ASTM	Skład chemiczny, %				
Znak	Numer		C	Cr	Ni	Mo	Inne
X12Cr13	1.4006	410	0,12	12,5	0,75	-	
X20Cr13	1.4021	420	0,20	13,0	-	-	-
X39Cr13	1.4031	420	0,39	13,5	-	-	-
X3CrNiMo13-4	1.4313	CA-6MN	0,05	13,0	3,5	0,5	N
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	-	0,06	16,0	5,0	1,2	N
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	-	0,03	12,5	5,5	2	Ti, V

Martenzytyczno – ferrytyczne (półferrytyczne)

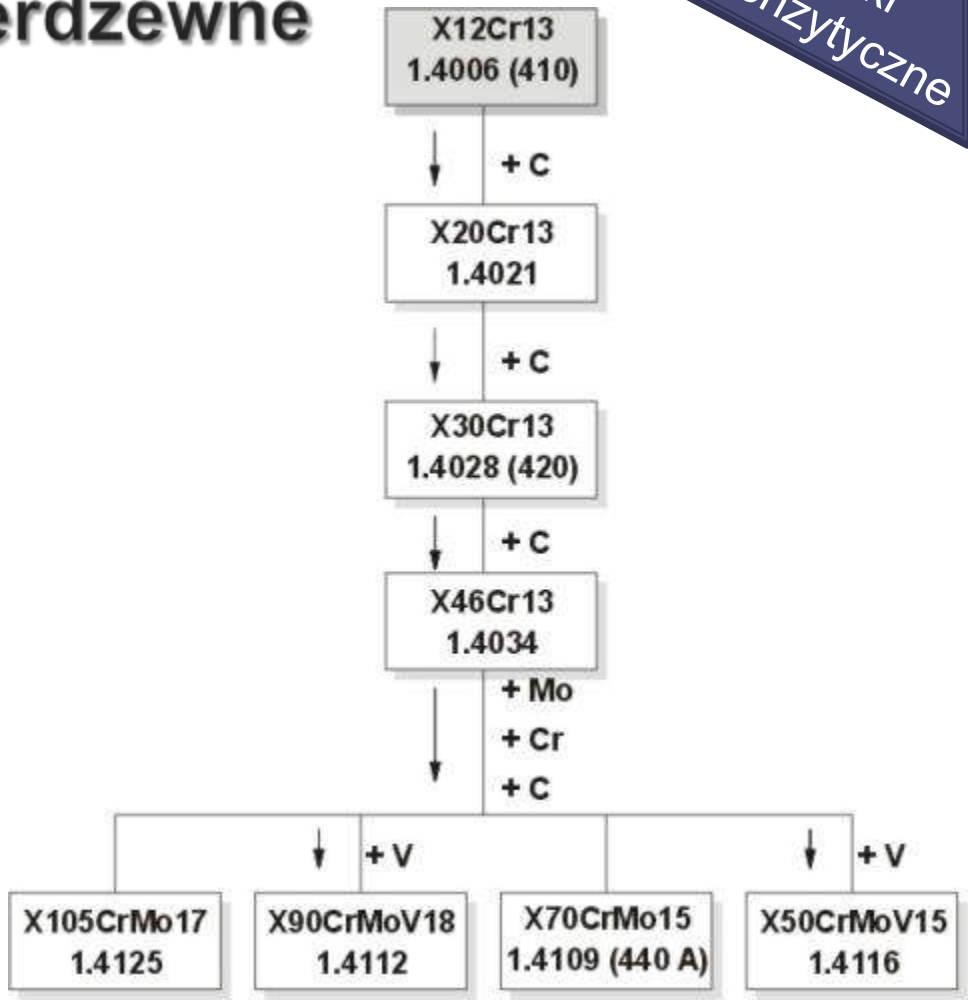
Martenzytyczne

Martenzytyczne – niklowe (M + A)

Super-martenzytyczne

Martenzytyczne stale nierdzewne

- Dostateczna odporność korozyjna
- Wysoka wytrzymałość
- Magnetyczne
- Niska odporność na korozję naprężeniową
- Niska ciągliwość
- Niska podatność na kształtowanie (obr. plast.)
- Niska udarność
- Niska spawalność



Główne gatunki martenzytycznych stali nierdzewnych pochodne od gatunku X12Cr13 (AISI 410)

Martenzytyczne stale nierdzewne

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

- Hartowanie i odpuszczanie w celu uzyskania struktury całkowicie martenzytycznej bez udziału węglików chromu.
- Aby uzyskać strukturę martenzytyczną, stal podgrzewa się do temperatury występowania jednofazowej struktury austenitycznej, powyżej linii przemiany Ac_3, zwykle ok. 900ºC, z uwzględnieniem zawartości węgla i chromu.
- Czas utrzymywania temperatury austenityzowania - musi być wystarczająco długi, aby umożliwić całkowite rozpuszczenie węglików chromu.

Zakres temperatury hartowania

%C	%Cr	%Ni	Ac_3 ºC	Temp. Hartowania ºC
≤ 0,1	11,5-13,50	≤ 1,0	920	950-1100
0,15-0,50	12,0-14,50	≤ 1,0	850-900	950-1100
0,60-1,20	14,0-18,00	≤ 1,0	830-860	1000-1050
≤ 0,22	12,0-18,00	1,5-6,0	800-900	950-1000

Martenzytyczne stale nierdzewne

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

- Szybkie chłodzenie do temperatury otoczenia
- Dla małych grubości przekrojów (powietrze) , dla grubości większych od 5 mm konieczne jest hartowanie w oleju.
- Jeżeli po chłodzeniu wciąż obserwuje się węgliki chromu oznacza to, że temperatura austenityzowania była za niska lub czas wygrzewania był zbyt krótki.
- W gatunkach wysokowęglowych do całkowitej przemiany austenitu w martenzyt może być konieczne wymrażanie w temp. -80 ºC.
- **Własności mechaniczne**

$R_{p0,2}$ MPa	• **450 - 650**
R_m MPa	• **650 - 1000**
A%	• **10 - 20**

- **Wyżarzanie odprężające**
- Polega na wygrzewaniu w temperaturze 150-300ºC przez kilka godzin.

Unikać wygrzewania w zakresie temp. 400-600ºC – Korozja międzykrystaliczna

Martenzytyczne stale nierdzewne

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

EN		ASTM	Temperatura, °C		$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A%
Znak	Numer		hartowania,	odpuszczania			
X12Cr13	1.4006	410	950 - 1000	680 - 780	450	650 - 850	15
X20Cr13	1.4021	420	950 - 1050	650 - 750	500	700 - 850	13
X39Cr13	1.4031	420	950 - 1050	650 - 700	650	800 - 1000	10
X3CrNiMo13-4	1.4313	CA- 6MN	950 - 1050	550 - 600	620	800 - 980	15
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	-	950 - 1050	590 - 620	550	760 - 960	16
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	-	950 - 1050	600 - 650	650	750 - 900	18

Zgodnie z normą: PN-EN 10088

Martenzytyczne stale nierdzewne

Zastosowania

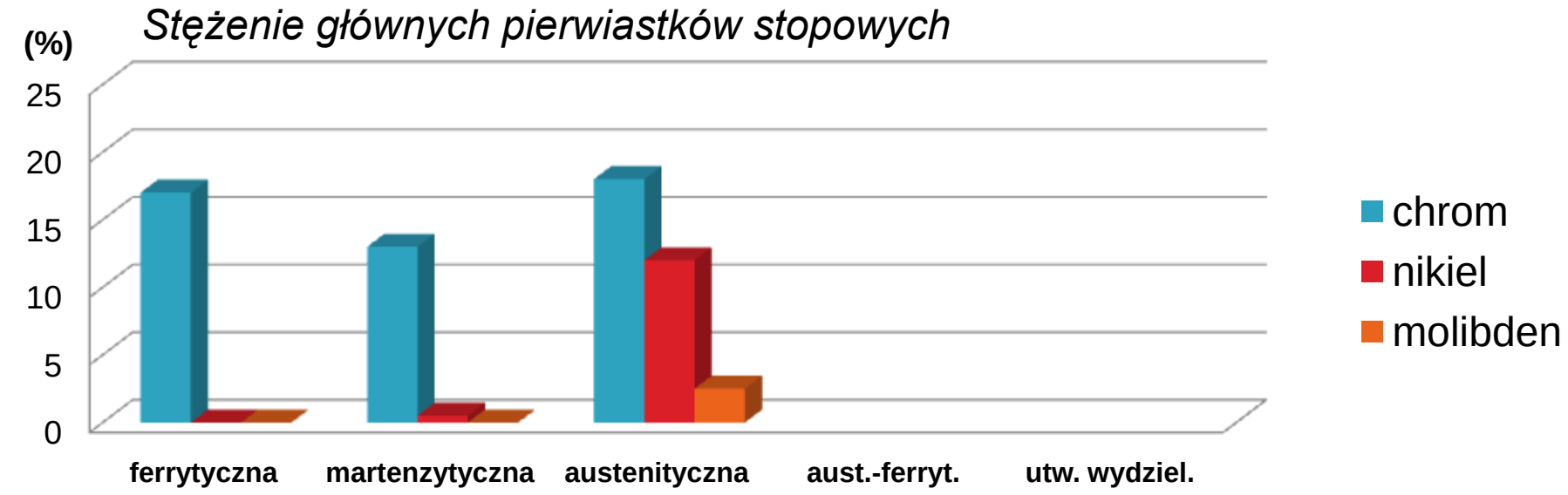
- Elementy o wymaganej wysokiej wytrzymałości i twardości: ostrza noży, narzędzia chirurgiczne, elementy złączne, trzpienie, dysze, wały, wirniki oraz sprężyny.

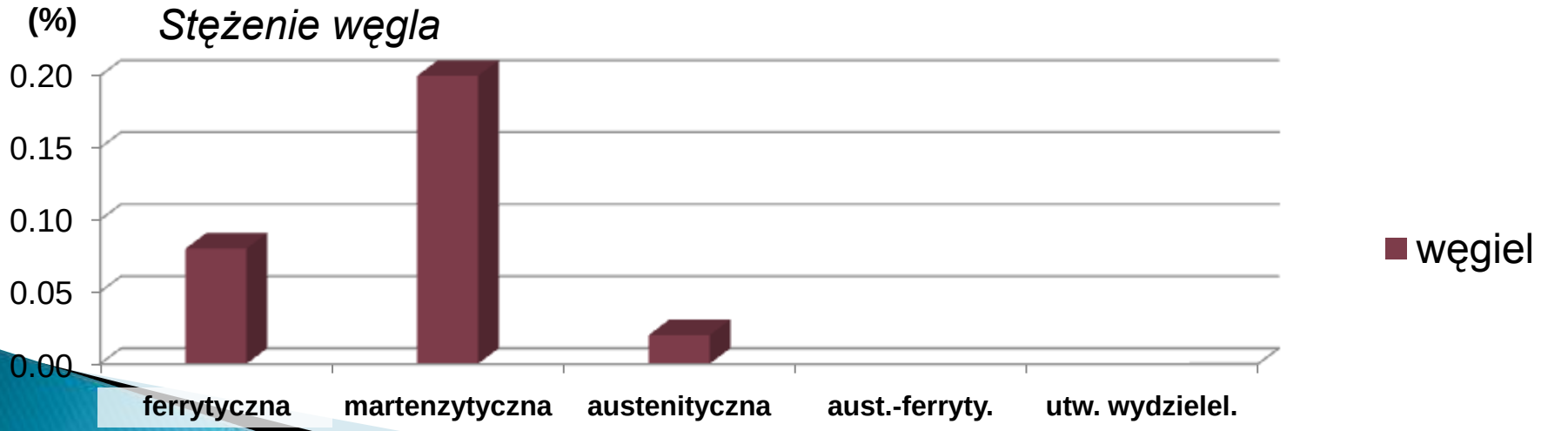
Austenityczne stale nierdzewne

- Nikiel konieczny do uzyskania struktury austenitycznej
- Nikiel może być częściowo zastąpiony przez Mn i N

- Austenityczne stale nierdzewne
- Standardowe gatunki stali austenitycznych
  - Stale Cr-Ni, Cr-Ni-Mo (Stale serii 300 wg AISI)
  - Stale Cr-Ni-Mn (Stale serii 200 wg AISI)
- Wysokostopowe gatunki stali austenitycznych (super austenityczne) – wysokie stężenie Cr, Mo, N (1.4539, 1.4547, 1.4652)
  - Stale o wysokiej odporności korozyjnej
- Stale żaroodporne / żarowytrzymałe

Austenityczne stale nierdzewne





Austenityczne stale nierdzewne Cr-Ni-Mo (Mn)

Skład chemiczny austenitycznych stali nierdzewnych

EN Numer	ASTM	Skład chemiczny, %						
		C	Cr	Ni	Mo	Mn	N	Inne
1.4310	301	0,15	16,0	6	-	-	-	-
1.4318	301LN	0,03	16,5	6	-	-	0,10	-
1.4372	201	0,15	16,0	3,5	-	5,5	0,05	-
1.4301	304	0,07	17,5	9,0	-	-	-	-
1.4541	321	0,09	17,0	9,0			-	Ti
1.4401	316	0,07	16,5	10,0	2	-	-	-
1.4571	316Ti	0,09	16,5	10,5	2	-	-	Ti
1.4539	904L	0,02	19,0	24,0	4	-	-	1,2Cu
1.4547	S31254	0,02	19,5	17,5	6	-	0,18	0,5Cu
1.4565	S34565	0,03	25,0	16,0	4		0,30	5Mn

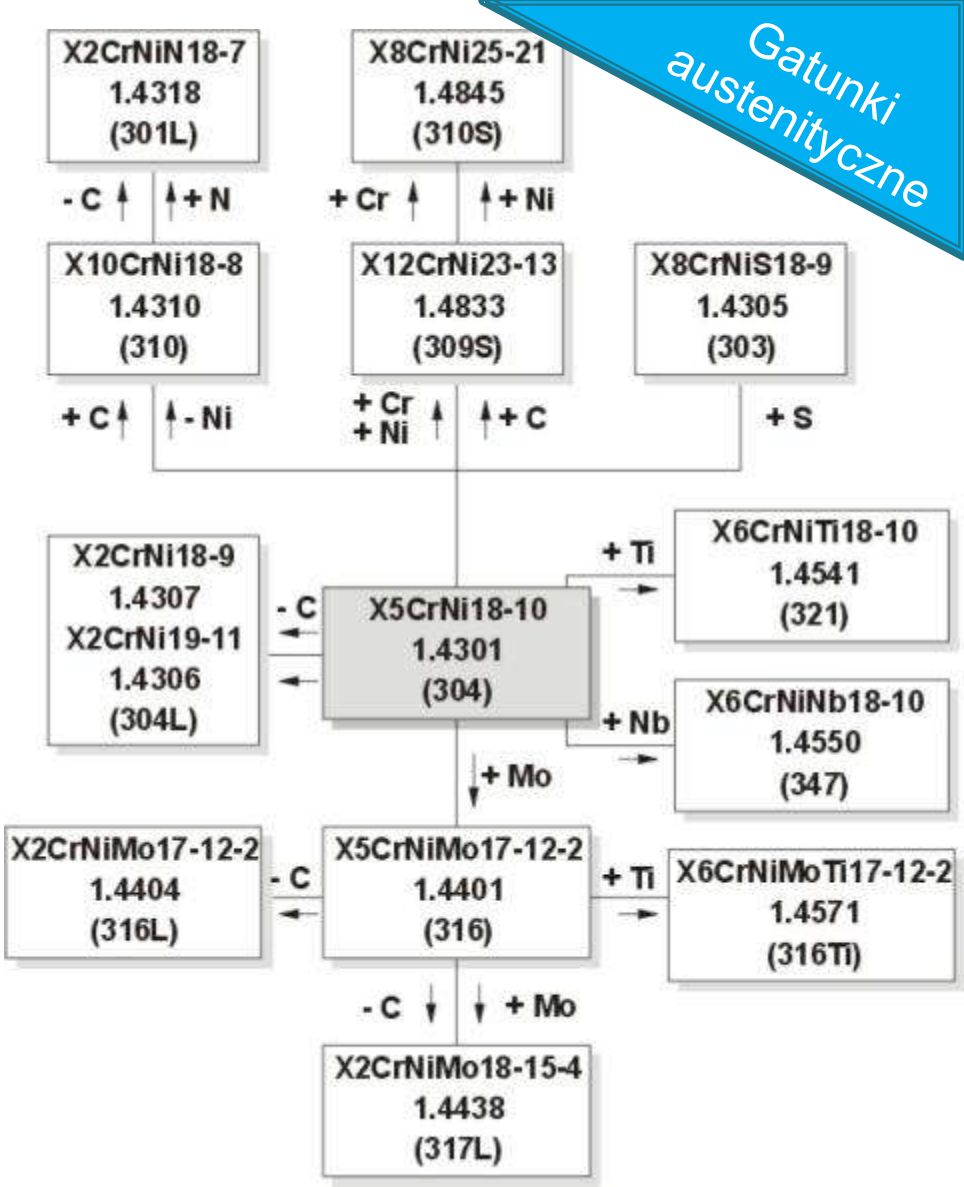
Austenityczne metastabilne

Austenityczne (śladowy udział ferrytu)

Całkowicie austenityczne Super-austenityczne

Stale austenityczne (Cr-Ni-Mo)

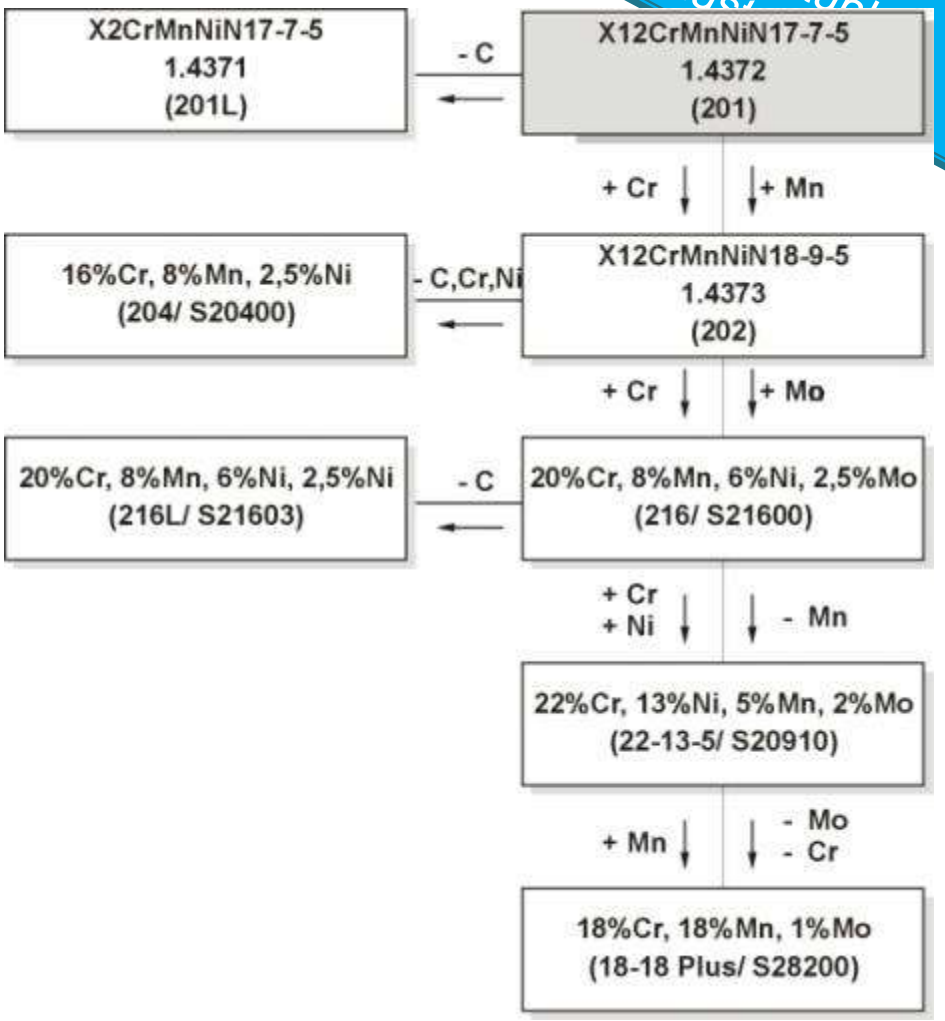
- Bardzo dobra odporność korozyjna
- Znakomita ciągliwość
- Znakomita podatność na kształtowanie (obr. plast.)
- Znakomita udarność
- Świetna spawalność
- Niemagnetyczne
- Umacniane przez przeróbkę plastyczną na zimno do wysokiej wytrzymałości
- Szeroki zakres temp. pracy
- Dostateczna wytrzymałość
- Podatność na korozję naprężeniową



Główne gatunki Cr-Ni-Mo austenitycznych stali nierdzewnych pochodne od gatunku X5CrNi18-10 (AISI 304)

Stale austenityczne (Cr-Mn-Ni)

- Dostateczna odporność korozyjna
- Znakomita ciągliwość
- Dobra podatność na kształtowanie (obr. plast.)
- Znakomita udarność
- Dobra spawalność
- Niemagnetyczne
- Dostateczna wytrzymałość
- Podatność na korozję naprężeniową



Główne gatunki Cr-Mn-Ni austenitycznych stali nierdzewnych pochodne od gatunku X12CrMnNi17-7-5 (AISI 201)

Austenityczne stale nierdzewne Cr-Ni-Mo (Mn)

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

- Struktura austenitu bez węglików i faz międzymetalicznych w wyniku przesycania w wodzie z zakresu temperatury **1000 - 1200°C** (chłodzenie na powietrzu lub w wodzie) . Czas wygrzewania 1-3min./mm grubości).

Unikać wygrzewania w zakresie temp. 500-800ºC – Korozja międzykrystaliczna

- **Własności mechaniczne**

$R_{p0,2}$ MPa	• **200 - 360**
R_m MPa	• **600 - 800**
A%	• **35 - 50**

- **Wyżarzanie odprężające**
- długotrwałe wygrzewanie (10-20 min./mm) w temp. 200 - 400ºC i powolne chłodzenie
- dla gatunków stali, które nie ulegają korozji międzykrystalicznej - krótkotrwałe wygrzewanie (ok. 3 min./mm), w temp. ok. 850ºC.

Austenityczne stale nierdzewne Cr-Ni-Mo (Mn)

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

EN	ASTM	Temperatura przesycania, ^{o}C	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A%
1.4310	301	1000 - 1100	195	500 - 750	40
1.4318	301LN	1020 - 1100	350	650 - 830	45
1.4372	201	1000 - 1100	230	750 - 950	40
1.4301	304	1000 - 1100	190	500 - 700	45
1.4541	321	1020 - 1120	190	500 - 700	40
1.4401	316	1020 - 1120	200	500 - 700	40
1.4571	316Ti	1020 - 1120	200	500 - 700	40
1.4539	904L	1050 - 1150	230	530 - 730	35
1.4547	S31254	1140 - 1200	300	650 - 850	35
1.4565	S34565	1120 - 1170	420	800 - 950	35

Zgodnie z normą: PN-EN 10088

Austenityczne stale nierdzewne

Zastosowania

- Elementy wyposażenia kuchennego - garnki, miski, widelce, itd..
- Zastosowania budowlane, okucia, elementy elewacji, balustrady
- Meble gastronomiczne, przemysł spożywczy, obróbka pożywienia w tym mięsa, wina, piwa
- Środki transportu, zbiorniki okrętowe do magazynowania skroplonych gazów (LNG)
- Zbiorniki i urządzenia procesowe dla przemysłu chemicznego, petrochemicznego, naftowego, wydobywczego i celulozowo-papierniczego.

Ograniczenia

- Nadają się do zastosowania w środowisku kwasów redukcyjnych o niskim stężeniu lub mieszanin redukujących kwasów w niskiej temperaturze – dla agresywniejszych środowisk stale super-austenityczne.
- Jony halogenkowe (chlorki, bromki, jodki) - korozja wżerowa, szczelinowa, naprężeniowa

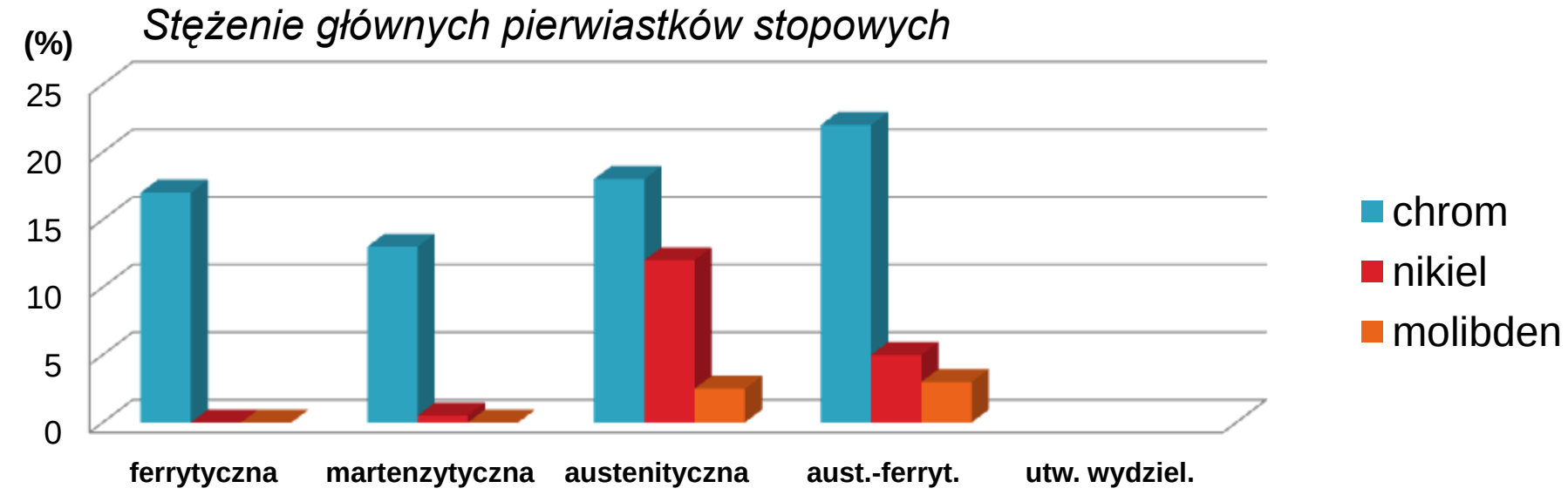
Stale austenityczno – ferrytyczne (duplex)

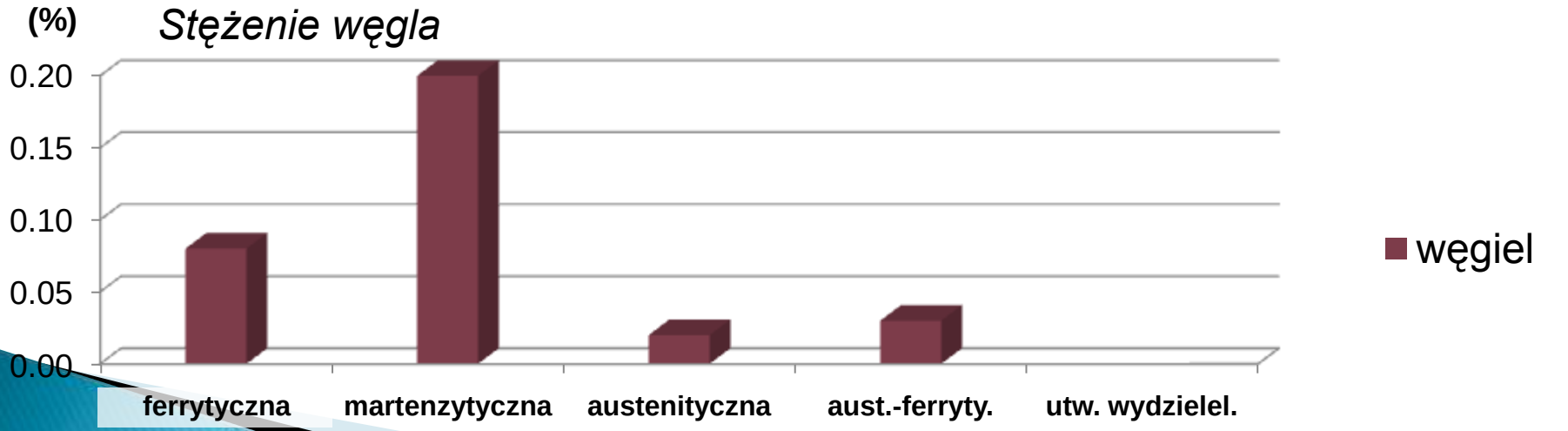
- Połączenie własności stali austenitycznych i ferrytycznych
- Kombinacja wysokiej wytrzymałości i odporności korozyjnej
- Faza austenityczna – ciągliwość, udarność, odporność korozyjna,
- Faza ferrytyczna – wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności i twardość. Udział ferryty od 30 do 50%

- Stale ferrytyczno - austenityczne (typu duplex)
- Stale „Lean Duplex” – (Cr-Mn-Ni)
- Standardowe gatunki (22%Cr)
- Wysokostopowe - Super-duplex – Cr powyżej 24%, Mo, N

- W normach ASTM gatunki ferrytyczno - austenityczne stali nierdzewnych są sklasyfikowane w grupie 300.

Stale austenityczno – ferrytyczne (duplex)





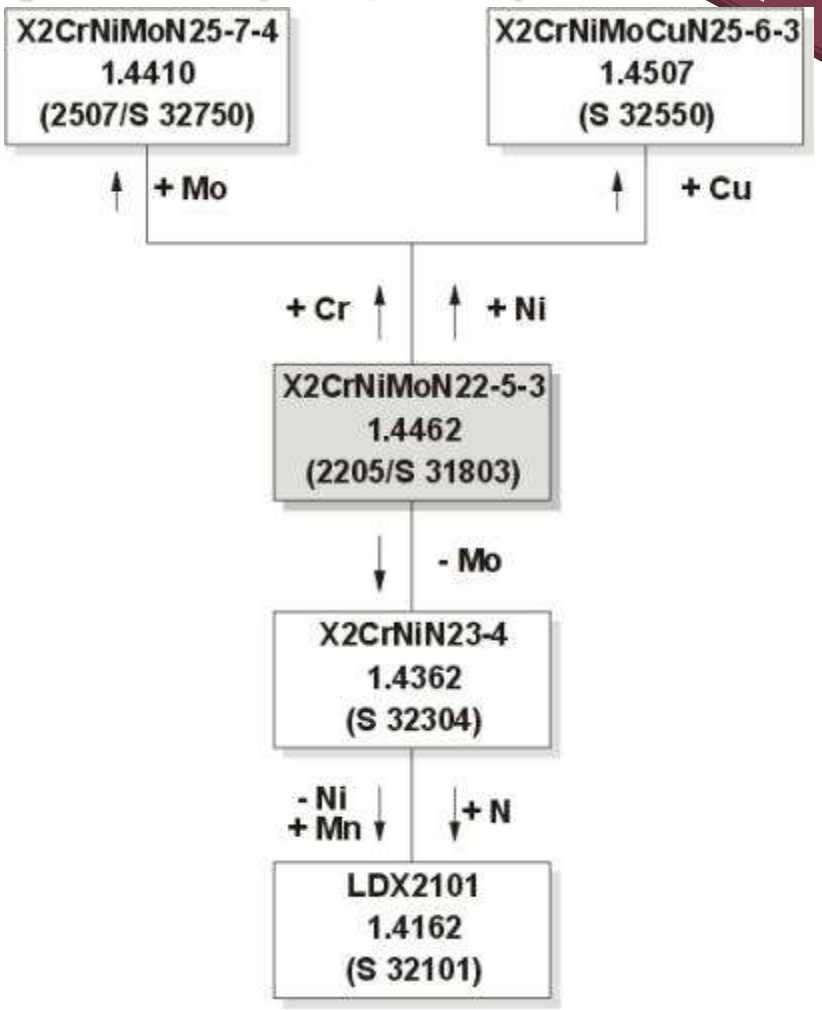
Stale austenityczno – ferrytyczne (duplex)

Skład chemiczny austenityczno – ferrytycznych stali nierdzewnych

EN		ASTM / UNS	Skład chemiczny, %						
Znak	Numer		C	Cr	Ni	Mo	N	Inne	
X2CrMnNiN22-5-2	1.4162	S32101	0,03	21,5	1,5	-	0,2	Mn5	Lean Duplex
X2CrNiN23-4	1.4362	2304	0,03	23	4,5	0,3	0,1	Cu	22%Cr
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	2205 / S 31803	0,03	22	5,5	3,0	0,2	-	
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	255 / S 43940	0,03	25	7,0	3,5	0,2	Cu, W	Super-Duplex (24%Cr)
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	329 / S 3290	0,03	27	5,5	1,5	0,1		
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	2507 / S 32750	0,03	25	7,0	4,0	0,3	-	

Stale austenityczno – ferrytyczne (duplex)

- Dobra lub znakomita odporność korozyjna
- Wysoka wytrzymałość
- Odporność na korozję naprężeniową
- Dobra udarność
- Dobra spawalność
- Dobra ciągliwość
- Umiarkowana podatność na kształtowanie (obr. plast.)



Główne gatunki ferrytyczno-austenitycznych (duplex) stali nierdzewnych pochodne od gatunku X2CrNiMoN22-5-3 (2205).

Stale austenityczno – ferrytyczne (duplex)

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

- Stabilną strukturę dwufazową ferrytyczno-austenityczną uzyskuje się po przesycaniu stali w wodzie w zakresie temperatury **od 950 do 1120°C.**
- Wolniejsze chłodzenie z temperatury przesycania, np. na powietrzu, umożliwia zwiększenie udziału austenitu w strukturze stali i w efekcie polepszenie własności plastycznych
- **Własności mechaniczne**

$R_{p0,2}$ MPa	• **400 - 530**
R_m MPa	• **600 - 930**
A%	• **20 - 30**

- Przesycanie – struktura:
- 50% austenitu 50% ferrytu, bez obecności faz wtórnych oraz innych wydzieleń.

Szybkie chłodzenie w zakresie temperatury 300-1050ºC
- kruchość 475ºC
- faza sigma

Stale austenityczno – ferrytyczne (duplex)

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

EN		ASTM / UNS	Temperatura przesycania, ^{o}C	$R_{p0,2}$MPa	R_m MPa	A%
Znak	Numer					
X2CrMnNiN22-5-2	1.4162	S32101	1020 - 1080 w,p	450	650 - 800	30
X2CrNiN23-4	1.4362	2304	950 - 1050 w,p	400	600 - 830	25
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	2205 / S 31803	1020 - 1100 w,p	450	650 - 880	25
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	255 / S 43940	1040 - 1120 w	500	700 - 900	25
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	329 / S 3290	1020 - 1100 w,p	450	620 - 880	20
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	2507 / S 32750	1040 - 1120 w	530	730 - 930	25

Zgodnie z normą: PN-EN 10088

Stale austenityczno – ferrytyczne (duplex)

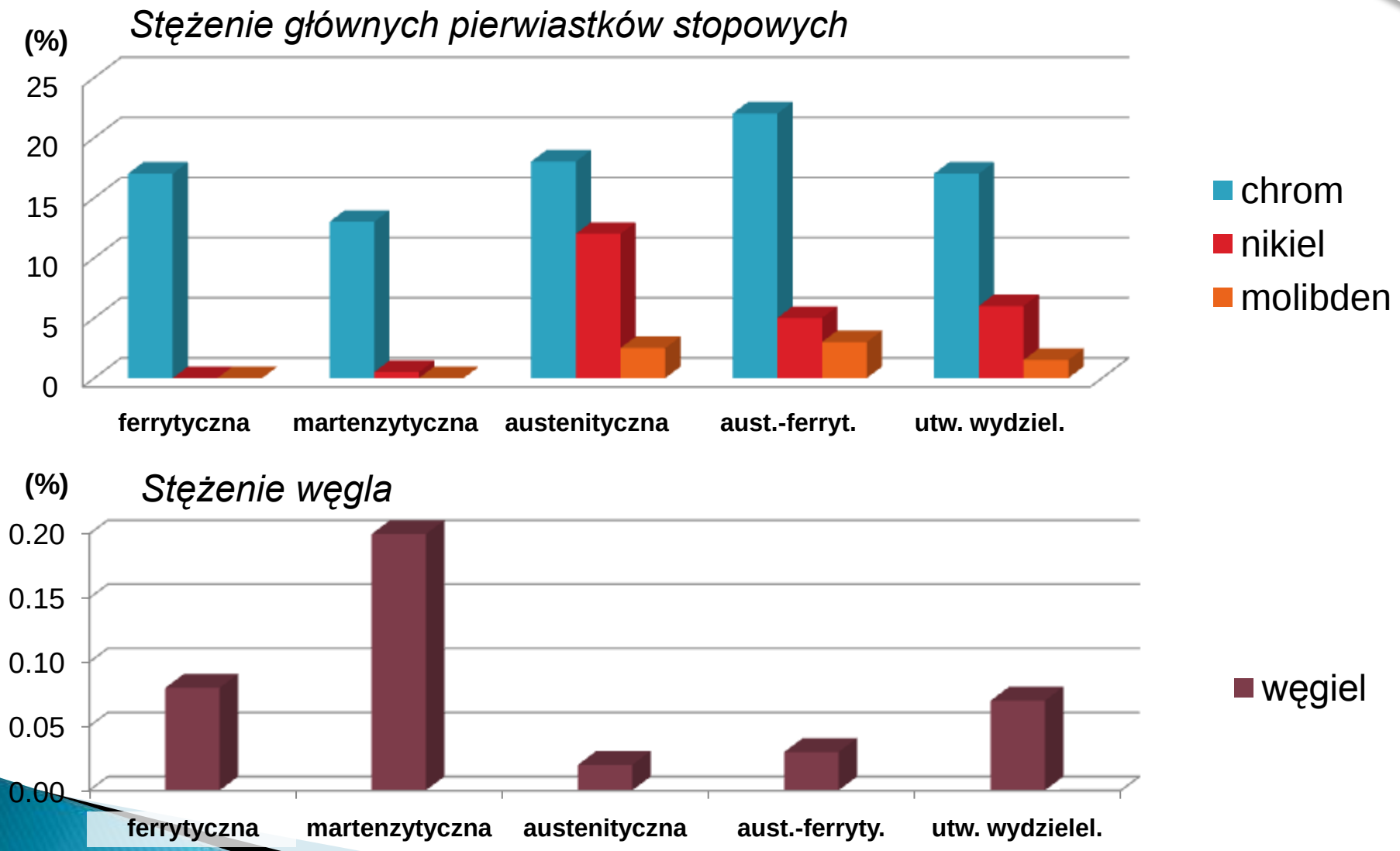
Zastosowania

- Przemysł stoczniowy - chemikaliowce,
- Elementy i urządzenia pracujące w środowisku wody morskiej, pomp i zaworów na platformach wiertniczych, instalacje odsalania,
- Elementy wymienników ciepła,
- Zbiorniki dla przemysłu celulozowo-papierniczego, urządzeń transportu bliskiego materiałów,
- Przemysł spożywczy – przetwórstwo wysoko solonych produktów spożywczych takich jak sos pomidorowy i sojowy.

Stale utwardzane wydzieleniowo

- W zależności od struktury stali po przesycaniu wyróżnia się trzy typy stali utwardzanych wydzieleniowo:
- Martenzytyczne
- Pół-austenityczne
- Austenityczne
- Stale martenzytyczne umacniane wydzieleniowo osiągają wytrzymałość na rozciąganie nawet do 1550MPa.
- Stale martenzytyczne umacniane wydzieleniowo charakteryzują się wyższymi własnościami wytrzymałościowymi w porównaniu do stali o strukturze martenzytu odpuszczonego umacnianego tylko wydzieleniami węglików - martenzytyczne stale nierdzewne.
    - W normach ASTM martenzytyczne gatunki stali nierdzewnych są sklasyfikowane w grupie 600.

Stale utwardzane wydzieleniowo



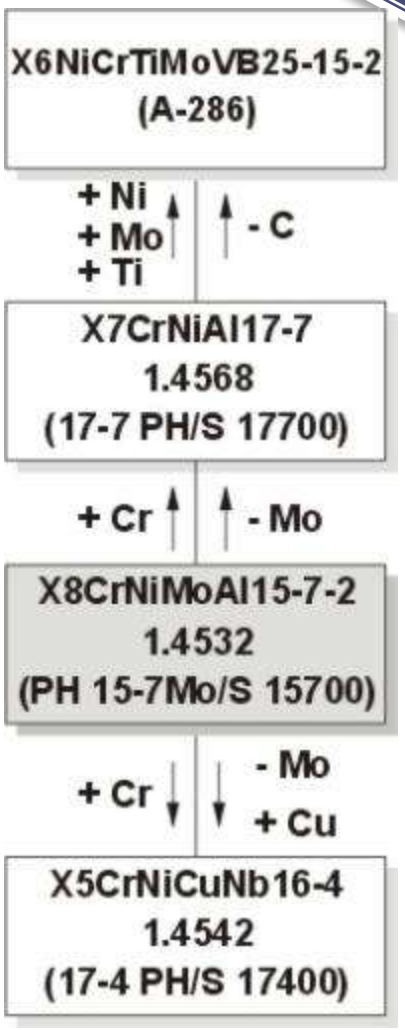
Stale utwardzane wydzieleniowo

Skład chemiczny utwardzanych wydzieleniowo stali nierdzewnych

EN		ASTM	Skład chemiczny, %					
Znak	Numer		C	Cr	Ni	Mo	Inne	
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	630	0,07	16,0	4,0	0,6	4,0 Cu 0,3 Nb	Martenzytyczne
X7CrNiAl17-7	1.4568	631	0,09	17,0	7,0	-	1,0 Al	Pół-austenityczne (F)
X1CrNiMoAlTi12-10-2	1.4596	-	0,015	12,0	10,0	2,0	1,0 Al, Ti, N	
X5NiCrTiMoVB25-15-2	1.4606	-	0,08	15,0	25,0	1,0	2,0 Ti 0,3 Al B, N	Austenityczne

Stale utwardzane wydzieleniowo

- Dostateczna odporność korozyjna
- Wysoka wytrzymałość
- Niska odporność na korozję naprężeniową
- Niska ciągliwość
- Niska podatność na kształtowanie (obr. plast.)
- Niska udarność
- Niska spawalność



Główne gatunki utwardzanych wydzieleniowo stali nierdzewnych pochodne od gatunku X8CrNiMoAl15-7-2 (PH 15-7)

Stale utwardzane wydzieleniowo

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

- Obróbka cieplna stali tej grupy polega na hartowaniu i odpuszczaniu.
- Dla niektórych gatunków stosuje się wymrażanie w celu wymuszenia przemiany martenzytycznej.
- Umacniają się podczas odpuszczania przez fazy międzymetaliczne np. Ni_3Al, Ni_3Ti, Ni_3Nb, Ni_3Cu, także azotki Cr_2N i Mo_2N, fazy Lavesa (AB_2) i częściowo także przez węgliki – utwardzenie i wzrost wytrzymałości stali.
- **Własności mechaniczne**

$R_{p0,2}$ MPa	• **550 - 1300**
R_m MPa	• **880 - 1550**
A%	• **10 - 20**

- Przesycanie 800-1050ºC / w, p
  Celem jest rozpuszczenie wszystkich wydzielonych faz, jakie mogą występować w strukturze i następne szybkie chłodzenie
- Utwardzanie wydzieleniowe (starzenie) 530-620ºC 4h / p
  Celem jest utworzenie drobnodyspersyjnych wydzieleń z przesyconego roztworu.

Stale utwardzane wydzieleniowo

Obróbka cieplna i własności mechaniczne

EN		ASTM	Temperatura, °C		$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A%
Znak	Numer		przesycania	utwardz. wydziel.			
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	630	1030 - 1050 o,p	4 h 620/ p	720	930 - 1100	16
X7CrNiAl17-7	1.4568	631	1030 - 1050 w,p	-	-	max. 850	
X1CrNiMoAlTi12-10-2	1.4596	-	820 - 860 o,p	4 h ≥ 530 / p	1300	min. 1400	9
X5NiCrTiMoVB25-15-2	1.4606		970 - 990 w,o	16 h 720 / p	550	880 - 1150	20
w – woda, p – powietrze, o - olej							

Stale utwardzane wydzieleniowo

Zastosowania

- Wysokowytrzymałe wały pomp oraz trzpienie obrotowe zaworów.
- Elementy o wysokich wymaganiach technicznych w przemyśle lotniczym elementy podwozia samolotów, przemysł zbrojeniowy

Stale żaroodporne - żarowytrzymałe

Żaroodporność - odporność na działanie agresywnych czynników chemicznych w temp. wyższej niż 550°C - tworzenie zgorzeliny.

- Wymagania te spełniają niskowęglowe stale o jednofazowej strukturze ferrytu lub austenitu, o dużym stężeniu Cr i Ni oraz 3% Si i 2,5%Al.
- Konwencjonalne gatunki 18%Cr 8%Ni stosowane do ok. 600ºC oraz w wyższej, jeżeli jedynym wymaganiem jest żaroodporność.
- Stale austenityczne Cr –Ni - wyższa stabilność strukturalna w wysokiej temperaturze,

Żarowytrzymałość- zdolność do wytrzymywania obciążeń mechanicznych w wysokiej temperaturze - powyżej 550°C - odporność na pełzanie.

- Stale austenityczne – Cr i Ni oraz dodatki Mo, W, V, Co, Ti, Cr i Si.
- Zwiększenie żarowytrzymałości - umocnienie zgniotowe, utwardzanie wydzieleniowe
- Dodatki pierwiastków silnie węglikotwórczych - Ti, Nb lub Ce (utworzenie twardych węglików lub węglikoazotków.)

Stale żaroodporne - żarowytrzymałe

Skład chemiczny wybranych stali żaroodpornych i żarowytrzymałych

EN		ASTM / UNS	Skład chemiczny, %						Żaro-odporność w powietrzu, °C
Znak	Numer		C	Cr	Ni	Si	Al	Inne	
Stale ferrytyczne									
X10CrAlSi13	1.4724	-	0,12	13	-	1,0	1,0		850
X10CrAlSi18	1.4742	-	0,12	18	-	1,0	1,0		1000
X10CrAlSi25	1.4762	446 S44600	0,12	25	-	1,0	1,5		1150
Stale austenityczne									
X8CrNiTi18-10	1.4878	321H S32109	0,10	18	10	1,0	-	Ti	850
X9CrNiSiNCe21-11-2	1.4835	253MA S30815	0,09	21	11	2,0	-	Ce, N	1150
X15CrNiSi25-21	1.4841	310 S31000	0,2	25	21	2,0	-	N	1150

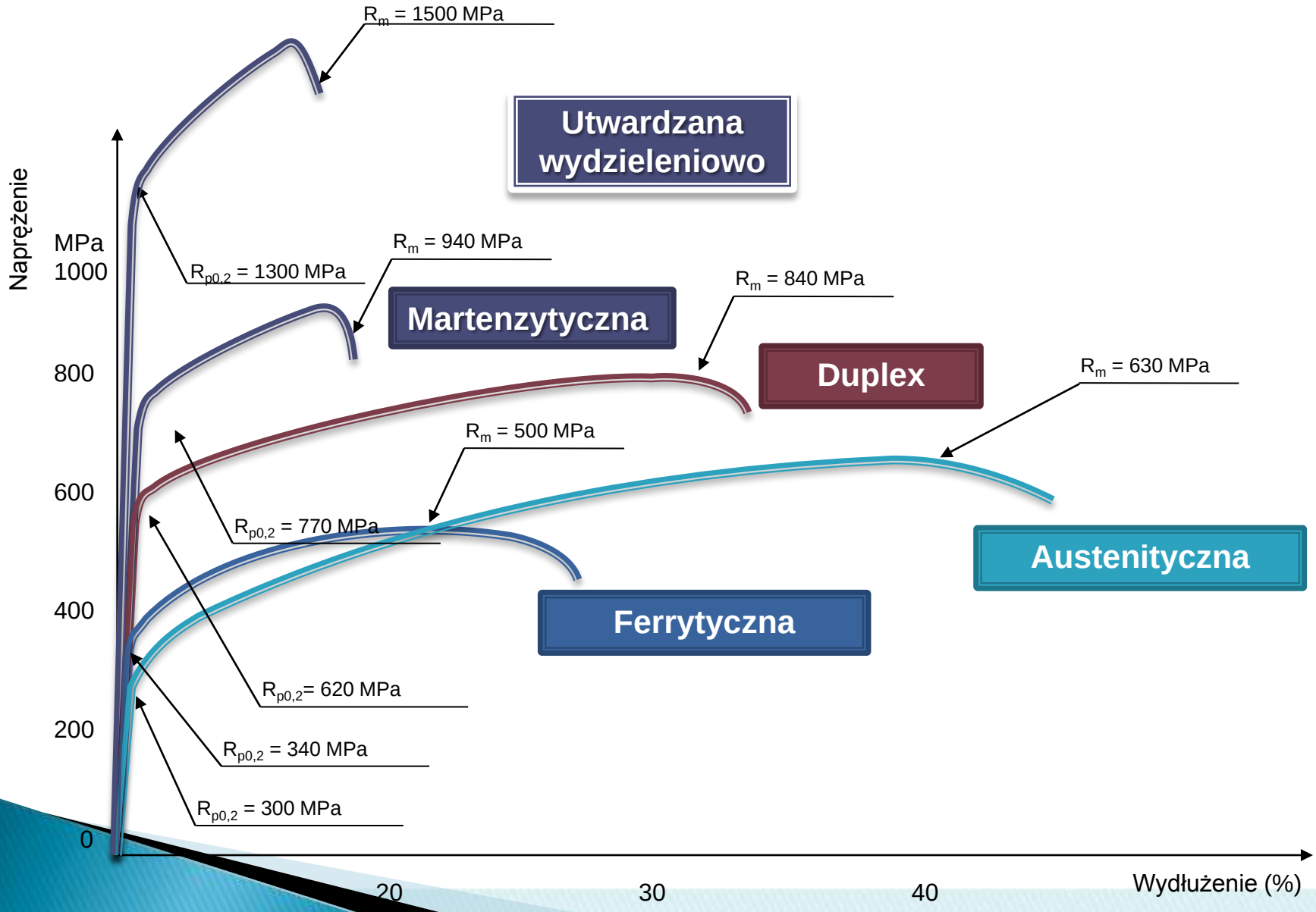
PN-EN 10088 - Stale odporne na korozję,
PN-EN 10095 - Stale i stopy niklu żaroodporne

Stale żaroodporne

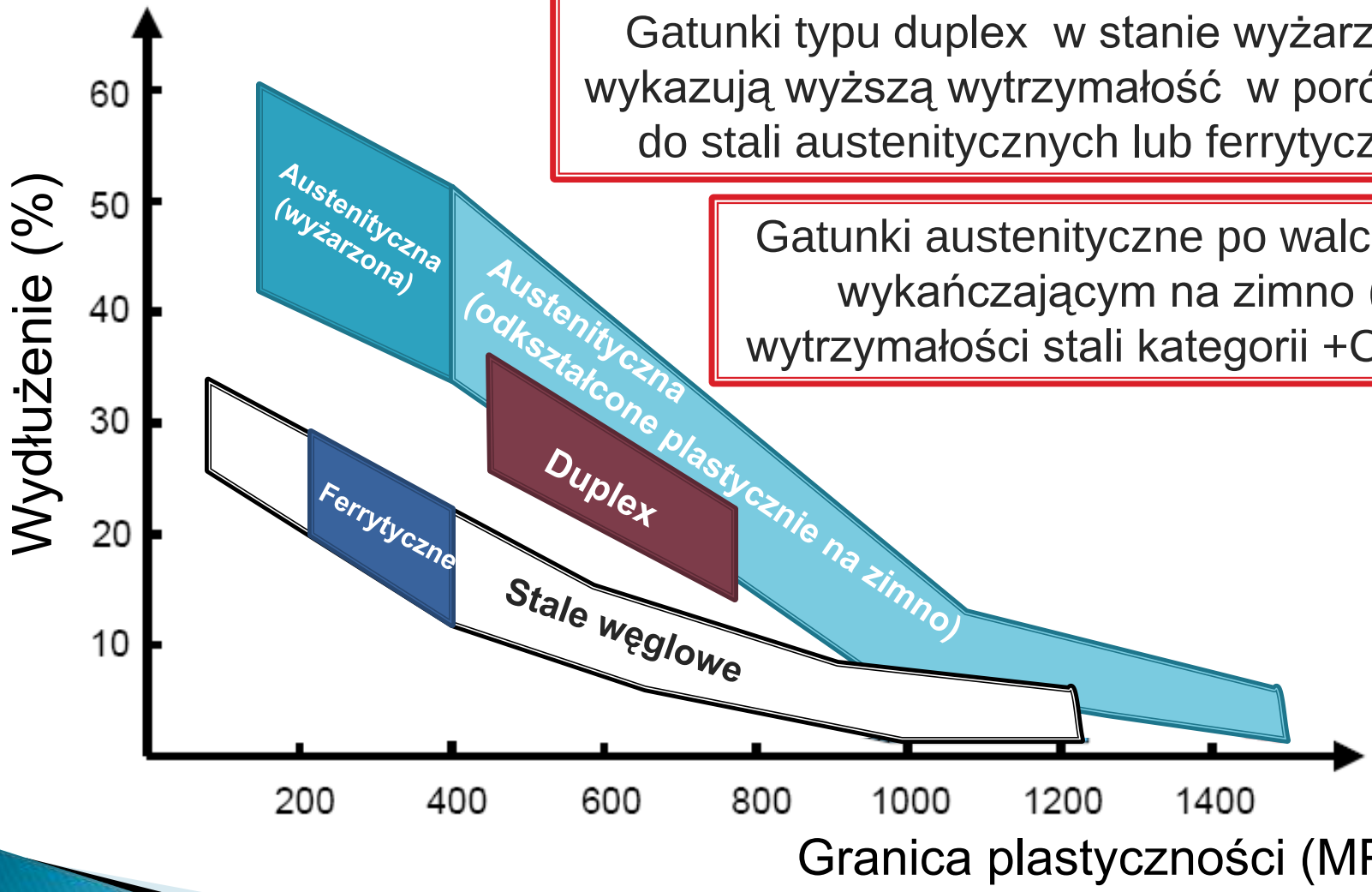
Ograniczenia

- Podczas spawania lub użytkowania w wysokiej temperaturze – posiadają strukturę jakby w stanie uwrażliwionym - (obecność wydzieleń węglików chromu), ale nie wpływa to na ich własności w takich warunkach pracy, lecz znacznie obniża odporność na korozję w roztworach wodnych.
- Należy brać to pod uwagę podczas czasowego wyłączania instalacji wykonanych z tych stali, podczas którego mogą wystąpić kondensaty zanieczyszczone przez chlorki lub inne związki chemiczne – ich obecność może spowodować przyśpieszoną korozję stali.

Porównanie własności mechanicznych



Porównanie własności mechanicznych



Gatunki typu duplex w stanie wyżarzonym wykazują wyższą wytrzymałość w porównaniu do stali austenitycznych lub ferrytycznych

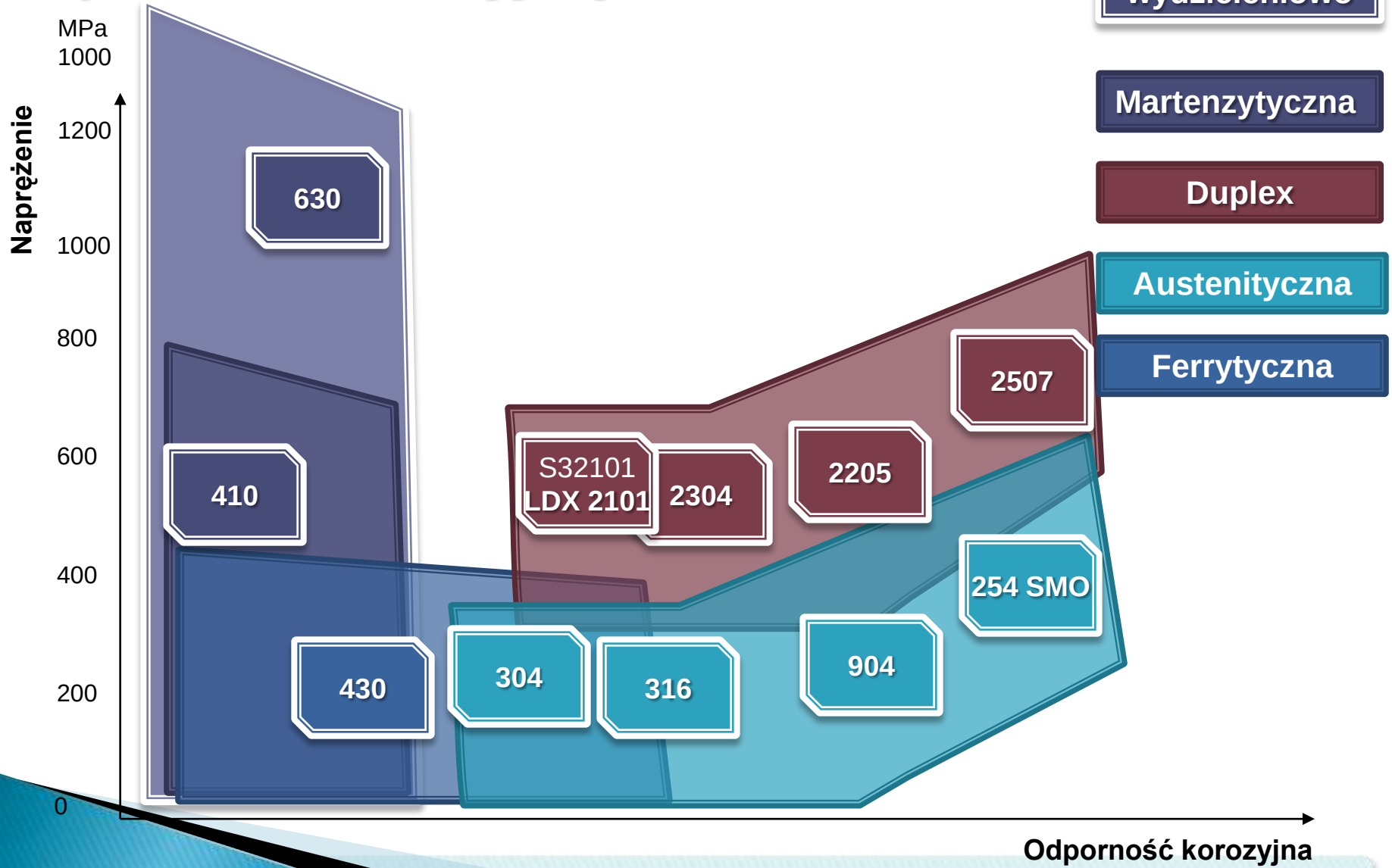
Gatunki austenityczne po walcowaniu wykańczającym na zimno (do wytrzymałości stali kategorii +CP1100)

Porównanie własności stali nierdzewnych

Typ stali	Magnetyczność	Odporność korozyjna	Ciągliwość	Utwardzenie	Umocnienie przez zgniot	Żaroodporność	Udarność	Spawalność
Austenityczna	NIE	↑↑	↑↑↑	Obr. plastyczna na zimno	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑
Duplex	TAK	↑↑↑	↑	-	↑	↓	↑	↑↑
Ferrytyczna	TAK	↑	↑	-	↑	↑↑	↓	↓
Martenzytyczna	TAK	↑	↓	Hartowanie + odpuszczanie	↑	↑	↓	↓
Utwardzana wydzieleniowo	TAK	↑	↑	Przesycanie+ starzenie	↑	↓	↓	↑↑

Wartość własności: ↑↑↑ - Bardzo wysoka, ↑↑ - wysoka, ↑ - średnia, ↓ -niska

Porównanie własności mechanicznych i odporności korozyjnej

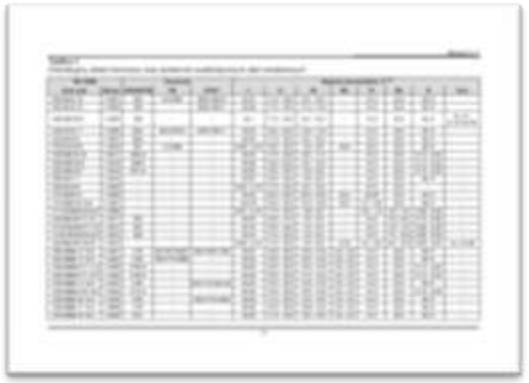


Porównanie własności fizycznych

Typ stali	Śr. współczynnik rozszerzalności cieplnej w temp. między 20°C - 200°C, $10^{-6} \times K^{-1}$	Przewodność cieplna w temp. 20°C, W/m x K	Jednostkowa pojemność cieplna w temp. 20°C, J/kg x K	Elektryczny opór właściwy w temp. 20°C, W x mm^2/m	Gęstość w temp. 20°C, kg/cm^3	Gatunek
Ferrytyczna	10,0	25	460	0,60	7,7	1.4016
Martenzytyczna	11,0	30	460	0,60	7,7	1.4006
Duplex	13,5	15	500	0,80	7,8	1.4462
Utwardzana wydzieleniowo	13,5	16	500	0,80	7,8	1.4568
Austenityczna	16,5	15	500	0,73	7,9	1.4301

Charakterystyka stali nierdzewnych

- Więcej informacji na stronie: **www.stalenierdzewne.pl**
- Tablice gatunków stali nierdzewnych



- Podatność stali nierdzewnych na przeróbkę plastyczną

Dziękuje za uwagę

Zbigniew.brytan@polsl.pl

Dr inż. Zbigniew Brytan