

Wykład 9 – Stopy żelaza

Grzegorz Karwasz

- Wg M. Blicharskiego, Wprowadzenie ...
i S. Prowansa, Struktura Stopów

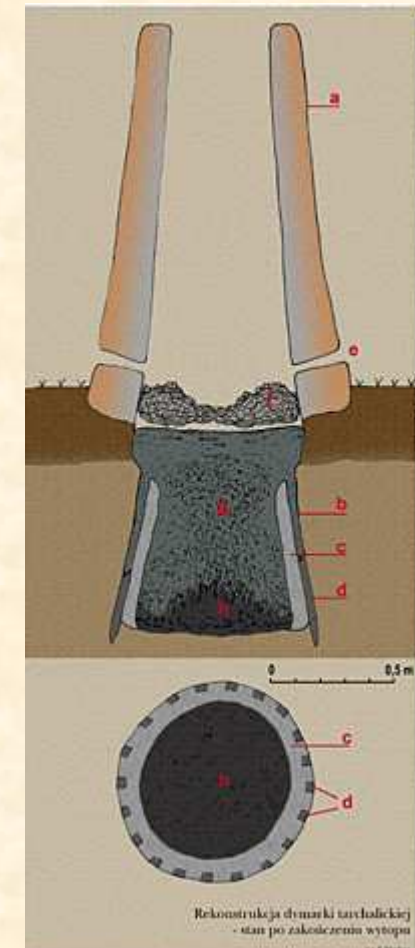
Historia

- Historia – dymarki, rudy żelaza



Wypalanie w dymarkach odbywało się przypuszczalnie w temperaturze około 1200°C i dawało „kęs” żelaza. Podlegał on dalszej obróbce termicznej, redukcji (?), przekuwaniu. Jaki był skład chemiczny tego „kęsa” i dalsza obróbka, tego nie wiemy

http://welniaczki.nazwa.pl/Wolow_eu-Dymarki/

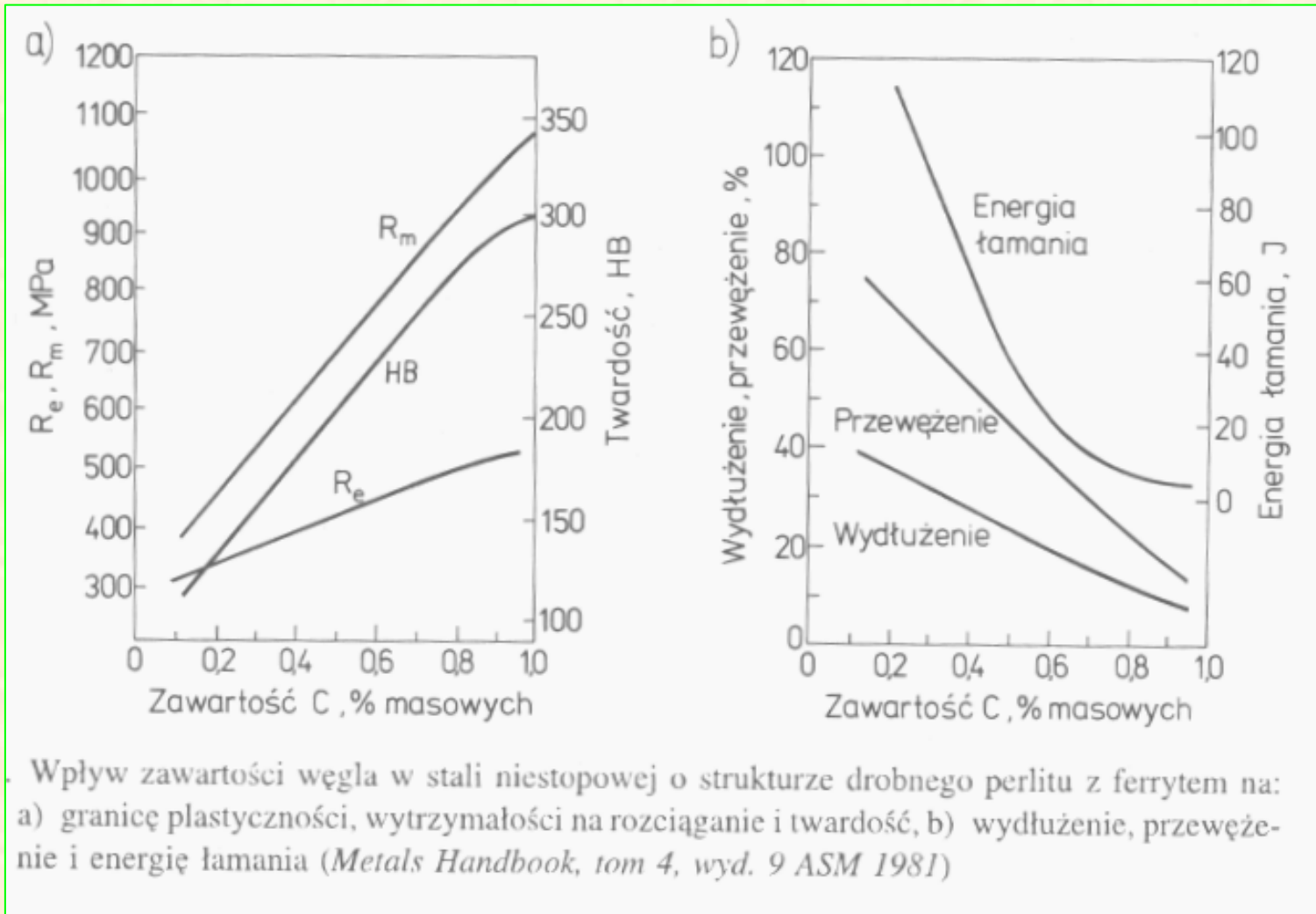


Węglik metali

Grupa Okres	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII A		
3	TiC	VC	Cr₂₃C₆ Cr₇C₃ Cr₃C₂ V₂C	Mn₂₃C₆ Mn₇C₃ Mn₃C	ε Fe₃C	[Co ₃ C]	[Ni ₃ C]
4	ZrC	NbC	Nb₂C Mo₂C MoC	Węgliki o sieci regularnej Węgliki o sieci heksagonalnej Węgliki o sieci rombowej [...] Węgliki niestabilne			
5	HfC	TaC	Ta₂C W₂C WC				

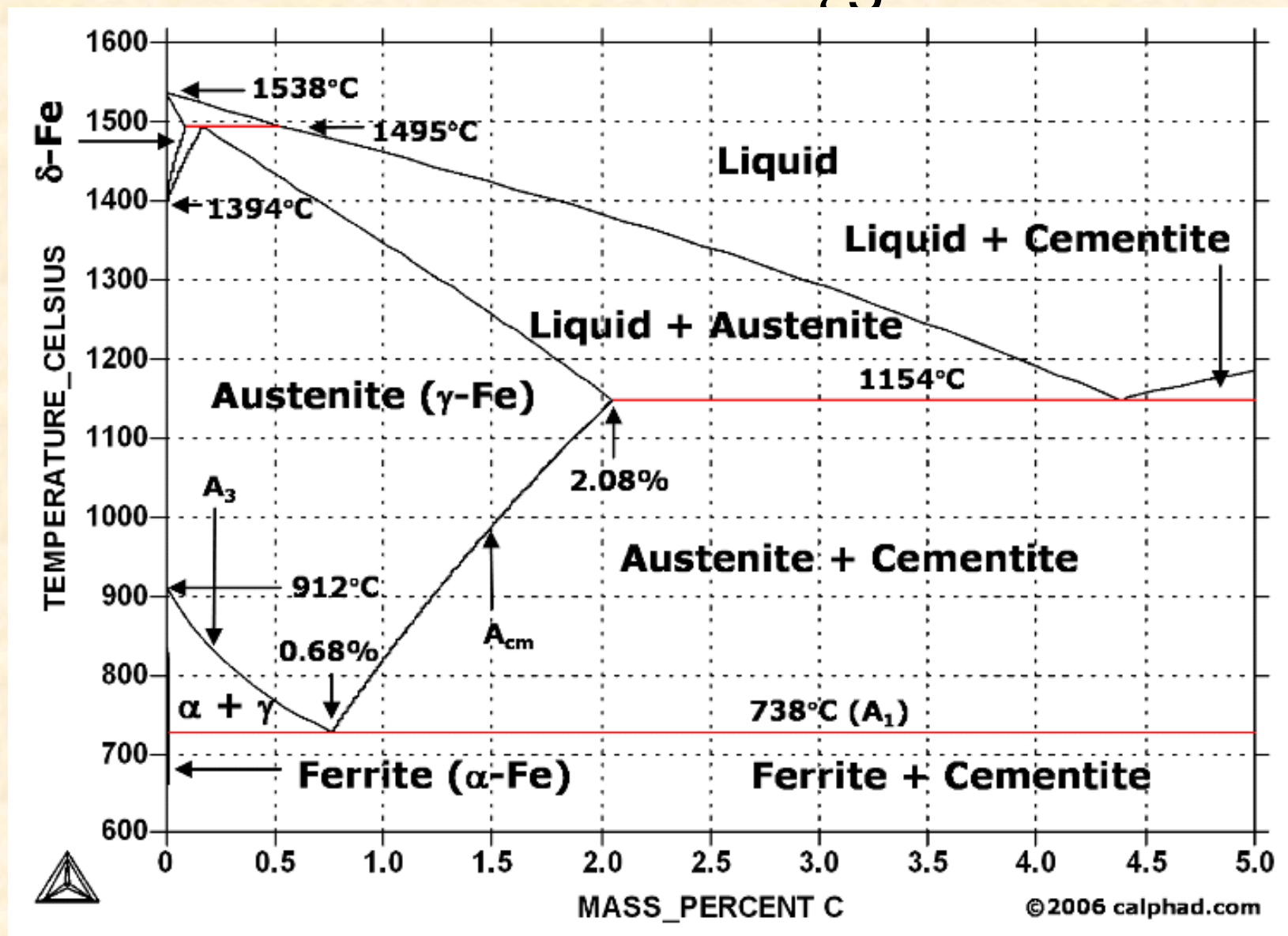
Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

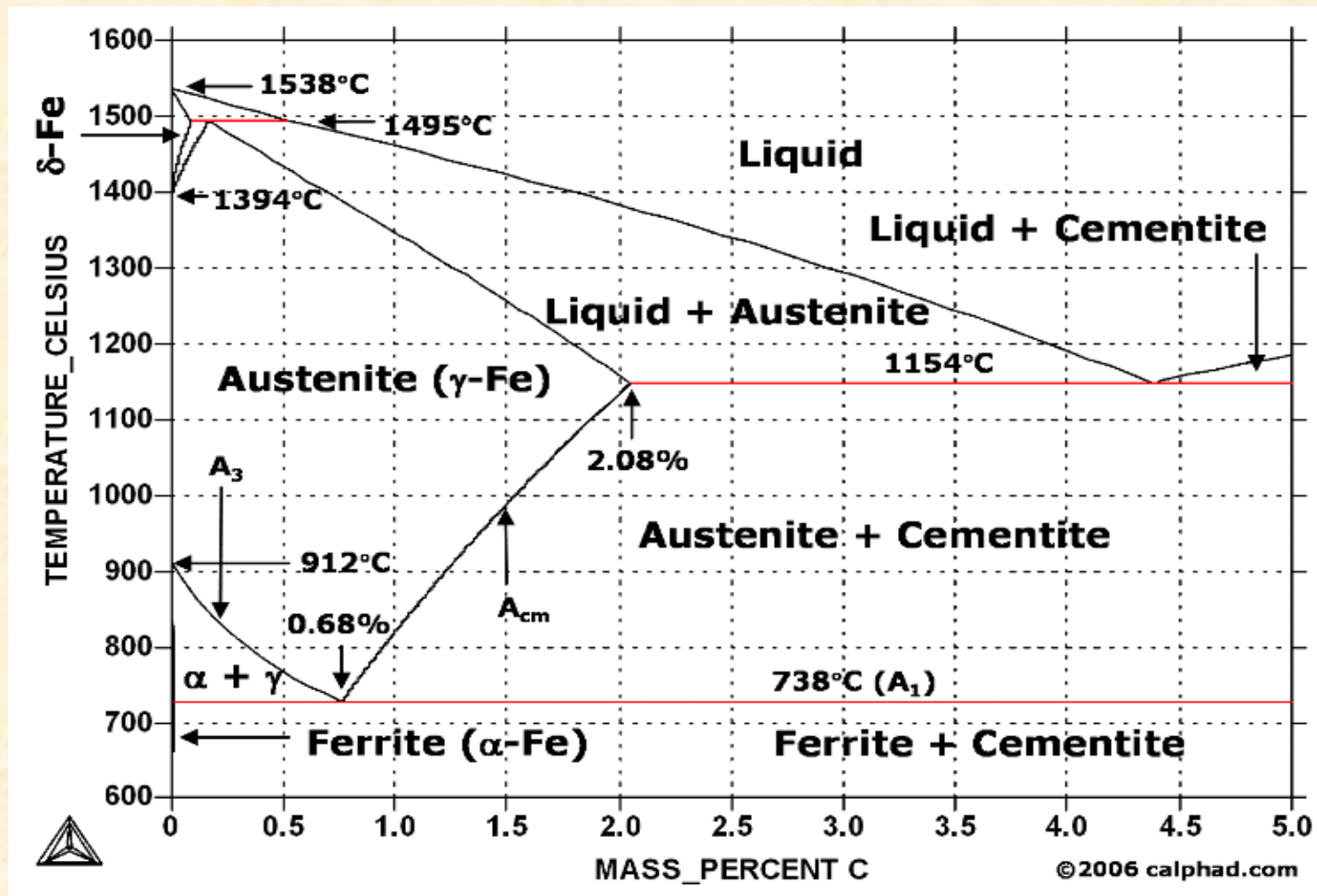
Węgliki metali



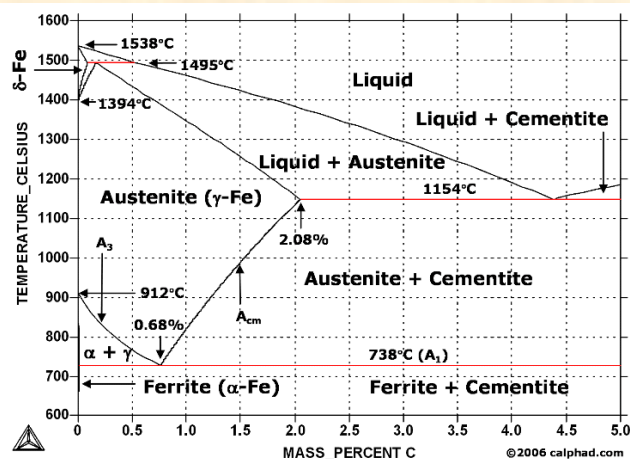
Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

Układ żelazo - węgiel





1. składniki: Fe ↔ Fe₃C (cementyt)
2. Żelazo „czyste”, tj. <0.008% (w 20°C) = **ferryt**, układ *regularny*, przestrzennie centrowany Fe-α; podobnie Fe-δ
3. dla 912°C < T < 1394°C **austenit** (do 2.11%C @ 1148 °C) układ *regularny*, ściennie centrowany Fe-γ



Charakterystyczne fazy

Ferryt ↔ Austenit

At the low-carbon end of the [metastable Fe-C phase diagram](http://www.calphad.com/iron-carbon.html), we distinguish **ferrite** (alpha-iron), which can at most dissolve 0.028 wt. % C at 738 °C, and **austenite** (gamma-iron), which can dissolve 2.08 wt. % C at 1154 °C.

The much larger phase field of **gamma-iron** (austenite) compared with that of **alpha-iron** (ferrite) indicates clearly the considerably greater solubility of carbon in gamma-iron (austenite), the maximum value being 2.08 wt. % at 1154 °C. The **hardening** of carbon steels, as well as many alloy steels, is based on this difference in the **solubility of carbon** in alpha-iron (ferrite) and gamma-iron (austenite).

Cementyt

At the carbon-rich side of the metastable Fe-C phase diagram we find **cementite** (Fe_3C). Of less interest, except for highly alloyed steels, is the **delta-ferrite** at the highest temperatures.

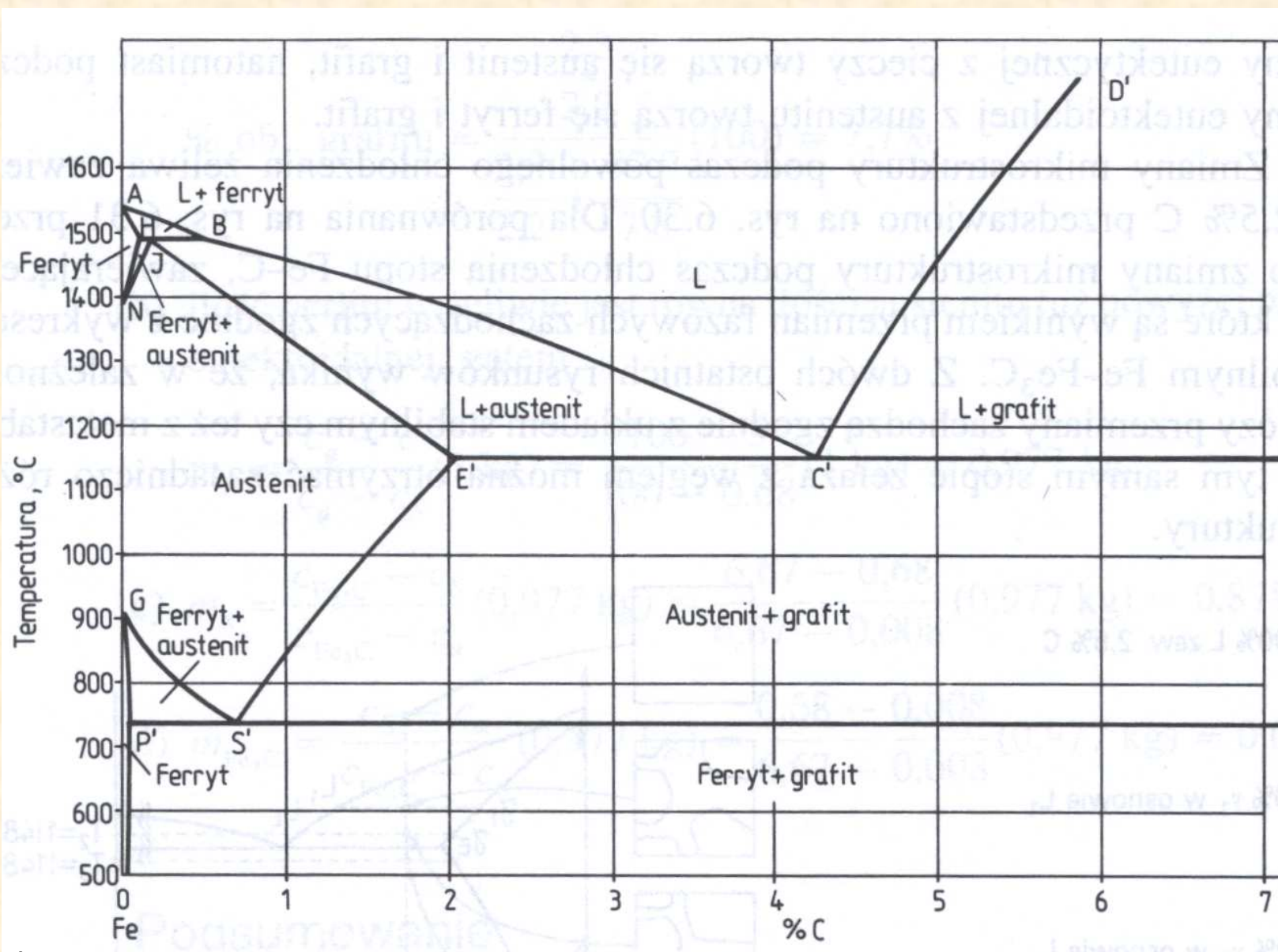
The vast majority of steels rely on just two allotropes of iron: (1) **alpha-iron**, which is **body-centered cubic** (BCC) ferrite, and (2) **gamma-iron**, which is **face-centered cubic** (FCC) austenite. At ambient pressure, BCC ferrite is stable from all temperatures up to 912 °C (the A3 point), when it transforms into FCC austenite. It reverts to ferrite at 1394 °C (the A4 point). This high-temperature ferrite is labeled **delta-iron**, even though its crystal structure is identical to that of alpha-ferrite. The delta-ferrite remains stable until it melts at 1538 °C.

Stal i żeliwo

The steel portion of the Fe-C phase diagram covers the range between 0 and 2.08 wt. % C. The **cast iron** portion of the Fe-C phase diagram covers the range between 2.08 and 6.67 wt. % C.

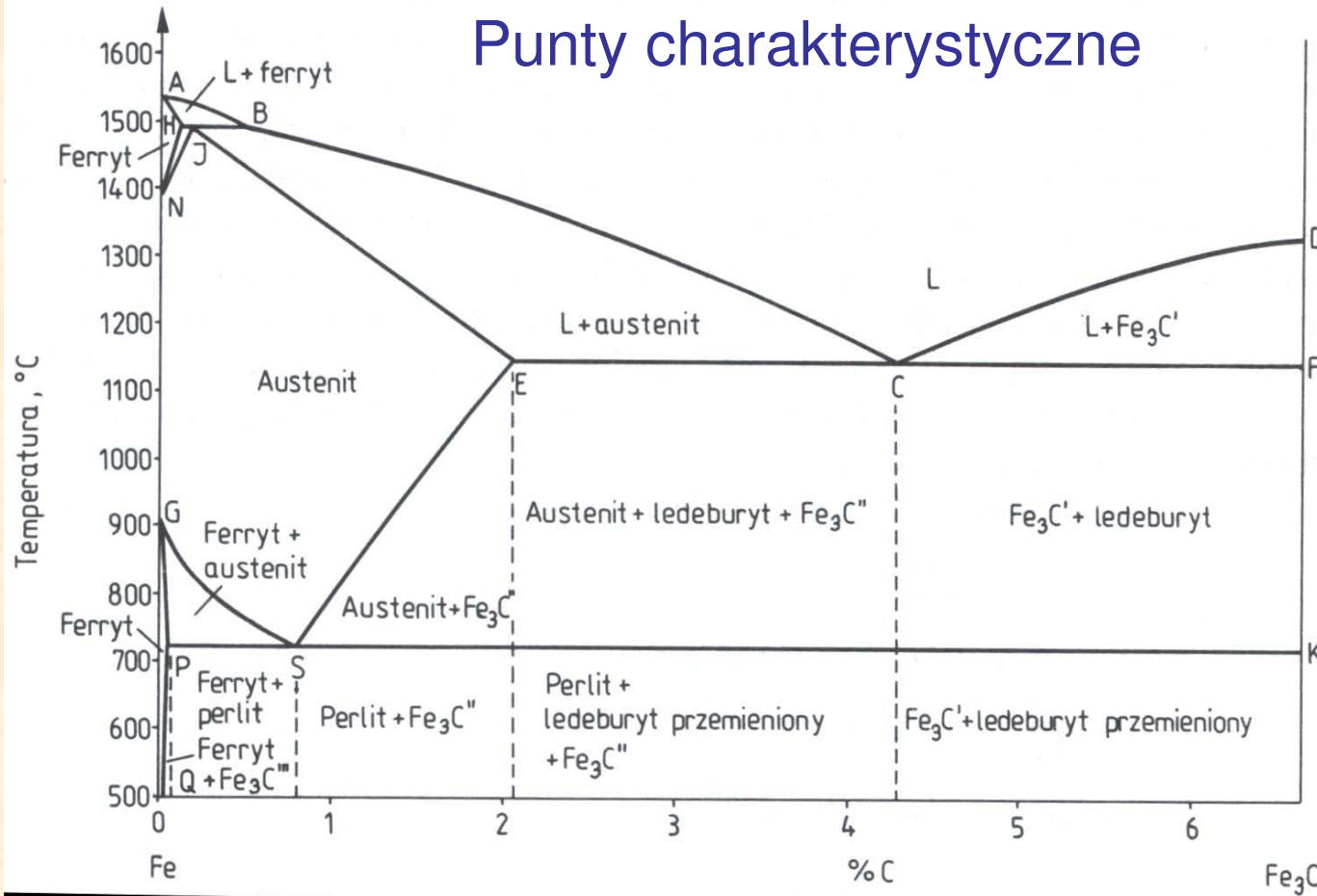
<http://www.calphad.com/iron-carbon.html>

Układ żelazo - węgiel



Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

Punty charakterystyczne



„perlit= ferryt
+ cementyt

„ledeburit”=
austenit +
cementyt

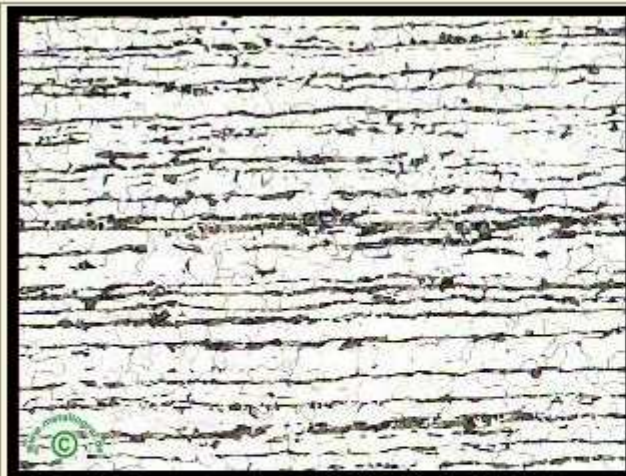
%C
T [°C]

A	B	C	D	E	G	H	J	N	P	S	Q
0	0.53	4.30	6.67	2.11	0	0.09	0.17	0	.022	0.77	.008
1538	1495	1148	1227	1148	912	1495	1495	1394	727	727	20

Ferryt = α -Fe bcc

(<0.028%C@738°C)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
max. 0,17			max. 0,040	max. 0,035			

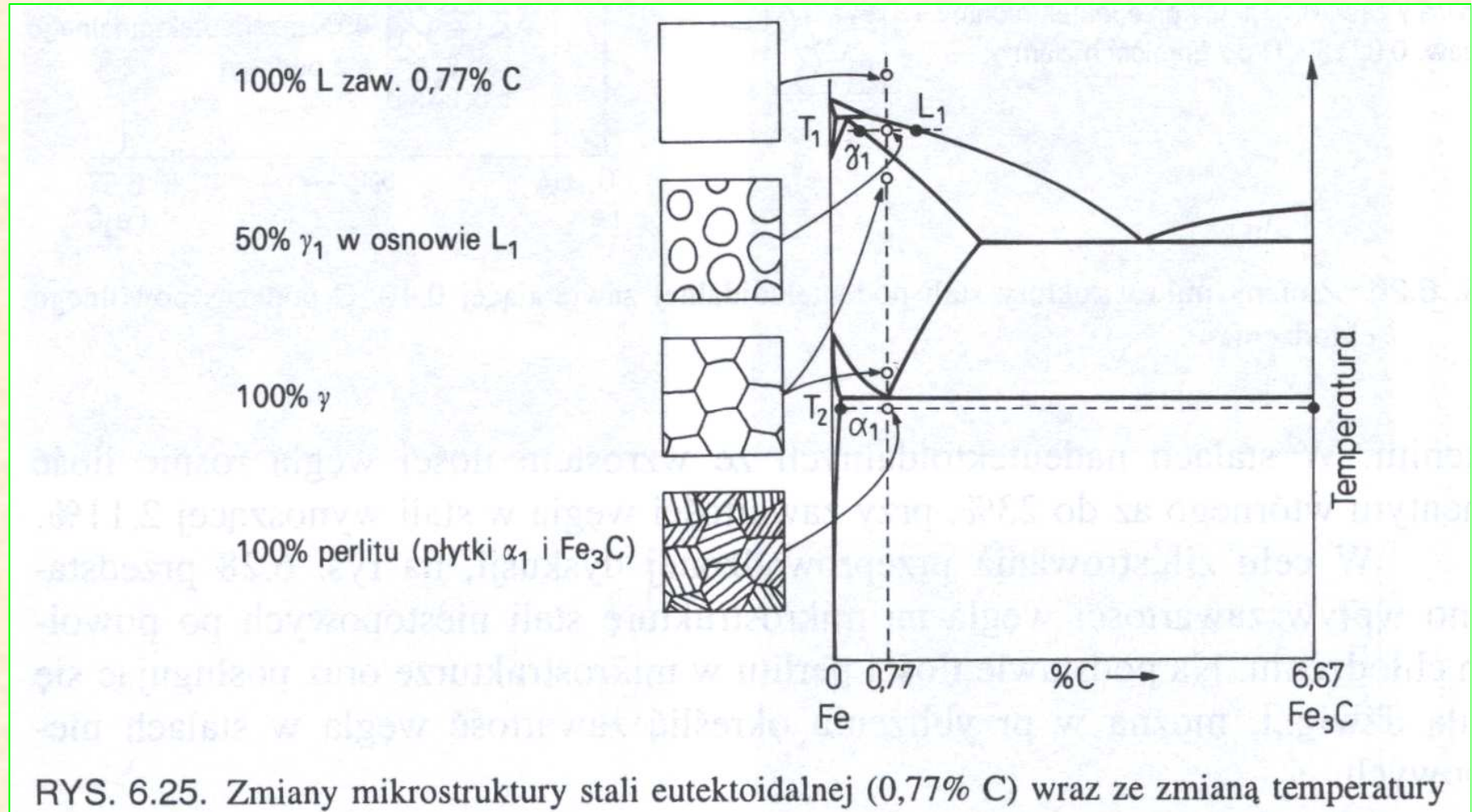


Zustand : unbehandelt
 Aufnahmevergrößerung : 100 : 1
 Ätzmittel : 3 % alkoholische Salpetersäure
 Probelage / Prüfvorschrift : Längsschliff
 Befund :
 ca. 70 % Ferrit ; 28 % Sorbit ; 2 % Perlit
 leichte Zeiligkeit



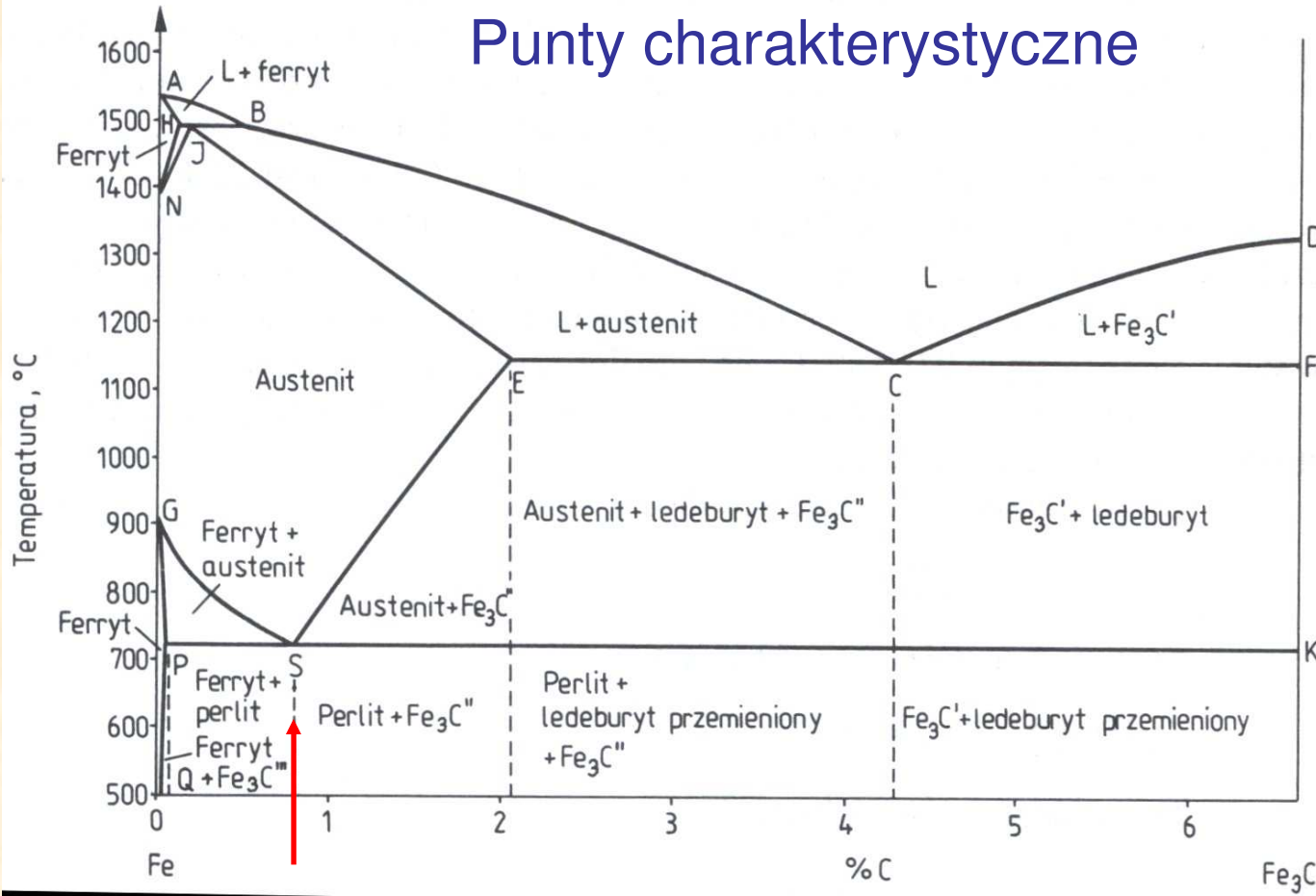
Zustand : unbehandelt
 Aufnahmevergrößerung : 500 : 1
 Ätzmittel : 3 % alkoholische Salpetersäure
 Probelage / Prüfvorschrift : Längsschliff
 Befund :
 ca. 70 % Ferrit ; 28 % Sorbit ; 2 % Perlit

Punkt eutektoidalny: perlit



Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

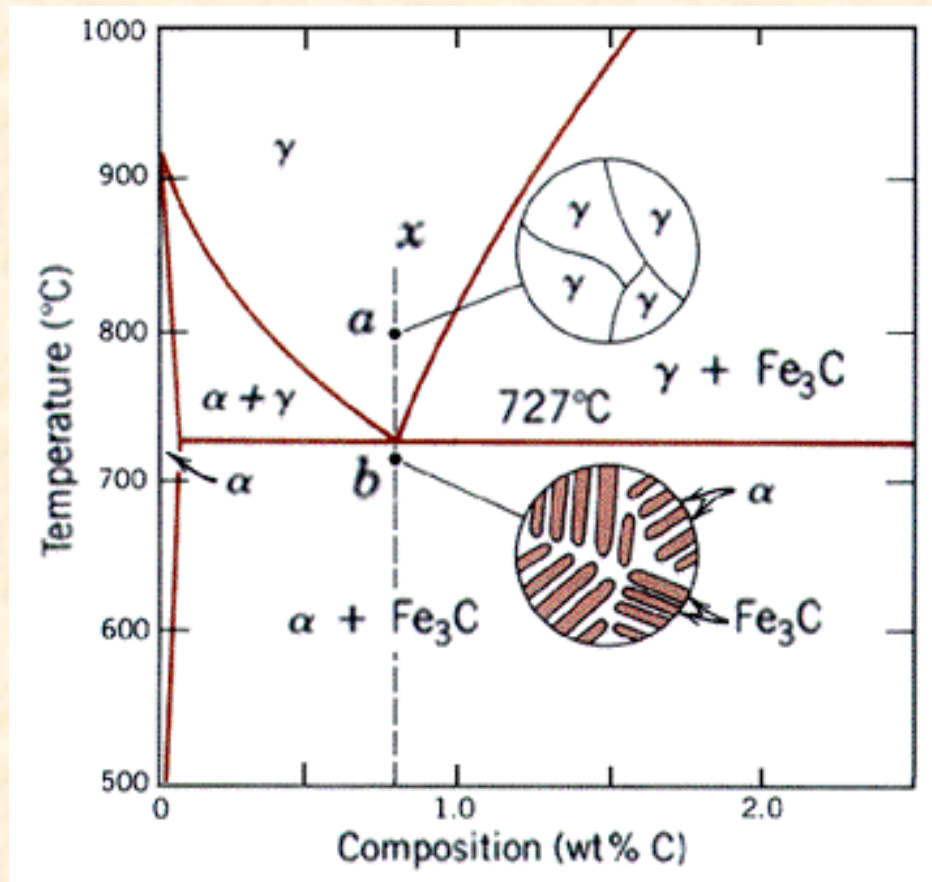
Punty charakterystyczne



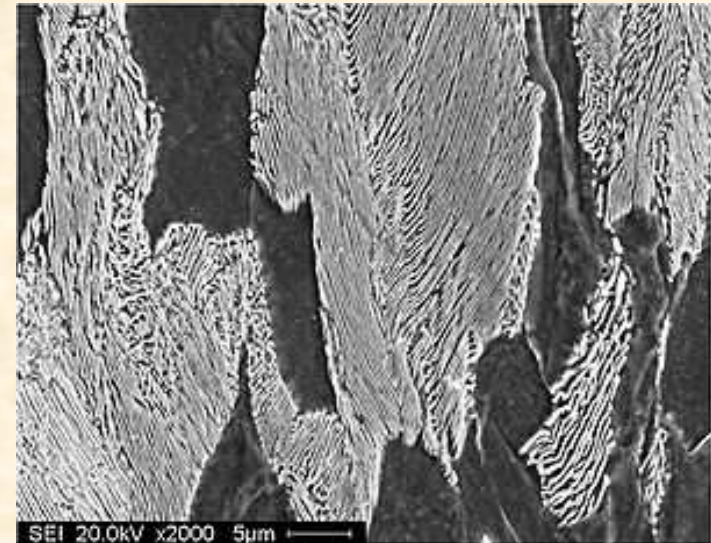
„**perlit**= ferryt
+ cementyt
z przemiany
eutektoidalnej
austenitu 8:1

[illegible]

Punkt eutektoidalny: perlit



alfa-ferryt (88 wt%)
cementyt (12%)

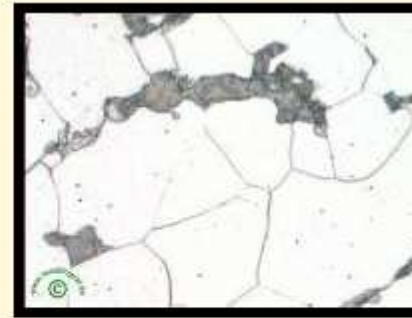


<http://en.wikipedia.org/wiki/Pearlite>

Ferryt → Perlit → Sorbit

Querschliff

Untereutektoider Stahl mit einem niedrigen Kohlenstoffgehalt von ca. 0,10 %. Aufgrund dessen ist ein hoher Ferritanteil und nur wenig Perlit vorhanden.



Querschliff

Stahl mit ca. 0,40 % Kohlenstoff. Das Gefüge besteht zu ca. 50 % aus Ferrit und zu 50 % aus Perlit. Der Perlit ist teilweise lamellar und zum anderen dichtstreifig / feinlamellar ausgebildet.

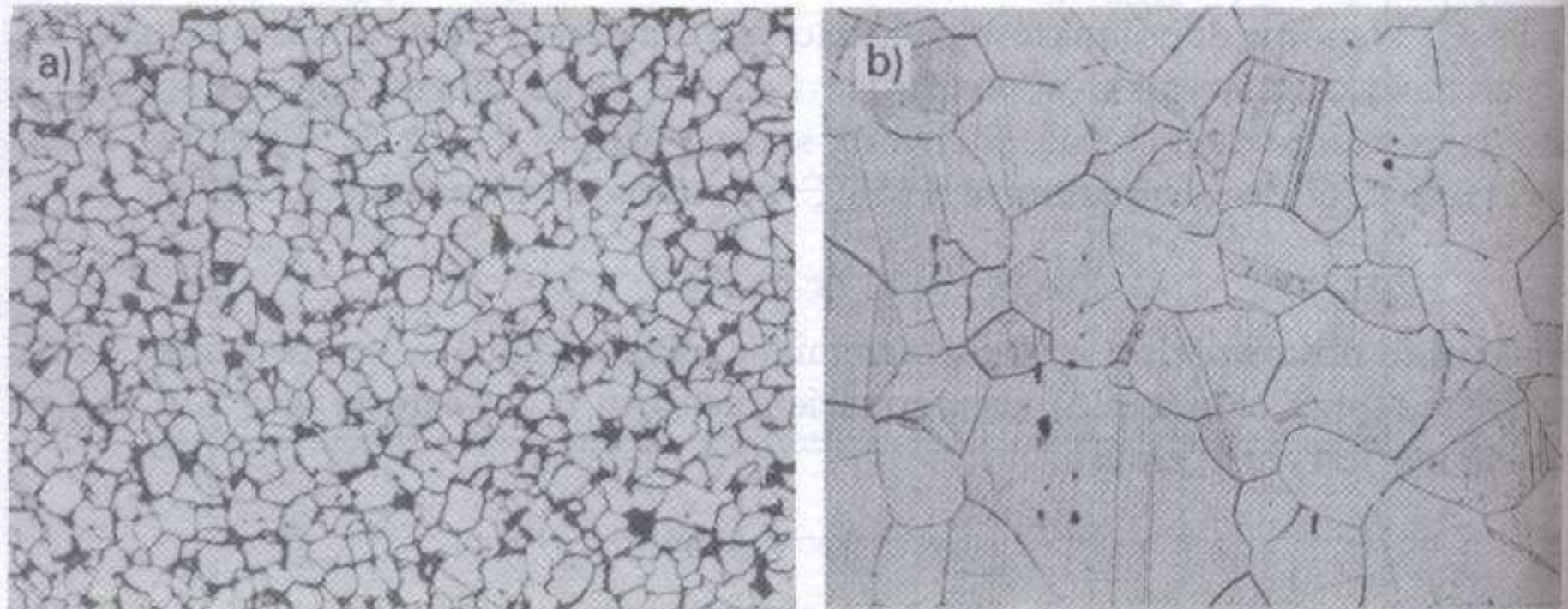


Querschliff

Eutektoider Stahl mit ca. 0,80 % Kohlenstoff. Gefüge aus lamellarem Perlit und Sorbit (feinlamellarer Perlit). Aufgrund des hohen Kohlenstoffgehaltes ist kein Ferrit vorhanden.



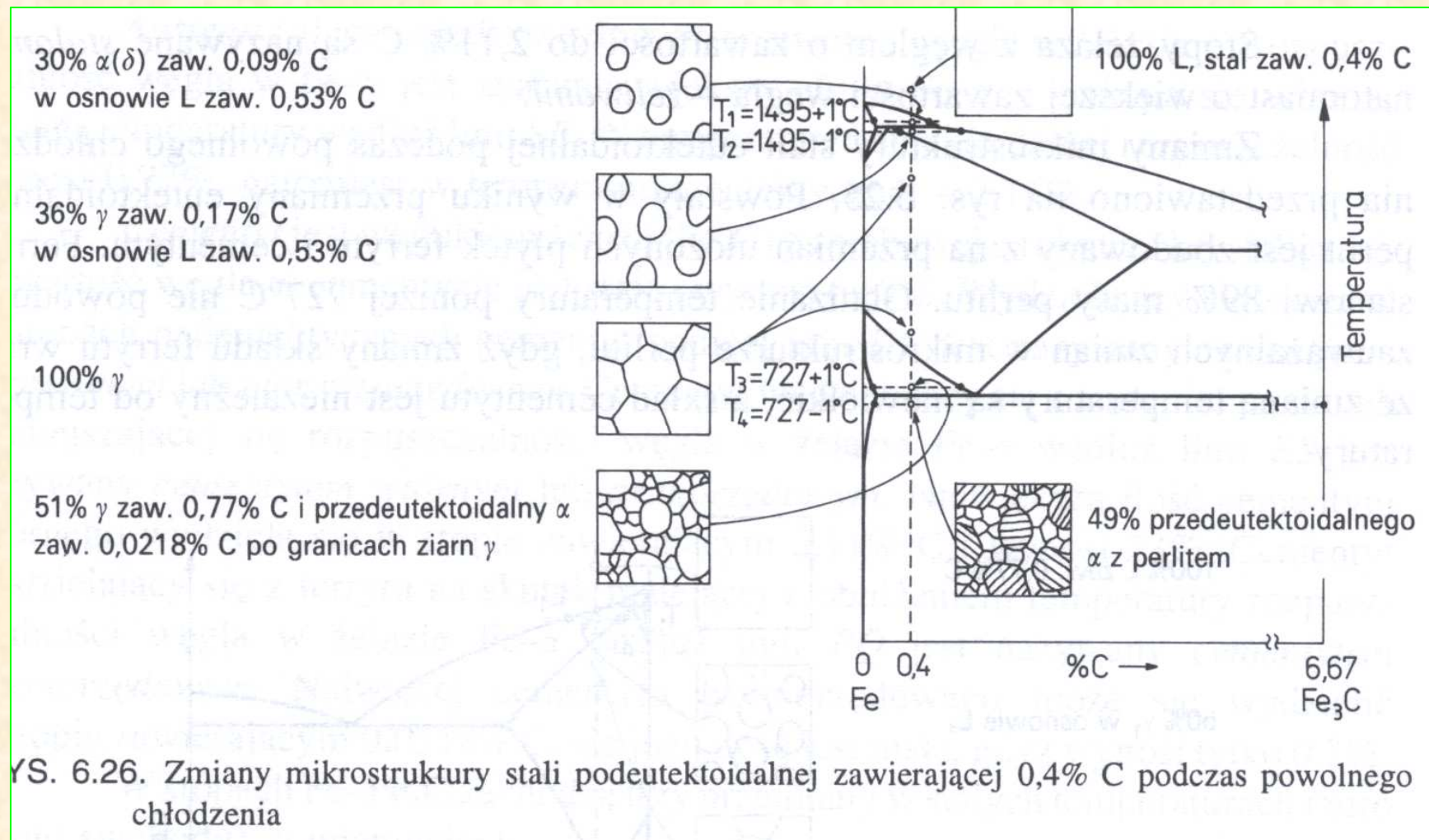
Ferryt i austenit



Rys. 5.5. Fazy układu Fe-Fe₃C: a) ferryt, b) austenit

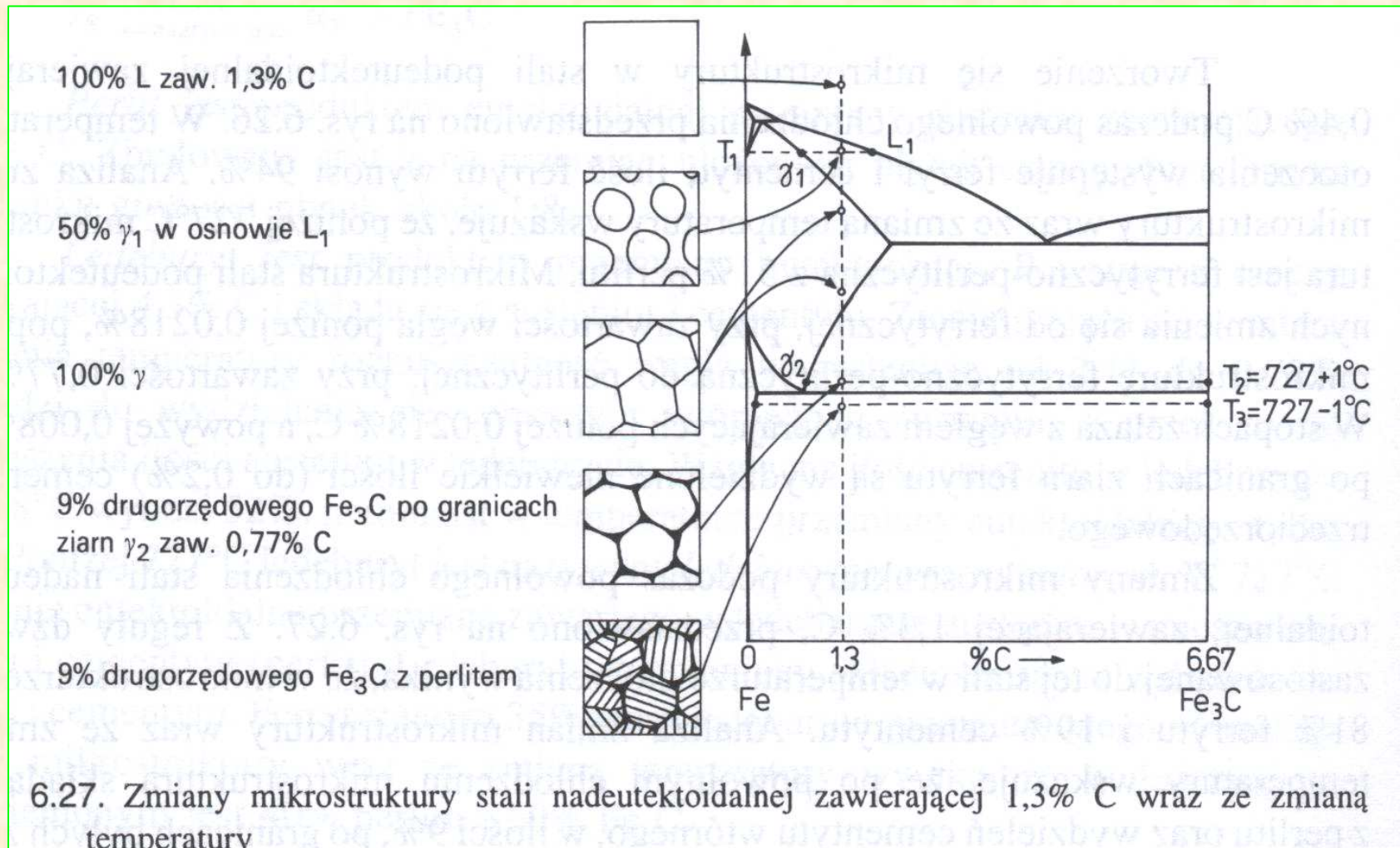
Źródło: Prowans, Struktura stopów

Stal podeutektoidalna – wolne chłodzenie



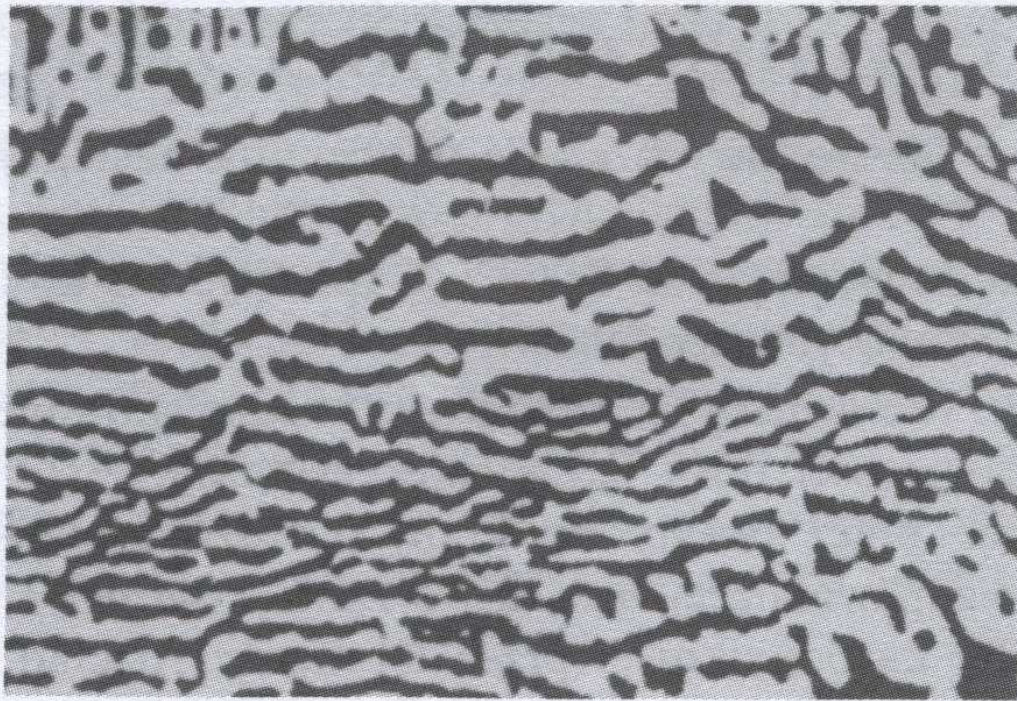
Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

Stal nadeutektoidalna – wolne chłodzenie



Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

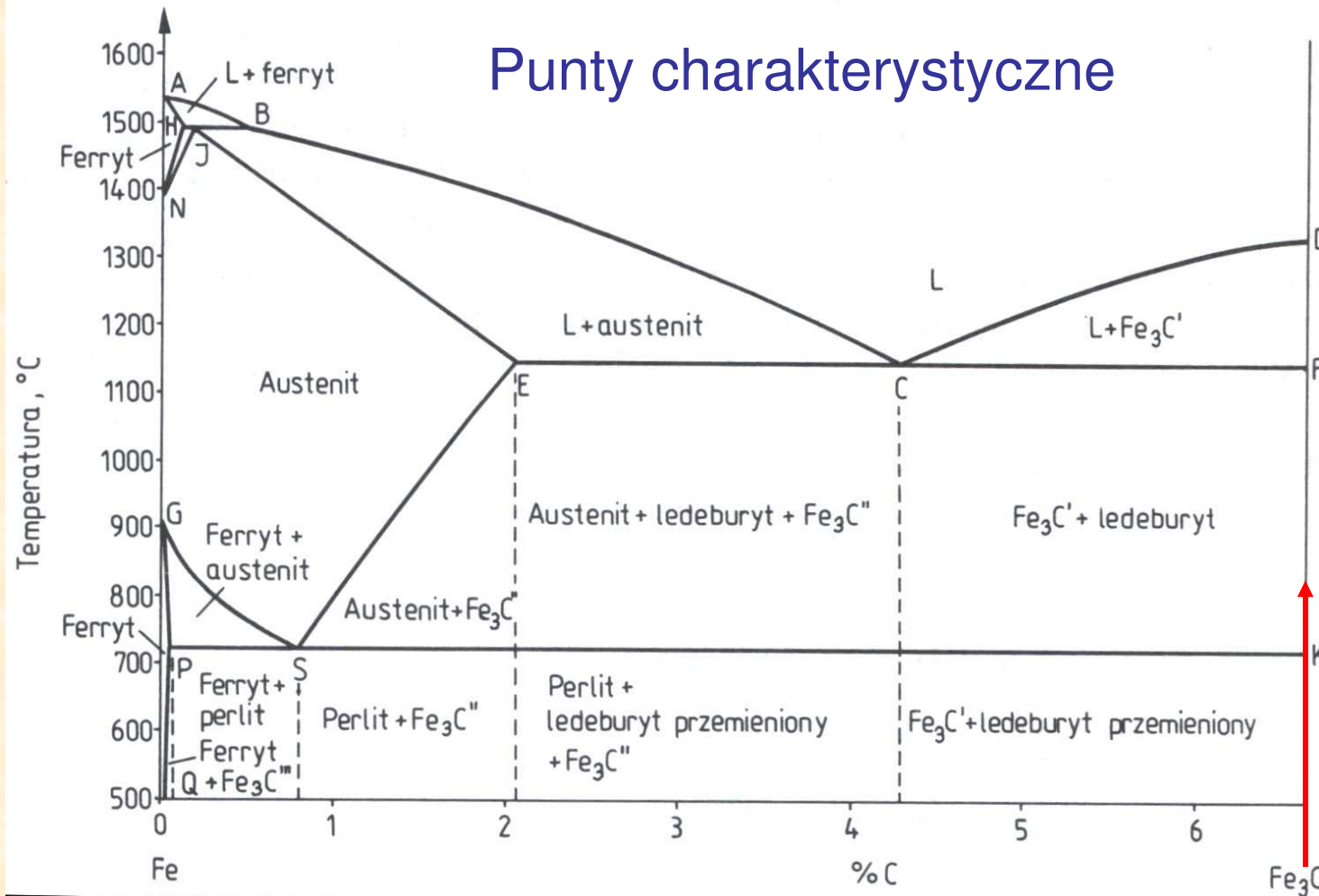
Ledeburyt (=eutektyka)



Rys. 5.8. Ledeburyt przemieniony

Prowans,
Struktura stopów

Punty charakterystyczne

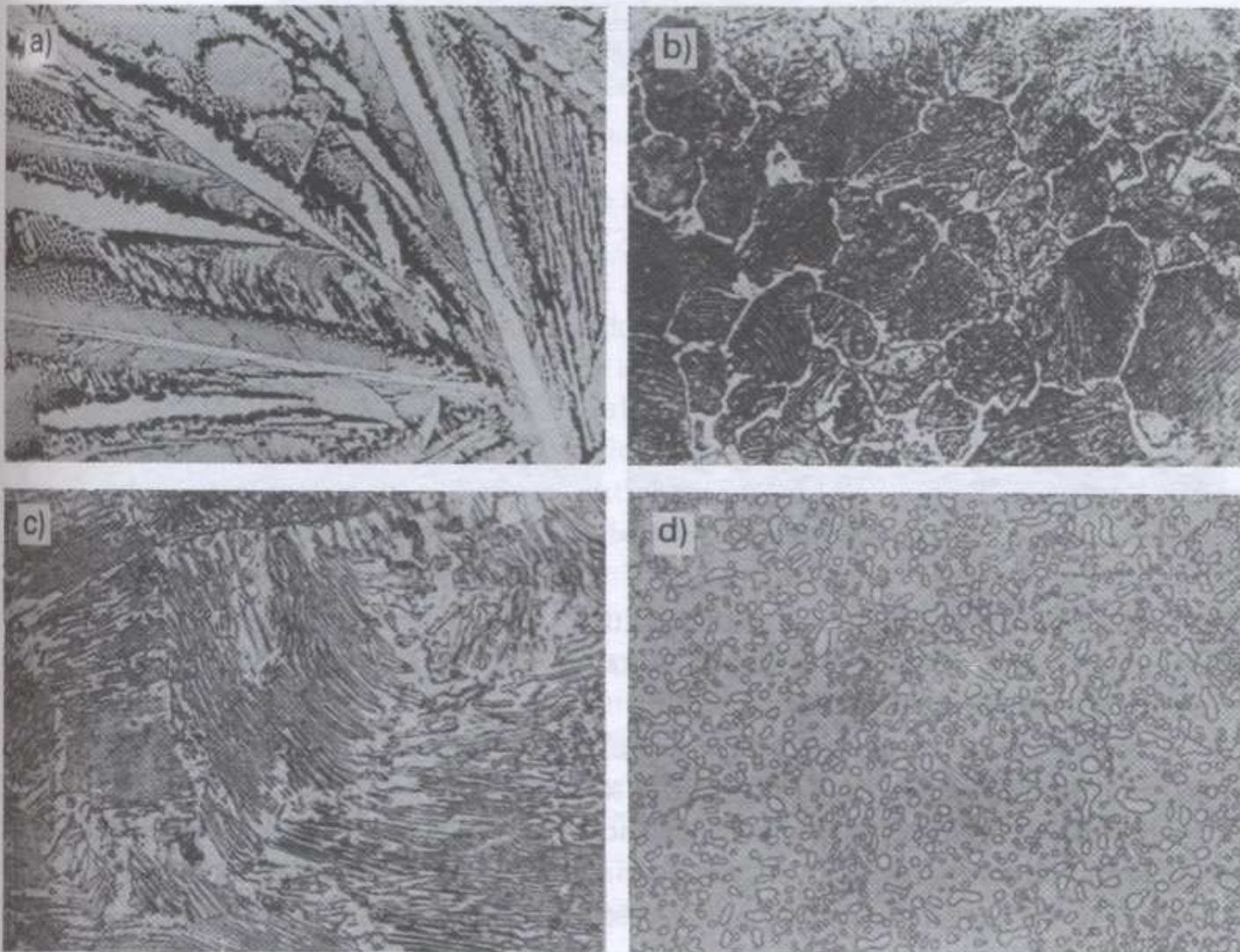


cementyt
Fe₃C (układ
rombowy)

1. rzędowy
(z linii CD)
2. rzędowy z
austenitu (ES)
3. rzędowy
z ferrytu (PQ)

	A	B	C	D								
%C	cementyt			6.67								
T [°C]				1227								

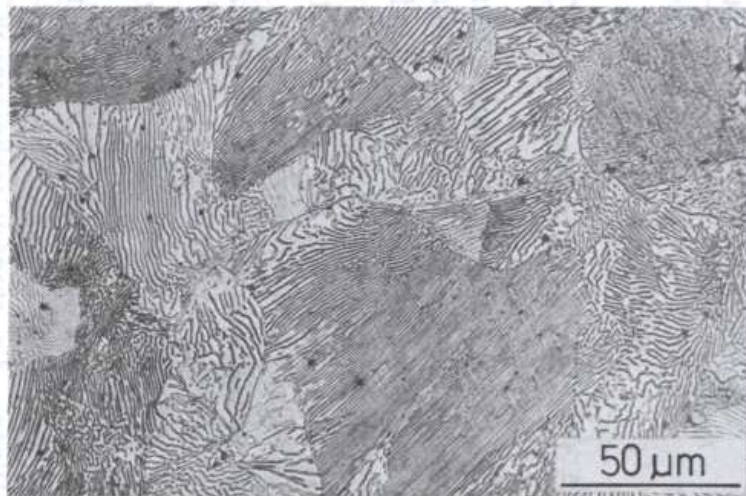
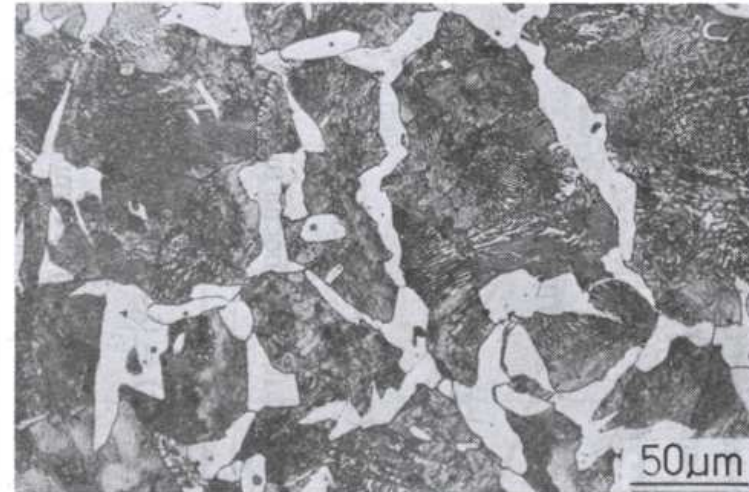
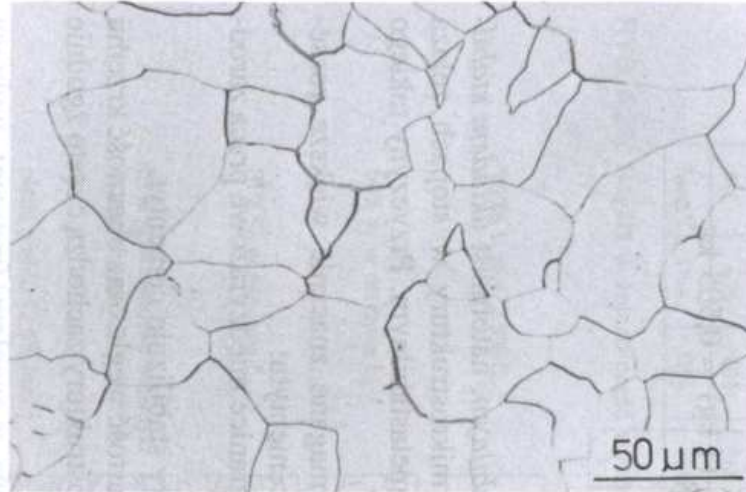
Cementyt



Prowans,
Struktura stopów

Rys. 5.6. Wydzielenia cementytu: a) igły cementytu pierwotnego, b) siatka cementytu wtórnego, c) płytki cementytu wtórnego, d) kulki cementytu wtórnego

ferryt, perlit, cementyt



6.28. Mikrostruktury stali węglowych po powolnym chłodzeniu: a) ferryt i cementyt trzeciorzędowy (zaw. mniej niż 0,0218% C), b) struktura ferrytyczno-perlityczna (zaw. ok. 0,6% C), c) struktura perlityczna (zaw. ok. 0,77% C), d) struktura składająca się z perlitu i cementytu drugorzędowego (zaw. ok. 1,3% C)

Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

Stal nad- i pod-eutektoidalna

Querschliff

Übereutektoider Stahl mit ca. 1,20 % Kohlenstoff. Gefüge aus lamellarem Perlit und Sorbit (feinlamellarer Perlit). Aufgrund des hohen Kohlenstoffgehaltes ist zusätzlich noch Sekundärzementit vorhanden. Der Zementit ist als Netzwerk auf den Korngrenzen vorhanden.



Wolne chłodzenie: perlit

Querschliff

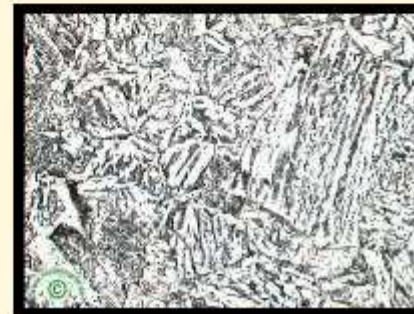
Untereutektoider Stahl der nach der Warmumformung sehr schnell abgekühlt wurde. Es hat sich ein Gefüge aus Martensit und unterer Zwischenstufe (unterer Bainit) gebildet. Das Gefüge ist gut an seiner nadeligen Struktur zu erkennen.



Bardzo szybkie chłodzenie: **martenzyt**

Querschliff

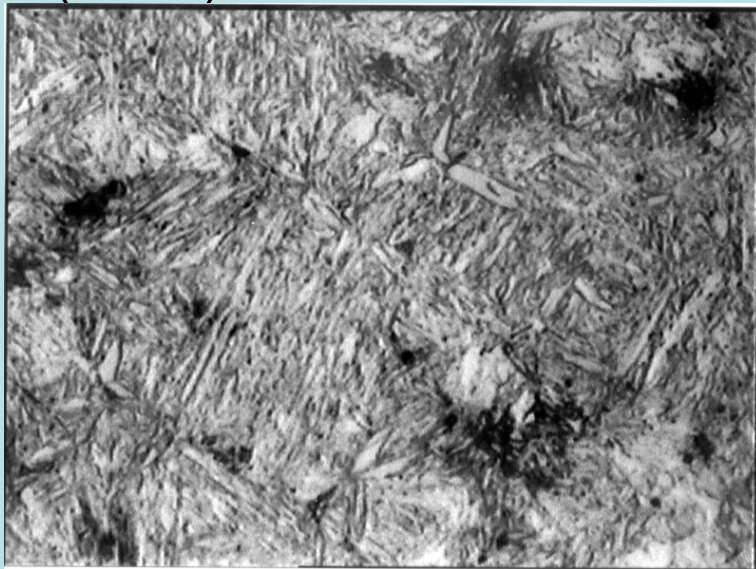
Untereutektoider Stahl der nach der Warmumformung schnell abgekühlt wurde. Es hat sich ein bainitisches Gefüge gebildet. Bainit wird auch Zwischenstufengefüge genannt. In diesem Fall handelt es sich um obere Zwischenstufe. Das Gefüge ist an seiner ferritischen Matrix mit parallel angeordneter



Szybkie chłodzenie: bainit

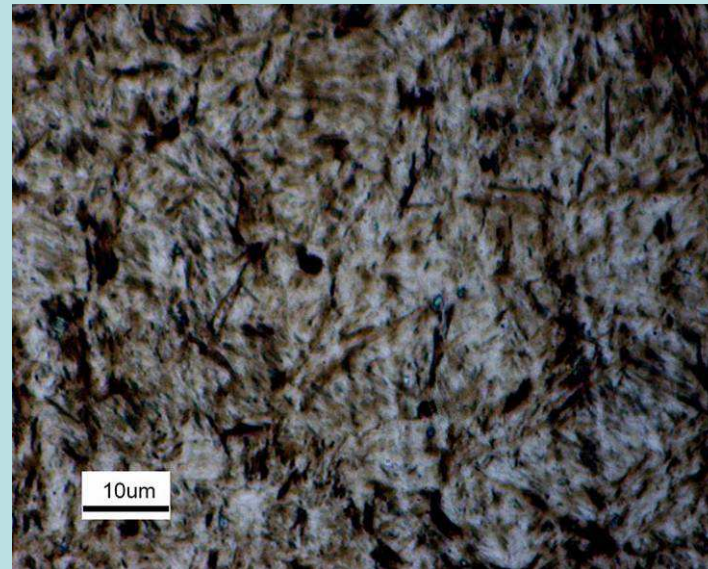
Hartowanie stali

- The martensite is formed by rapid cooling (quenching) of austenite which traps carbon atoms that do not have time to diffuse out of the crystal structure
- martensite has a body centered tetragonal crystal structure, whereas austenite has a face center cubic (FCC) structure.



Martensite in AISI 4140 steel

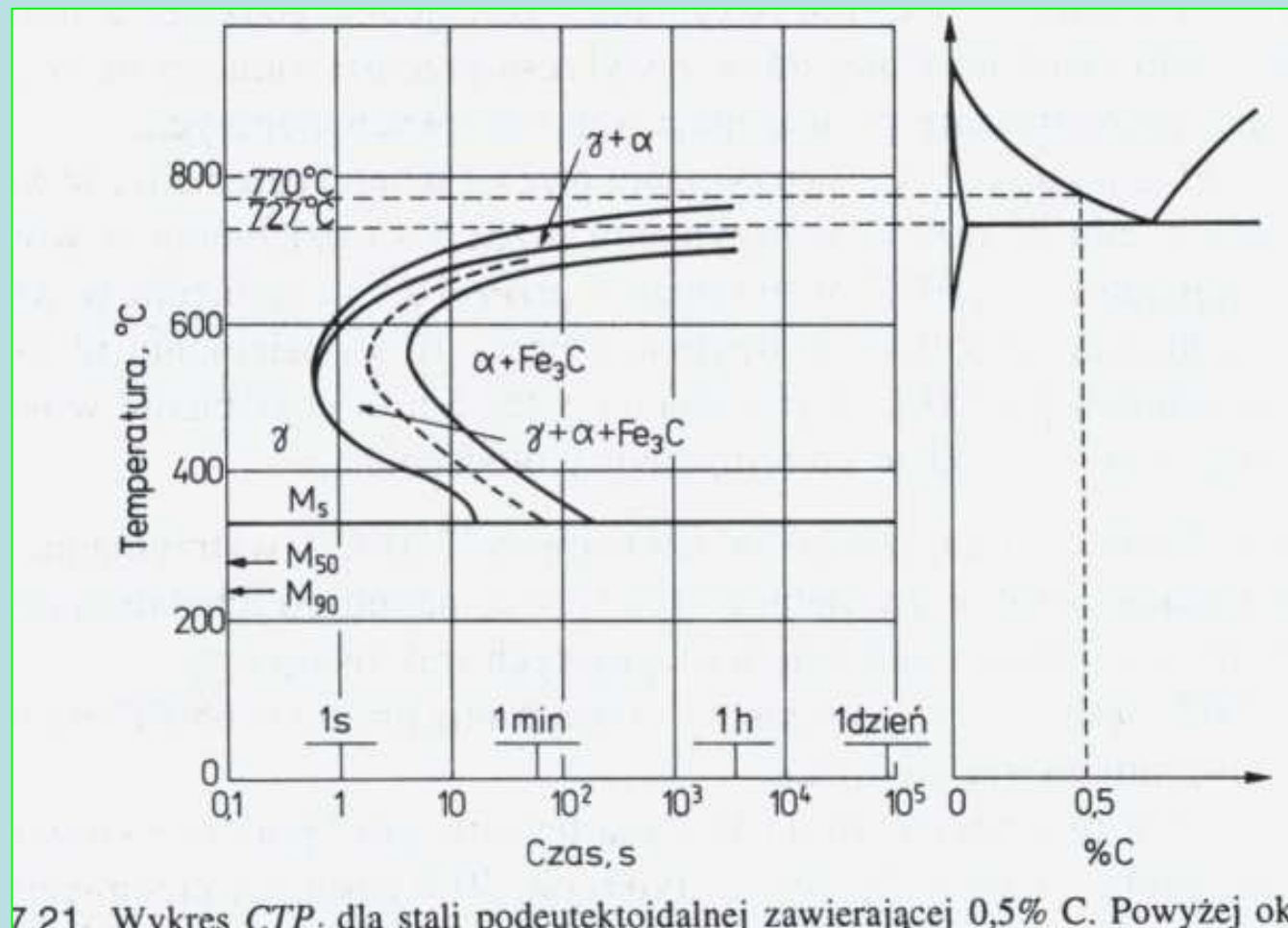
<http://en.wikipedia.org/wiki/Martensite>



0.35%C Steel, water-quenched from 870°C

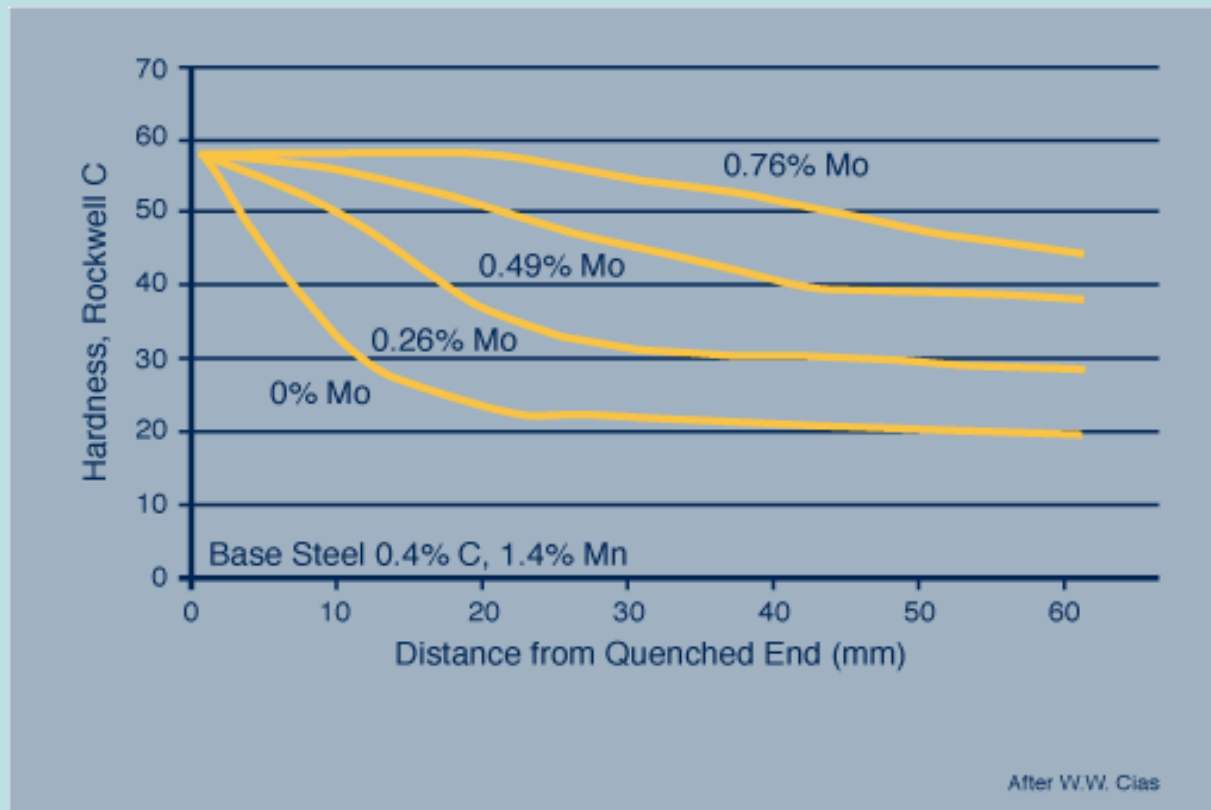
Hartowanie = szybkie chłodzenie

- Martenzyt – układ tetragonalny; przechłodzony rozwór C w austenicie (wydłużone kryształy w kształcie igieł)
- Bainit – mieszanina ferrytu i węglików



Hartowanie stali

- Dodatki stopowe



twardość

Zestawienie faz

Właściwości składników fazowych i strukturalnych stopów żelaza z węglem

Składnik	Gęstość g/cm^3	Wytrzymałość na rozciąganie R_m MPa	Wydłużenie A_5 %	Twardość HB
ferryt	7,86	295	40	<u>80</u>
austenit	8,06	740	50	200
cementyt	7,66	29,5	<u>0</u>	700
grafit	2,2	19,5	0	<u>ok. 1</u>
perlit	7,85	740	8	200
ledeburyt				450
perlit drobny	7,85	940		250
bainit		1285	20	400
martenzyt	7,74	<u>1485</u>	0	<u>700</u>

TABLICA 8.2. Granica między stalami niestopowymi i stopowymi
(PN-EN 10020)

Pierwiastek	Zawartość graniczna % masowe	Pierwiastek	Zawartość graniczna % masowe
Aluminium	0,30	Nikiel	0,30
Bor	0,0008	Ołów	0,40
Bizmut	0,10	Selen	0,10
Kobalt	0,30	Krzem	0,60
Chrom	0,30	Tellur	0,10
Miedź	0,40	Tytan	0,05
Mangan	1,65	Wanad	0,10
Molibden	0,08	Wolfram	0,30
Niob	0,06	Cyrkon	0,05

Stale stopowe i niestopowe

TABLICA 8.3. Współczynnik do ustalania symboli liczbowych pierwiastków stopowych przy oznaczaniu stali stopowych (bez stali szybko tnących) o zawartości każdego pierwiastka stopowego <5%
(PN-EN 10027-1)

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

Źródło: M. Blicharski,
Wstęp do inżynierii materiałowej

Stale stopowe

Krzem: 0.5-3.0% dla stabilizacji ferrytu

0.5-4% blachy transformatorowe

(większy opór elektryczny i mniejsza histereza magnetyczna)

Chrom: 0.2-2.0 % podniesienie hartowności

$\geq 10.5\%$ stale kwasoodporne

Nikiel: 0.5-1.0 % podniesienie hartowności

$> 8\%$ stabilizacja austenitu (żaroodporne)

Molibden: do 2.5 % podniesienie hartowności

$> 2\%$ odporność na ścieranie

Wanad: do 0.2 % podniesienie hartowności

$> 2\%$ odporność na ścieranie

Mangan: do 0.8 % odtlenienie stali

1.0-1.5% umocnienie roztworowe w walcowaniu na gorąco

Stale konstrukcyjne

TABLICA 8.4. Składy chemiczne i własności wytrzymałościowe niektórych stali konstrukcyjnych

Rodzaj stali	Znak stali wg PN-EN	Średni skład stali, %					R_e MPa	R_m MPa
		C	Si	Mn	Cr	Inne		
Stal niestopowa	C10	0,10	≤0,40	0,45	–	–	280	480
	C35	0,35	≤0,40	0,65	–	–	390	680
	C60	0,61	≤0,40	0,75	–	–	540	950
Stal niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości	S355NL	≤0,18	≤0,50	1,28	–	0,05 ≥ Nb; 0,12 ≥ V; 0,03 ≥ Ti	355	550
	S460N	≤0,20	≤0,60	1,35	–	0,05 ≥ Nb; 0,20 ≥ V; 0,03 ≥ Ti	460	640
Stal do nawęglania	C15R	0,15	≤0,40	0,45	–	0,03 S	320	550
	16MnCrB5	0,16	≤0,40	1,15	0,95	0,035 ≥ S; 0,0029 B	–	–
	20NiCrMoS2-2	0,20	≤0,40	0,80	0,53	0,55 Ni; 0,20 Mo; 0,03 S	–	–
Stal do ulepszenia cieplnego	C45E	0,45	≤0,40	0,65	–	–	620	900
	25CrMoS4	0,25	≤0,40	0,75	1,05	0,23 Mo; 0,03 S	650	920
	42CrMoS4	0,42	≤0,40	0,75	1,05	0,23 Mo; 0,03 S	880	1100
	34CrNiMo6	0,34	≤0,40	0,65	1,50	1,50 Ni; 0,23 Mo	950	1100
Stal sprężynowa	51CrV4	0,51	≤0,40	0,90	1,05	0,18 V	1100	1300
	60Si7	0,60	1,65	0,75	–	–	1200	1400

Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

Stale narzędziowe

TABLICA 8.5. Składy chemiczne i twardości wybranych stali narzędziowych

Rodzaj stali	Znak stali wg PN-EN-ISO 4957	Średni skład stali, %					Twardość HV min.
		C	Si	Mn	Cr	Inne	
Stal niestopowa do pracy na zimno	C45U	0,45	0,27	0,70	–	–	54
	C70U	0,70	0,20	0,25	–	–	57
	C90U	0,90	0,20	0,25	–	–	60
	C120U	1,20	0,20	0,25	–	–	62
Stal stopowa do pracy na zimno	102Cr6	1,02	0,25	0,35	1,50	–	60
	60WCrV8	0,60	0,85	0,30	1,05	1,95 W; 0,15 V	58
	X210CrW12	2,15	0,25	0,45	12,00	0,7 W	62
	X153CrMoV12	1,53	0,35	0,40	12,00	0,85 Mo; 0,85 V	61
Stal stopowa do pracy na gorąco	55NiCrMoV7	0,55	0,25	0,75	1,00	1,65 Ni; 0,45 Mo; 0,10 V	42
	32CrMoV12-28	0,32	0,25	0,30	2,95	2,75 Mo; 0,55 V	46
	X40CrMoV5-1	0,40	1,00	0,38	5,15	1,35 Mo; 1,00 V	50
	X30WCrV9-3	0,30	0,25	0,30	2,85	9,00 W; 0,40 V	48
Stal szybkotnąca	HS18-0-1	0,78	≤0,45	≤0,40	4,15	17,95 W; 1,10 V	63
	HS2-9-2	1,00	≤0,70	≤0,40	4,00	8,70 Mo; 1,95 V; 1,80 W	64
	HS6-5-4	1,32	≤0,45	≤0,40	4,15	5,60 W; 4,60 Mo; 3,95 V	64
	HS2-9-1-8	1,10	≤0,70	≤0,40	4,00	9,50 Mo; 8,00 Co; 1,55 W; 1,10 V	66

Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

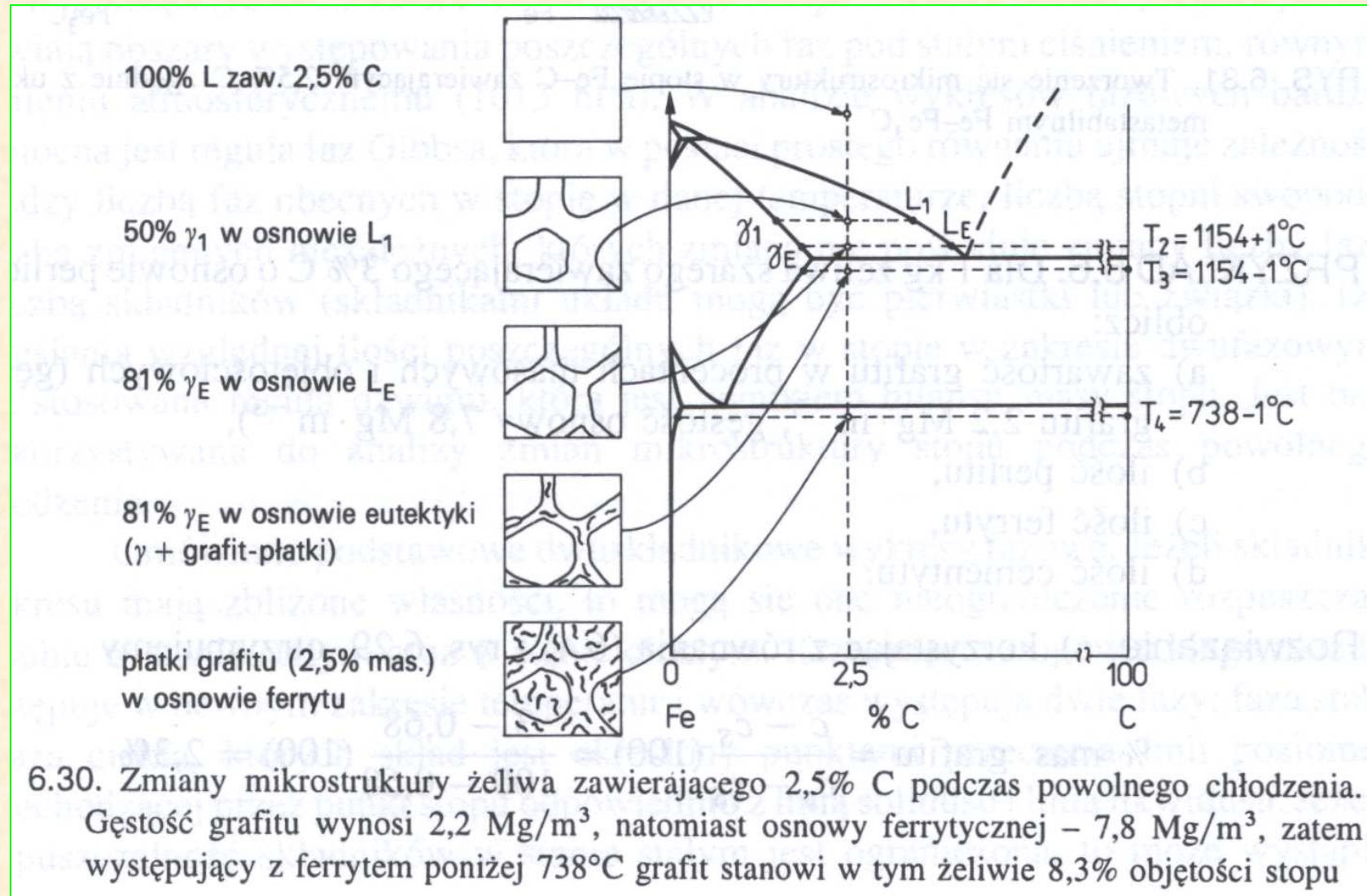
Stale narzędziowe

TABLICA 8.6. Skład chemiczny wybranych stali o szczególnych właściwościach

Rodzaj stali	Znak wg PN-EN	Średni skład stali, %				
		C	Si	Mn	Cr	Inne
Stal odporna na korozję; ferrytyczna	X6Cr13	≤0,08	≤1,00	≤1,00	13,00	–
	X6Cr17	≤0,08	≤1,00	≤1,00	17,00	–
	X6CrMo17-1	≤0,08	≤1,00	≤1,00	17,00	1,15 Mo
Stal odporna na korozję; martenzytyczna	X30Cr13	0,30	≤1,00	≤1,50	13,00	–
	X17CrNi16-2	0,17	≤1,00	≤1,50	16,00	2,00 Ni
	X90CrMoV18	0,90	≤1,00	≤1,00	18,00	1,10 Mo; 0,10 V
Stal odporna na korozję; austenityczna	X2CrNi19-11	≤0,03	≤1,00	≤2,00	19,00	11,00 Ni
	X2CrNiMo17-12-2	≤0,03	≤1,00	≤2,00	17,50	11,50 Ni; 2,25 Mo
	X2CrNiMoN17-13-5	≤0,03	≤1,00	≤2,00	17,50	13,50 Ni; 4,50 Mo; 0,17 N
	X1CrNiMoCuN25-25-5	≤0,02	≤0,70	≤2,00	25,00	25,50 Ni; 5,20 Mo; 1,50 Cu; 0,21 N
Stal odporna na korozję; ferrytyczno-austenityczna	X3CrNiMoN27-5-2	≤0,05	≤1,00	≤2,00	26,50	5,50 Ni; 1,65 Mo; 0,125 N
	X2CrNiMoCuN25-6-3	≤0,03	≤0,70	≤2,00	25,00	6,50 Ni; 3,35 Mo; 1,75 Cu; 0,225 N
Stal żaroodporna; ferrytyczna	X10CrAlSi13	≤0,12	1,05	≤1,00	13,00	0,95 Al
	X10CrAlSi25	≤0,12	1,05	≤1,00	24,50	1,45 Al
Stal żaroodporna; austenityczna	X15CrNiSi20-12	≤0,20	2,00	≤2,00	20,00	12,00 Ni
	X6CrNiSiNCe19-10	0,06	1,50	≤1,00	19,00	10,00 Ni; 0,16 N; 0,055 Ce
Oznaczenia i składy stali odpornych na korozję zaczerpnięto z PN-EN 10088-1, natomiast stali żaroodpornych z PN-EN 10095.						

Źródło: M. Blicharski, Wstęp do inżynierii materiałowej

Żeliwa (>2% C)



Żeliwa szare i białe

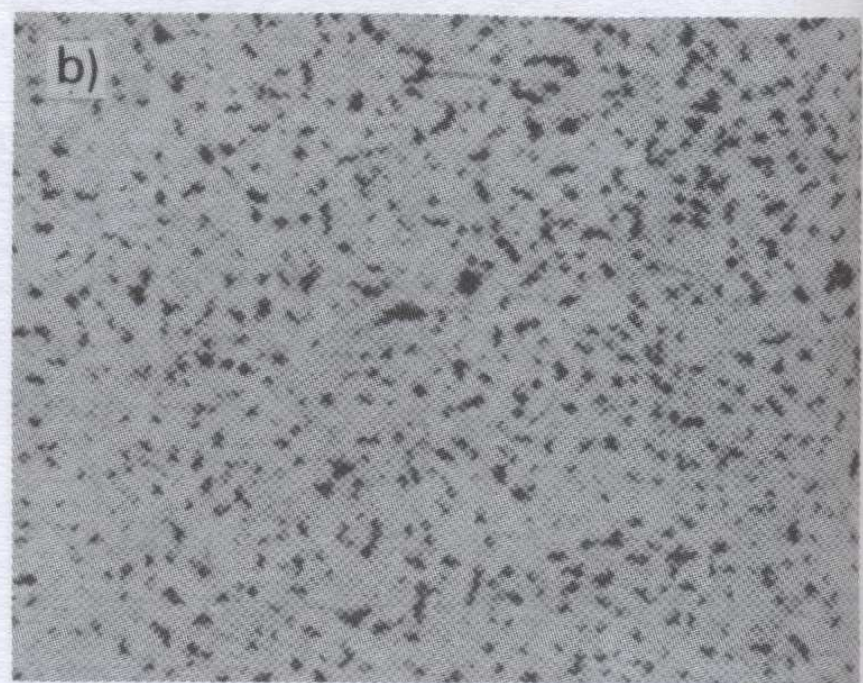
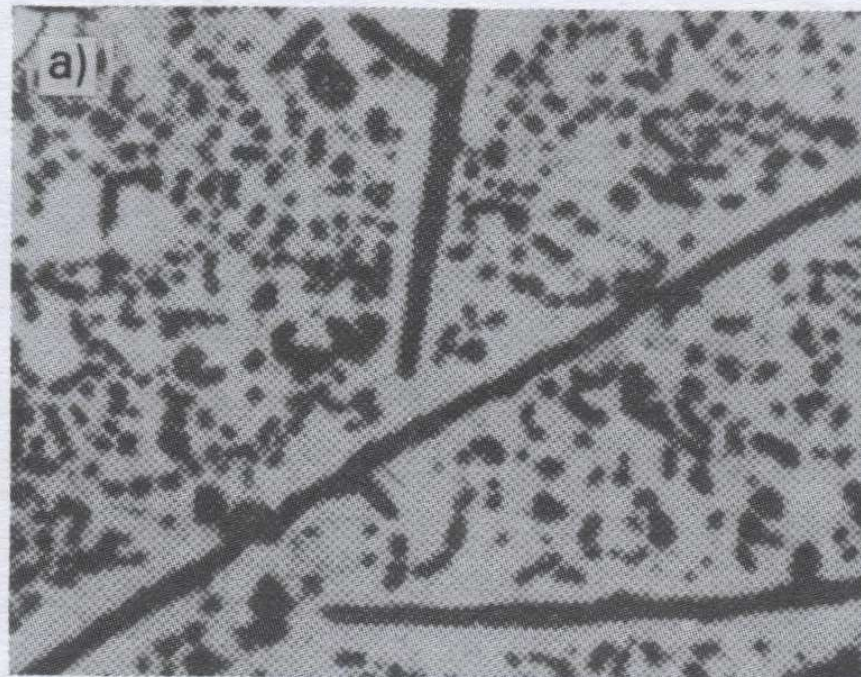
Żeliwo szare (węgiel w postaci grafitu):

- dobra obrabialność (skrawanie),
- duża odporność na ścieranie,
- mały skurcz odlewniczy i stałość wymiarów.
- szeroko stosowane w przemyśle maszynowym (np. kadłuby maszyn, wały, tuleje cylindrowe)

Żeliwo białe (węgiel w postaci cementytu):

- bardzo twarde i kruche, słabo obrabialne, używane jest na walce walcarek, utwardzone ruszty kotłowe
- po długotrwałym wyżarzaniu otrzymuje się z niego żeliwo ciągliwe o własnościach zbliżonych do stali.

Żeliwa szare i białe



Rys. 5.7. Wydzielenia grafitu: a) pierwotnego, b) wtórnego

Źródło: Prowans, Struktura stopów

Reasumując...

- Na własności stopów żelaza z węglem wpływa głównie zawartość węgla, stąd klasyfikacja na stale (<2.1%) i żeliwa (>2.1%C)
- Węgiel występuje jako cementyt Fe_3C lub grafit
- Ferryt zawiera zaledwie 0.008% C (w 20°C)
- Stale dzielimy na pod- i nadeutektoidalne (0,8%C) – fazą wyjściową jest austenit
- Występujące mikro-struktury zależą od nie tylko od składu ale od szybkości chłodzenia, obróbki cieplnej, dodatków stopowych
- i jest to ciągle pole do dalszych badań...