โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมแม่พิมพ์
Mould & Die Industry Development Project

Thai-German Institute
สถาบันไทย-เยอรมัน

การอบชุบโลหะ (Heat Treatment)

โดย

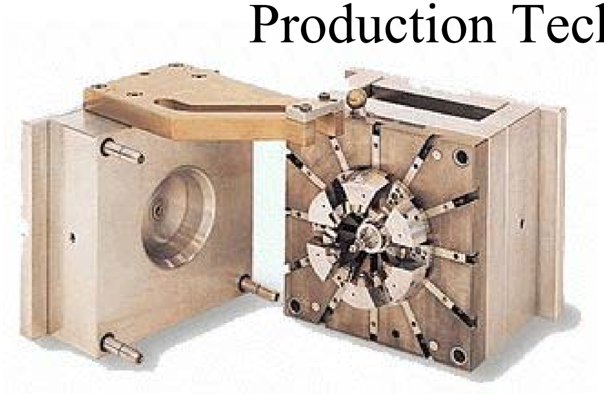
อรุณ เจียงศรีเจริญ

arunjeang@gmail.com, arun.j@tgi.or.th

083-1995780 ,(038)215-033-44,(02)7846666

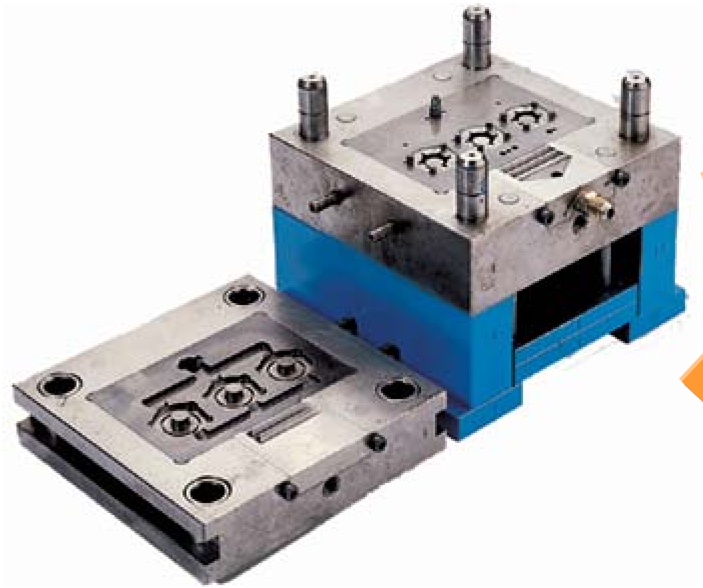
Production Technology development center (PT Department)

Thai-German Institute

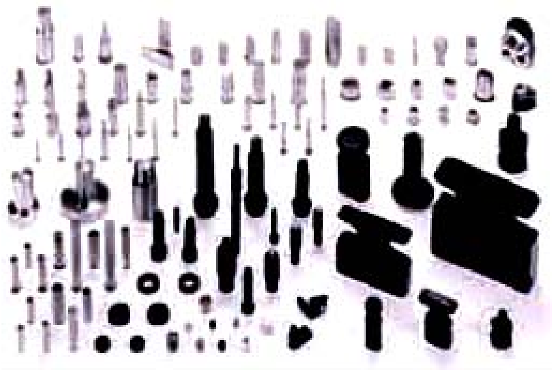


High – tech training

Introduction



- Punches
- Guide post
- Coil Spring
- Ball Retainer
- Roller Cam
- Guide bush
- Dowel pin

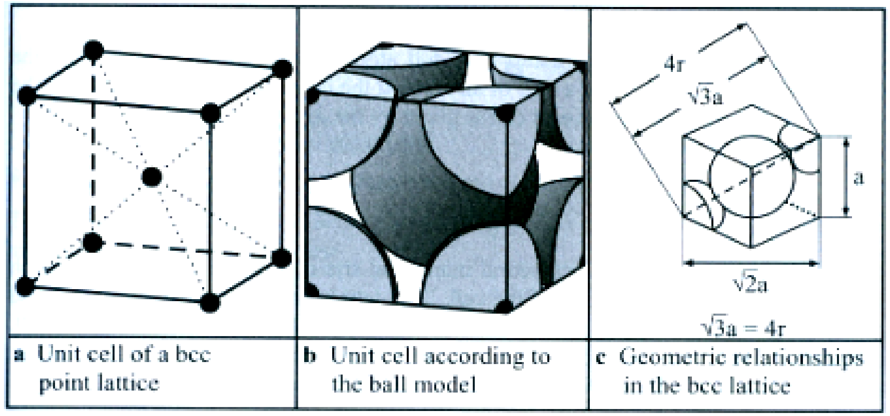


- retainer
- Roller
- stripper bolt
- spring plunger

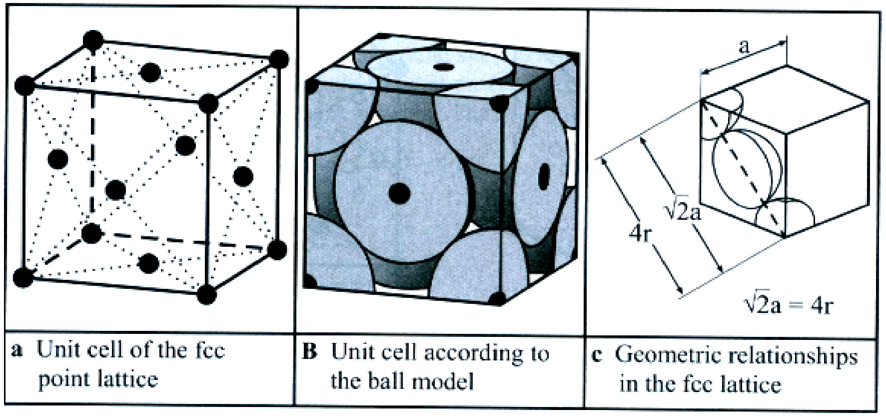
จุดประสงค์
↓
วัสดุ
↓
วิธีการ
↓
ข้อมูล
↓
เทคนิค
↓
ผลลัพธ์
↓
ทดสอบ
↓
ใช้งาน

Contents

1. โลหะวิทยาเบื้องต้น
2. กรรมวิธีทางความร้อน
3. การชุบแข็งเหล็กกล้า
4. การทดสอบเบื้องต้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง
5. ปัญหาและการป้องกันข้อผิดพลาดจากกรรมวิธีทางความร้อน

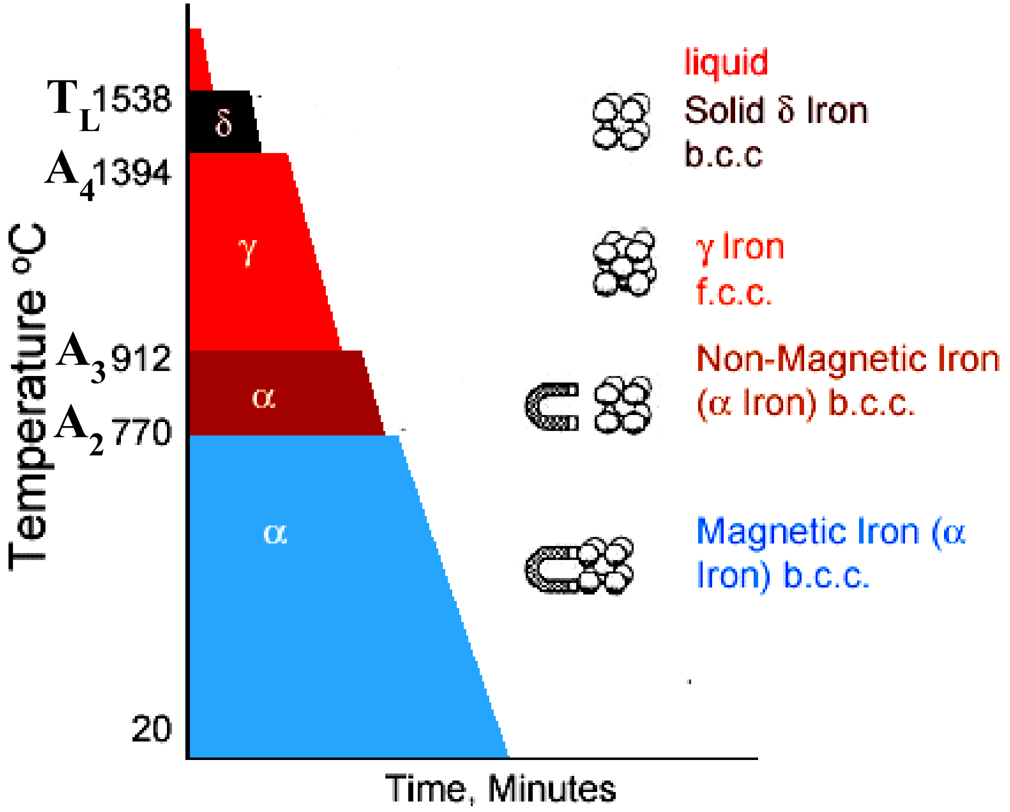


BCC

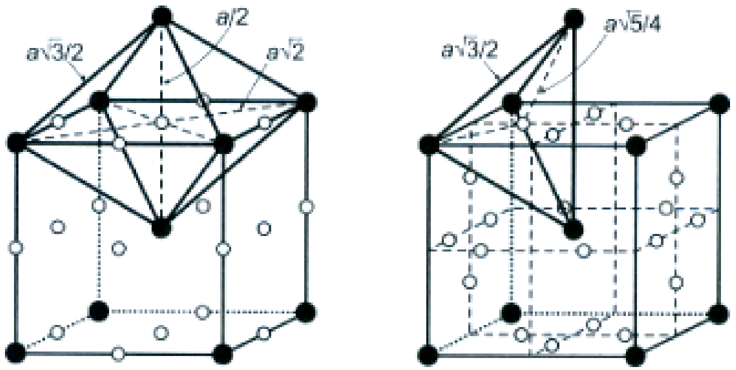


FCC

Crystal structures of iron



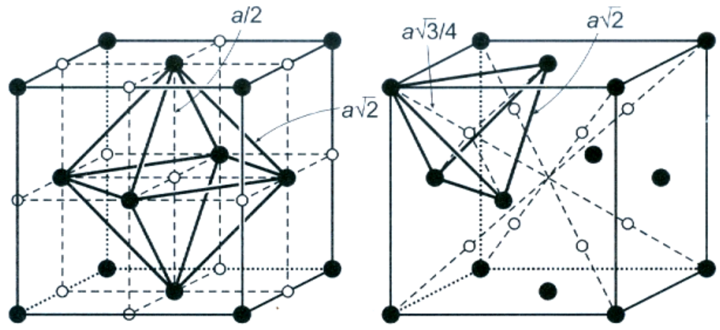
โลหะวิทยาเบื้องต้น (Introduction of Metallurgy)



● Metal atoms
○ Interstitial atoms in octahedral interstitial sites

● Metal atoms
○ Interstitial atoms in tetrahedral interstitial sites

BCC



● Metal atoms
○ Interstitial atoms in octahedral interstitial sites

● Metal atoms
○ Interstitial atoms in tetrahedral interstitial sites

FCC

Element	Atomic radius in 10^{-10} m
H	0.32
N	0.75
C	0.77
O	0.72
B	0.82
He	0.93

	Body-centered cube	Face-centered cube
Lattice constant	$a = 2.86 \cdot 10^{-10}$ m at room temperature	$a = 3.64 \cdot 10^{-10}$ m at 911°C
Volume of the unit cell	a^3	a^3
Number of atoms per unit cell	2	4
Number of adjacent neighboring atoms	8	12
Distance to adjacent neighboring atoms	0.866 a	0.707 a
Number of octahedral interstitial sites	6	4
Number of tetrahedral interstitial sites	12	8
Size of the octahedral interstitial sites	$0.19 \cdot 10^{-10}$ m	$0.53 \cdot 10^{-10}$ m
Size of the tetrahedral interstitial sites	$0.36 \cdot 10^{-10}$ m	$0.28 \cdot 10^{-10}$ m
Number of the second closest neighbors	6	6
Distance to the second closest neighbors	a	a
Volume ratio	68 %	74 %
Closed packed direction	<111>	<110>
Closed packed plane	{110}	{111}
Atomic radius	$1.24 \cdot 10^{-10}$ m	$1.29 \cdot 10^{-10}$ m
Atomic distance	$2.48 \cdot 10^{-10}$ m	$2.57 \cdot 10^{-10}$ m
Theoretical density	7.88 g/cm^3	7.69 g/cm^3

สถานภาพของธาตุผสมที่อยู่ในเหล็กกล้า

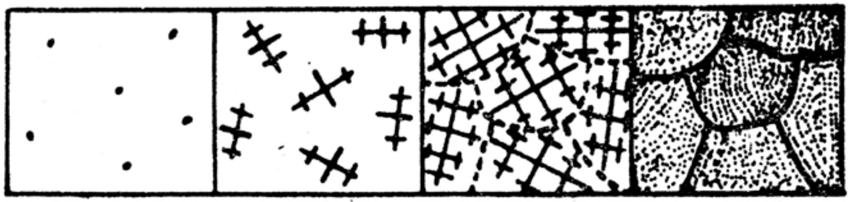
1. แยกตัวเป็นอิสระในรูปโลหะบริสุทธ์ → เช่น ทองแดง ตะกั่ว
2. แทนที่อะตอมของธาตุหลัก → ขนาดและโครงสร้างผลึกที่ใกล้เคียงกัน มีแบบใหญ่กว่าและเล็กกว่าอะตอมหลักเช่น Cr Ni
3. แทรกช่องว่างอะตอมของธาตุหลัก → อะตอมมีขนาดเล็ก แทรกเข้าไปเกิดความเสียหาย ความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมาก เช่น C
4. รวมตัวกับเหล็กเป็นสารประกอบ → ภาวะอิ่มตัวและเกิดการแยกตัวเกิดเป็นสารประกอบโลหะ เช่น Fe_3C

การเกิดเกรน

1.แกนผลึกที่มาจากวัสดุอื่นๆ เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กผสมต่างๆ

2.แกนผลึกที่เกิดขึ้นในตัวเอง เช่น เหล็กบริสุทธ์

ขนาดเกรน → ส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งและความแข็งแรงของวัสดุนั้นๆ



(ก) (ข) (ค) (ง)

ลักษณะการเกิดของเกรน

(ก) เริ่มเกิดเป็นจุดเล็ก ๆ ในโลหะเหลวที่กำลังเย็นตัวลง
(ข) เกิดผลึกเติบโตในทุกทิศทุกทาง ออกจากจุดเล็ก ๆ ในรูป (ก)
(ค) ผลึกเติบโตมาชนกัน เกิดเป็นแนวขอบเกรนขึ้น
(ง) โลหะเหลวที่คงมีอยู่ ในแนวกิ่งก้านผลึกแข็งตัว ทำให้เกรนมีเนื้อสม่ำเสมอ ไม่เหลือลักษณะกิ่งก้านของผลึกให้เห็น

เหล็กกล้า

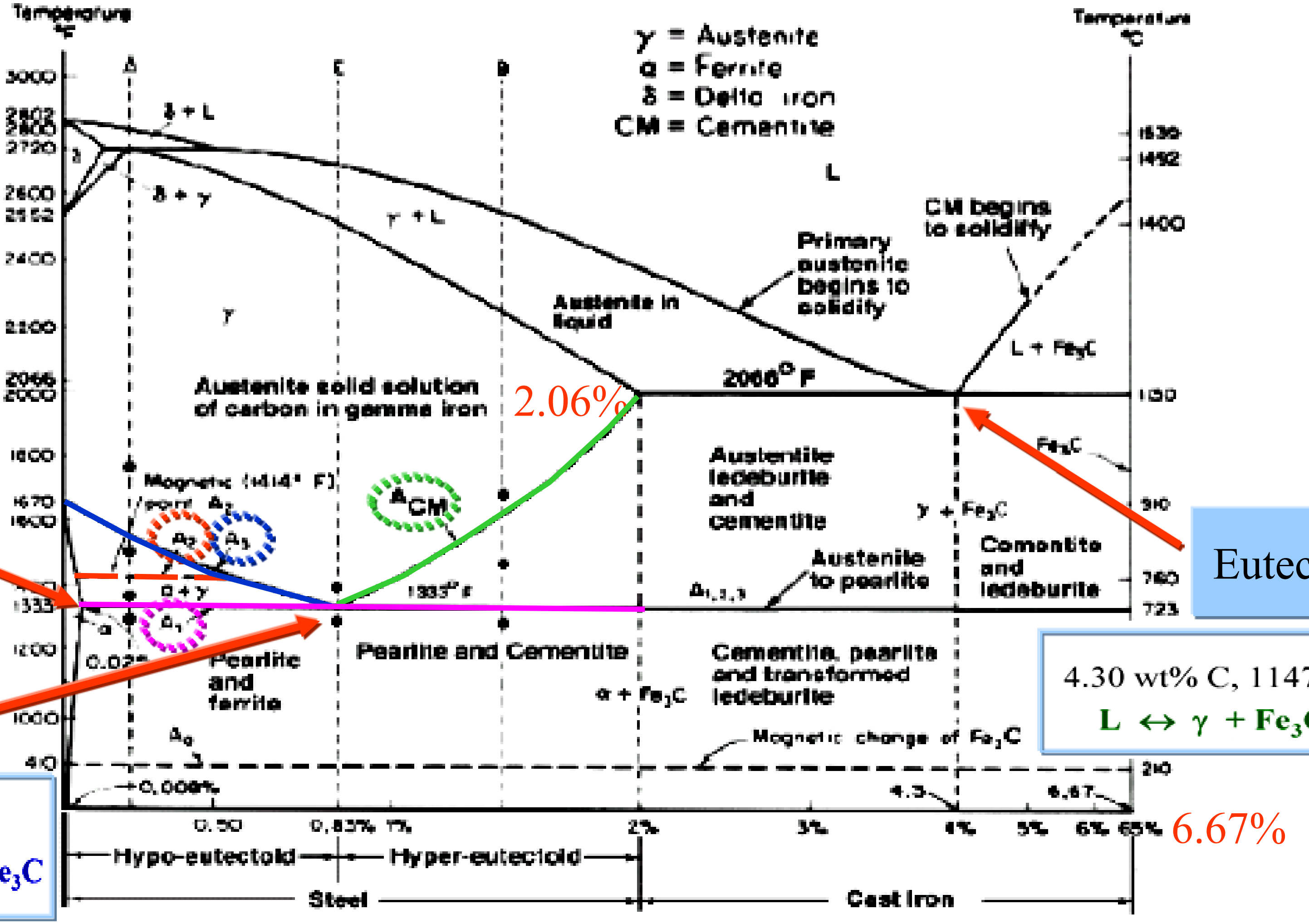
- **เหล็กกล้าคาร์บอน**
  - ตามมาตรฐาน EURONORM 20

Si	<=	0.5 %
Mn	<=	1.6 %
Al	<=	0.1 %
Ti	<=	0.05 %
Cu	<=	0.4 %
Ni + Cr	<=	0.3 %
Mo	<=	0.08 %

- **เหล็กกล้าเจือ**
  - เหล็กกล้าเจือต่ำ
    - สารเจือมีจำนวนรวมกัน < 5 %
    - ตัวอย่างเช่น (ตามมาตรฐาน DIN)
      - 15 Mo 3 (C=0.15%,Mo=0.3%)
      - 42 Mn V 7 (C=0.42%,Mn=1.75%)
  - เหล็กกล้าเจือสูง
    - สารเจือมีจำนวนรวมกัน > 5 %
    - ตัวอย่างเช่น (ตามมาตรฐาน DIN)
      - X 10 CrNiTi 18 9 (C=0.1%,Cr=18%, Ni=9%)
      - X 10 Cr 13 (C=0.1%,Cr=13%)

Metastable System

Fe-Fe_3C diagram



Eutectoid

0.76 wt%C, 727 °C

γ(0.76 wt% C) $\leftrightarrow$ α (0.022 wt% C) + Fe_3C

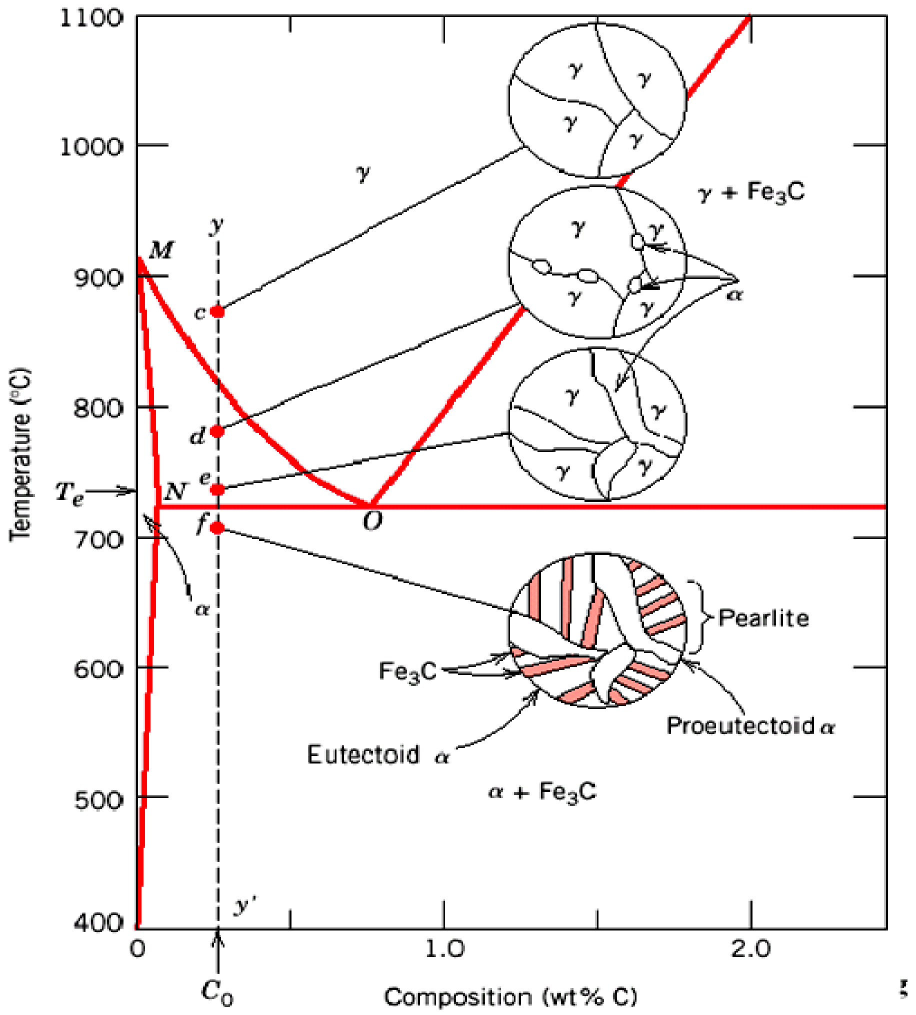
4.30 wt% C, 1147 °C

$L \leftrightarrow \gamma + Fe_3C$

Hypoeutectoid

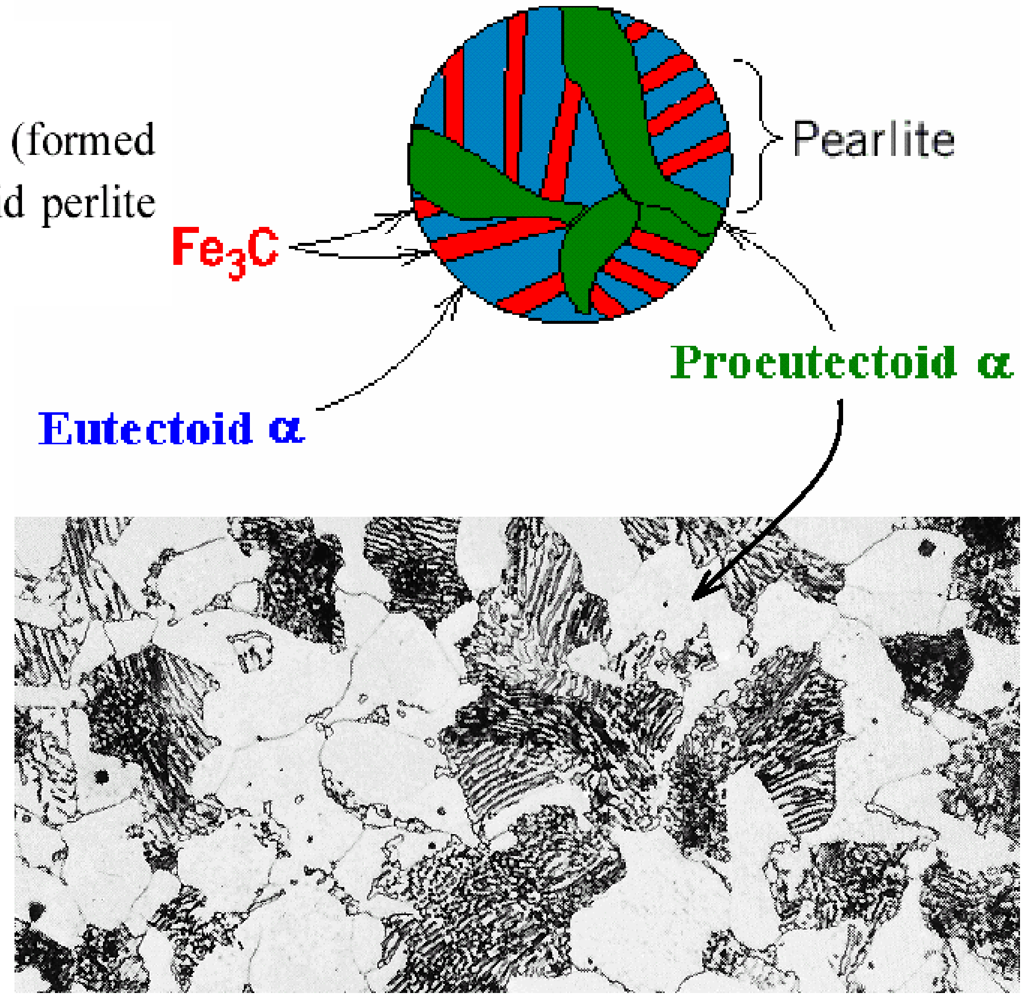
ช่วงไฮโปยูเทกตอยด์ (C < 0.8%)

!!!!!เฟสไหนเกิดทีหลังเมื่อให้ความร้อนอีกครั้งจะละลายก่อน

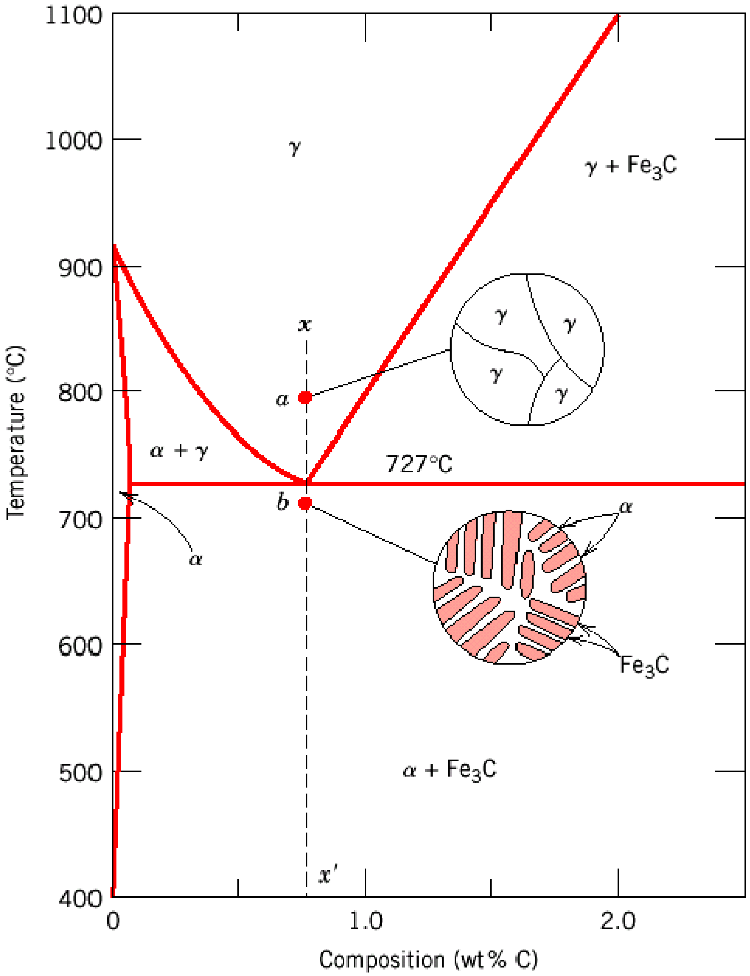


Microstructure of hypoeutectoid steel

Hypoeutectoid alloys contain proeutectoid ferrite (formed above the eutectoid temperature) plus the eutectoid perlite that contain eutectoid ferrite and cementite.



Microstructure of eutectoid steel



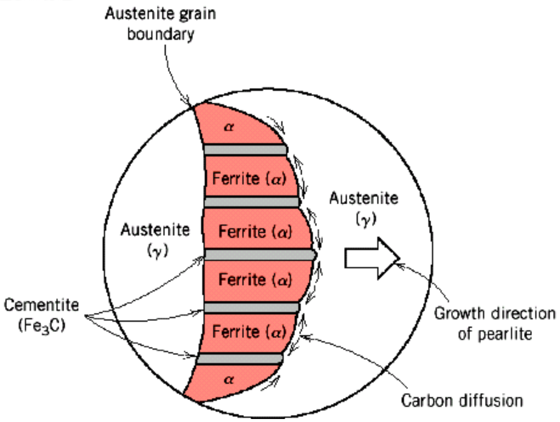
Microstructure of eutectoid steel

When alloy of eutectoid composition (0.76 wt % C) is cooled slowly it forms **perlite**, a lamellar or layered structure of two phases: α-ferrite and cementite (Fe_3C)

The layers of alternating phases in pearlite are formed for the same reason as layered structure of eutectic structures: redistribution C atoms between ferrite (0.022 wt%) and cementite (6.7 wt%) by atomic diffusion.

Mechanically, pearlite has properties intermediate to soft, ductile ferrite and hard, brittle cementite.

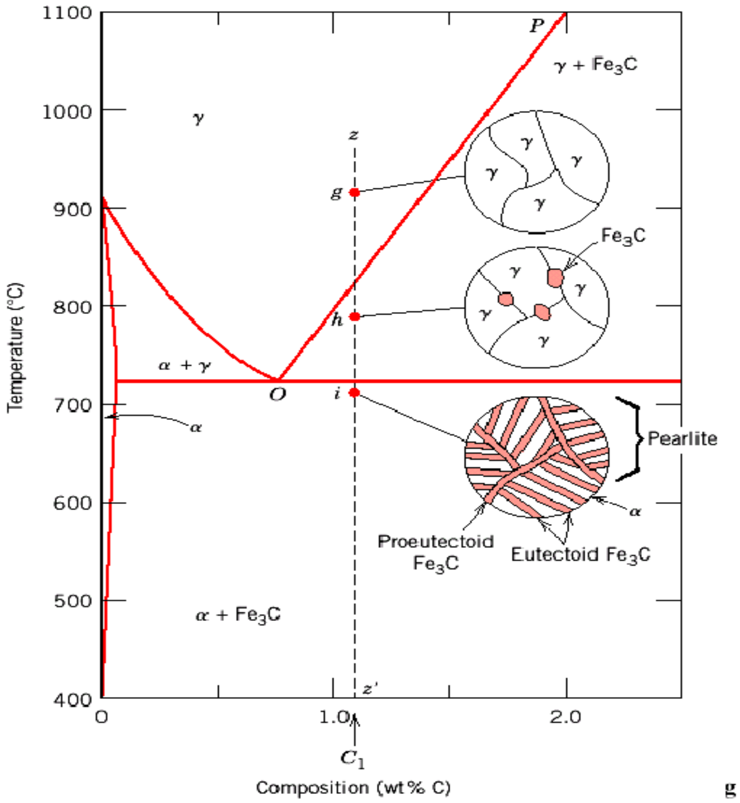
In the micrograph, the dark areas are Fe_3C layers, the light phase is α-ferrite



Microstructure of hypereutectoid steel (I)

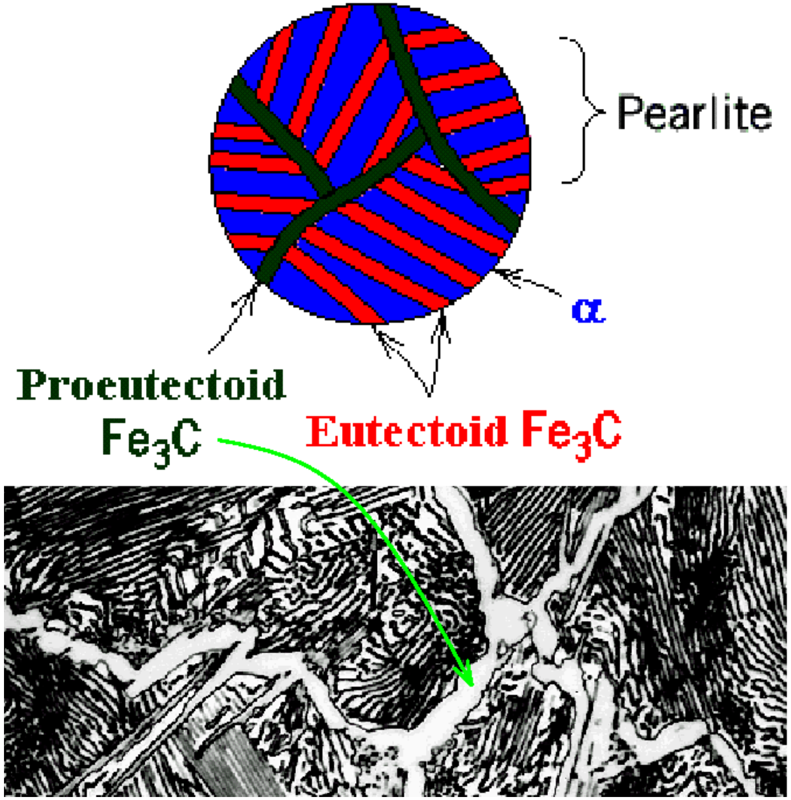
Compositions to the right of eutectoid (0.76 - 2.14 wt % C) **hypereutectoid** (*more than eutectoid* -Greek) alloys.

$$\gamma \rightarrow \gamma + Fe_3C \rightarrow \alpha + Fe_3C$$

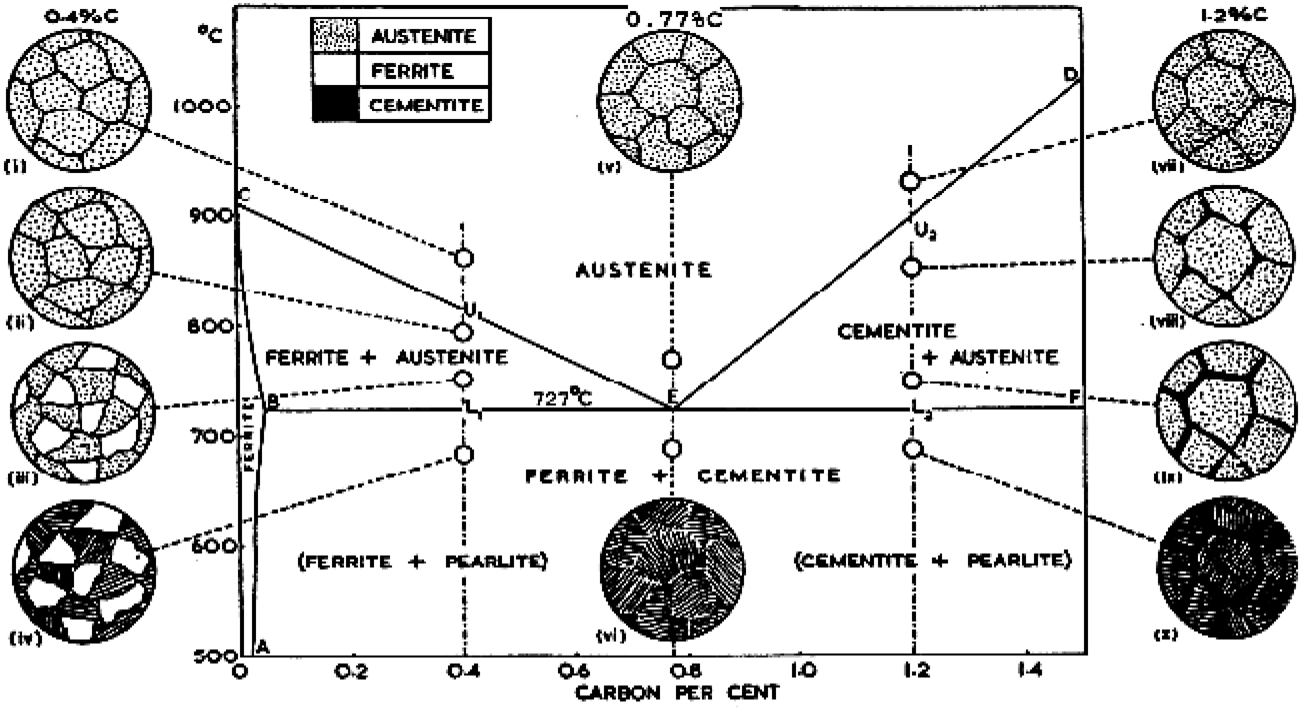


Microstructure of hypereutectoid steel

Hypereutectoid alloys contain proeutectoid cementite (formed above the eutectoid temperature) plus perlite that contain eutectoid ferrite and cementite.



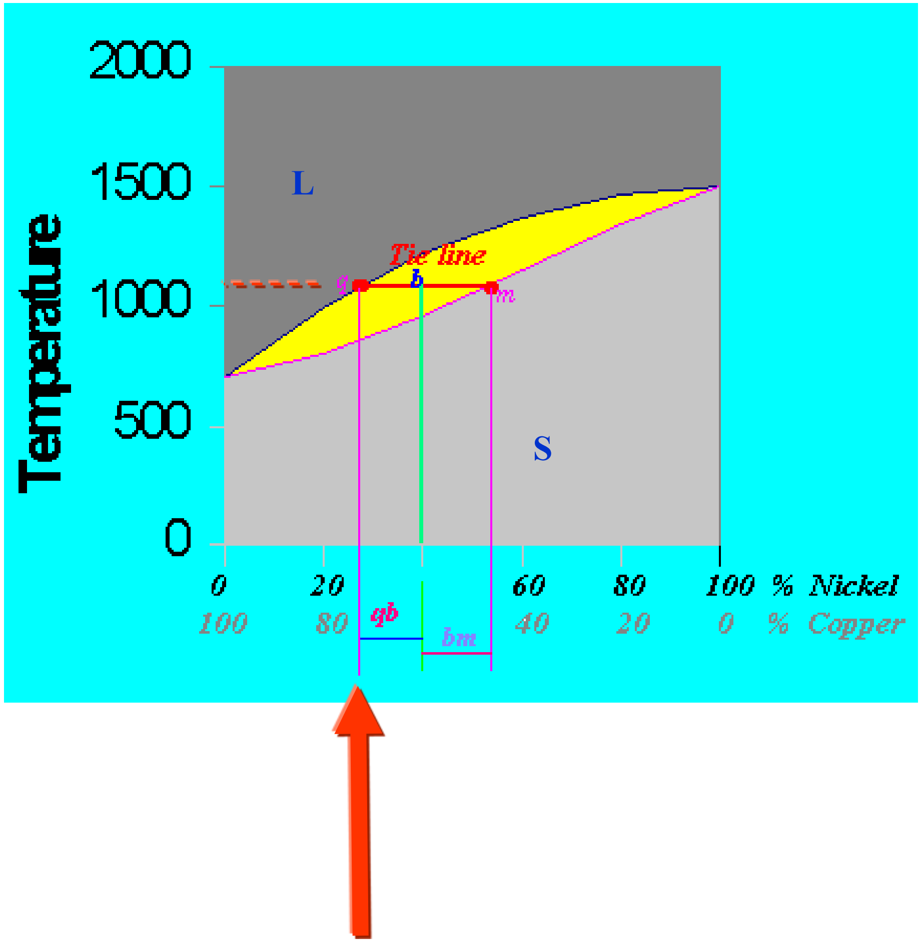
hypoeutectoid	eutectoid	hypereutectoid
proeutectoid α & $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$	$\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$	proeutectoid Fe_3C & $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$



Lever Rule

- จากLever Rule สามารถคำนวณหาปริมาณเฟสหนึ่งในองค์ประกอบสองเฟสได้โดยใช้เส้นที่ลากต่อเนื่องระหว่างเส้นขอบเขตของของเหลวถึงของแข็ง(Tie Line)
- โดยยึดหลักด้านตรงกันข้ามกับเฟสที่ต้องการหา
- จาก Level Rule ได้เศษส่วนโดยของเฟสของ***<u>เหลว ที่ T 1,100</u>***

พิจารณาจากเส้น Tie Line = $\dfrac{b \times m}{q \times m} \bullet 100\%$



โดยปริมาณนิเกิลและทองแดงที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะคือ **25% Ni** และ **75% Cu**

Ex. Lever Rule Using

หา %γ ที่อุณหภูมิ 800^0C ส่วนผสม 1.5%C

= [(6.67-1.5)/(6.67-1)]x 100%

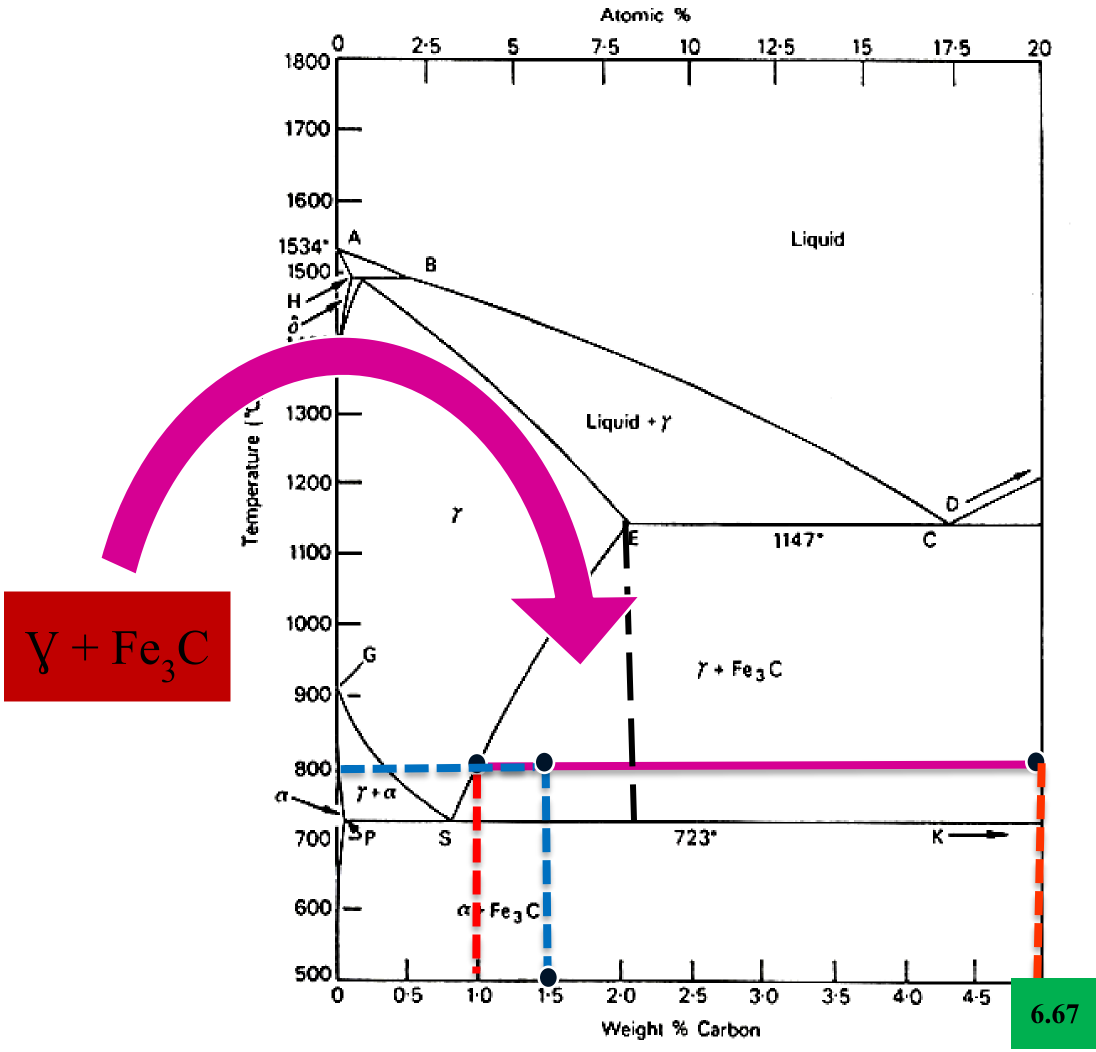
= 91.181 %

หา% Fe_3C = [(1.5-1.0)/(6.67-1)]x 100%

= 8.818 %

%C in γ = 1.0%

%C in Fe_3C = 6.67%



การเปลี่ยนแปรงโครงสร้าง Austennite ในสภาวะไม่สมดุลย์

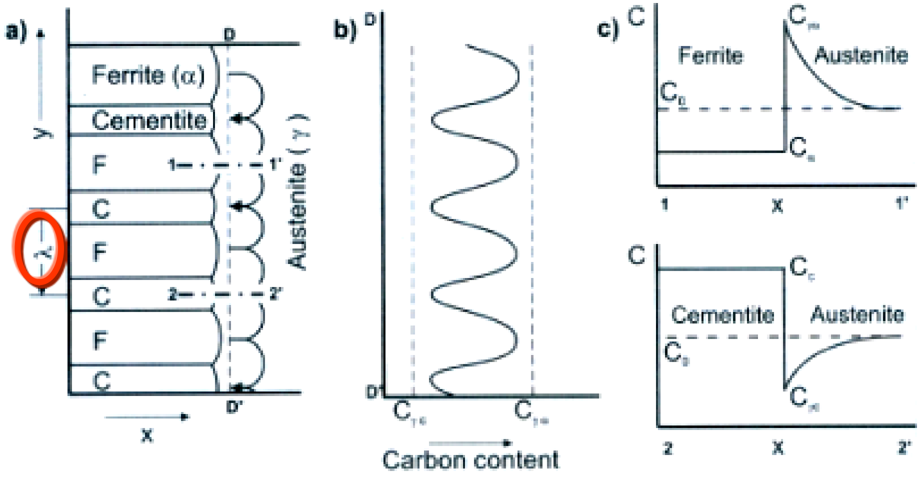
- **ซอร์ไบท์ Sorbite**
- **ทูลไซท์ Troostite**

} Very fine lamellar pearlite

- **เบนไนท์ Bainnite**
  - **-Upper Bainnite**
  - **-Lower Bainnite**
- **มาร์เทนไซต์ Martensite**
  - **-Plate Martensite**
  - **-Lath Martensite**

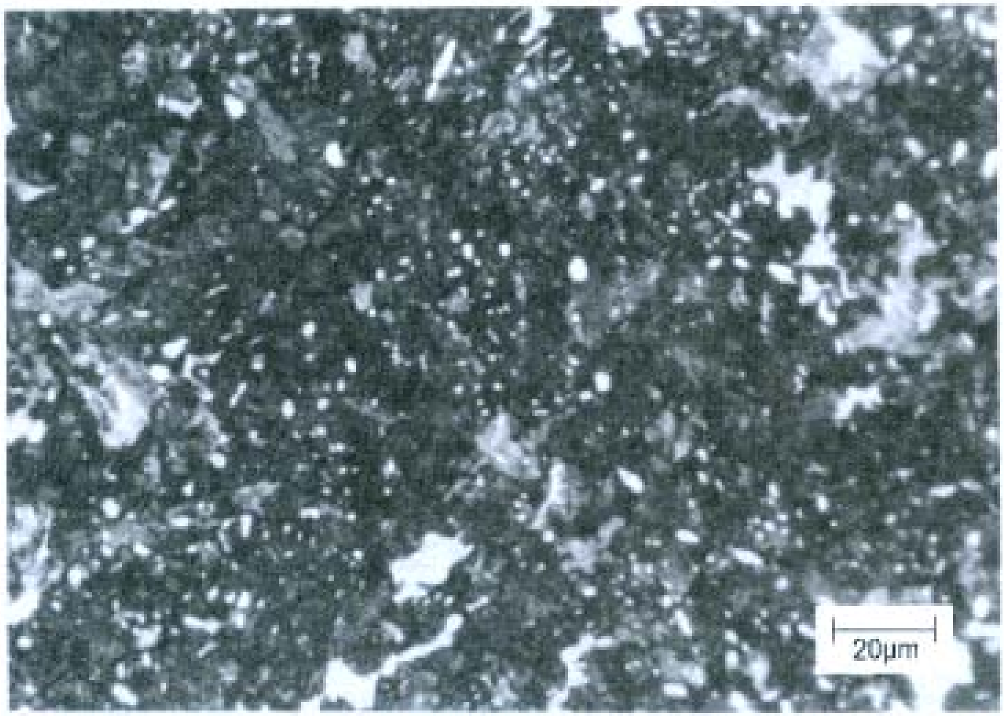
Microstructure	
ferrite and tertiary cementite	↓ increasing carbon content
ferrite and pearlite	
pearlite	
pearlite and secondary grain boundary cementite	

Microstructure	
coarse lamellar pearlite	↓ decreasing lamellar spacing λ
fine lamellar pearlite	
very fine lamellar pearlite (sorbite)	
very fine lamellar pearlite (troostite)	



Coordinates x,y; carbon concentrations C,C_0,C_α,C_c; lamellar spacing λ

Sorbite



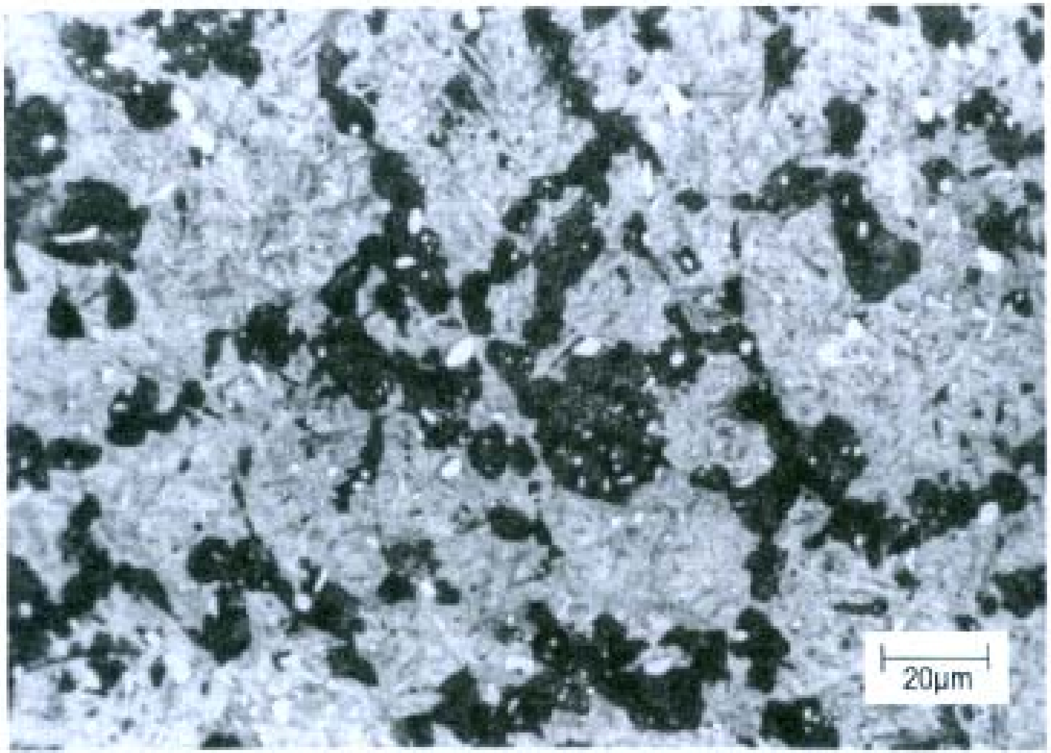
A fine lamellar microstructure (sorbite) under light microscopy.

-อัตราการเย็นตัวสูงกว่าภาวะปกติ

-Cooling rates up to 200^{0}K/s

-Reheat the sample เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของคาร์บอนได้

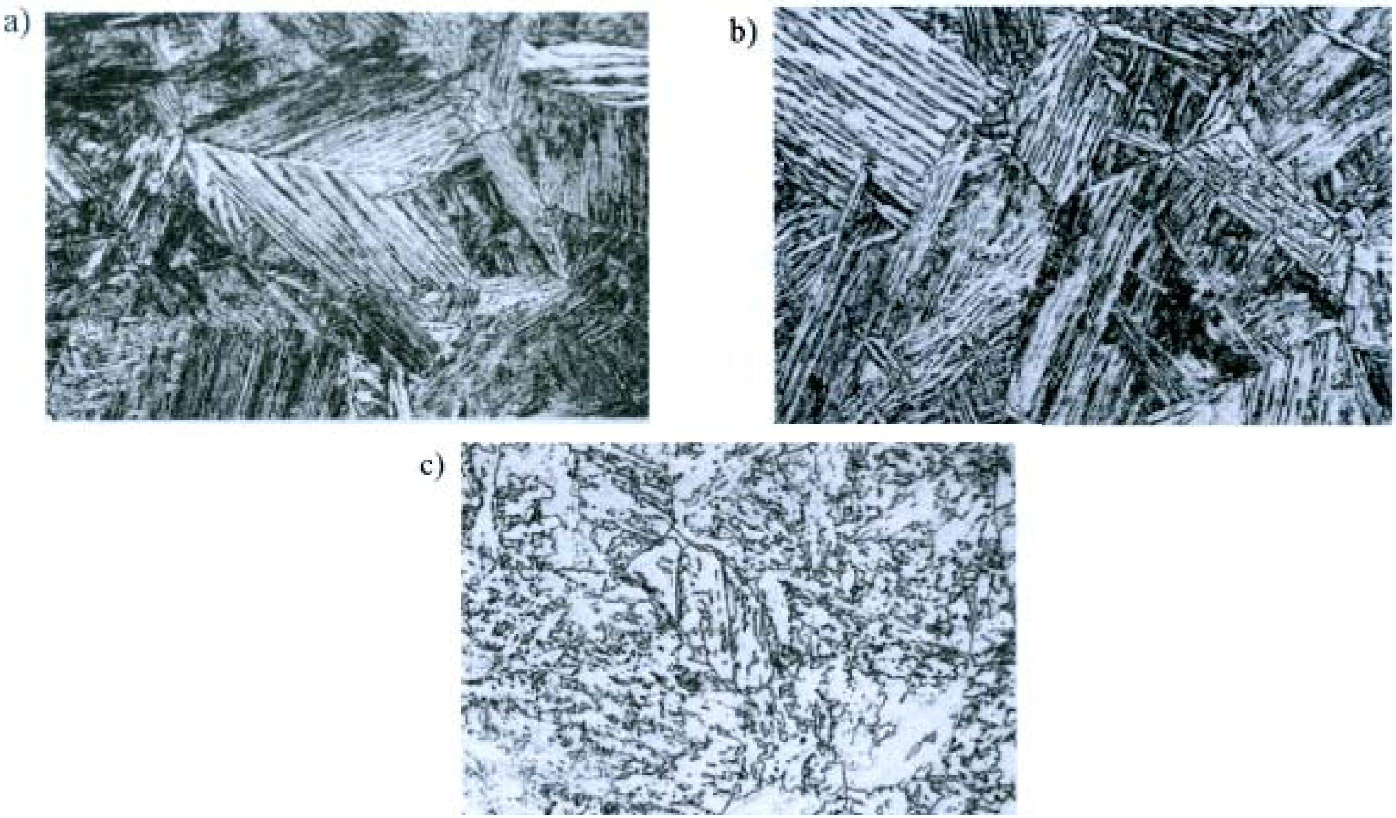
Troostite



A micro-lamellar microstructure (troostite) under the optical microscope.

- อัตราการเย็นตัวสูงแต่ไม่ถึงขั้นชุบแข็ง
- Cooling rates above 200^0K/s
- Reheat does not occur
- Pearlite form at around 500^0C
- คาร์บอนไม่สามารถเคลื่อนตัวได้

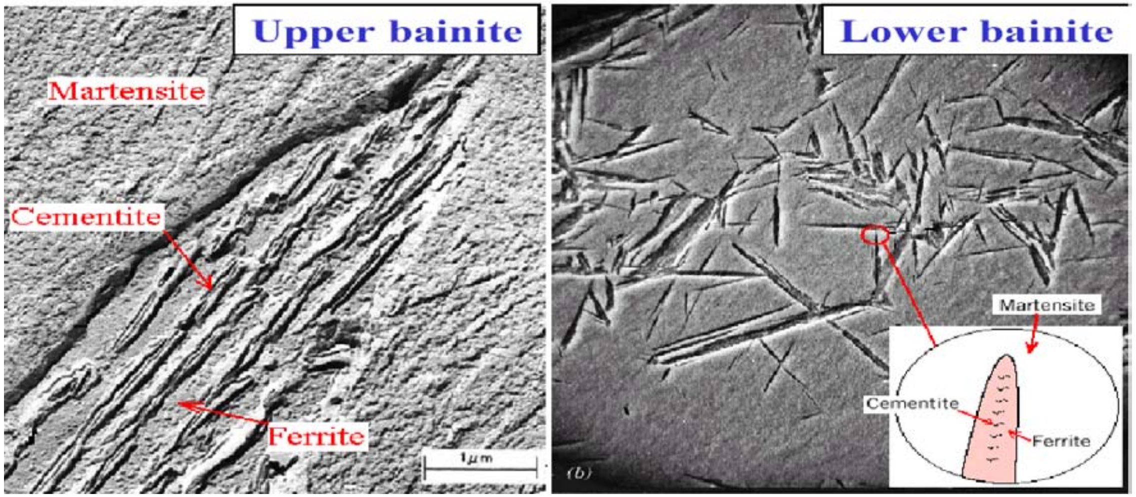
Bainite



Optical microscope photo of bainitic microstructures: a) fine acicular bainite, b) coarse acicular bainite, and c) granular bainite.

Formation of Bainite Microstructure (II)

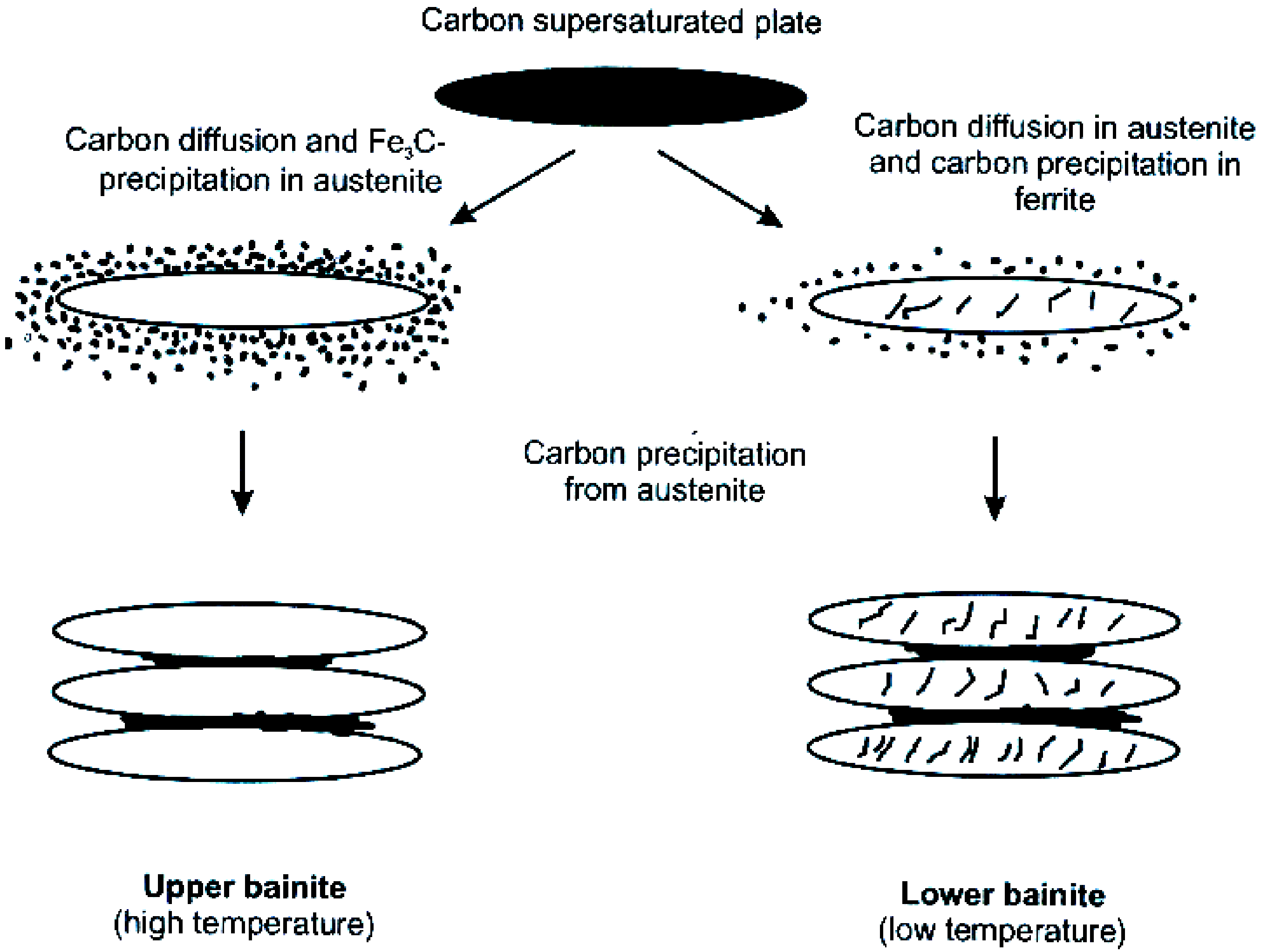
- For T ~ 300-540°C, **upper bainite** consists of needles of ferrite separated by long cementite particles
- For T ~ 200-300°C, **lower bainite** consists of thin plates of ferrite containing very fine rods or blades of cementite
- In the bainite region, transformation rate is controlled by microstructure growth (diffusion) rather than nucleation. Since diffusion is slow at low temperatures, this phase has a very fine (microscopic) microstructure.
- Pearlite and bainite transformations are competitive; transformation between pearlite and bainite not possible without first reheating to form austenite



เบนไนท์(Bainite)

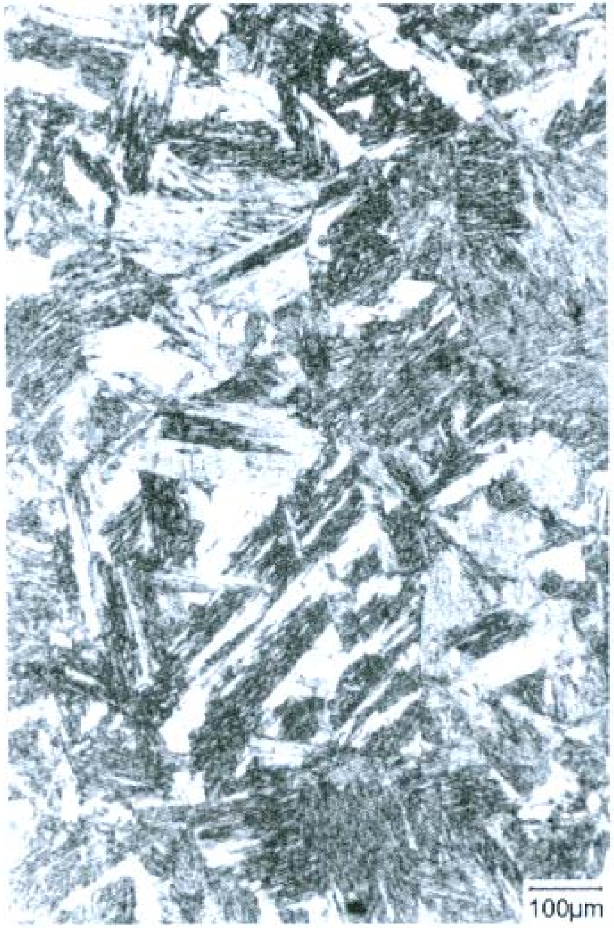
-เกิดจากเฟสออสเตนไนท์ที่เย็นตัวลงรวดเร็วแต่อัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าการเกิดมาร์เทนไซต์ โดยจะเกิดเฟอร์ไรท์ก่อน มีลักษณะคล้ายเข็มยื่นเข้าสู่ใจกลางเกรนออสเตนไนท์

-เมื่อเฟอร์ไรท์ขยายตัว จะผลักอะตอมคาร์บอนส่วนที่เกินออกมาด้านข้าง ทำให้บริเวณนั้นมีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นจนถึง 6.67% จะเกิดแถบบางๆของซีเมนต์ไตต์ เมื่อเฟอร์ไรท์ขยายตัวมากขึ้น จะเกิดแถบซีเมนต์ไตต์บริเวณที่ห่างไปเป็นระยะๆ การเกิดจะเกิดรอบๆเกรนหรือทั่วไปเป็นแห่งๆหรือเป็นกลุ่มแทรกในโครงสร้างมาร์เทนไซต์


Carbon supersaturated plate
Carbon diffusion and Fe_3C-precipitation in austenite
Carbon diffusion in austenite and carbon precipitation in ferrite
Carbon precipitation from austenite
Upper bainite
(high temperature)
Lower bainite
(low temperature)

Matensite

a) Plate martensite



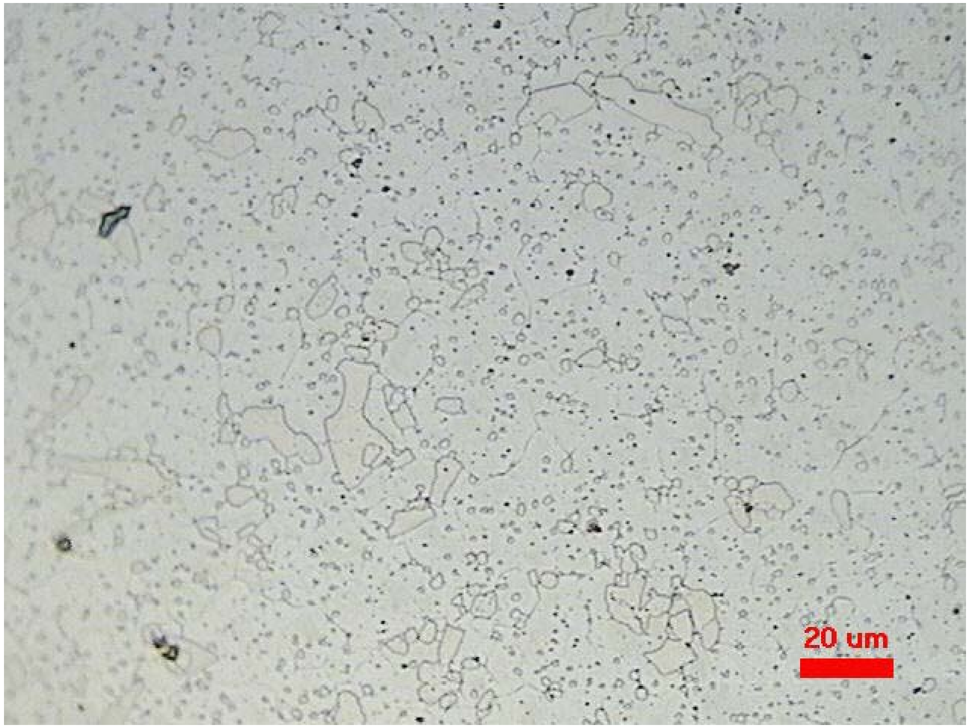
b) Lath martensite

มาร์เทนไซต์(Martensite)

- เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีเฟสออสเตนไนท์เมื่อถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว อะตอมของคาร์บอนไม่สามารถแพร่ออกจาก FCC แต่จะเปลี่ยนไปอยู่ที่ตำแหน่งOctahedral SiteของBCCจะเกิดการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอม อะตอมคาร์บอนในBCCจะเกินความสามารถในการละลายจึงจัดโครงสร้างผลึกใหม่เป็นBody Centered Tetragonal, BCT ที่มีชื่อเรียกว่ามาร์เทนไซต์(Martensite)

- ถ้าปริมาณคาร์บอนสูง อะตอมคาร์บอนที่ประกอบกันเป็นเฟสจะบิดเบี้ยวมาก มีลักษณะเป็น Plates รูปเข็มวิ่งเข้าสู่Plane(111) เรียกว่า Plate Martensite
- ถ้าปริมาณคาร์บอนน้อย อะตอมคาร์บอนที่ประกอบกันเป็นเฟสจะบิดเบี้ยวน้อย มีลักษณะเป็นแผ่นบาง เรียกว่า Lath Martensite

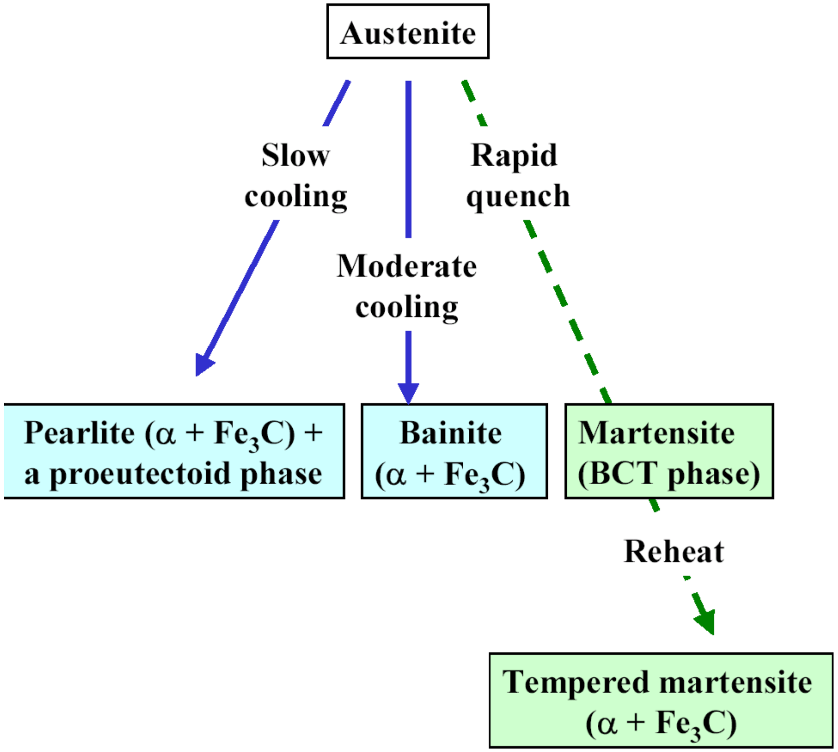
Others types of Martensite



SKD 11

SKS 3

Summary of austenite transformations



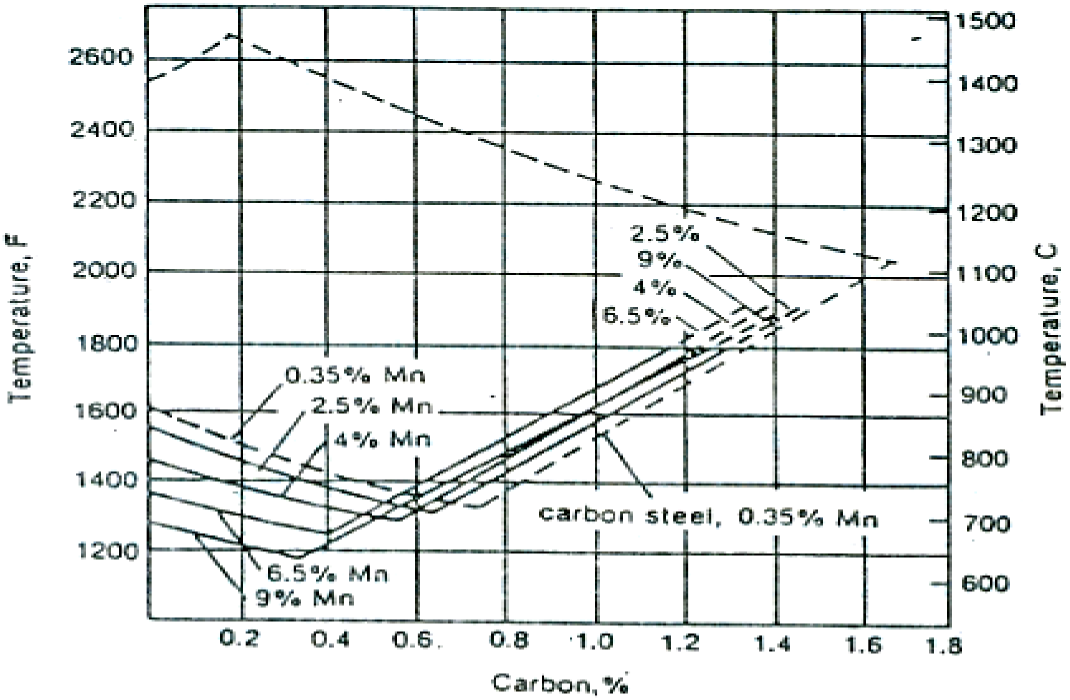
Solid lines are diffusional transformations, dashed is diffusionless martensitic transformation

บทบาทของธาตุผสมที่มีอิธิพลต่อโครงสร้างเหล็กกล้า

- -เพิ่มสเถียรภาพออสเตนไนท์
- -เพิ่มสเถียรภาพเฟอร์ไรท์

นิเกิล แมงกานีส และคาร์บอน

อาณาเขตของออสเตนไนท์กว้างขึ้นและถ้ามากพอจะทำให้มีโครงสร้างออสเตนไนท์ที่อุณหภูมิห้อง



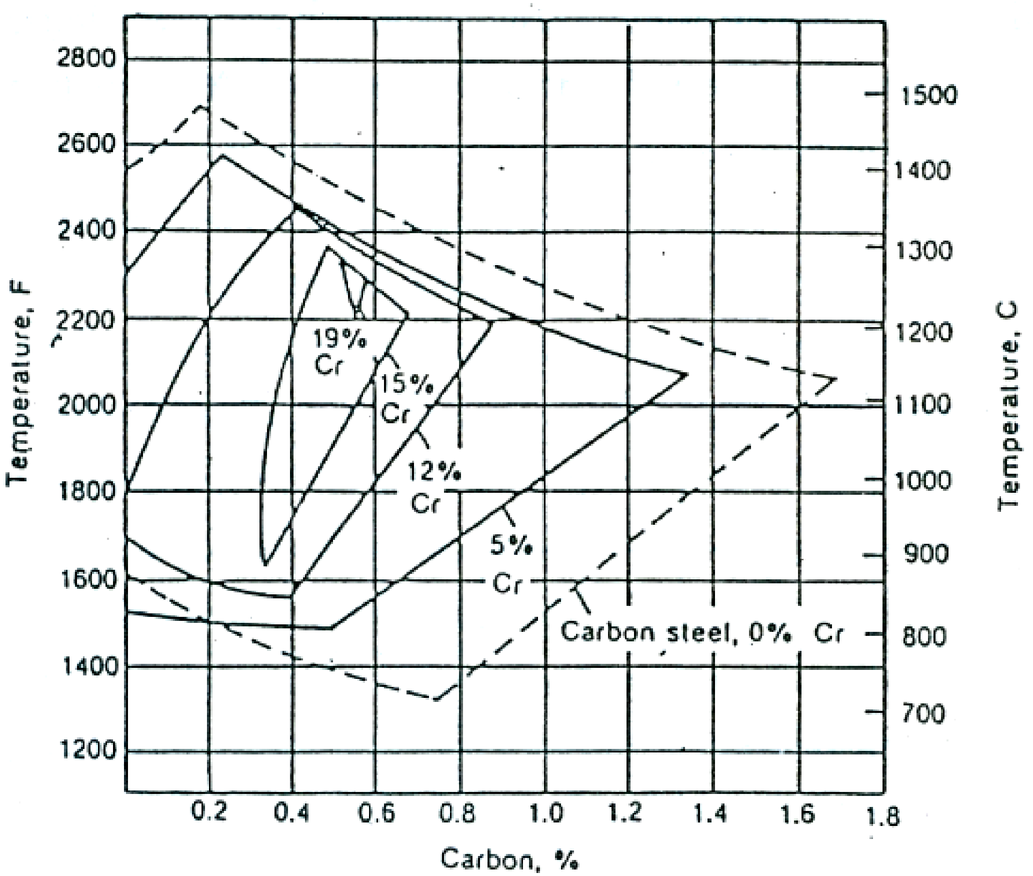
-เพิ่มสเถียรภาพออสเตนไนท์
-เพิ่มสเถียรภาพเฟอร์ไรท์

โครเมี่ยม โมลิบดินั่ม ซิลิกอน
ทังสเตน และอลูมิเนียม

ทำให้มีอาณาเขตของออสเตนไนท์ลดลง

เช่น SKD 11 → Cr 12%

Heat up to 980-1025^{0}C



C,คาร์บอน เพิ่มความแข็งแรง และรวมตัวกับ โครเมี่ยมและโมลิบดินั่มเกิดเป็นคาร์ไบด์

Mn,แมงกานีส ไล่ซัลเฟอร์ ช่วยให้อบชุบง่าย สามารถรวมตัวกับคาร์บอนได้ ช่วยเกรนละเอียด....

Al,อลูมิเนียม ช่วยไล่อ็อกซิเจนขณะเทลงแบบ เนื้อเหล็กละเอียดขึ้น เพิ่มความแข็งในรูปผิวไนตราย

Cr,โครเมี่ยม ช่วยอบชุบแข็งเหล็กง่ายขึ้น เพิ่มความแข็ง เกิดเป็นคาร์ไบด์แต่ทำให้ลดค่าต้านกัดกร่อน

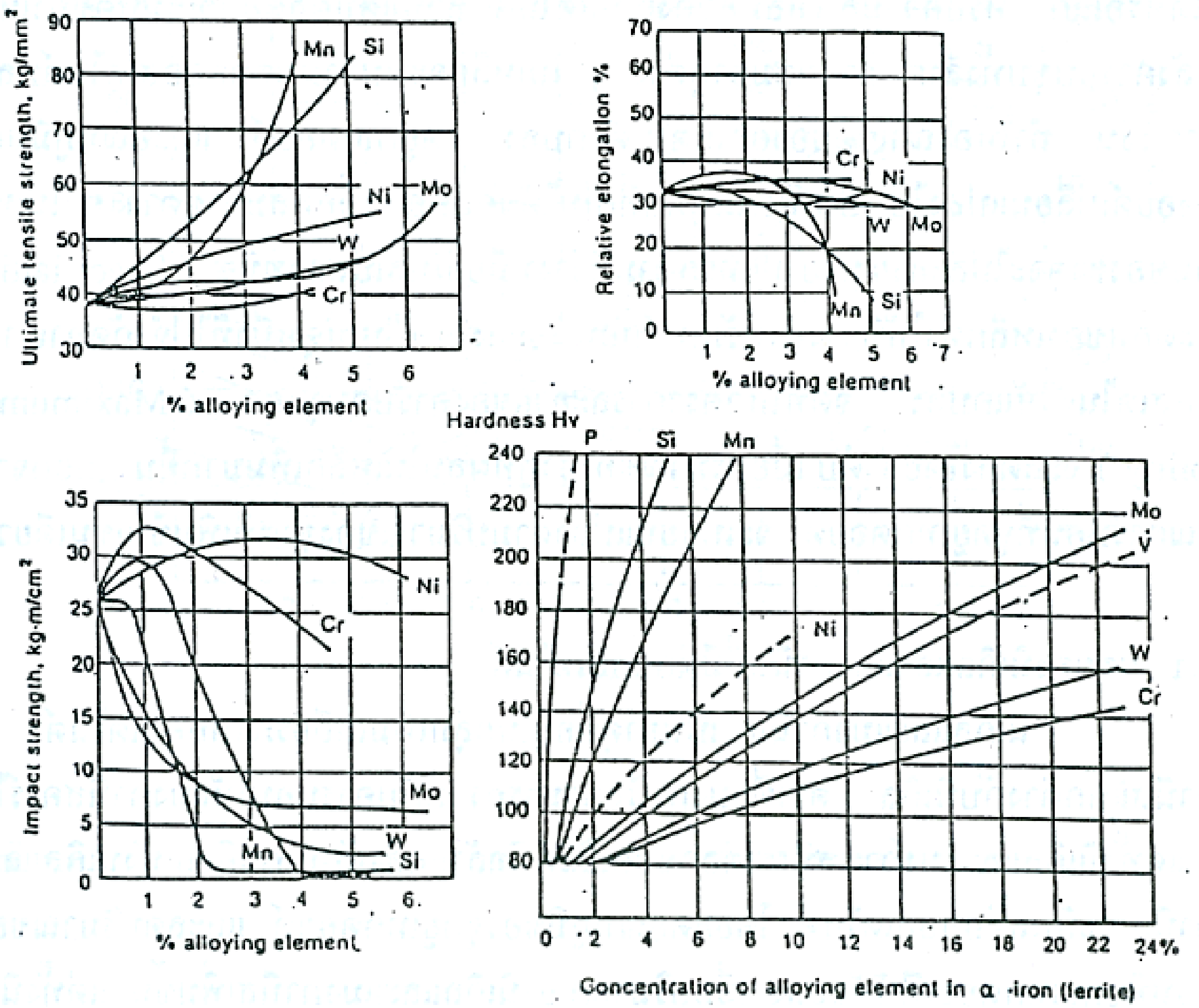
W,ทังสเตน รวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ คงความแข็งที่อุณหภูมิสูง ทนการเสียดสี ใช้ทำมีดตัดปาด

Mo,โมลิบดินั่ม ช่วยอบชุบแข็งเหล็กง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะเทมเปอร์ เหล็กเนื้อละเอียด เพิ่มความแข็งดึง

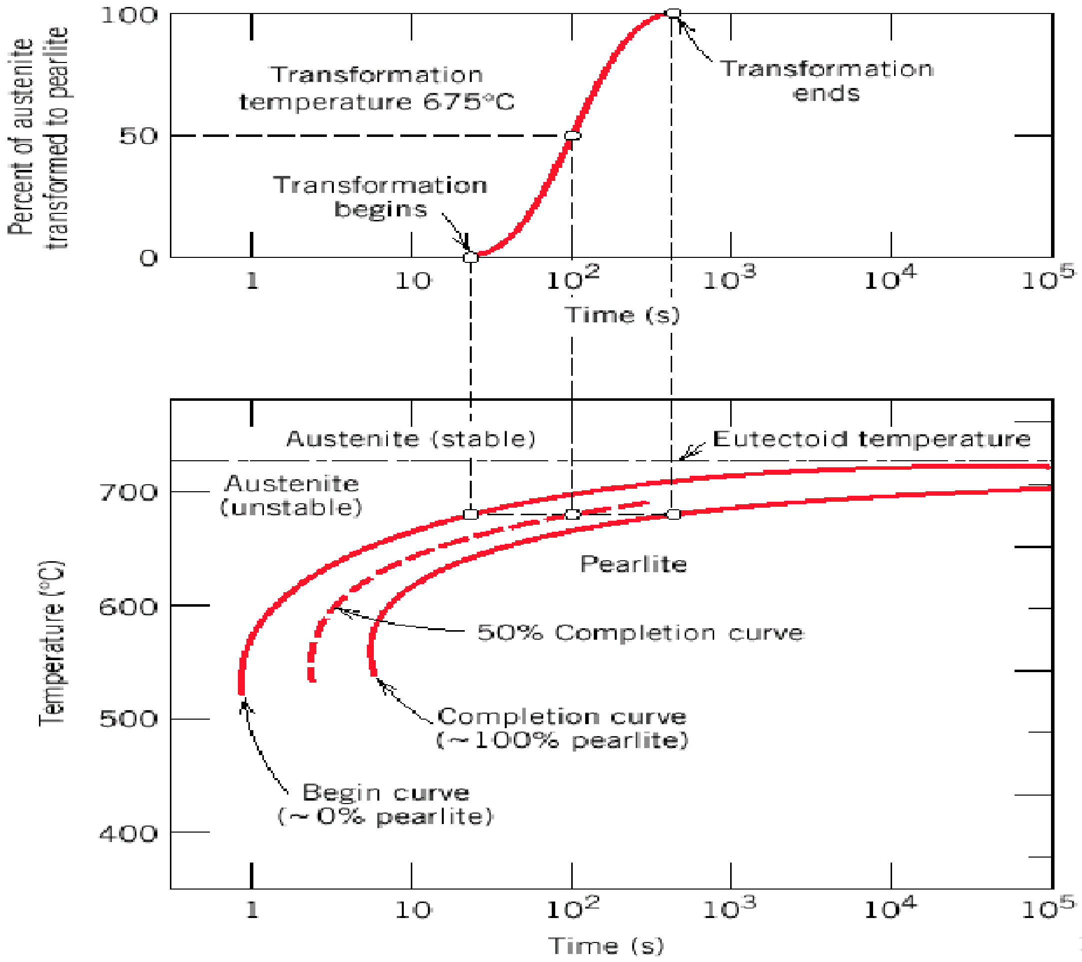
V,วาเนเดี่ยม ช่วยรักษาความแข็งที่อุณหภูมิสูง เหล็กเกรนละเอียด จับกับคาร์บอนได้คาร์ไบด์ พวกเหล็กงานร้อน

....

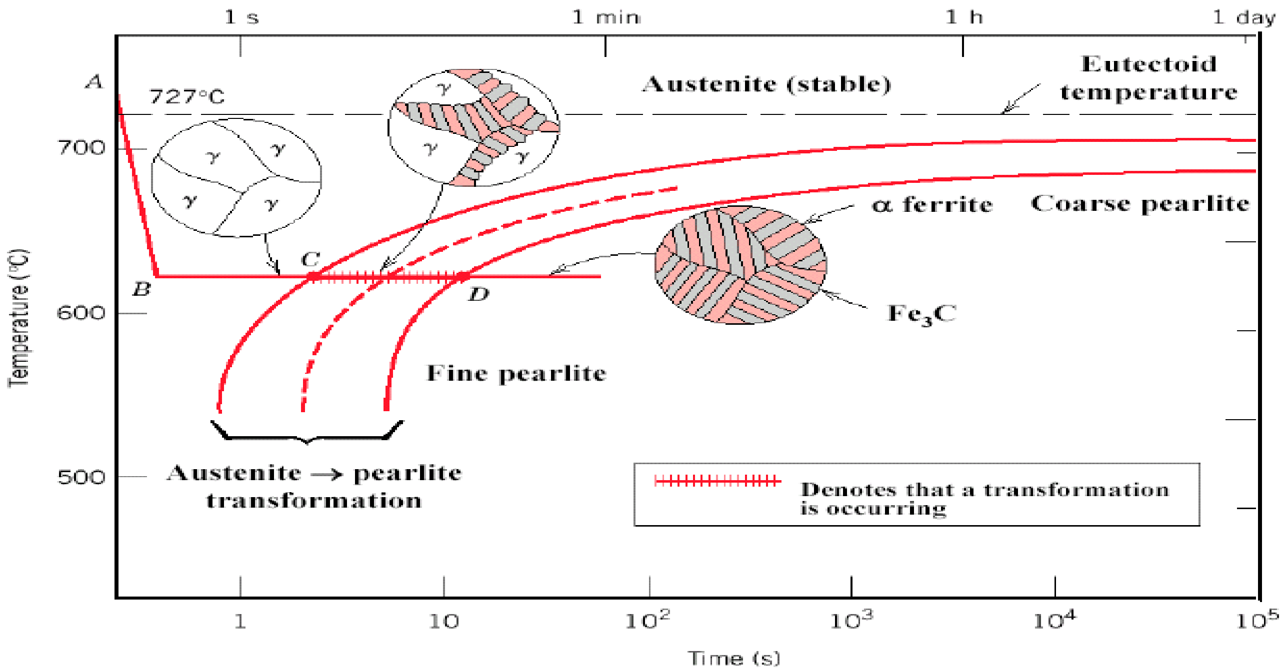
โลหะวิทยาเบื้องต้น (Introduction of Metallurgy)



Isothermal Transformation (or TTT) Diagrams (Temperature, Time, and % Transformation)

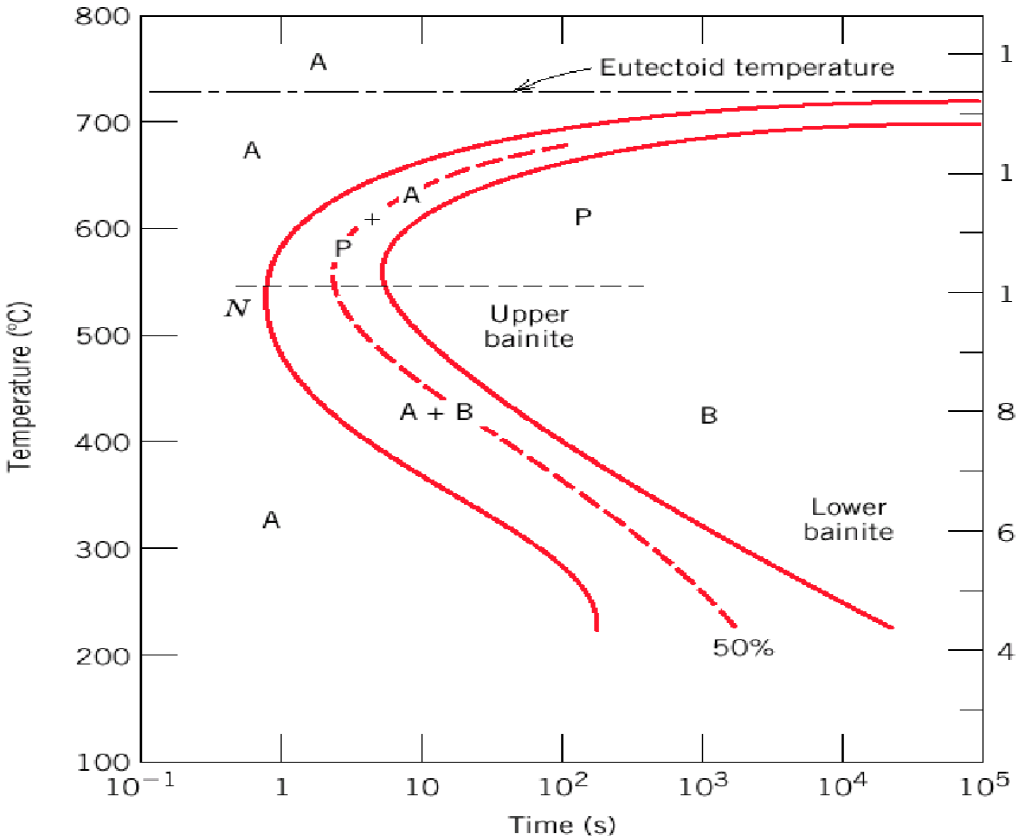


TTT Diagrams



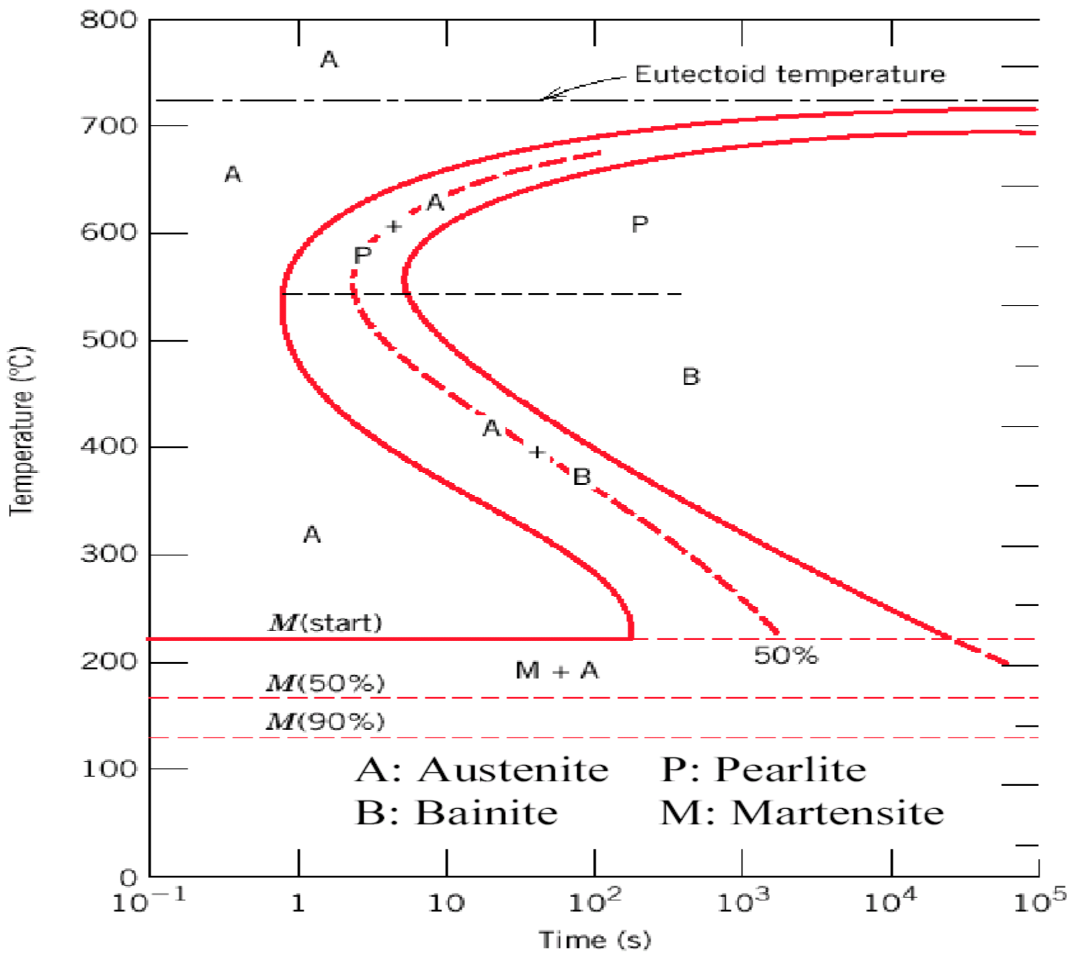
The thickness of the ferrite and cementite layers in pearlite is ~ 8:1. The absolute layer thickness depends on the temperature of the transformation. The higher the temperature, the thicker the layers.

Formation of Bainite Microstructure (I)



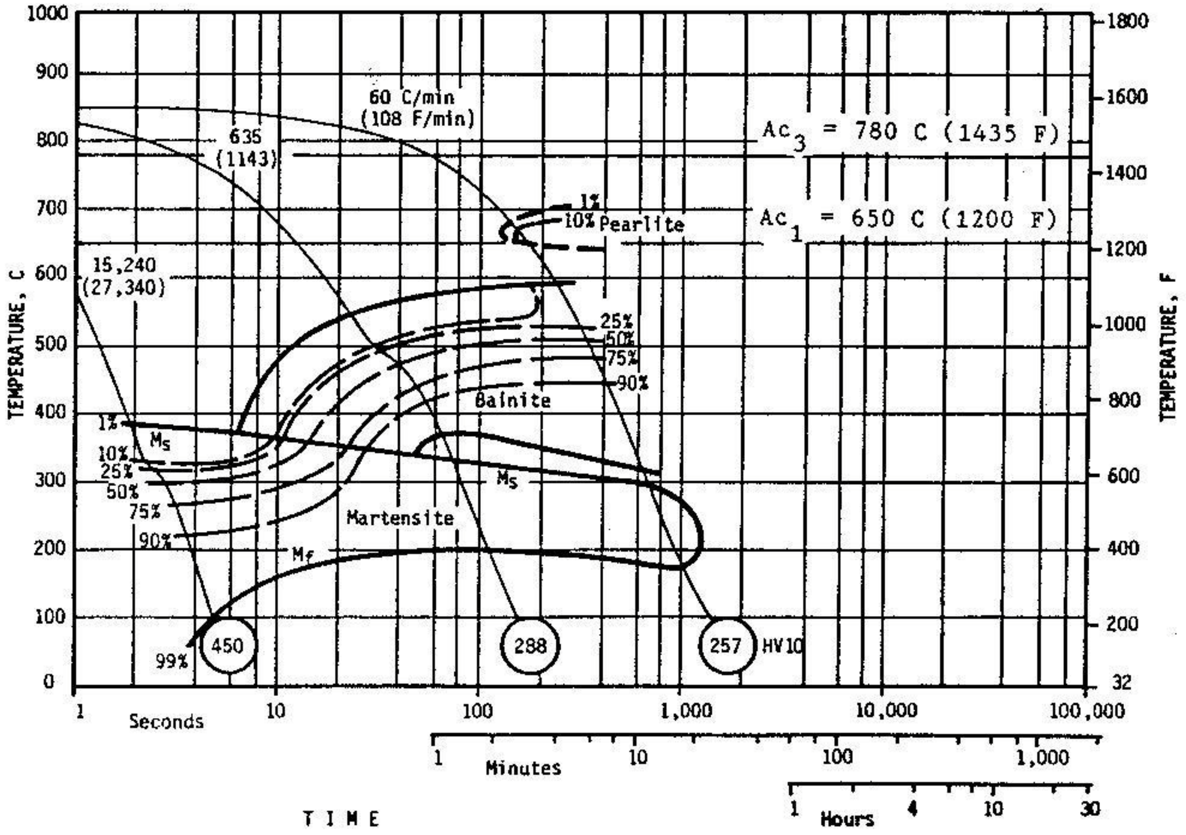
If transformation temperature is low enough (≤540°C) bainite rather than fine pearlite forms.

TTT Diagram including Martensite

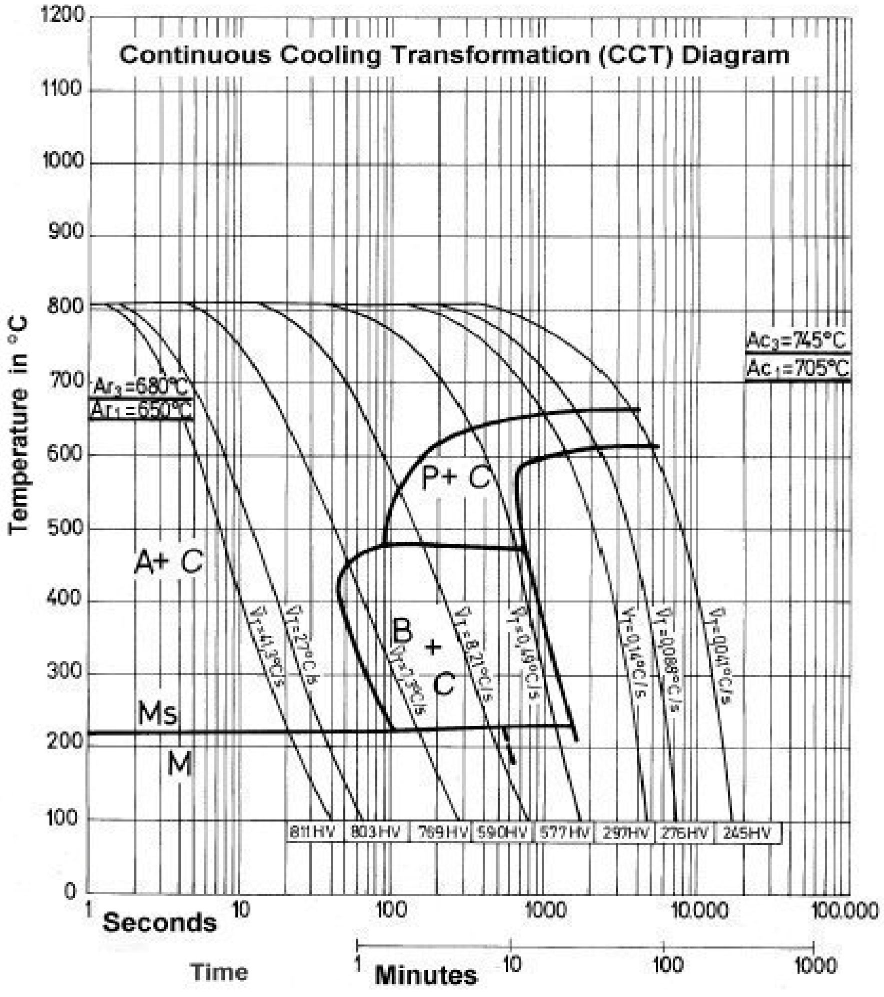


CCT Diagram

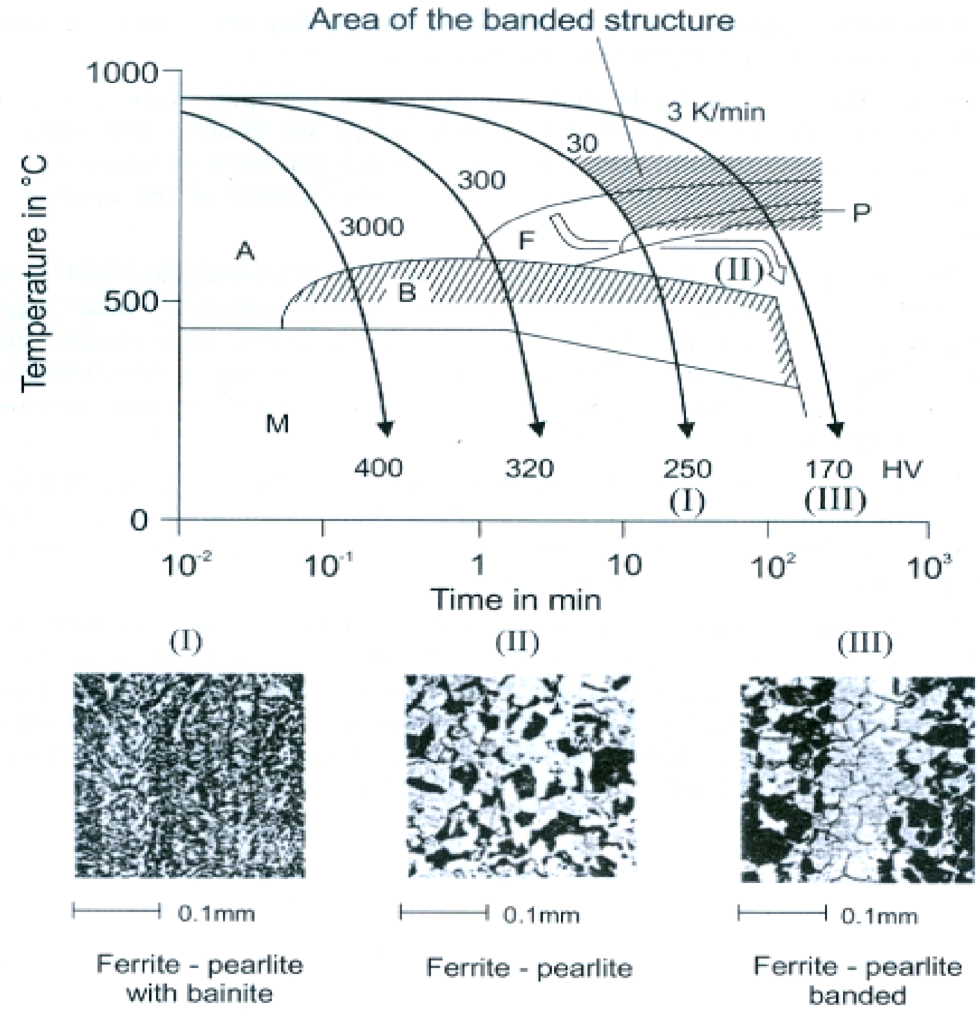
4815H: CCT Diagram. Composition for commercial SAE 4815 carburizing steel: 0.16 C, 0.63 Mn, 0.010 P, 0.012 S, 0.24 Si, 3.35 Ni, 0.21 Cr, 0.24 Mo, 0.19 Cu. In this study, slabs from commercial billet 76 mm (3 in.) square were normalized at 925 °C (1695 °F) for 1 h. Specimens were austenitized at 870 °C (1600 °F) for 20 min. The purpose of the study was to characterize a standard grade of carburizing steel for comparison with recently developed grades. Source: Datasheet I-257. Climax Molybdenum Company

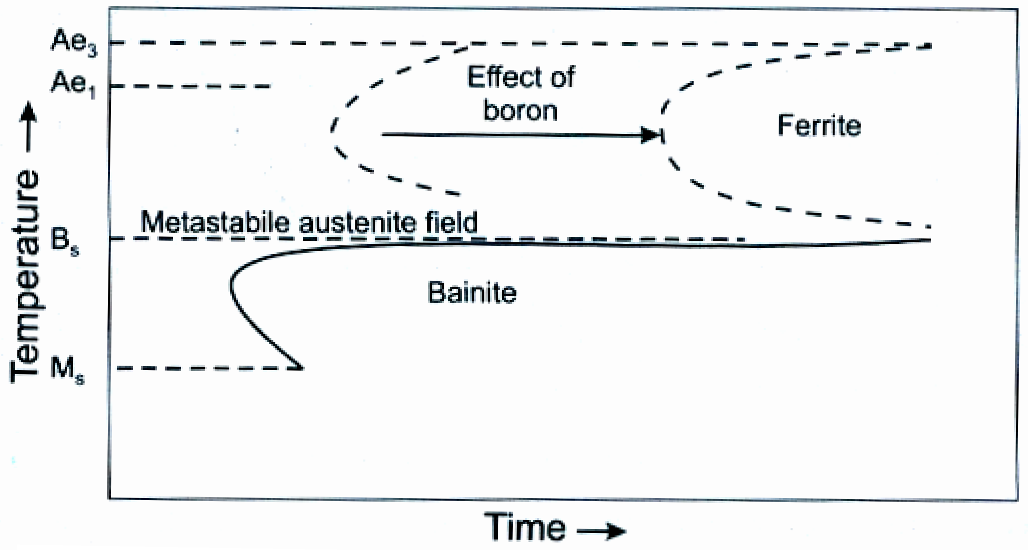


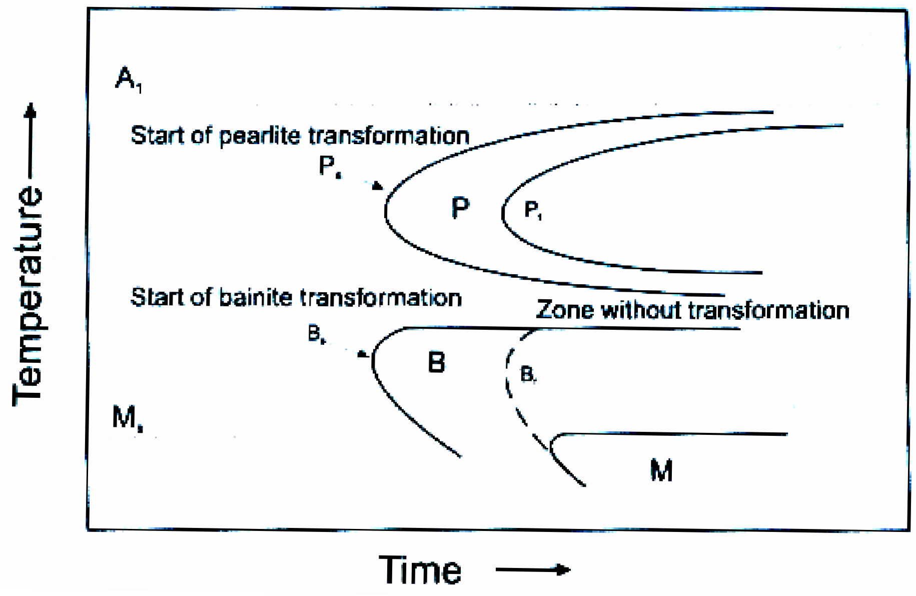
CCT Diagram


Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram
Temperature in °C
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Ar3=680°C
Ar1=650°C
Ac3=745°C
Ac1=705°C
P+ C
A+ C
B + C
Ms
M
811HV
803HV
769HV
590HV
577HV
297HV
276HV
245HV
1
Seconds
10
100
1000
10.000
100.000
Time
1
Minutes
10
100
1000

โลหะวิทยาเบื้องต้น (Introduction of Metallurgy)



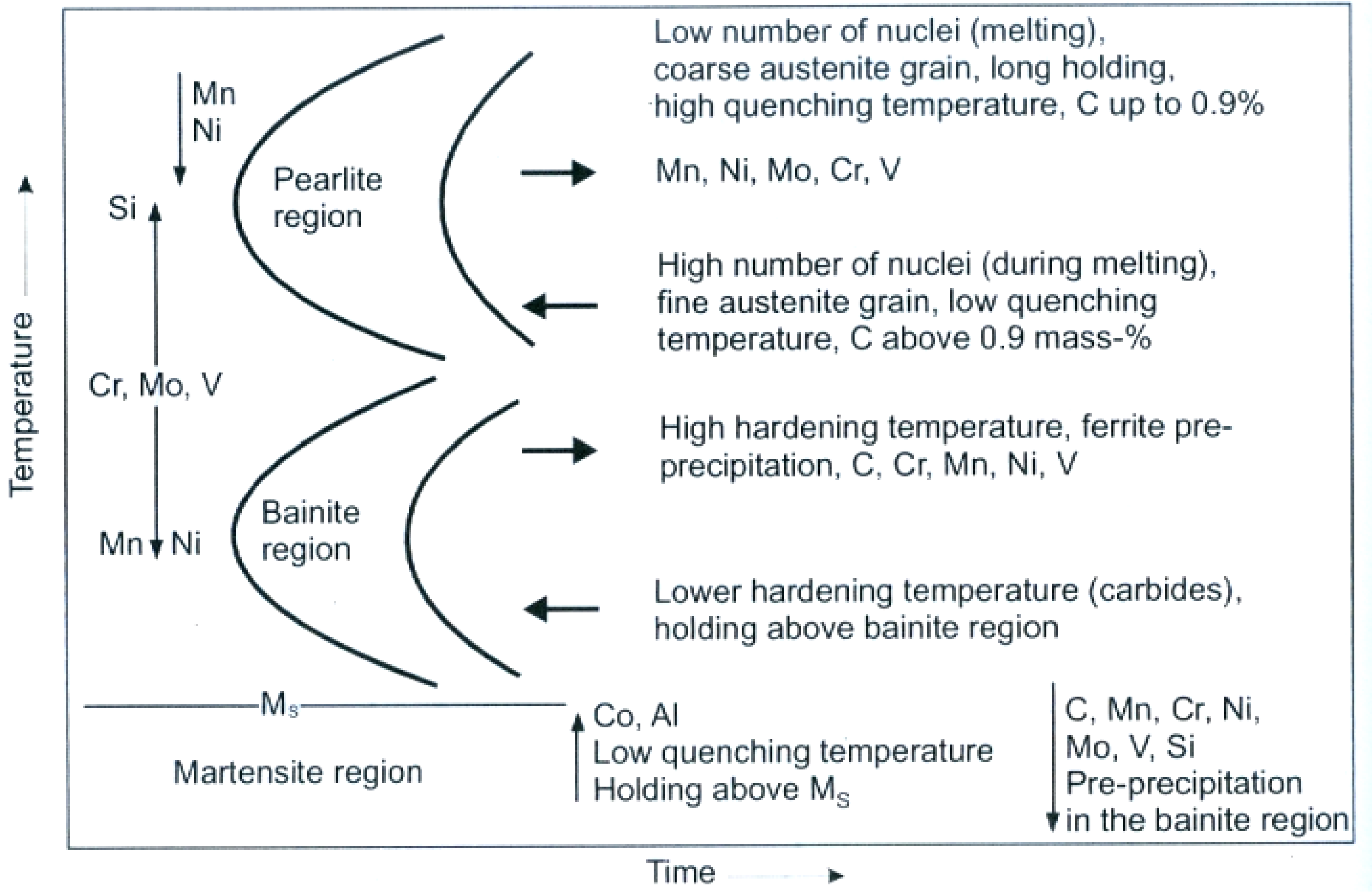


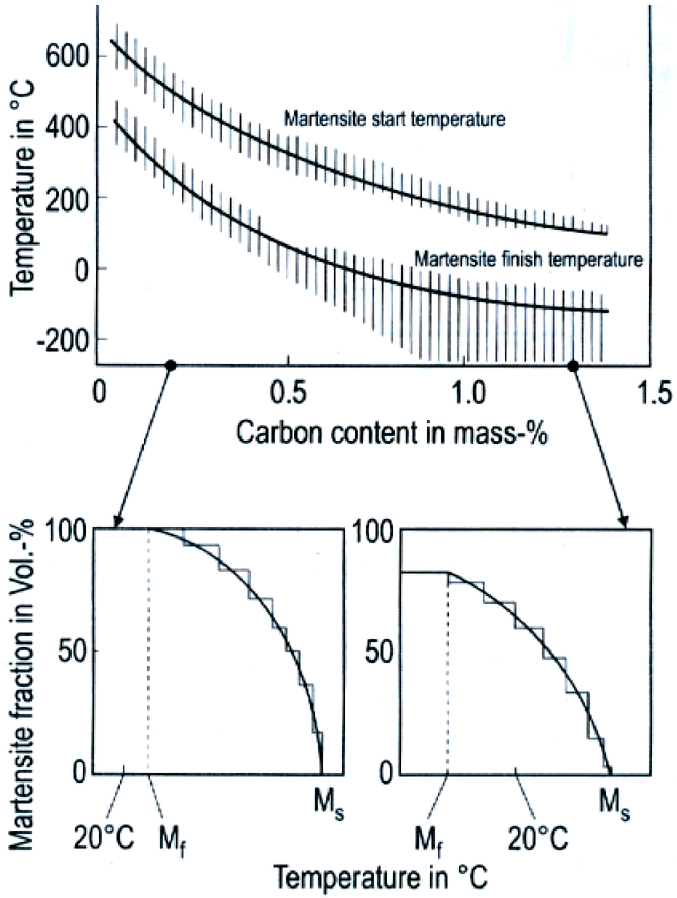


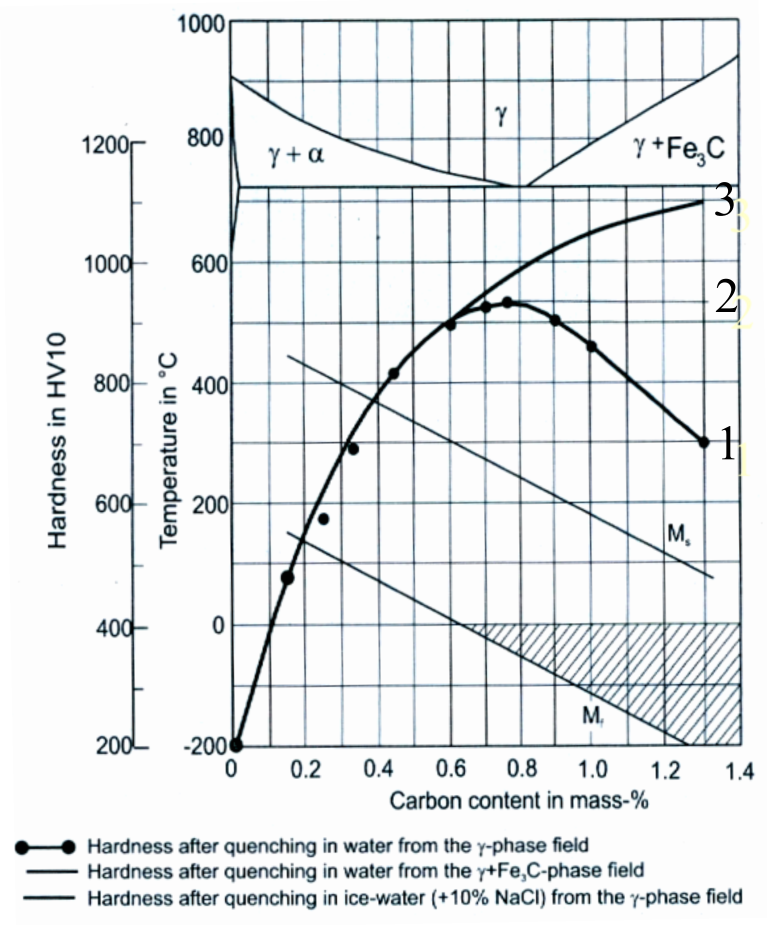
SKD 11

C 1.5%

Cr 12%

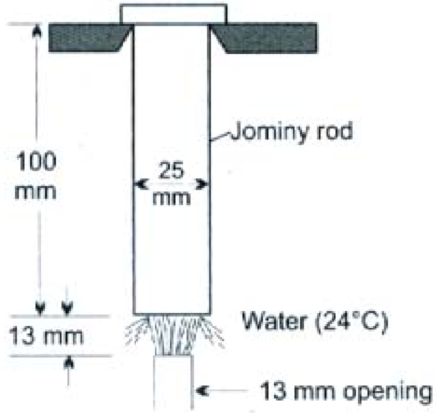

Low number of nuclei (melting), coarse austenite grain, long holding, high quenching temperature, C up to 0.9%
Mn, Ni, Mo, Cr, V
High number of nuclei (during melting), fine austenite grain, low quenching temperature, C above 0.9 mass-%
High hardening temperature, ferrite pre-precipitation, C, Cr, Mn, Ni, V
Lower hardening temperature (carbides), holding above bainite region
Mn
Ni
Si
Pearlite region
Cr, Mo, V
Bainite region
Mn Ni
Temperature
Ms
Martensite region
Co, Al
Low quenching temperature
Holding above Ms
C, Mn, Cr, Ni, Mo, V, Si
Pre-precipitation in the bainite region
Time

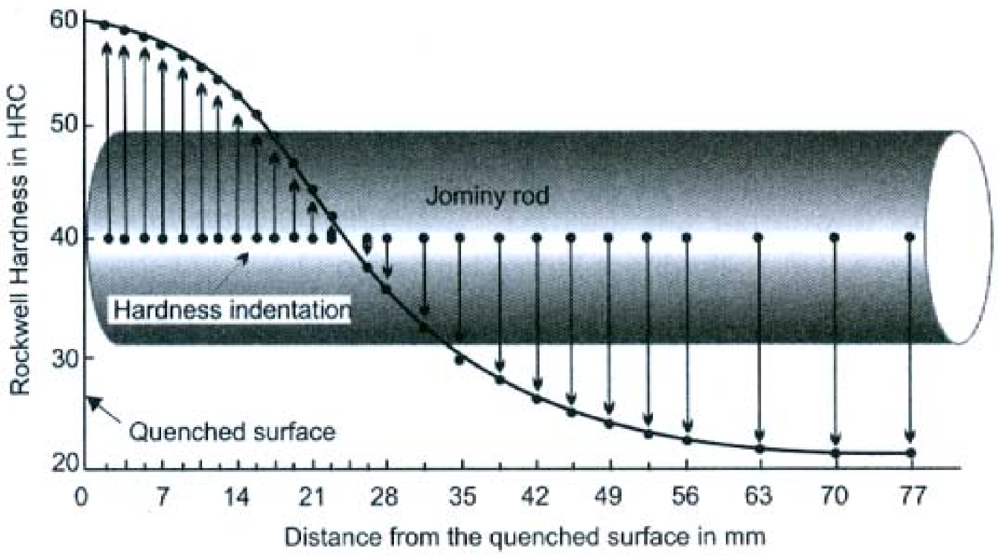

Temperature in °C
600
400
200
0
-200
Martensite start temperature
Martensite finish temperature
0
0.5
1.0
1.5
Carbon content in mass-%
Martensite fraction in Vol.-%
100
50
0
20°C
M_f
M_s
Temperature in °C


Hardness in HV10
Temperature in °C
1200
1000
800
600
400
200
1000
800
600
400
200
0
-200
γ + α
γ
γ + Fe_3C
3
2
1
M_s
M_f
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
Carbon content in mass-%
Hardness after quenching in water from the γ-phase field
Hardness after quenching in water from the γ+Fe_3C-phase field
Hardness after quenching in ice-water (+10% NaCl) from the γ-phase field

Deformation parameter	Type of metallurgical mechanism	Effect on M_s
High deformation temperature	Carbide pre-precipitation on the nucleation spots for martensite	Increased
Low deformation temperature, small degree of deformation	Dislocation configuration, localized alloying element depletion	Increased
Low deformation temperature, high degree of deformation	Presence of bainite, hindrance of atomic shear movements	Decreased

โลหะวิทยาเบื้องต้น (Introduction of Metallurgy)





กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

นิยาม: กรรมวิธีที่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าให้เป็นไปตามต้องการ โดยใช้คุณสมบัติทางความร้อน

หลักการ

ให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิที่กำหนด

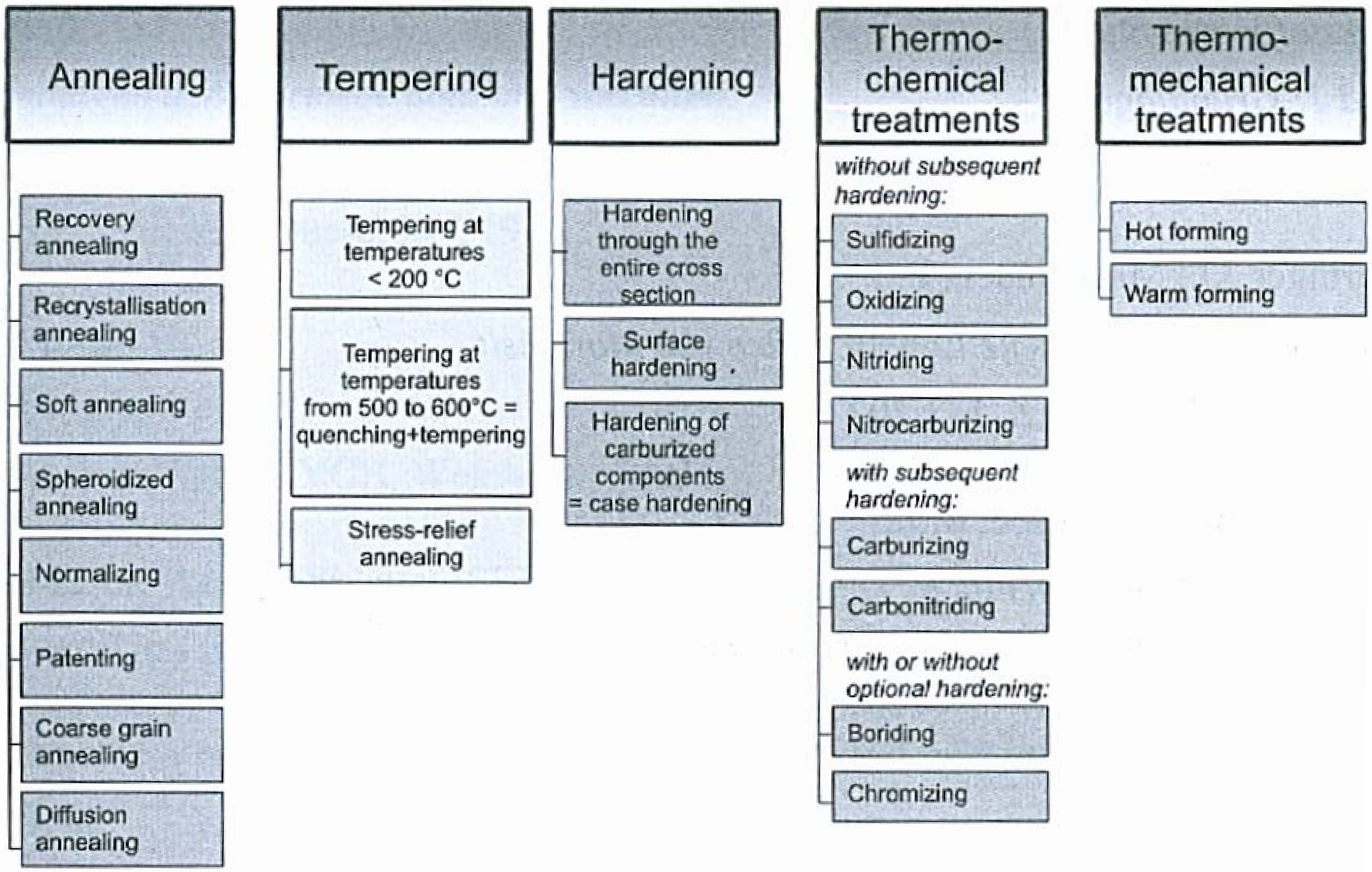
↓

แช่หรือคงอุณหภูมินั้นเอาไว้ในเวลาที่เหมาะสม

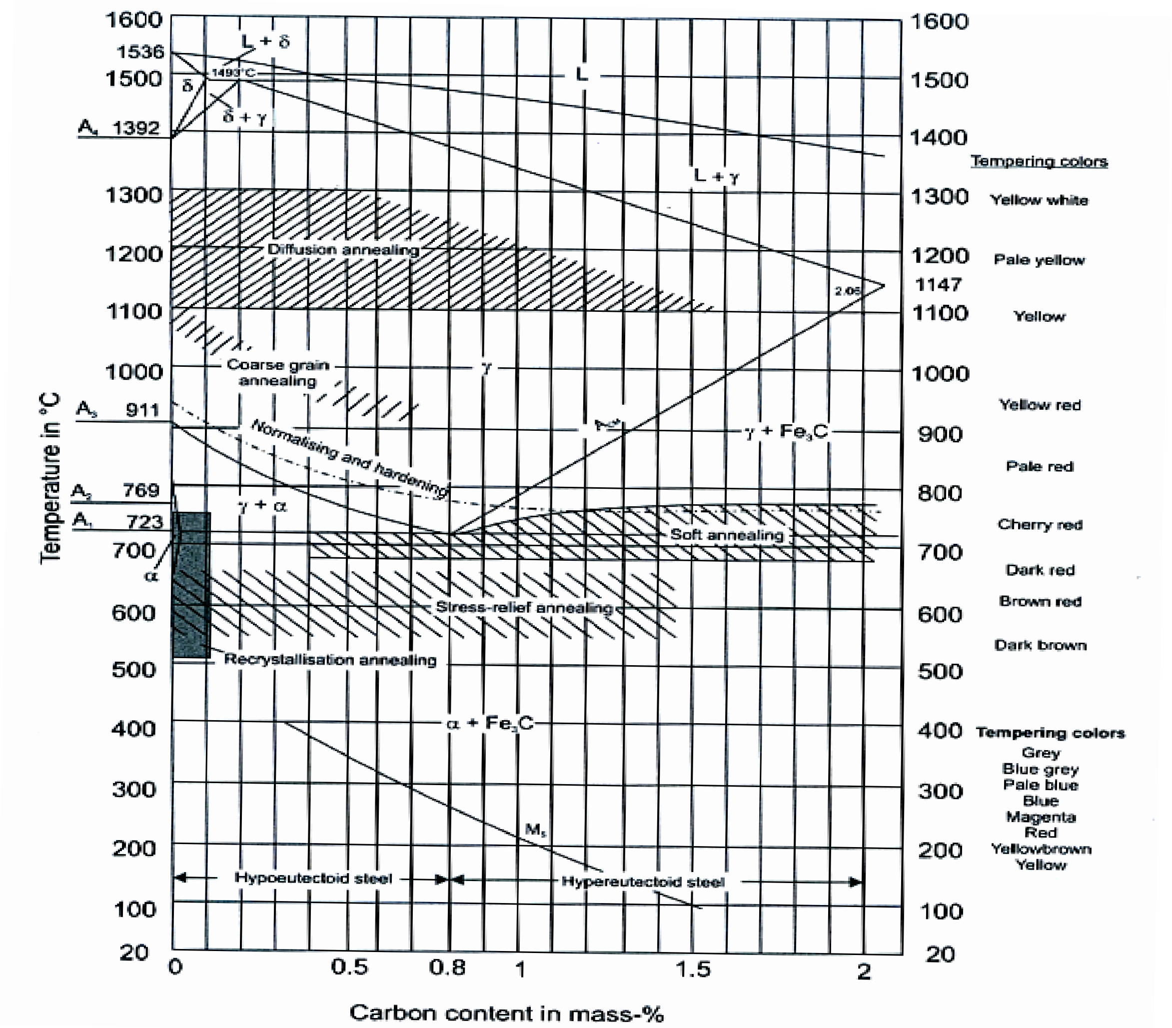
↓

เย็นตัวลงในอัตราที่เหมาะสม

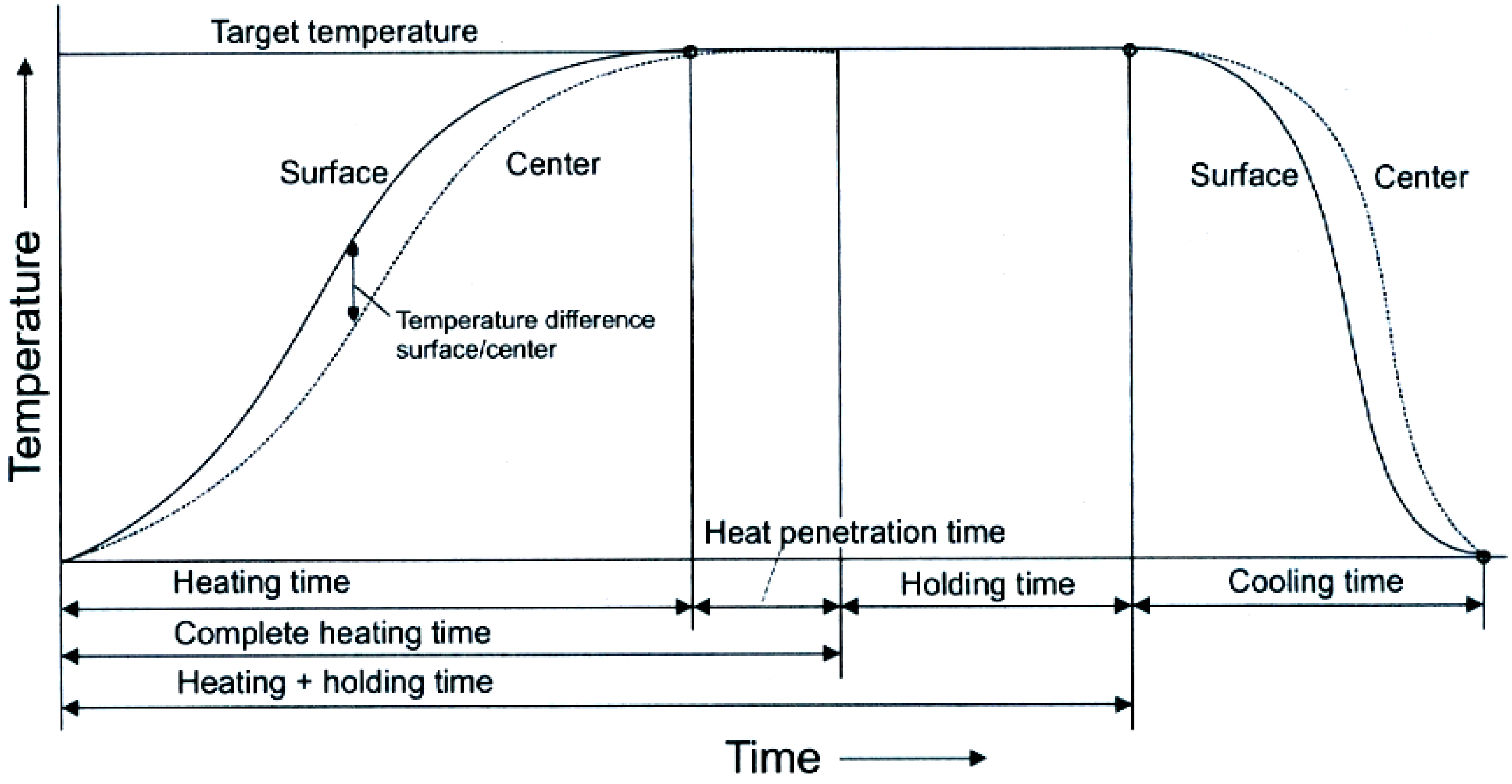
กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)



กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)



กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)



การอบชุบความร้อนเหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งเป็น

1.**การอบอ่อน**(Annealing)คือการปรับคุณสมบัติของเหล็กที่ผ่านการผลิตในแบบต่างๆ ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น แบ่งเป็น

-การอบอ่อนแบบสมบูรณ์(Full annealing)จุดประสงค์ทำเพื่อให้เหล็กมีโครงสร้างใกล้เคียงสภาพสมดุล

-**การอบอ่อนไม่สมบูรณ์**(Incomplete or Process annealing) แบ่งเป็น

-**Stress relief annealing** ทำเพื่อทำลายความเค้นตกค้างจากงานขึ้นรูปเย็น โดยให้ความร้อนต่ำกว่าA1 ประมาณ 500-650ºC ใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง กลุ่มอะตอมที่ไม่สมดุลจะค่อยๆปรับสู่สภาพปกติ โดยโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อให้ความร้อนนานพอ ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

-Spheroidising annealing ทำกับเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนสูง(0.7-1.2%C)เพื่อmachineได้ง่าย โดยเปลี่ยนproeutectoid cementiteให้ไม่ต่อเนื่องและ Fe_3C จากแถบบางเป็นเม็ดกลมเล็กๆ โดยให้ความร้อนต่ำและสูงกว่าA1เล็กน้อย ทำสลับกัน 10-15 ชัวโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

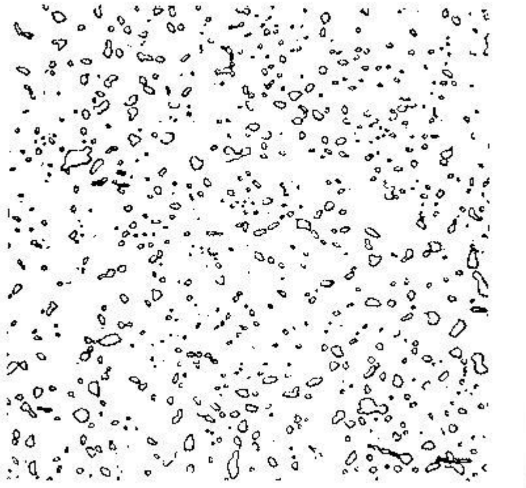


Fig 5 Spheroidized microstructure of 1040 steel after 21 h at 700 °C (1290 °F). 4% picral etch. 1000×

2.**การอบปกติ** (Normalising)

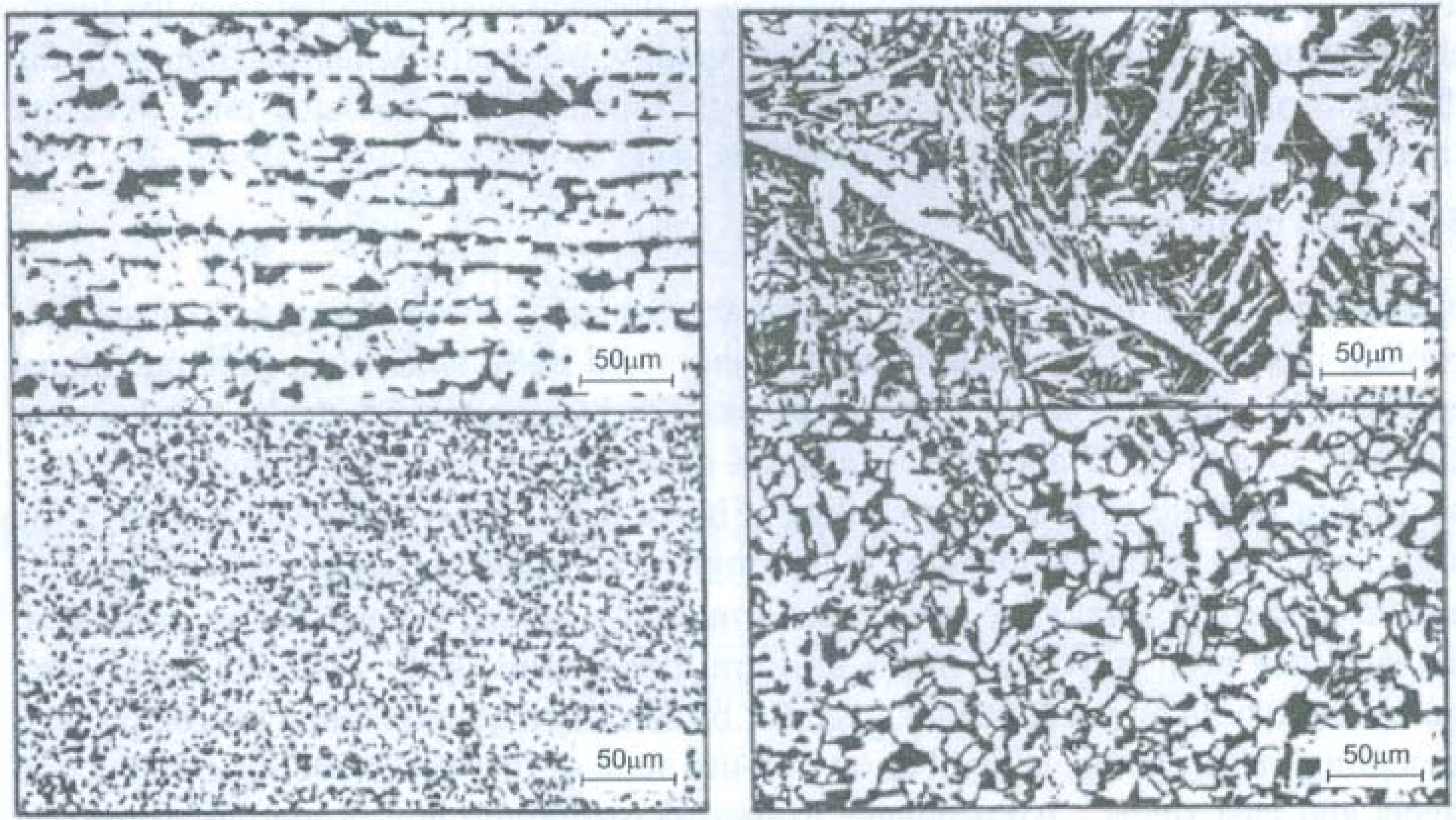
คือการปรับให้เกรนมีความสม่ำเสมอและมีขนาด

เล็กลงเพื่อเอาไปทำการชุบแข็ง โดยให้ความร้อนเหนือA3 สำหรับเหล็ก hypo และ

เหนือA1สำหรับเหล็กhyperประมาณ 30-50ºC เผาแช่ที่ความหนาเฉลี่ย

25มม./30-60นาทีและ ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)



sheet 0.25% C: rolled condition (top)
normalized (bottom)

cast steel 0.25% C: casted condition (top)
normalized (bottom)

3. Recrystallization

คือการเปลี่ยนรูปร่างเกรนที่ผ่านการ

Cold working มาเพื่อไม่ให้มี

ความเครียดตกค้าง

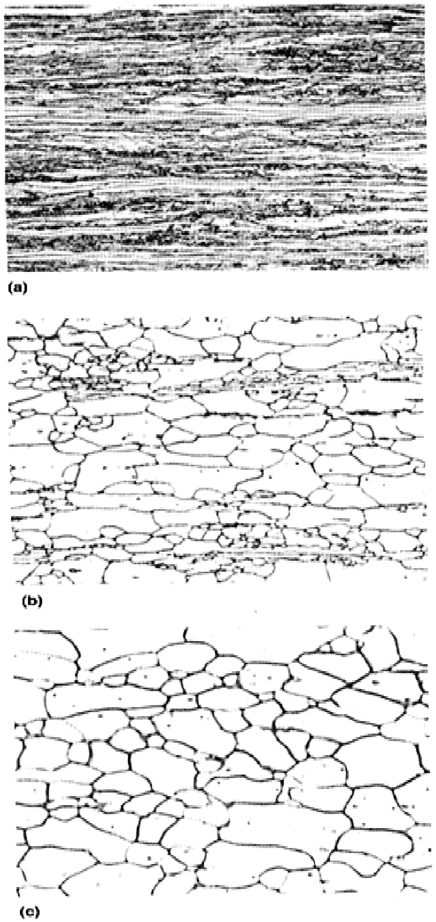


Fig 11 A low-carbon sheet steel in the (a) as-cold-rolled unannealed condition, (b) partially recrystallized annealed condition, and (c) fully recrystallized annealed condition. Marshall's etch. 1000×

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

การชุบแข็ง

การชุบแข็งทั้งชิ้นงาน (Full hardening)

- การชุบแข็งด้วยน้ำ
- การชุบแข็งด้วยน้ำมัน
- การชุบแข็งด้วยอากาศ
- การชุบแข็งแบบมาร์เทมเปอริง (Martempering)
- การชุบแข็งแบบออสเทมเปอริง (Austempering)

การชุบผิวแข็ง (Case hardening)

- การชุบแข็งด้วยเปลวไฟ (Flame hardening)
- การชุบแข็งเหนี่ยวนำ (Induction hardening)
- การชุบแข็งโดยการอาบคาร์บอน (Carburization hardening)
- การชุบแข็งโดยการอาบไนโตรเจน (Nitride hardening)
- การชุบแข็งโดยการอาบคาร์บอนไนโตรเจน (Carbo-Nitriding)

การชุบแข็งทั้งก้อน(Full Hardening)คือการอบชุบทำให้เหล็กมีความแข็งโดยให้ความร้อนกับเหล็กจนมีโครงสร้างออสเตนไนท์และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์

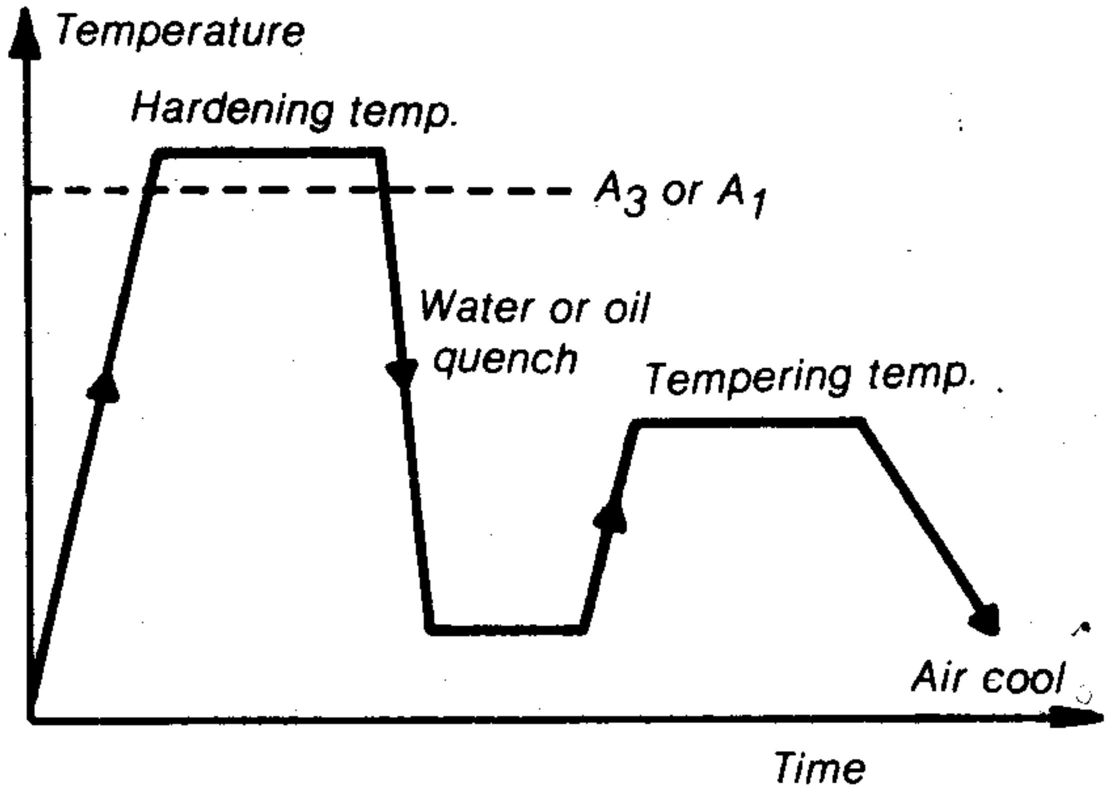
แบ่งเป็น

-Conventional hardening

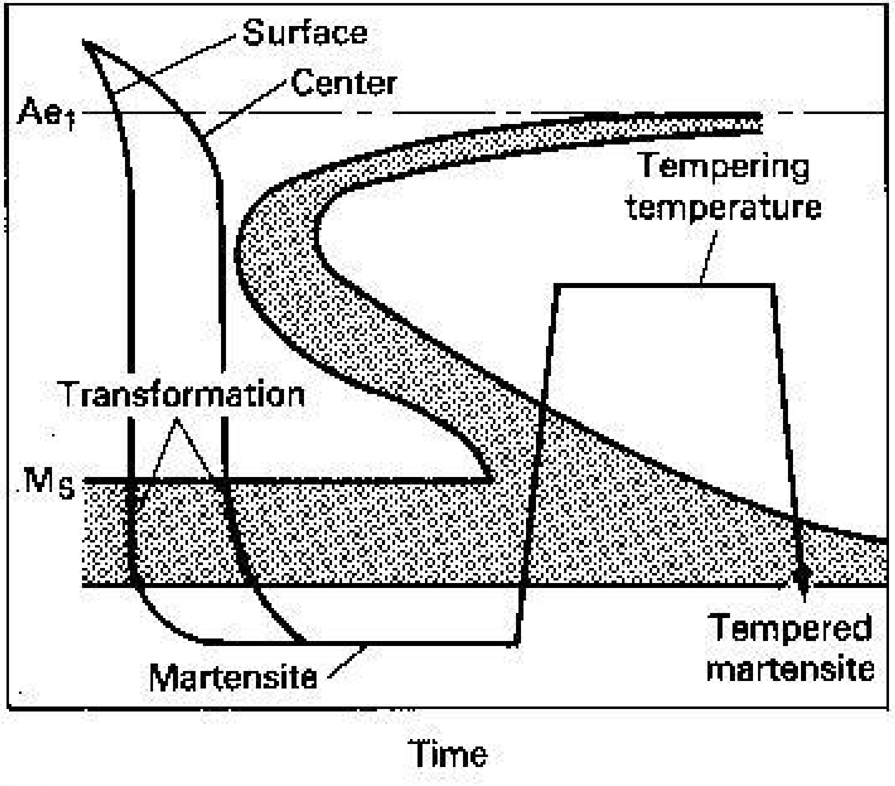
-Martempering hardening

-Austempering hardening

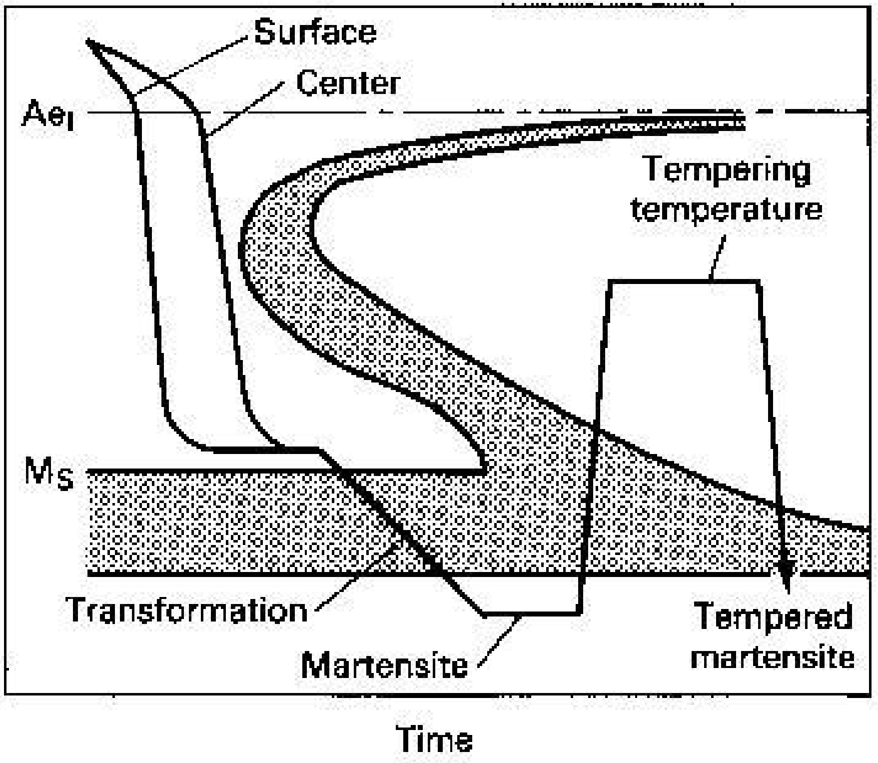
กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)



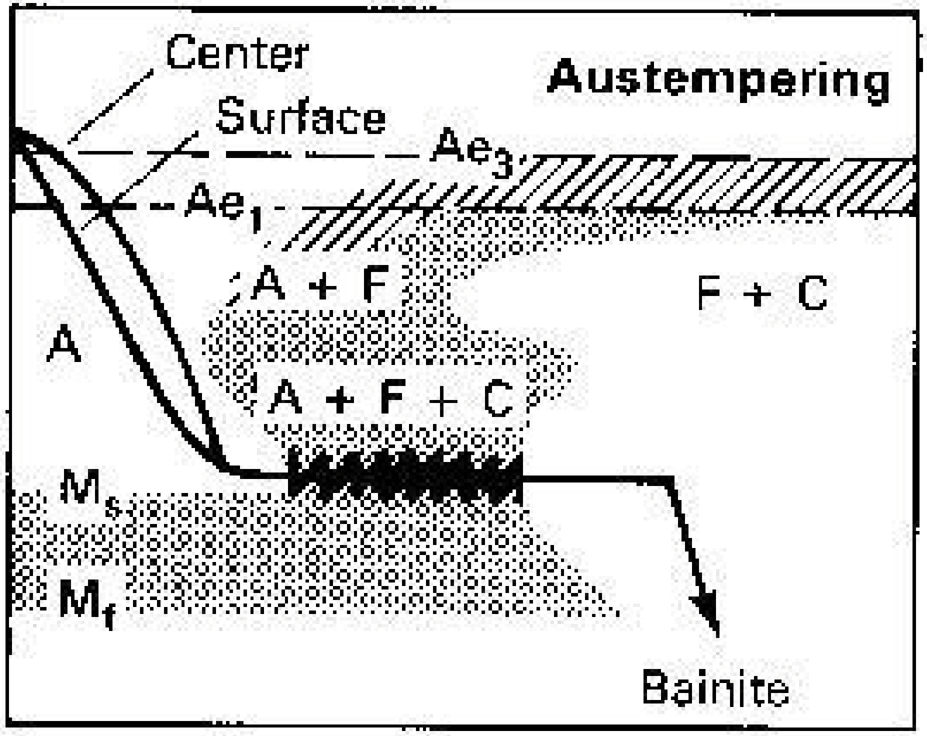
Conventional hardening



Martempering hardening



Austempering hardening



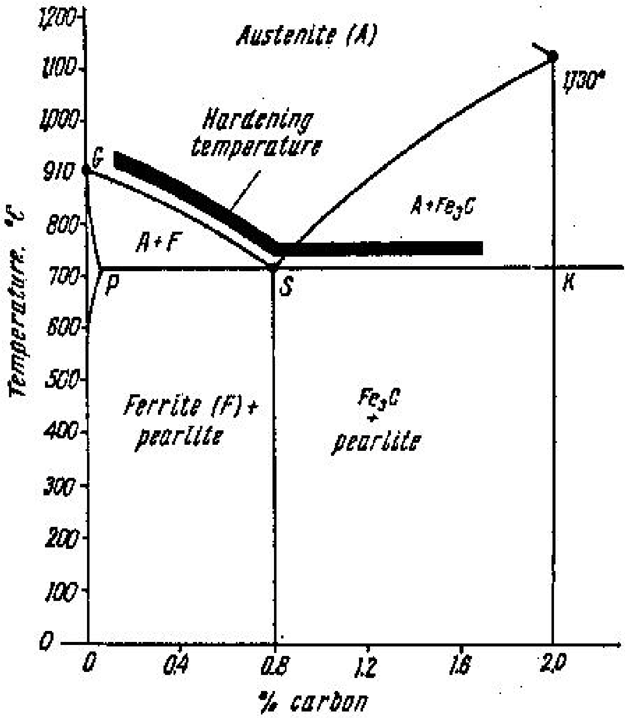
องค์ประกอบของการชุบแข็ง

-ปริมาณคาร์บอน ต้องมากกว่า0.3%เพราะความแข็งมาร์เทนไซต์ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน

-อุณหภูมิก่อนชุบ ต้องถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเตนไนท์ เพราะโครงสร้างมาร์เทนไซต์มาจากออสเตนไนท์

-อัตราการเย็นตัว ต้องเร็วพอที่จะเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ ถ้าช้าจะเกิดโครงสร้างเพิร์ไลท์

อุณหภูมิสำหรับการ ชุบแข็ง



-เหล็กHypo อุณหภูมิเหนือA3 30-50ºC จะได้ออสเตนไนท์ไม่หยาบ

-เหล็กHyper อุณหภูมิเหนือ A1 30-50ºC proeutectoid cementite,cementite จะสลายเป็นออสเตนไนท์และกระจ่ายทั่วไปในออสเตนไนท์ เมื่อชุบแข็งได้มาร์เทนไซต์ที่มี proeutectoid cementite, cementite กระจ่ายอยู่

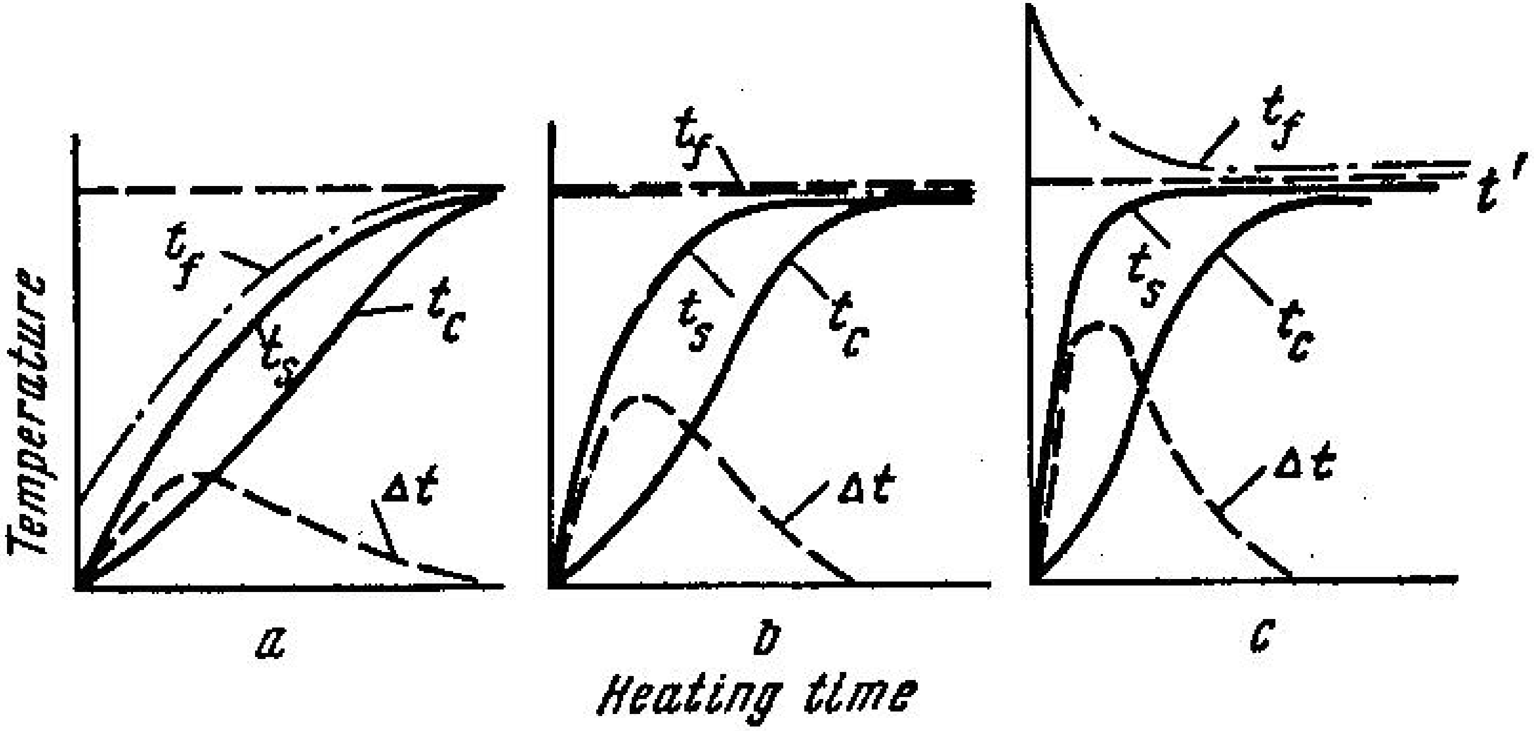
การอบคืนตัว (Tempering) คือการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาให้ความแข็งลดลงและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น จะทำหลังจากการชุบแข้งทันที

การเปราะที่เกิดจากการอบคืนตัว) (Tempered Brittleness)

จะเกิดที่อุณหภูมิที่ 300-500ºC ออสเตนไนท์ตกค้างจะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์และจากกาที่คาร์ไบด์ตกผลึก

Homogenizing คือการทำให้ส่วนผสมชองธาตุกระจ่าย หรือลดการกระจุกตัว โดยการให้ความร้อน และ Holding ที่อุณหภูมิสูง

อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสม(Heating rate&Holding time)

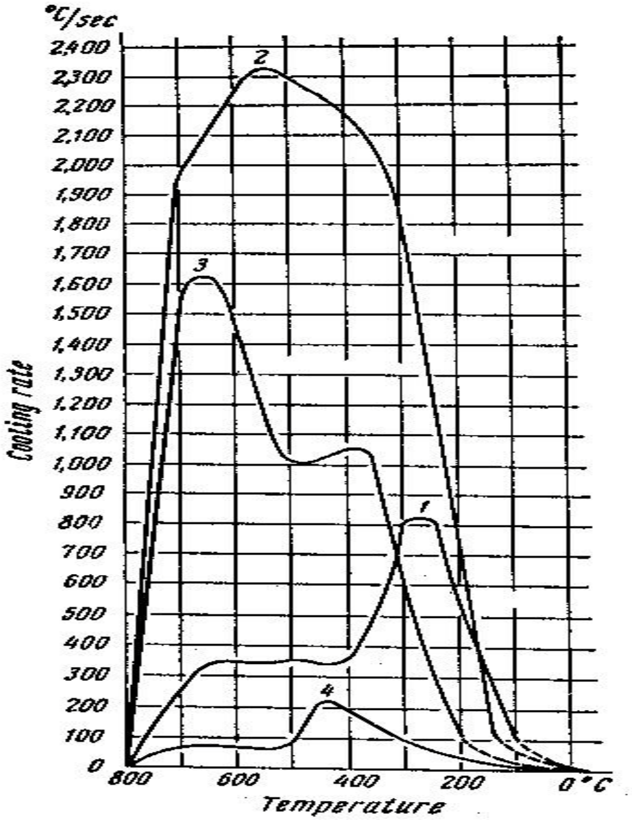


Heating Times and Holding Times (at Working Temperatures) for Hardening Carbon and Structural Steels

Thickness or diameter of part, mm	Box furnaces (gas or oil-fired)		Salt baths	
	heating, min	holding, min	heating, min	holding, min
25	20	5	7	3
50	40	10	17	8
75	60	15	24	12
100	80	20	33	17
125	100	25	40	20
150	120	30	50	25
200	160	40	65	35

Note: Heating time for alloy steels should be increased from 25 to 50 percent.

ของเหลวสำหรับการชุบแข็ง



1. H_2O
2. H_2O+10%NaCl
3. H_2O+50%NaOH
4. Oil

การอบคืนตัว(Tempering)

ทำเพื่อคลายความเค้นที่ตกค้าง และทำให้มาร์เทนไซต์แตกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุลย์

การเปราะที่เกิดจากการอบคืนตัว (Tempered Brittleness)

จะเกิดที่อุณหภูมิที่ 300-500ºC ออสเตนไนท์ตกค้างจะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์และจากกาที่คาร์ไบด์ตกผลึก

การควบคุมบรรยากาศภายในเตา

(Funace atmosphere and its control)

- ป้องกันการสูญเสีย คาร์บอน และธาตุอื่นๆ
- ป้องกันการเกิดอ๊อกไซด์บริเวณผิว
- ปรับปรุงความแข็งบริเวณผิวให้สูงขึ้น

ชนิดของบรรยากาศภายในเตา

- **บรรยากาศไนโตรเจน** เหมาะกับการอบชุบเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กเครื่องมือ
- **บรรยากาศไฮโดรเจน** ใช้ในการทำโลหะผง ทังสเตนคาร์ไบด์
- **บรรยากาศไนโตรเจน-ไฮโดรเจน** เหมาะกับการอบชุบเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กเครื่องมือ(Brightannealing&hardening)
- **บรรยากาศเอกโซเทอร์มิคแก๊ส**(Exothermic gas)ประเภทเจือจางเหมาะกับงานอบชุบทองแดง ประเภทเข้มข้นเหมาะกับงานอบอ่อนเหล็กกล้าคาร์บอน (Co_2, N_2)

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

- **บรรยากาศเอนโดเทอร์มิค**(Endothermic gas)เหมาะกับการอบชุบเหล็กกล้าทุกชนิด รวมทั้งการชุบผิวแข็งประเภทคาร์บูไรซิง คาร์บูไนตรายดิง(CO, H_2, N_2)
- **บรรยากาศสุญญากาศ** เหมาะกับงานอบชุบเหล็กเครื่องมือที่ต้องการคุณภาพผิวและความเที่ยงตรงของขนาด

การอบชุบด้วยอ่างเกลือ(Salt baths heat treatment)

เป็นการป้องกันการสูญเสียคาร์บอนและการเกิดอ๊อกซิเดชั่นที่ผิว และทำให้ชิ้นงานร้อนอย่างสม่ำเสมอ เกิดการบิดงอน้อย

Nominal composition of salt baths used in heat treatment of tool steels

Type of treatment	Composition percentage					Temperature °C	
	Barium chloride, $BaCl_2$	Sodium chloride, NaCl	Calcium chloride, $CaCl_2$	Sodium nitrate, $NaNO_2$	Potassium nitrate, KNO_2	Melting	Working range
(1) Preheat and stress relieve	25-35	15-25	45-55			480	510-760
(2) Austenitize carbon and low alloy steels	70.3	29.7				655	705-925
(3) Austenitize high alloy steels	80-40	10-20				760	815-1095
(4) Austenitize hot work and high speed steels	92-96	4-8				870	955-1260
(5) Martemper and austemper				40-50	50-60	145	160-650

Note: Rectification of baths to prevent decarburization: Baths(1), (2) and (3) use boric acid. Bath (4) uses ferro-silicon or silicon carbide.

Composition of Salt Baths Used to Heat Steel Parts for Hardening

Compositions	Melting point, °C	Range of practical application, °C	Features
100% NaCl	808	850 to 1,100	Decarburises steel
100% $BaCl_2$	960	1,000 to 1,400	Ditto
28% NaCl + 72% $CaCl_2$	500	540 to 870	Decarburises steel
50% Na_2CO_3 + 50% KCl	560	580 to 815	Decomposes above 875°C
50% NaCl + 50% K_2CO_3	560	580 to 815	Ditto
33.3% $CaCl_2$ + 33.3% $BaCl_2$ + 33.4% NaCl	570	600 to 870	Decarburises steel above 820°C
50% $CaCl_2$ + 50% $BaCl_2$	600	650 to 900	Ditto
35% NaCl + 65% Na_2Co_3	620	650 to 815	Decomposes above 815° C
22% NaCl + 78% $BaCl_2$	635	700 to 870	Decarburises steel above 820°c
44% NaCl + 56% KCl	665	700 to 870	Ditto

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

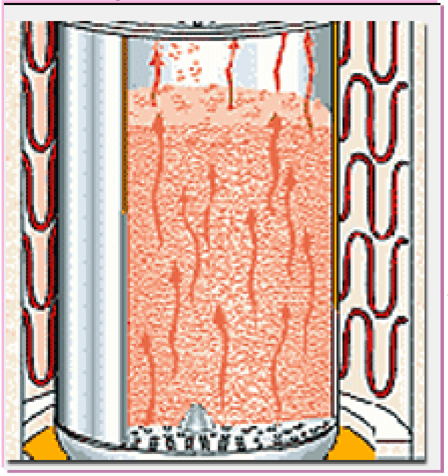
Typical Salt Compositions

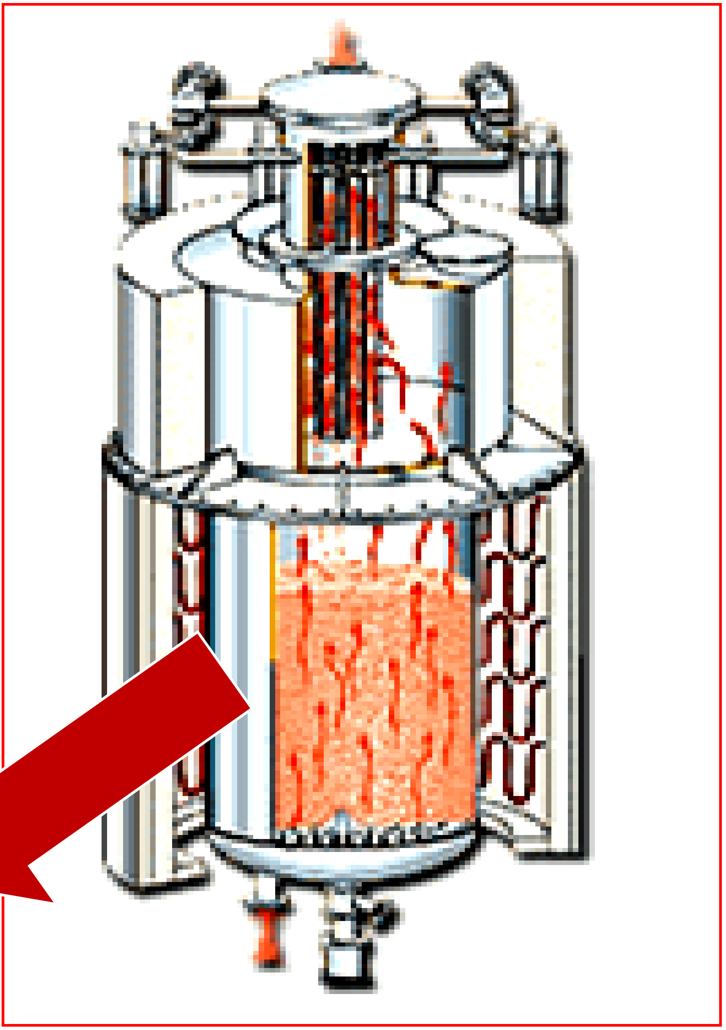
Application	Composition	Usable temperature range °C
High temparature	100% $BaCl_2$	980 — 1350
	95% $BaCl_2$ + 5% MgF_2	950 — 1350
	95% $BaCl_2$ + 5% NaF	950 — 1350
	90% $BaCl_2$ + 10% NaCl	950 — 1300
Medium temperature	78% $BaCl_2$ + 22% NaCl	700 — 950
	65% $BaCl_2$ + 35% NaCl	730 — 930
	55% $BaCl_2$ + 20% NaCl + 25% KCl	680 — 900
	100% NaCl	850 — 920
	56% KCl + 35% NaCl	700 — 900
Low temperature	100% $NaNO_3$	325 — 600
	55% KNO_3 + $NaHO_3$	165 — 400
	45% KNO_3 + 55% $NaNO_3$	250 — 590
	43% KNO_3 + 53% $NaNO_3$ + 4% H_2O	200 — 500
	50% NaOH + 50% KOH	250 — 538
	20% NaOH + 80% KOH + 6% H_2O	150 — 250
	30% $BaCl_2$ + 20% NaCl + 50% $CaCl_2$	480 — 780
	75% NaOH + 25% $NaNO_2$	320 — 540
Carburizing & Carbonitriding	70~76% Na_2CO_3 + 9 12% NaCl + 6 9% NH_4Cl + 8 10% SiC	800 — 900
	85% Na_2CO_3 + 10% NaCl + 5% SiC	800 — 900
	15% NaCN + 10% NaCl + 65% Na_2CO_3 + 10% Na_2SiO_3	800 — 950
	4% $BaCl_2$ + 10% NaCl + 22% Na_2CO_3 + 64% NaCN	900 — 930
	65% Na_2CO_3 + 35% NaCN	800 — 900

การอบชุบลักษณะฟลูอิดไดซ์-เบ็ด(Fluidized-bed)

โดยการแช่ชิ้นงานในผงอลูมิน่าที่ถูกเผาให้ร้อนและปล่อยแก็สไหลวนจนทั่วผิวชิ้นงาน ซึ่งลักษณะการไหลของแก็สจะมีคุณสมบัติคล้ายของเหลว ดังนั้นจึงทำให้เวลาในการเผาสั้นกว่าและจะไม่เกิดออ๊กซิเดชั่นและสูญเสีย คาร์บอนที่ผิว

โดยแก็สที่ใช้แล้วแต่ละกระบวนการเช่น N_2, Ar





การชุบแข็งพื้นผิว(Surface Hardening)

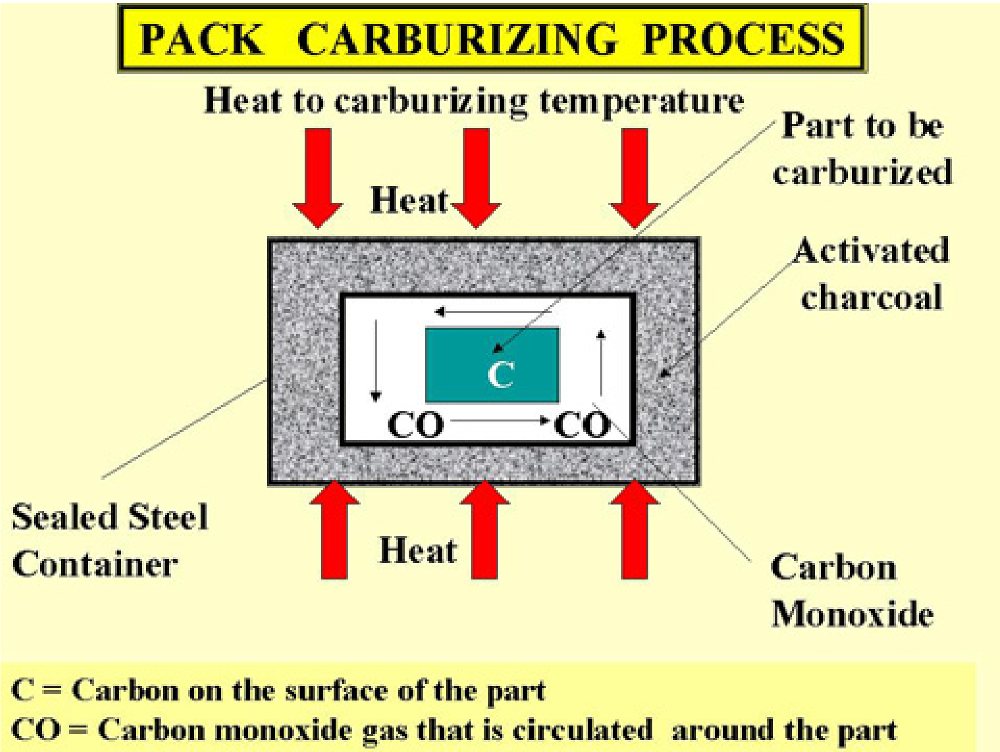
ทำเพื่อให้บริเวณผิวมีความแข็ง แต่บริเวณเนื้องานที่ต่ำกว่าผิวที่มีความแข็งถึงแกนกลางมีคุณสมบัติเหมือนเดิม ทำให้ชิ้นงานทนต่อการสึกหรอ รับแรงบิดและแรงกระแทกได้ดี แบ่งเป็น

วิธีคาร์บูไรซ์ซิง(Carburizing)

เพิ่มปริมาณคาร์บอนที่ผิวให้ได้ประมาณ 0.8% จะทำกับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ(เหล็ก 0.1-0.2%) และทำการชุบแข็ง

วิธีการเพิ่มคาร์บอนมี 3 ลักษณะ

1.Solid Carburizing โดยการเอาชิ้นงานไปหมกในผงถ่านไม้ 70-80% ผสมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยา $BaCO_3$, $Na2CO_3$, $CaCO_2$



กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

$O_2 + C \longrightarrow CO_2$

$BaCO_3 = BaO + CO_2$

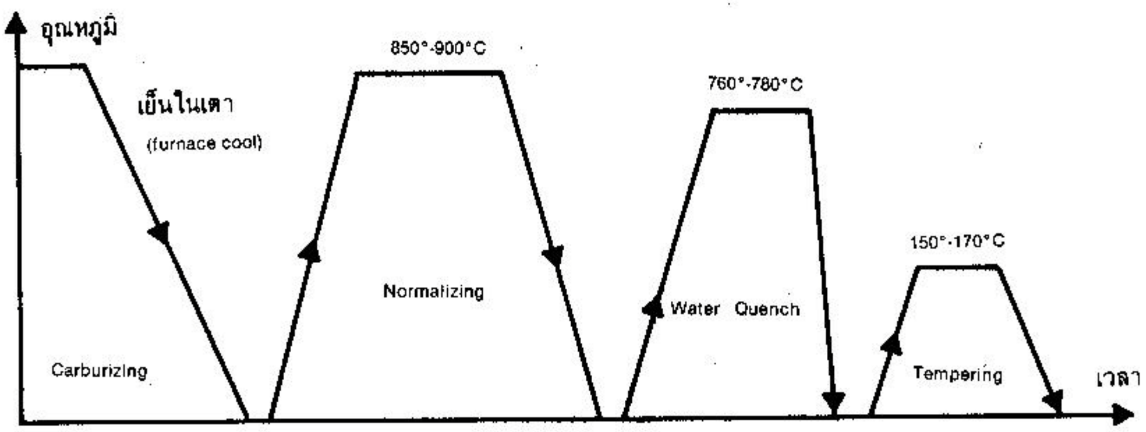
$2C + O_2 \longrightarrow 2CO$

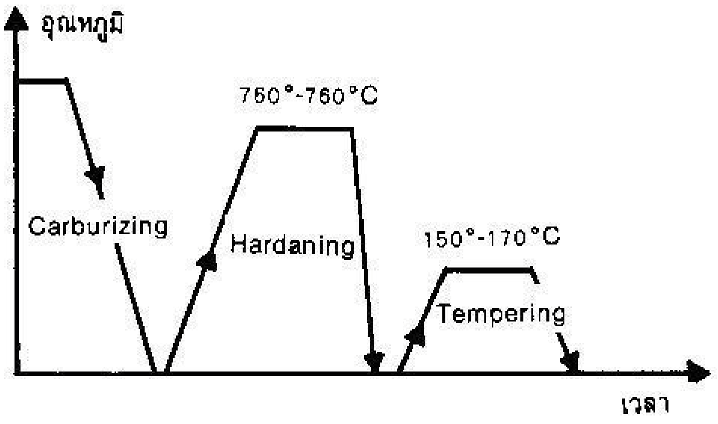
$CO_2 + C \longrightarrow CO$

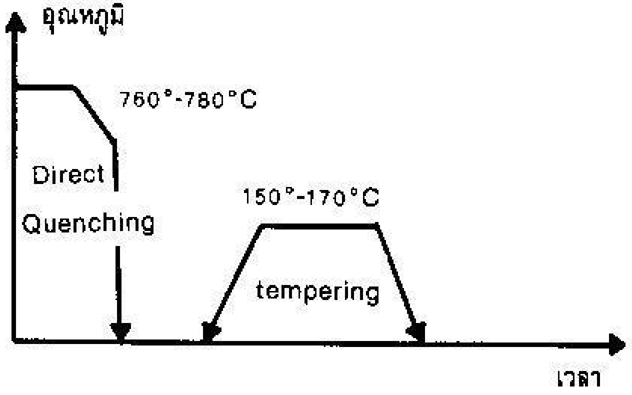
$2\,CO + 3Fe(\gamma) \longrightarrow Fe_3C + CO_2$

การเพิ่มคาร์บอน ด้วยวิธีนี้จะเกิด Proeutectoid Cementiteที่ขอบเกรน และขนาดเกรนของเนื้อแกนกลางจะหยาบ เมื่อเอาไปชุบแข็งเลยจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพไม่ดี จึงต้องมีการทำหลายขั้นตอน

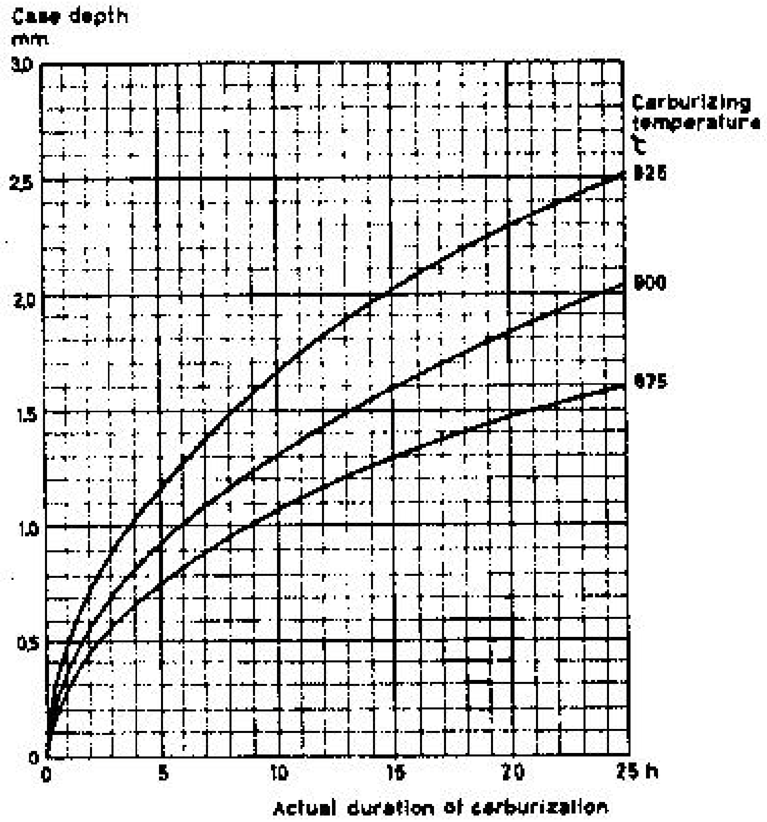
กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

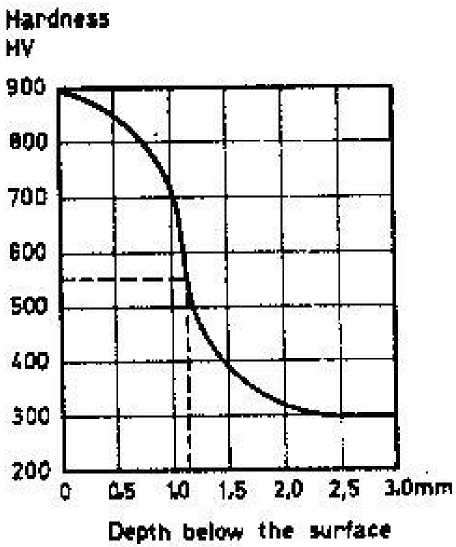






กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)





Gas Caburizing ใช้แก๊สมีเทน(CH_4)ผสมกับแก๊สเอนโดเทอร์มิค ($CO20\%, H_2 40\%, N_2 40\%$)

$$2\,CO + 3Fe(\gamma) \longrightarrow Fe_3C + CO_2$$

$$CH_4 \longrightarrow C_{at} + 2H_2$$

$$3Fe(\gamma) + C_{at} = Fe_3C$$

Liquid Carburizing ใช้เกลือNaCl 10-15% ผสมกับ

Na_2CO_3 75-85% หลอมละลายในเบ้า และผสม SiC 6-10%

$$2Na_2CO_3+SiC=Na_2SiO_3+Na_2O+2CO+C_{at}$$

$$2CO=CO_2+C_{at}$$

$$3Fe(\gamma)+C_{at}=Fe_3C$$

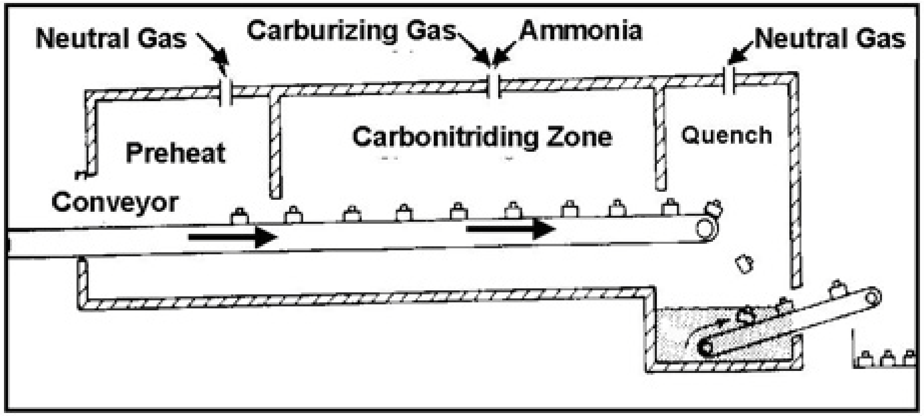
การเพิ่มคาร์บอนที่ผิววิธีนี้ สามารถแช่ชิ้นงานไว้เมื่ออุณหภูมิชิ้นงานถึงอุณหภูมิชุบแข็ง สามารถเอาออกมาจุ่มชุบได้ทันที

วิธีไซยาไนด์ดิ่ง(Cyaniding)

เป็นการเพิ่มคาร์บอนและไนโตรเจนที่ผิวเหล็กโดยใช้ NaCN,KCN $Ca(CN)_2$ ผสมกับเกลือNaClหรือNa_2CO_3 ตามสัดส่วน อุณหภูมิที่ใช้ ทำให้หลอมละลายในเบ้า เผาชิ้นงานที่ต้องการชุบผิวแข็งที่ 100-400ºC การเพิ่มคาร์บอนที่ผิววิธีนี้สามารถแช่ชิ้นงานไว้เมื่ออุณหภูมิชิ้นงานถึงอุณหภูมิชุบแข็ง สามารถเอาออกมาจุ่มชุบได้ทันที

วิธีคาร์โบไนตรายดิง(Carbunitriding)

เป็นการเพิ่มคาร์บอนและไนโตรเจนที่ผิว โดยใช้แก๊ส$CH_4$70-80% ผสมกับแก๊ส $NH_3$20-30%ผ่านเข้าไปในเตาตามอุณหภูมิที่ต้องการ



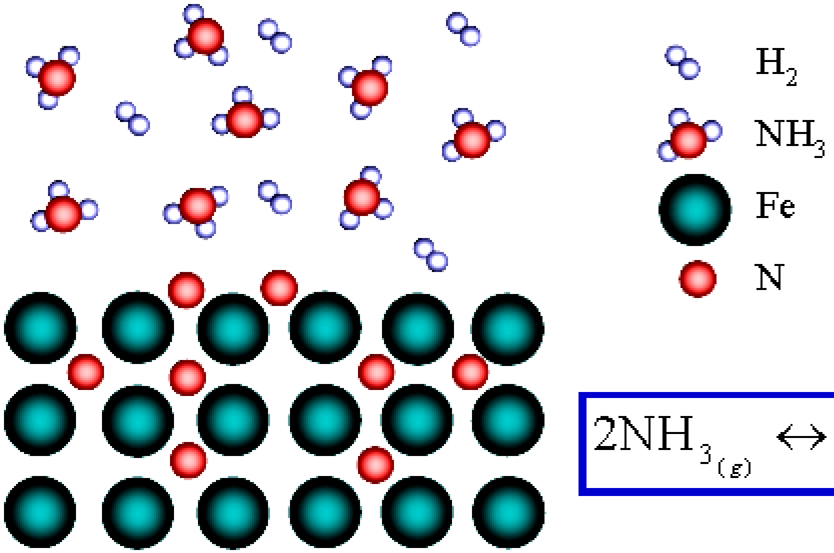
Conveyor Hearth Carbonitriding

วิธีไนตรายดิง(Nitriding)

เป็นการเติมอะตอมไนโตรเจนที่ผิวเหล็กในสภาพเหล็กเฟอร์ไรท์ โดยการผ่านแก๊สNH_3 เข้าไปในเตาที่ปิดสนิทแก๊สจะแตกตัวให้ N แพร่ซึมเข้าไปในเนื้อเหล็ก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 590ºC จะได้ไนตรายของเหล็กที่มีไนโตรเจน=5.5-5.9%(Fe_4N, γ')และที่อุณหภูมิต่ำกว่า500ºC จะได้ไนตรายของเหล็กที่มีไนโตรเจน=11%(Fe_2N)

$$2NH_3 \longrightarrow 2N + 3H_2$$

โครงสร้างและกลไกการเพิ่มความแข็ง



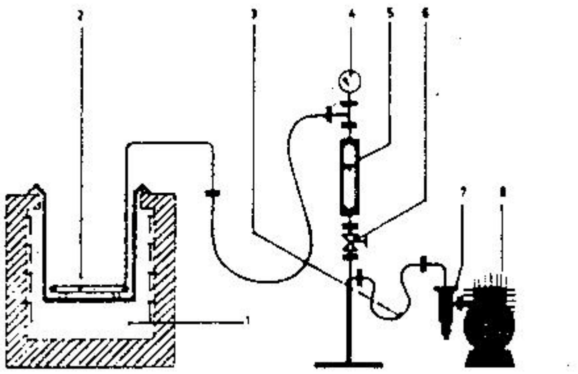
- การเกิดชั้นสารประกอบในตรายสีขาว
- การตกตะกอนของสารประกอบในตราย
- การละลายของไนโตรเจนในเนื้อพื้น

$$2NH_{3_{(g)}} \leftrightarrow 2N + 3H_{2_{(g)}}$$

Schematic illustration of nitriding of a steel by using ammonia gas

Tufftride

การชุบแข็งพื้นผิวในตราย ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ550-570ºCโดยใช้เกลือNaCN60-70%กับKCN30-40%หลอมละลายในเบ้าที่มีท่อเป่าอากาศแช่อยู่ อากาศที่เป่าจะเป็นตัวเร่งให้ใช้เวลาสั้นลง

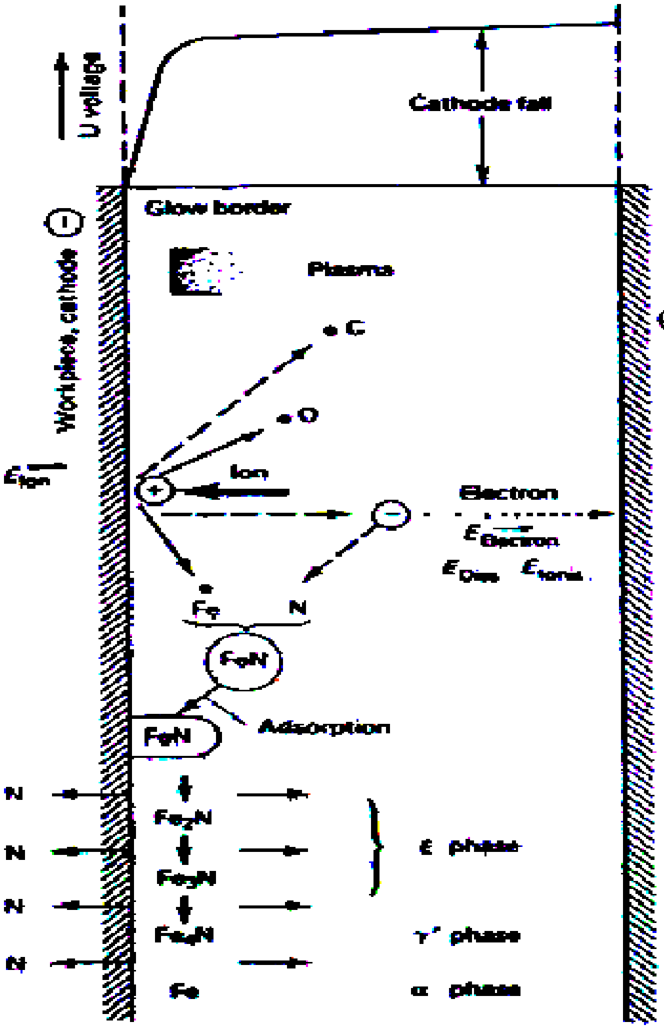


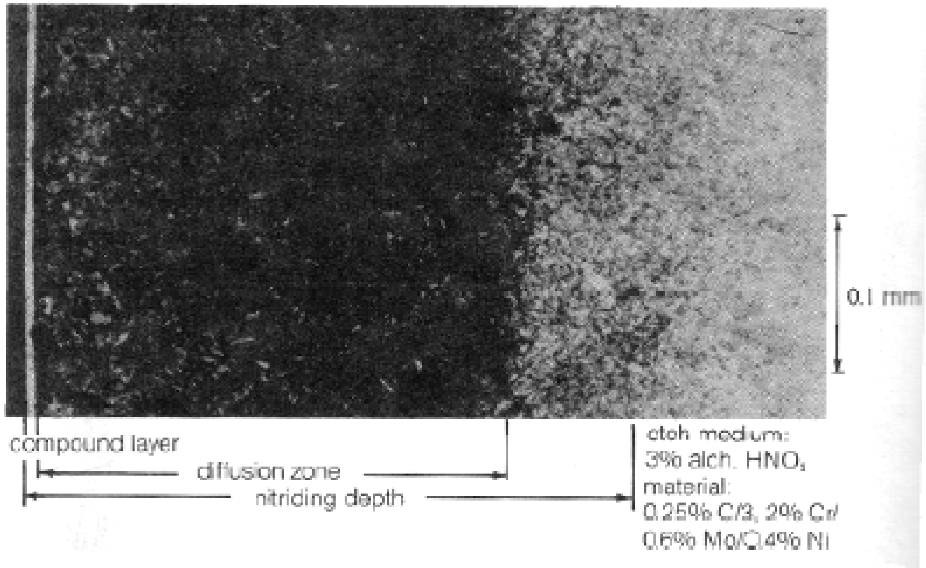
1. Nitriding furnace NOe
2. Distribution pipe with air nozzles
3. Connecting tube
4. Manometer
5. Air gauge
6. Needle valve
7. Regulating screw
8. Compressor

Ion Nitriding

ทำในเตาสุญญากาศ ใช้กระแสไฟDCจ่ายเข้าที่ชิ้นงานและตัวเตา โดยชิ้นงานเป็น cathode (-) เตาเป็น anode (+) อิเลคตรอนจาก วิ่ง cathode เข้า anode ทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิทำไนตรายขณะเดียวกันกับการจ่ายแก๊สNH_3เข้าไปจะแตกตัวให้อะตอมไนโตรเจนและเกิดไอออนไนซ์ (N^{-3}) และเกิดความร้อนในลักษณะพลาสม่า ไอออนบางส่วนวิ่งจับกับอนุภาคของโลหะแล้วตกลงบนผิวชิ้นงาน ส่วนไนโตรเจนที่เหลือจากไอออนไนซ์จะแตกตัวให้อะตอมของไนโตรเจนแพร่ซึมเข้าสู่ผิวเหล็ก

Ion Nitriding

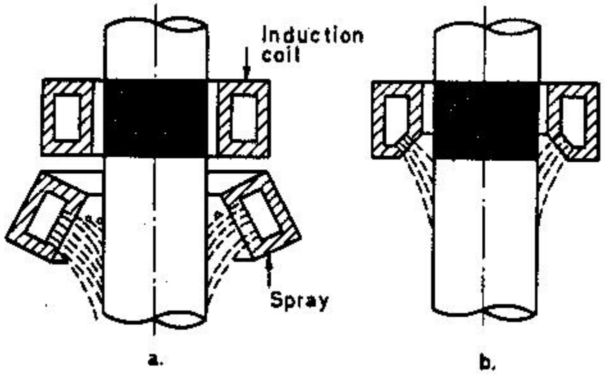


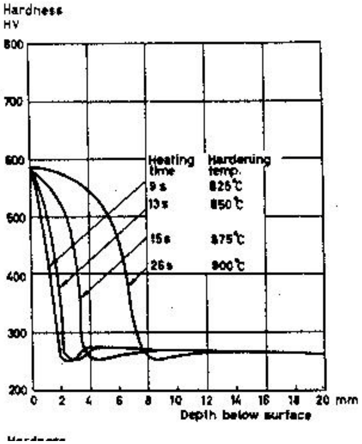


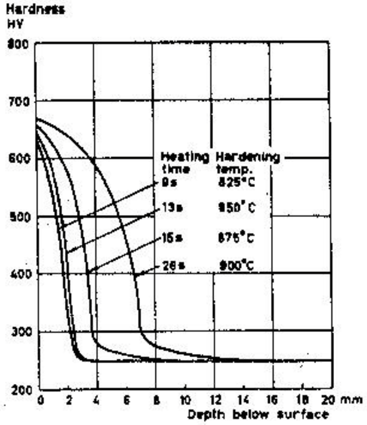
การชุบแข็งพื้นผิวด้วยกระแสเหนี่ยวนำ(Induction hardening)

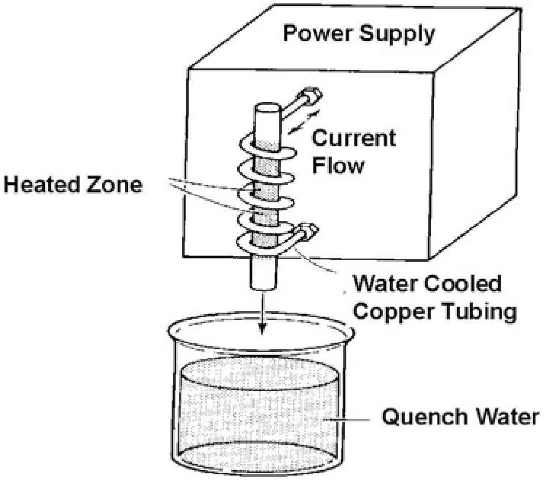
ทำกับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง(0.4-0.5%C) เหล็กผสมปริมาณคาร์บอนปานกลางหรือเหล็กผสมสูง(0.8-1.2%) โดยใช้กระแสสลับเหนี่ยวนำความถี่สูง จะทำให้เหล็กร้อนจัดที่ผิวจนมีโครงสร้างเป็นออสเตนไนท์ เมื่อทำให้เย็นตัวเร็วจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ เนื้อเหล็กตรงกลางโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้มีความแข็งเฉพาะที่ผิว ทนการเสียดสี ทนต่อการล้าได้ดี

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)









การชุบแข็งพื้นผิวด้วยเปลวไฟ(Flame hardening)

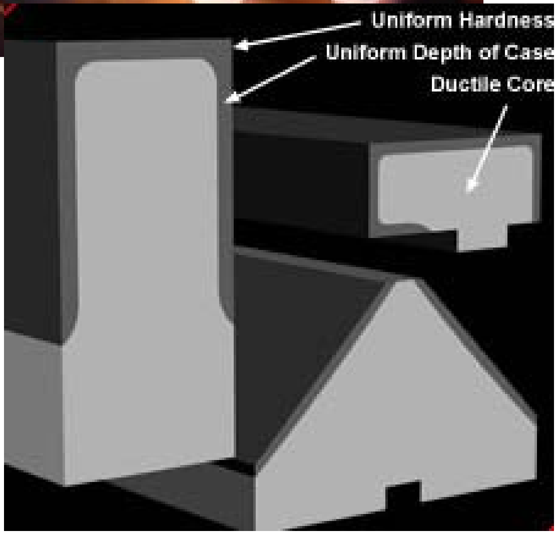
ทำกับเหล็กคาร์บอน0.4-0.8% ที่มีCrและNi ผสม โดยใช้เปลวจาก

แก๊สO_2และC_2H_2 ใช้เปลวกลาง(Neutral Flame)ให้ความร้อนกับ

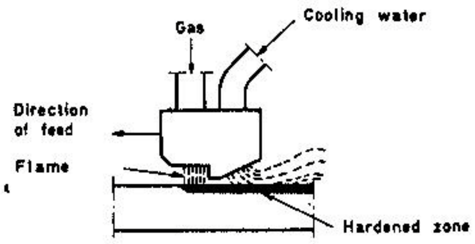
ชิ้นงาน ที่ผิวงานจะร้อนจัดจนมีโครงสร้างเป็นออสเตนไนท์เมื่อทำให้เย็น

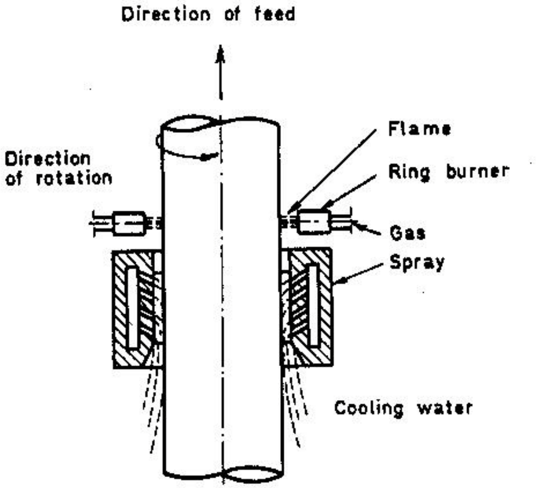
ตัวเร็วจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)



กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)





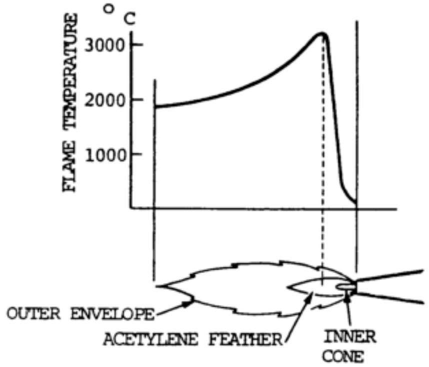


Figure 11-1. The temperature of the flame.

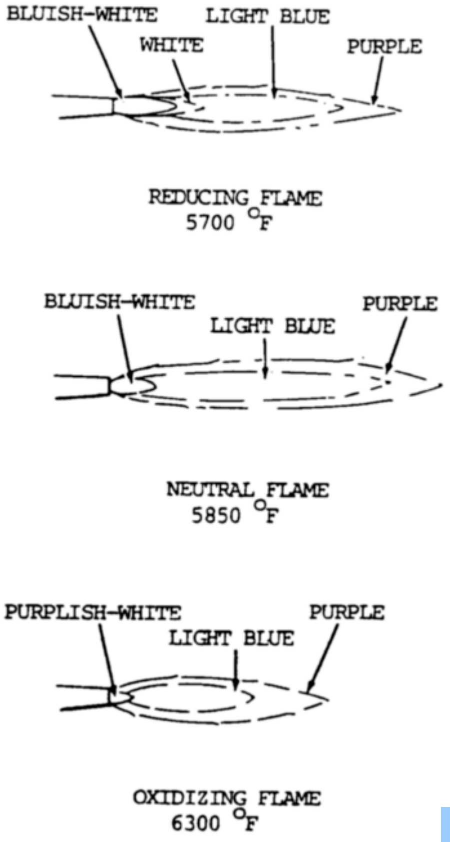


Figure 11-2. Oxyacetylene flames.

การทดสอบชิ้นงานเบื้องต้นหลังการชุบแข็ง

-การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile Testing)

-การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

-การทดสอบการกระแทก (Impact Testing)

-การทดสอบความต้านการสึกหรอ (Wear Resistance Testing)

-การทดสอบทางโครงสร้างมหภาคและจุลภาค (Macro and Micro Structure Testing)

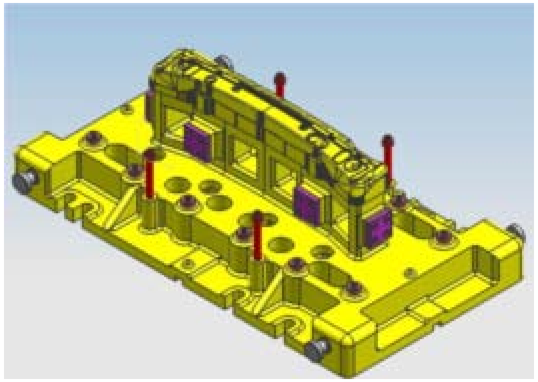
-การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing)

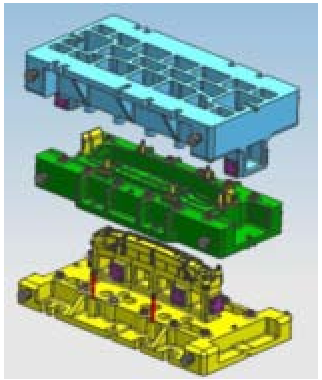
ความแข็งแรงของวัสดุ

นิยาม → วามแข็งแรงของวัสดุใดๆ จะแสดงให้เห็นได้ใน 2 ประการ

-วัสดุนั้น ๆ จะต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร → σy

-วัสดุนั้น ๆ จะต้านทานต่อการแตกหัก หรือ ฉีกขาด → σu

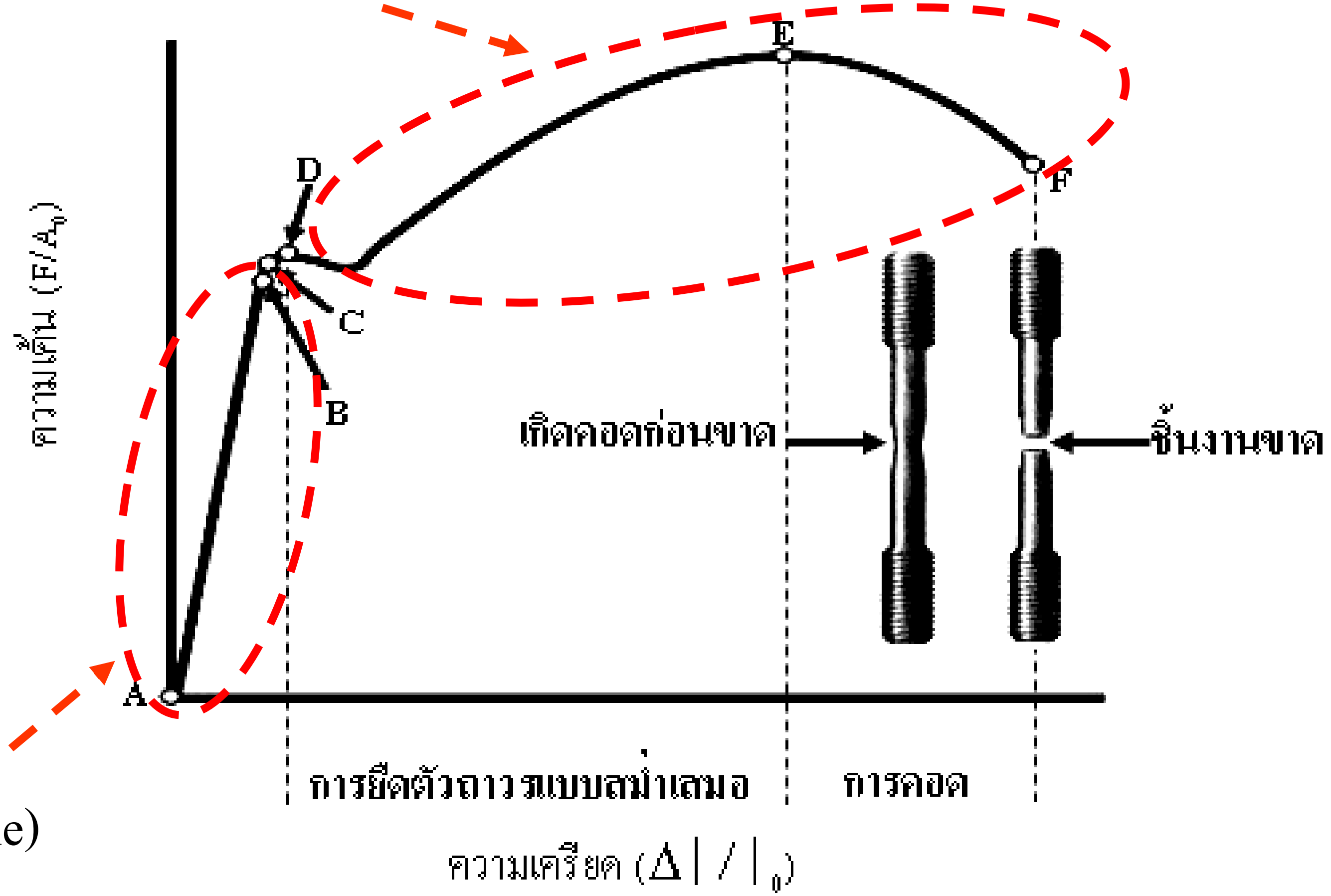




ความแข็งแรงของวัสดุ

เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ช่วงเสียรูป(Plastic Zone)



ช่วงยืดหยุ่น (Elastic Zone)

ความแข็งแรงของวัสดุ

ความหมายในแต่ละจุดบนกราฟที่ได้

A-B: พิกัดสัดส่วน

C: ขีดจำกัดความยืดหยุ่น(Elastic Limit)

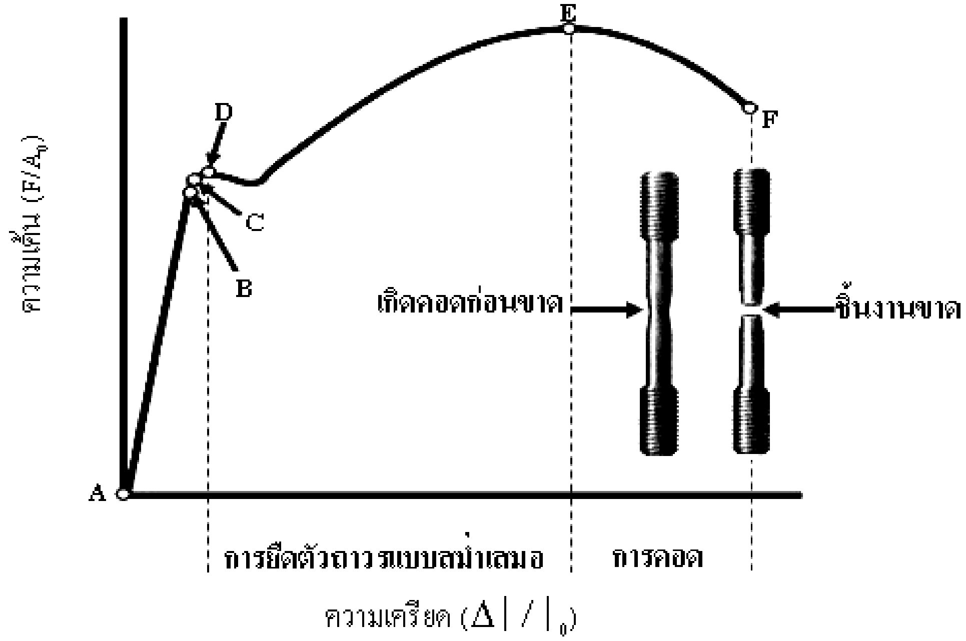
D: ค่าความต้านแรงดึงที่จุดคราก; Re

(Yield Point หรือ Yield Strength)

E: ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด; Rm

(Ultimate Tensile Strength)

F: จุดที่ชิ้นงานขาดออกจากกัน(Fracture)



ความแข็งแรงของวัสดุ

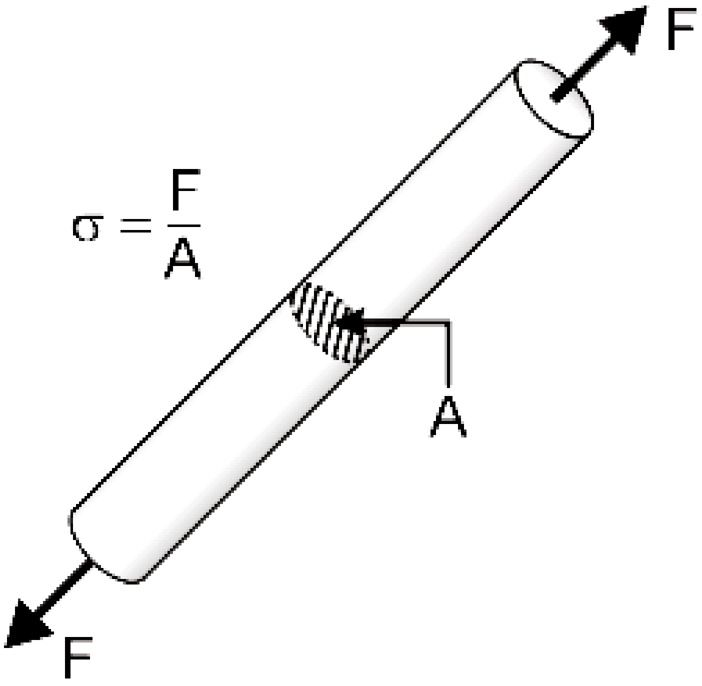
ความเค้น (Stress) = แรงที่กระทำ / พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงนั้น

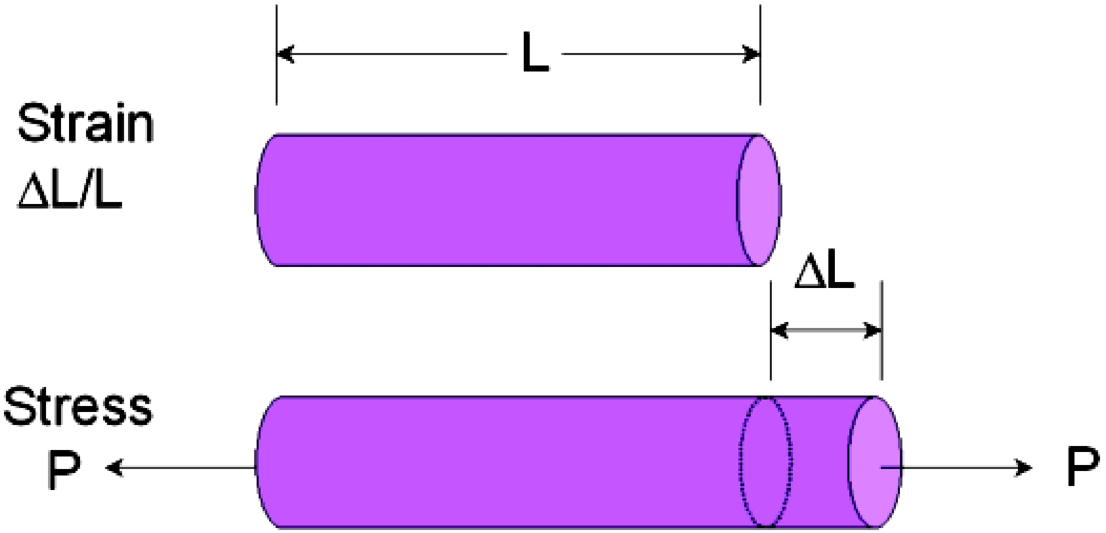
= F/A_0 (N/mm^2,MPa,psi)

ความเครียด (Strain) = ความยาวที่ยืดออก (ΔL) / ความยาวเริ่มต้น (L_0)

โมดุลัสความยืดหยุ่น (Young's Modulus of Elasticity) = Stress/Strain

ความแข็งแรงของวัสดุ





$$\text{Young's Modulus} = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{P}{\Delta L/L}$$

ความแข็งแรงของวัสดุ

ค่าการยืดตัว

(Elongation)

สูตร การคำนวณโดยใช้การยืดตัว

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%EL)} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\%$$

เมื่อ L_f = ความยาวของชิ้นงานทดสอบหลังจากถูกดึงจนขาด

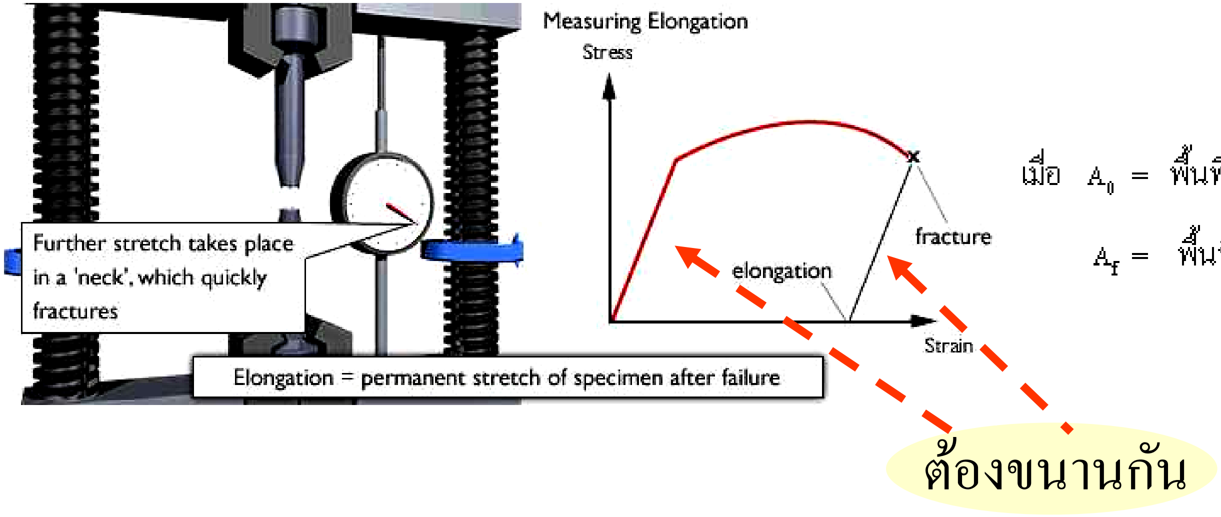
L_0 = ความยาวเดิมของชิ้นงานทดสอบ (ก่อนถูกดึง)

สูตร การคำนวณโดยใช้การลดของพื้นที่ภาคตัดขวาง

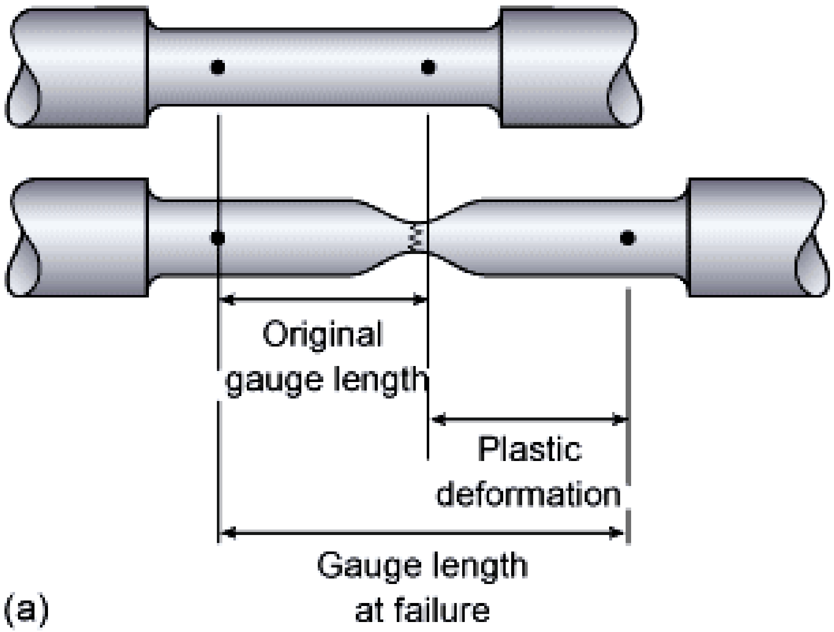
$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\%$$

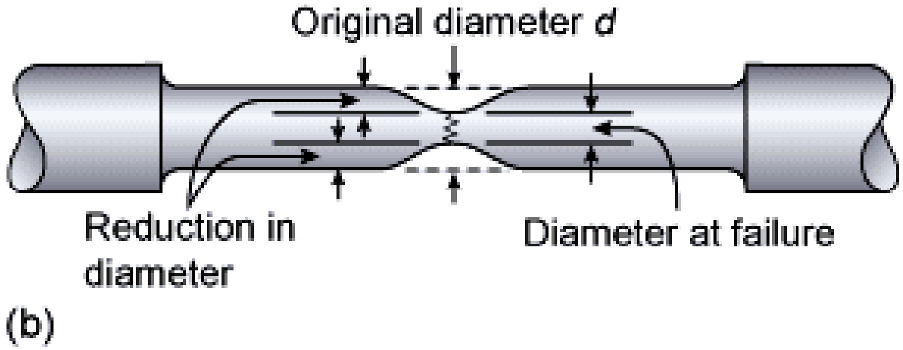
เมื่อ A_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

A_f = พื้นที่หน้าตัดภายหลังถูกดึงจนขาด



ความแข็งแรงของวัสดุ





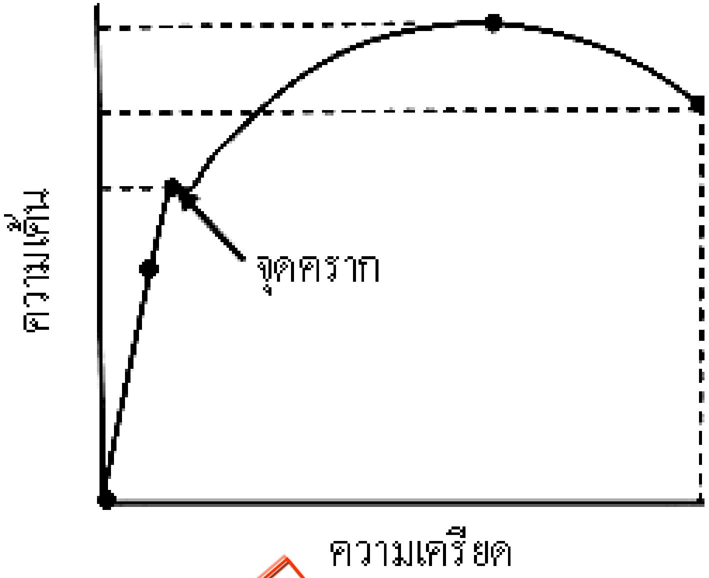
ผลการทดสอบจะใช้ได้เสมอ ไม่ว่ารอยจะอยู่บริเวณใดในช่วงความยาวพิกัด L_0 ถ้าค่า %EL ≥ ค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน

ถ้าตำแหน่งรอยขาดถ้าวัดจากขอบที่ใกล้ที่สุด < $1/3L_0$ และค่า %EL < Standard ➡ Failure ➡ ทดสอบใหม่

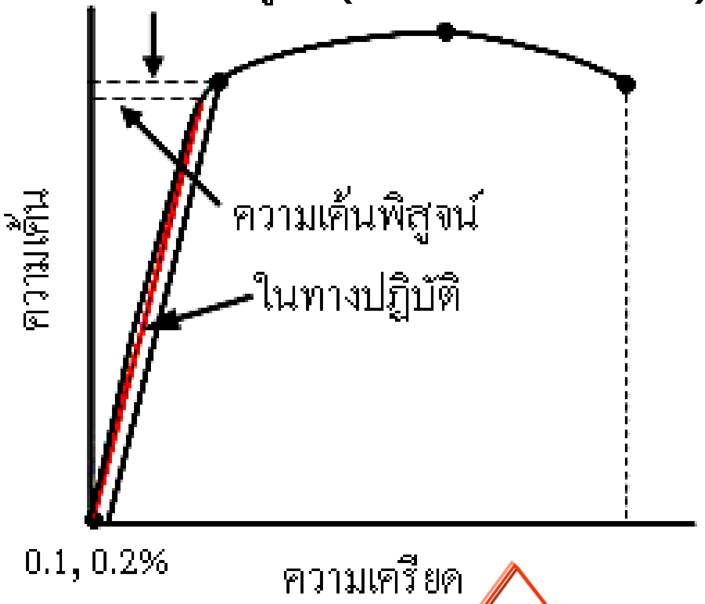
!!!!!ค่า %EL ในช่วง $1/3L_0$-$2/3L_0$ > ช่วงอื่น < ช่วงใกล้รอยขาด

ความแข็งแรงของวัสดุ

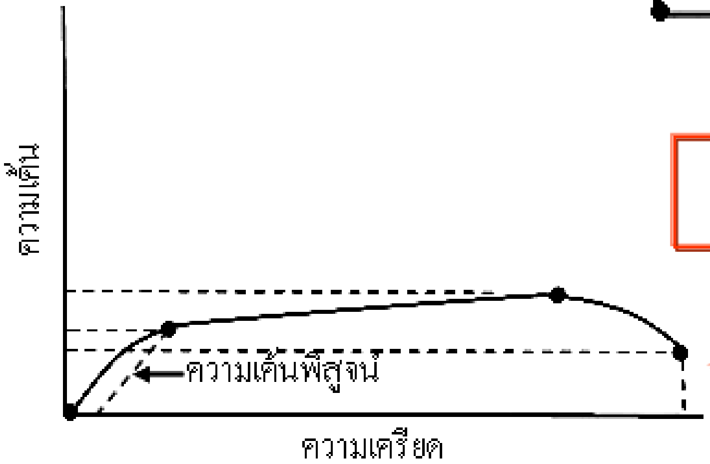
(Rp0.2);ความเค้นพิสูจน์ (Proof stress)



เช่น C-steel, low C-steel



เช่น Al, Cu,….



เช่น Soft plastic

ความแข็งแรงของวัสดุ

รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ

รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ

วิธีการเตรียม

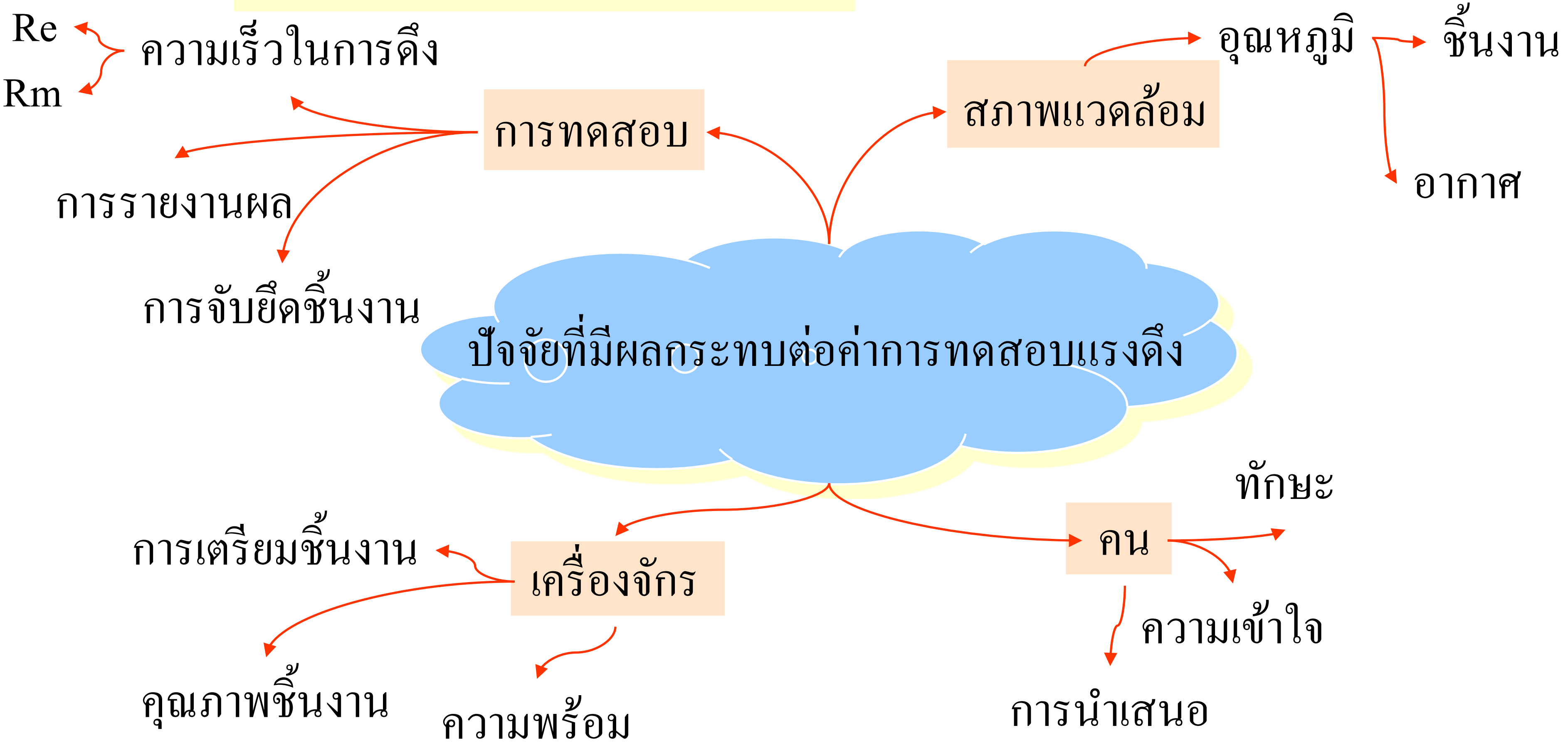
Standard e.g. DIN 50125,JIS Z 2201, DIN 50120 (งานเชื่อม)

พื้นที่หน้าตัดกลม: $L_0 = 5d_0$; > 25mm ;L0 ปัดให้หารลงตัวด้วย 5

พื้นที่หน้าตัดเหลี่ยม: $L_0 = 5.65(S_0)^{1/2}$; < 25mm ;L0 ปัดต้องไม่มากกว่า 10% ของขนาดที่คำนวณได้

ความแข็งแรงของวัสดุ

DIN 50145 e.g. Re; $\leq$ 30 N/mm^2/s

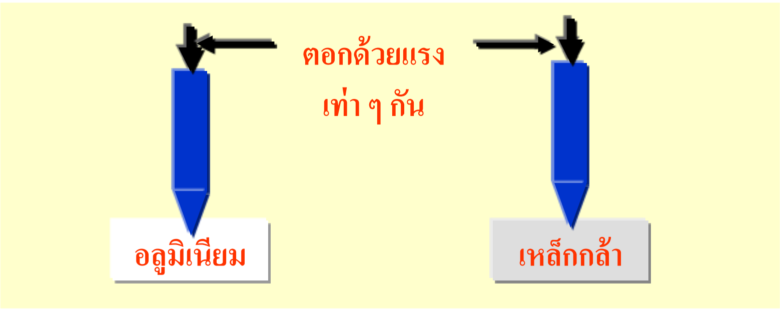


ความแข็งของวัสดุ

นิยาม:

ค่าความแข็งคือค่าการต้านทานรอยขีดข่วนหรือการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นที่ผิวหรือรูปร่างของวัสดุนั้นๆ

หลักการวัดค่าความแข็ง:



- ลักษณะการ ขูด-ขีด ให้เป็นรอย
- ลักษณะของการใช้น้ำหนักกดให้เป็นรอย
- ลักษณะใช้แรงสะท้อนกลับ

คุณสมบัติเมื่อมีค่าความแข็งที่สูง:

-ทนต่อการสึกหรอ เสียดสี

-รักษาคุณสมบัติด้านรูปร่าง เช่น ความคมหรือขนาด

-ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้น

-ค่าความเหนี่ยวลดลงหรือเปราะ (ข้อเสีย)

ความแข็งของวัสดุ

การปรับปรุงความแข็ง:

-โดยกระบวนการบำบัดด้วยความร้อน (โครงสร้างจุลภาค) เช่น อบชุบแข็ง

-เพิ่มสารหรือธาตุบางตัวเข้าไปในเนื้อวัสดุหรือที่ผิว (ส่วนผสมทางเคมี) เช่น การทำคาร์บูไรท์ หรือ การทำ remelting

-เพิ่มความเสียหายของโครงสร้างภายใน เช่น การขึ้นรูปเย็น

-โดยการแช่แข็ง

-..........

การทดสอบความแข็ง

เป็นการทดสอบแบบกึ่งทำลาย

- บริเนล (HB)
- ร๊อกเวล (HRB,HRC)
- วิกเกอร์ส (HV)

ทดสอบความแข็งโดยตรงแบบแรงคงที่

- ตะไบถู
- Shore (HS)
- ค้อนโพลดี้ (Poldi-Hammer)

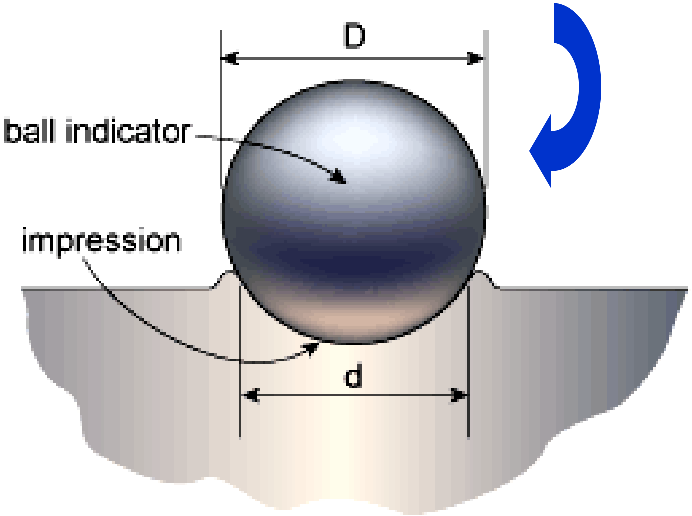
ทดสอบความแข็งโดยตรงแบบแรงไม่คงที่

- การทดสอบแรงดึง
- การทดสอบแรงกระแทก
- การทดสอบด้านความทนทานต่อการสึกหรอ

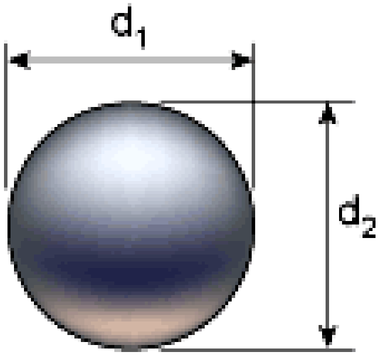
การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับความแข็ง

Brinell Hardness Test

บอลเหล็กกล้าชุบแข็ง(max.450HB)หรือ WC (E = 720,000 N/mm^2)



(a) Brinell indentation



(b) measurement of impression diameter

$$HB = \frac{0.102F}{0.5\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})}, \quad d = \frac{d_1+d_2}{2}$$

โดยค่า d วัดด้วยความละเอียด 0.01 mm

F= แรงกด (N)

D= เส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลกด (mm)

d= เส้นผ่านศนย์กลางรอยกด (mm)

Brinell Hardness Test

ข้อควรระวัง!!!!!!

-การกดทดสอบต้องไม่กระแทก

-แรงกดจะถูกรักษาให้คงที่ในระยะเวลาหนึ่งที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุเพื่อป้องกันการคืนตัว

เช่น เหล็กกล้า ~10-15 วินาที, อลูมิเนียม ~30 วินาที เป็นต้น

-ระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกด จากขอบชิ้นงาน

หรือระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดแต่ละรอยควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 2.d

-ขนาดของลูกบอลและแรงกดต้องกำหนดให้เหมาะสมโดยไม่ให้เกิดการเสียรูปด้านหลังของชิ้นทดสอบ

~ 10x ความลึกรอยกด (ISO/R 79-1968)

~ 17x ความลึกรอยกด (DIN50351)

ความหนาชิ้นงาน

Note! การทดสอบโลหะแผ่นบางควรทดสอบด้วยวิธีอื่น
และการจับโลหะแผ่นแล้วนำมาทดสอบจะได้ค่าที่ต่ำกว่าปกติ

Brinell Hardness Test

องศาของภาระ X = (0.102F/D2)	แรงกด F (N) , เส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลกด D (mm)					วัสดุชิ้นทดสอบและค่า HB สูงสุด
	1	2	2.5	5	10	
30	294.5	1177	1839	7355	29420	เหล็กกล้า นิเกิลเจือ และไททาเนียมเจือ ≤ 650 HB เหล็กหล่อสีเทา ≥ 140 HB* ทองแดงเจือ > 200 HB
15	–	–	–	–	14710	อลูมิเนียมเจือ ≥ 35 HB
10	98.1	382.3	612.9	2452	9807	เหล็กหล่อสีเทา < 140 HB* ทองแดงเจือ 35-200 HB อลูมิเนียมเจือ ≥ 35 HB
5	49	196.1	306.5	1226	4930	ทองแดงเจือ < 35 HB อลูมิเนียมเจือ 35-80 HB
2.5	24.5	98.1	153.2	612.9	2452	อลูมิเนียมเจือ < 35 HB
1-1.25	9.8	39.2	61.3	245.2	980.7	ตะกั่ว ดีบุก

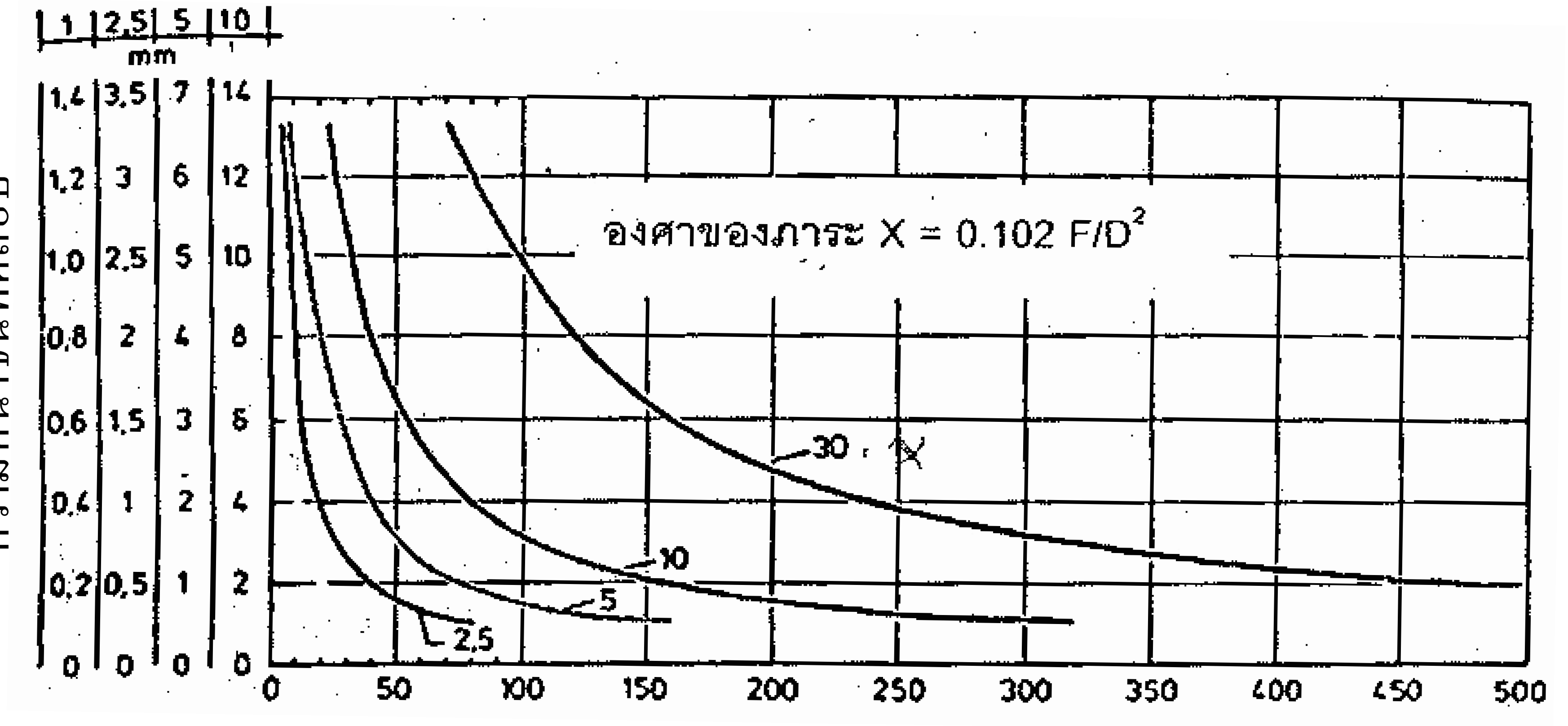
*การทดสอบเหล็กหล่อสีเทาควรใช้เส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลอย่างน้อย 5 mm.

Note; แรงกด(F) = XD^2

Brinell Hardness Test

Ø ลูกบอลกด (mm)

ความหนาชิ้นทดสอบ



HB

Brinell Hardness Test

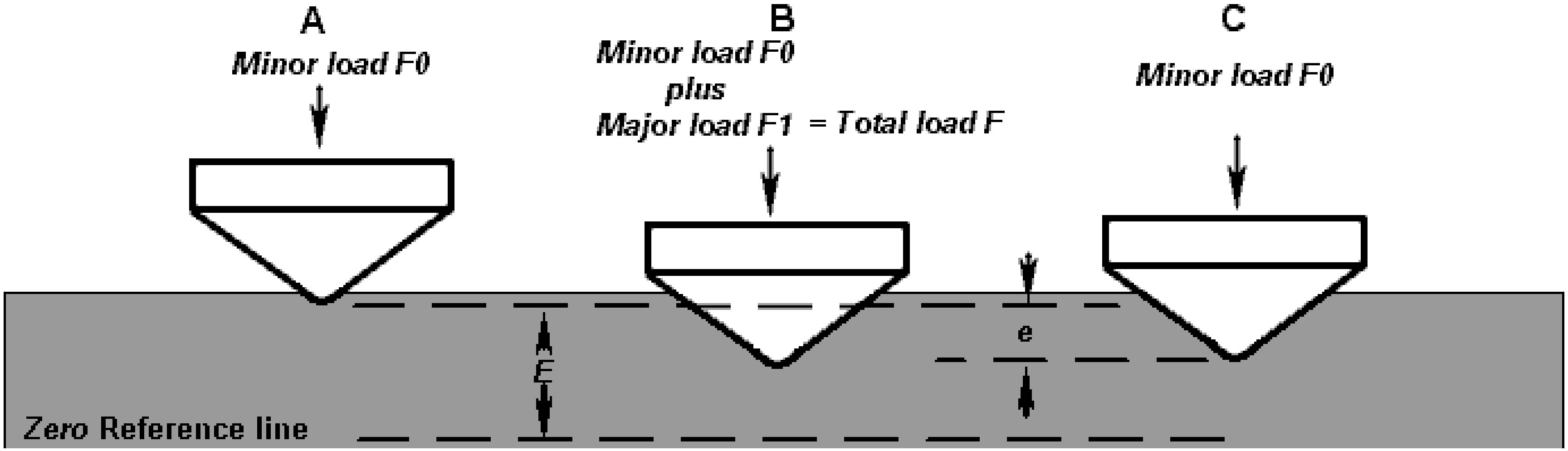
Hardness → Ultimate Tensile Strength

Rm ≈ μ.HB

เป็นค่าโดยประมาณ ไม่สามารถใช้แทนค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงได้ !!!การใช้ต้องระบุว่าได้จากการคำนวณค่าความแข็ง

วัสดุ	μ
เหล็กกล้า (Rm ≤ 1400 N/mm2)	3.5
เหล็กกล้า (Rm ≤ 2100 N/mm2)	4
เหล็กหล่อสีเทา ความหนา 30 mm (ความแข็ง ≤ 120 HB)	2.5
ทองแดง ทองเหลือง บรอนส์ (ขึ้นรูปเย็น)	4
ทองแดง ทองเหลือง บรอนส์ (อบอ่อน)	3.5
อลูมิเนียม อลูมิเนียมเจือ (Al Cu Mg)	3.8
อลูมิเนียมเจือ (Al Mg)	4

Rockwell Hardness Test



$$HR = E - e$$

$$HRC = 100 - e/0.002, \quad HRB = 130 - e/0.002$$

F0 = preliminary minor load in kgf
F1 = additional major load in kgf
F = total load in kgf
e = permanent increase in depth of penetration due to major load F1 measured in units of 0.002 mm
E = a constant depending on form of indenter: 100 units for diamond indenter, 130 units for steel ball indenter
HR = Rockwell hardness number
D = diameter of steel ball

Rockwell Hardness Test

Rockwell Hardness Scales

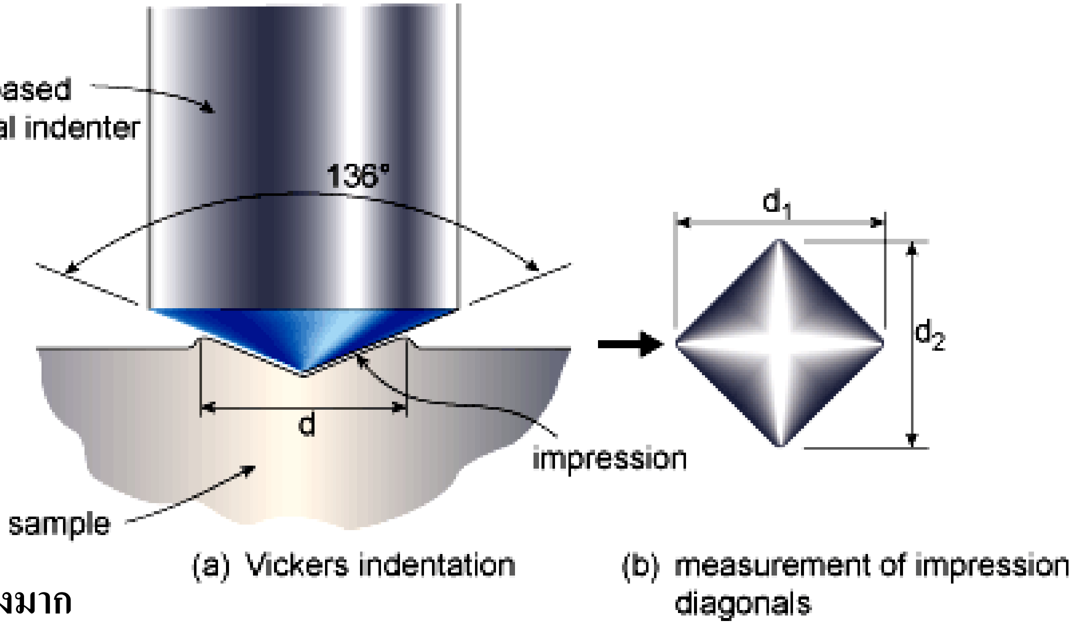
Scale	Indenter	Minor Load *F0* kgf	Major Load *F1* kgf	Total Load *F* kgf	Value of *E*
A	Diamond cone	10	50	60	100
B	1/16" steel ball	10	90	100	130
C	Diamond cone	10	140	150	100
			90	100	100
			90	100	130
			50	60	130
			140	150	130
			50	60	130
			140	150	130

Typical Application of Rockwell Hardness Scales

HRA . . . . Cemented carbides, thin steel and shallow case hardened steel
HRB . . . . Copper alloys, soft steels, aluminium alloys, malleable irons, etc.
HRC . . . . Steel, hard cast irons, case hardened steel and other materials harder than 100 HRB
HRD . . . . Thin steel and medium case hardened steel and pearlitic malleable iron
HRE . . . . Cast iron, aluminium and magnesium alloys, bearing metals
HRF . . . . Annealed copper alloys, thin soft sheet metals
HRG . . . . Phosphor bronze, beryllium copper, malleable irons HRH . . . . Aluminium, zinc, lead
HRK . . . . }
HRL . . . . }
HRM . . . .} . . . . Soft bearing metals, plastics and other very soft materials
HRP . . . . }
HRR . . . . }
HRS . . . . }
HRV . . . . }

Vickers Hardness Test

Vickers (HV)



การใช้งานโดยทั่วไป

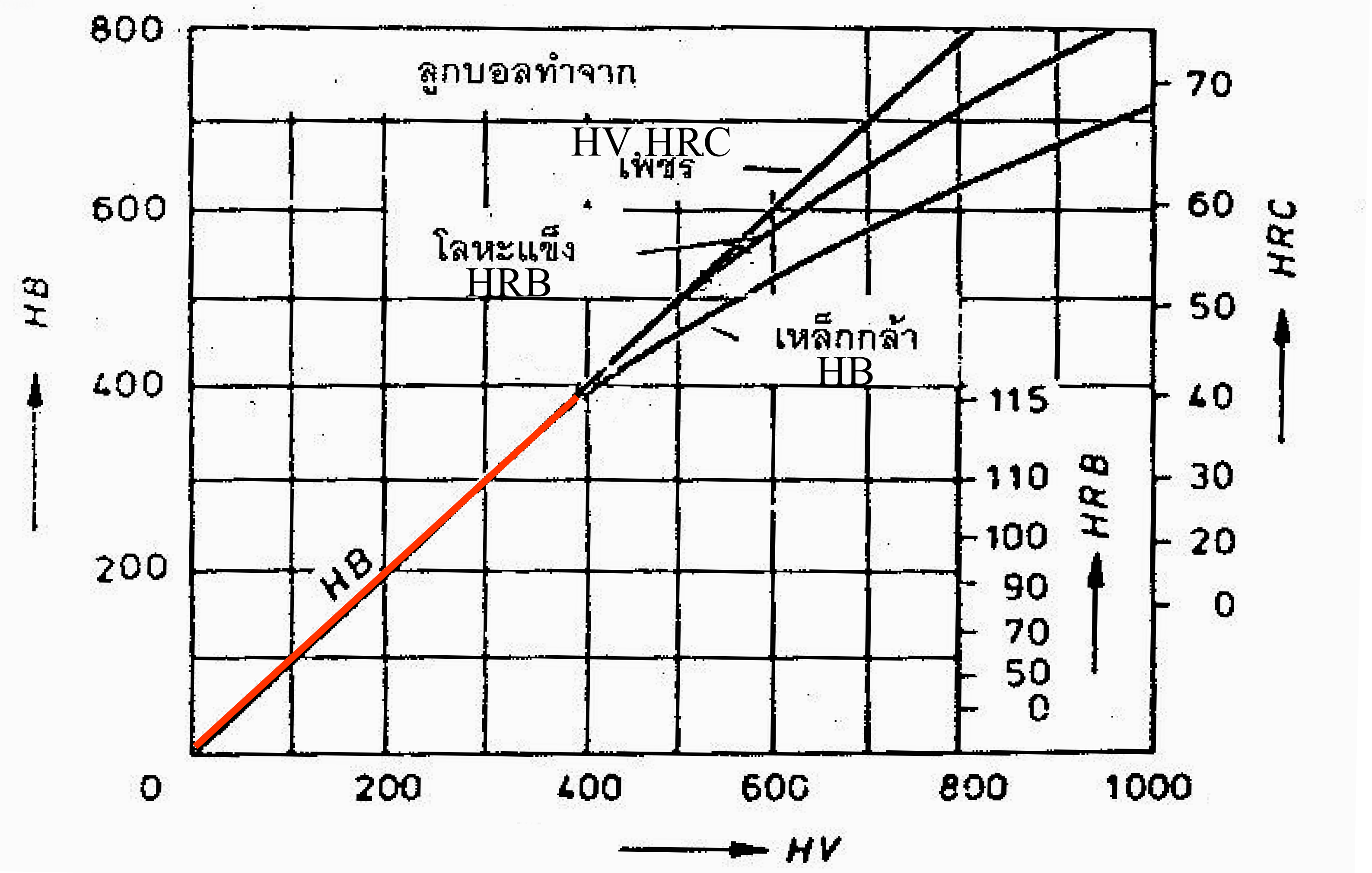
-ใช้ได้กับเหล็กอ่อนไปจนถึงเหล็กแข็งได้
-เหล็กที่มีค่าความแข็งสูงกว่า 450 HB ควรทำการทดสอบด้วยวิธีนี้
-เส้นทะแยงมุม d ทั้งสองข้างต้องวัดด้วยความละเอียด 0.002 mm
-ใช้แรงในการกดเท่าไหร่ก็ได้ แต่ไม่ต่ำกว่า 50 N
-ที่แรง 3-100 N มักใช้ในงานแผ่นบางหรือชั้นแข็งหรือกรณีชิ้นงานแข็งมาก
-ที่ 0.002-1 N สำหรับการทดสอบความแข็งจุลภาค
-ระยะห่างรอยกดหรือขอบชิ้นงาน ไม่น้อยกว่า 3d

$$HV = \frac{0.189F}{d^2}; d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

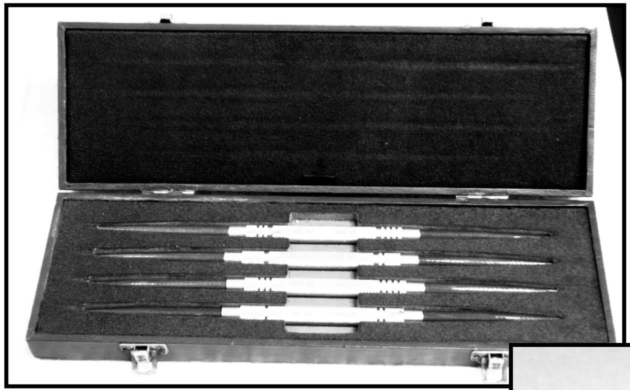
F = แรงกด

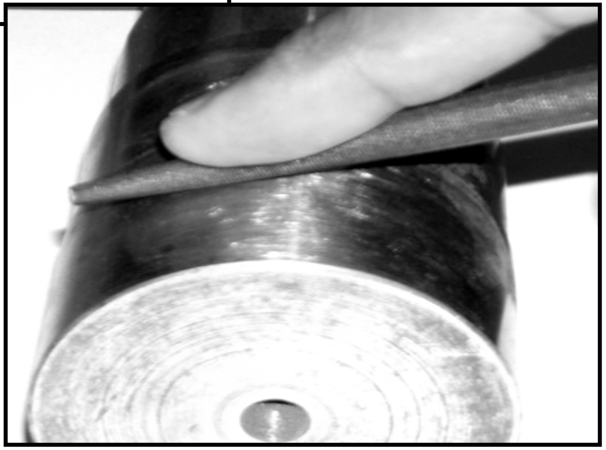
d = เส้นทะแยงมุมเฉลี่ย (mm)

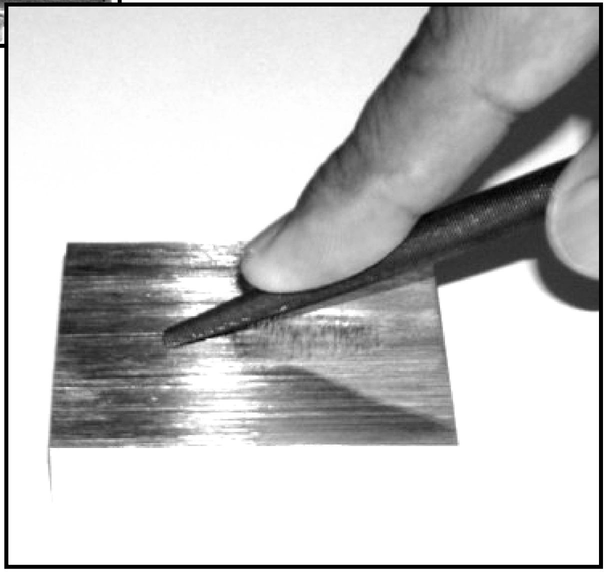
Vickers Hardness Test



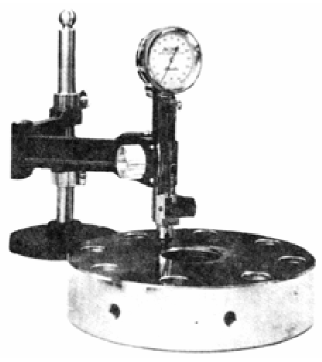
การทดสอบแบบ ตะไบฎ

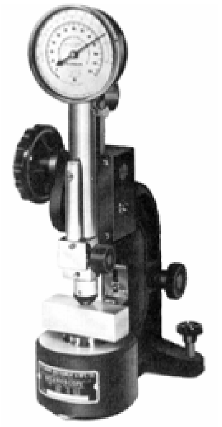






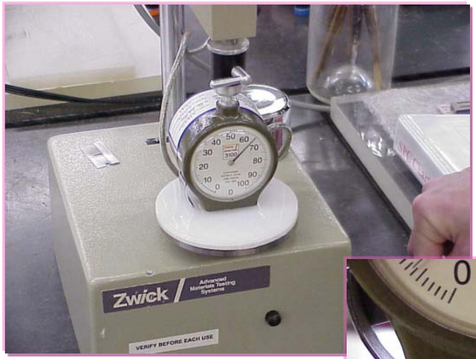
การทดสอบแบบ Shore

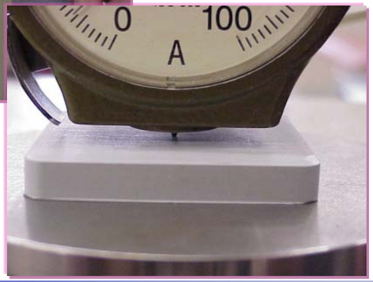




1. Shore Sclerocscope

วัดความแข็งในเทอมความยืดหยุ่นของวัสดุ ทดสอบโดยปล่อยบอลเหล็กกล้าชุบแข็งหรือ WC (ขนาด 40 เกรน; 2.5 กรัม; 0.0914 ออนซ์) ตกด้วยน้ำหนักของตัวเองและจากความสูงที่ทราบค่า (10 นิ้ว; 254 มิลลิเมตร) ในท่อแก้ว ความสูงที่กระดอนกลับวัดได้จากสเกลที่ได้แบ่งเป็น 100 ส่วน ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยจากการกระดอนของเหล็กกล้าคาร์บอนชุบแข็งที่สมบูรณ์ ถ้าสเกลมากกว่า 100 จะเป็นโลหะที่มีความแข็งมากเกิน ค่าความแข็งขึ้นอยู่กับความสูงที่กระดอนกลับของหัวค้อน วัสดุที่แข็ง ความสูงกระดอนจะมาก ความแข็งก็จะมาก วัสดุที่อ่อน ความสูงกระดอนจะน้อย ความแข็งก็จะน้อย

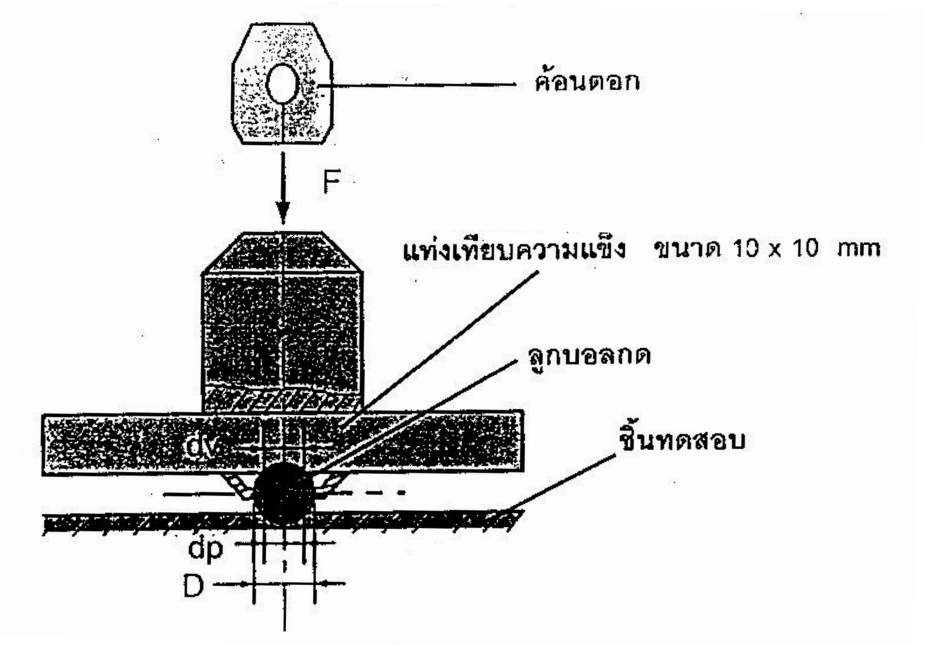




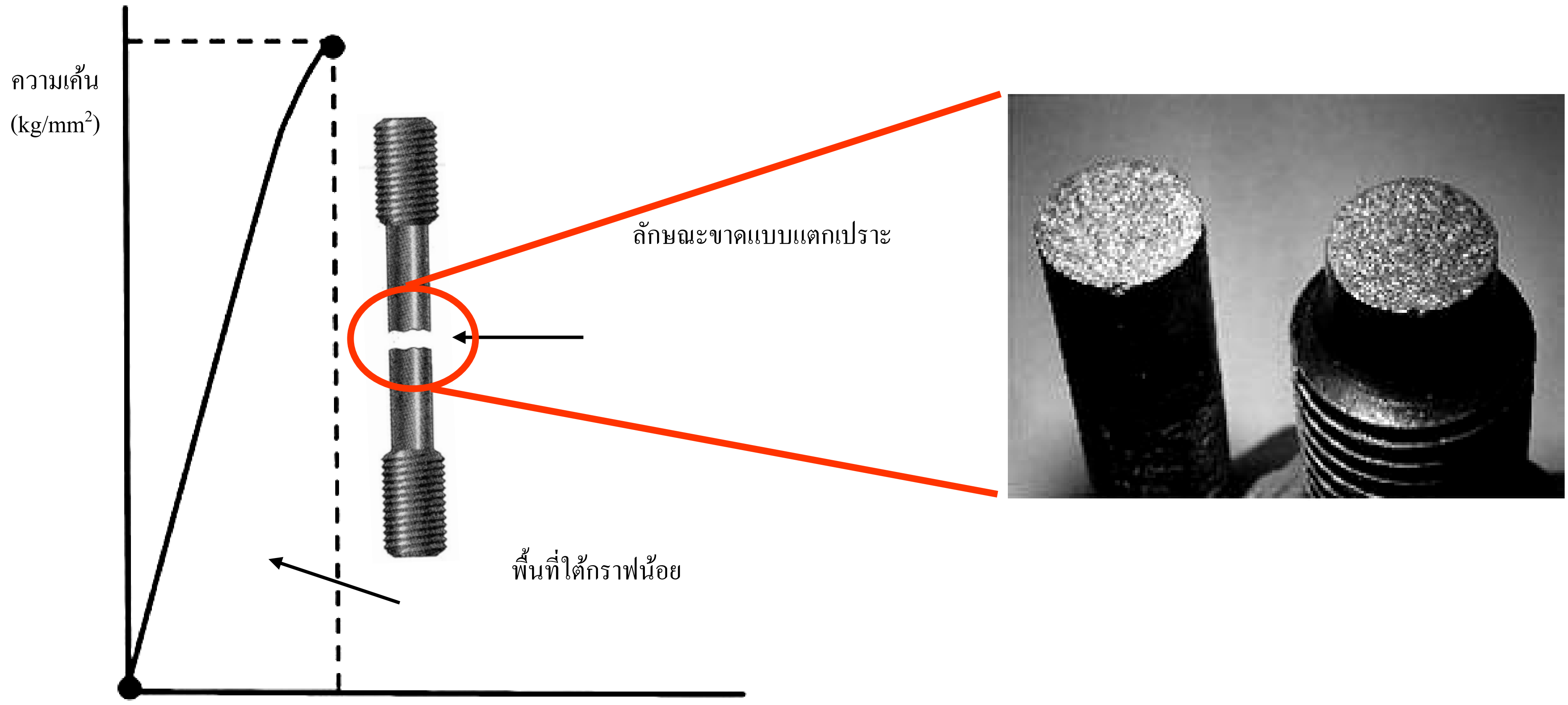
2. Shore Durometer

การทดสอบแบบ Shore Durometer ใช้หัวกดชุบแข็ง สปริงที่ได้ปรับค่าอย่างถูกต้อง ความลึกของหัวกด และแผ่นกด หัวกดจะถูกติดตั้งตรงกลางของฐานกดและมีระยะยืดตัว 2.5 มม.จากผิวของฐาน ตำแหน่งระยะยืดตัวเต็มที่เข็มชี้แสดงค่าศูนย์ เมื่อหัวกดถูกกดจนกระทั่งแนบติดผิวหน้าฐานกด ตัวบ่งชี้แสดงค่า 100 ดังนั้นทุกๆ จุดของ Shore มีค่าเท่ากับ ระยะกด 0.0025 มม. (สเกล M เท่ากับ 0.00125 มม.)

การทดสอบแบบ Poldi-Hammer



การทดสอบแรงดึง



การทดสอบแรงกระแทก

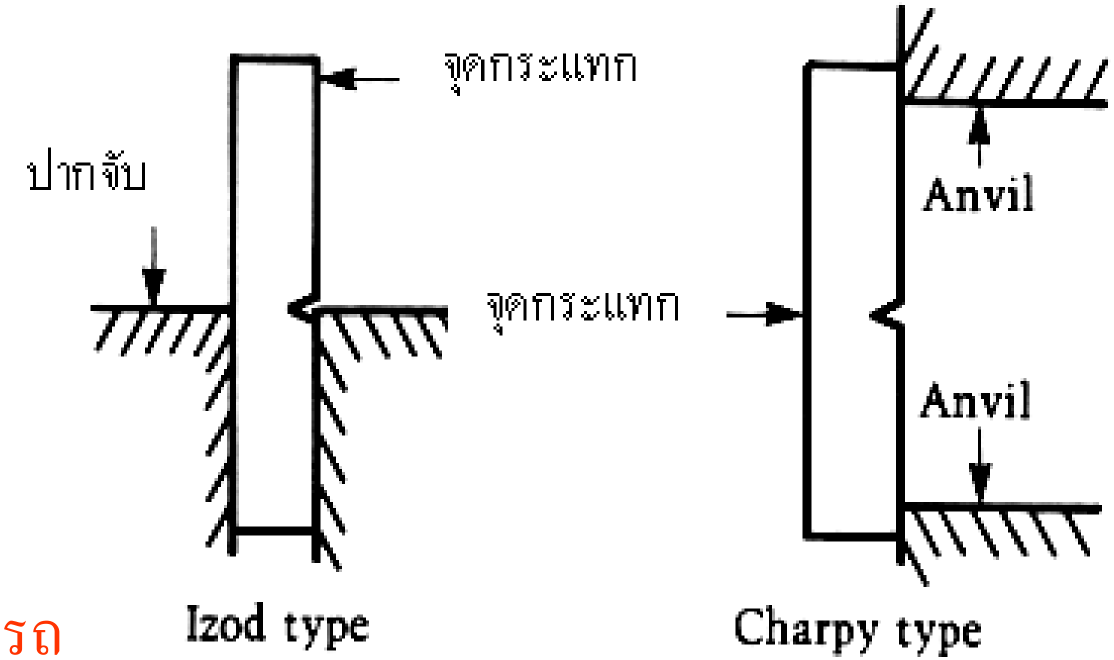
ที่นิยมสามารถแบ่งได้ 2 แบบ

-Izod Type

-Charpy Type

ข้อแตกต่าง

- การจับยึด
- จุดที่กระแทก
- ชนิดหัวตี

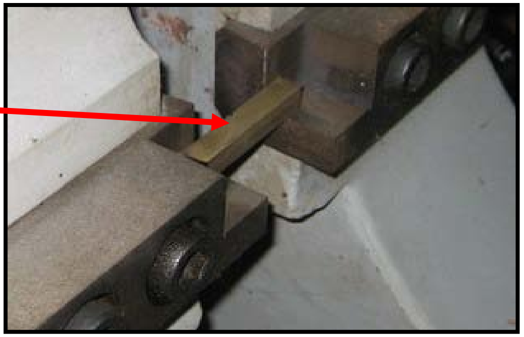


!!!การทดสอบการกระแทกสามารถ ใช้เพื่อวัดค่าความเหนียวได้เช่นกัน

V-Notch, U-Notch

การทดสอบแรงกระแทก

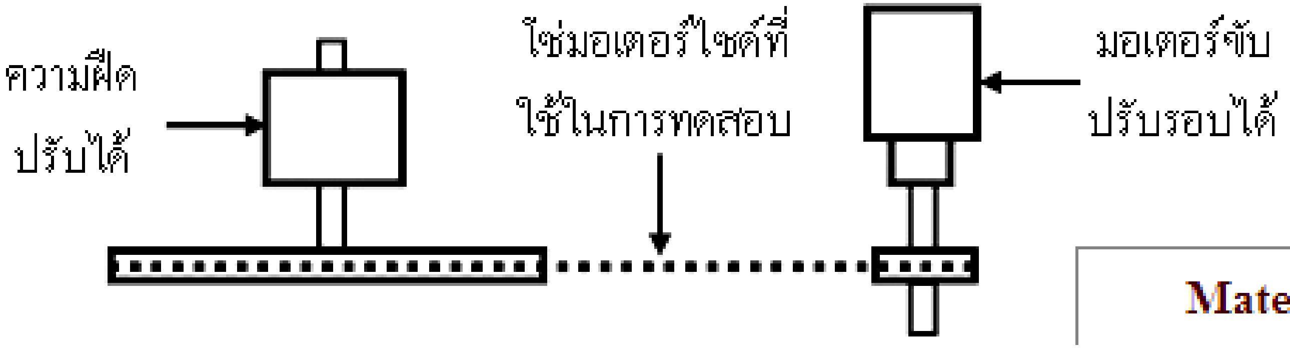
รูปขยายชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกกระแทก

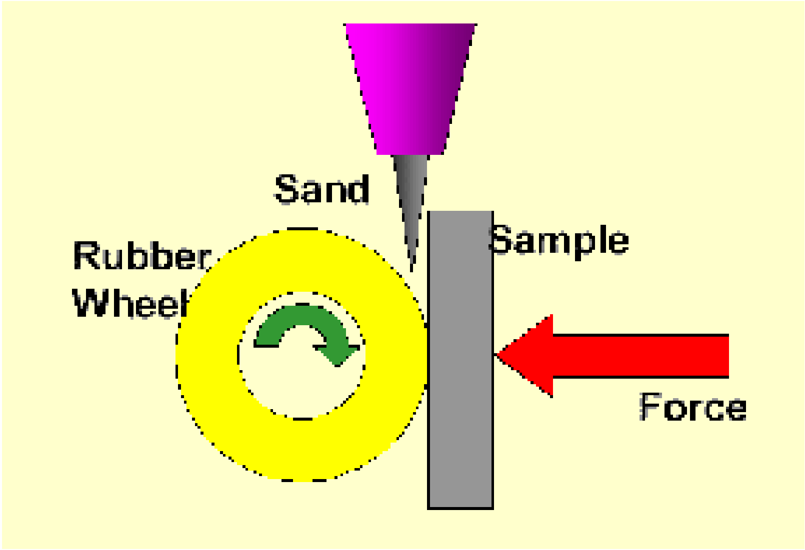


$1\ J = 1\ Nm$

$= 1\ kg\ m^2/s^2$

การทดสอบด้านความทนทานต่อการสึกหรอ





Material	Weight Loss (gm)
Mild Steel	2.6
400 BHN Wear Plate	2.0
Hardened Tool Steel	1.4
Chrome Carbide Plate	0.20

- Macro Str.

ตัด → เมาท์ → ขัดหยาบ → ขัดละเอียด → กัดกรด → ถ่ายภาพ → วิเคราะห์

80,120,320,500,800,1000,1200,1400

6, 3,1,0.5,0.1,0.05,0.01µm

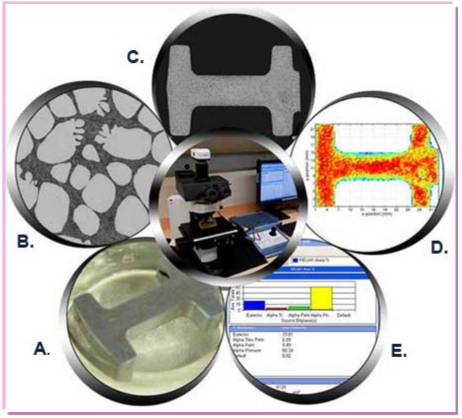
Nitric acid, Alcroregia, H_2SO_4, HF,…..

Depend on what is consided

Hot เมาท์

Cold เมาท์

ต้อง พิจารณา



- Micro Str.

ตัด → เมาท์ → ขัดหยาบ → ขัดละเอียด → กัดกรด → ถ่ายภาพ → วิเคราะห์

ตัด: !!!อย่าให้เกิดความร้อน

ขัดหยาบ: 80,120,320,500,800,1000,1200,1400

ขัดละเอียด: 6, 3,1,0.5,0.1,0.05,0.01µm

กัดกรด: Nitric acid, Alcroregia, H_2SO_4, HF,…..

ถ่ายภาพ: Depend on what is consided

Non destructive Testing, NDT

- VT = Visual Testing
- MT = Magnetic Patical Testing
- PT = Liquid Prenetant Testing
- RT = Radiographic Testing
- UT = Ultrasonic Testing
- ET = Eddy Current Testing

ข้อผิดพลาดของการอบชุบความร้อน

ความแข็งต่ำ

-เหล็กผิดมาตรฐาน

-อุณหภูมิไม่ถึงAustenitizing

-Holding or Soaking Timeสั้น

-Decarburizing

-ถังชุบอยู่ห่างเกินไป

-ใช้สารชุบที่มีอัตราการเย็นตัวไม่พอ

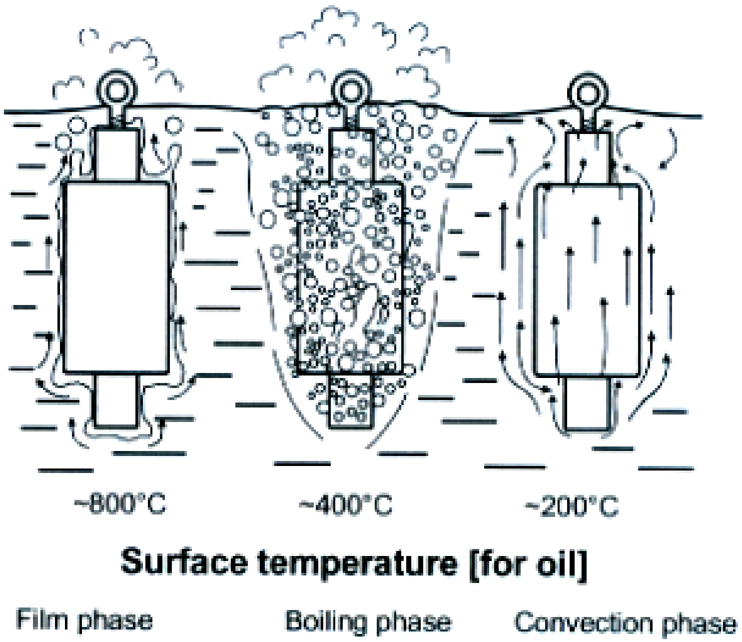
-สารชุบน้อยเกินไป

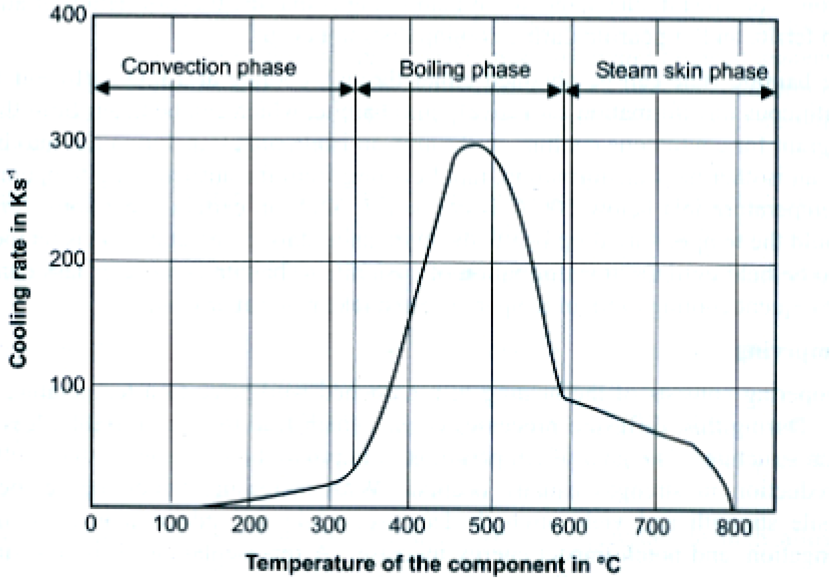
-ขนาดของชิ้นงานใหญ่เกินไป

-การอบคืนตัวไม่ถูกต้อง

-ถังชุบไม่มีพัดลมกวนสาร

ถังชุบไม่มีพัดลมกวนสาร





บิดงอ(Shape distrotion)

-Temperature gradient

-การเย็นตัวในขณะจุ่มชุบไม่สมมาตรกัน(Symmetry)

……….

การแตกร้าวหลังอบชุบ

-ปล่อยให้เย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง

-ออกแบบชิ้นงานมีมุมแหลมมาก

-ไม่ได้ทำTemperingก่อนทำSub-Zero

แตกร้าวขณะใช้งาน

-กรรมวิธีการผลิตเหล็ก

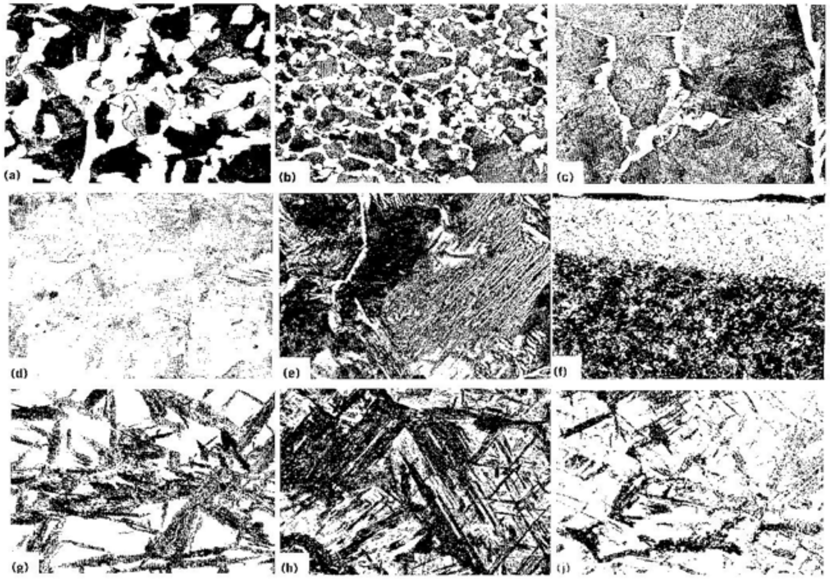
-อบชุบที่อุณหภูมิ Overheat ได้เกรนหยาบ

-อบชุบที่อุณหภูมิใกล้ Burning ขอบเกรนหลอมละลาย

-Temperingที่อุณหภูมิต่ำ

-ออสเตนไนท์ตกค้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)



1045 : Microstructures. (a) 2% nital, 500×. 25.4 mm (1 in.) bar stock. Normalized by austenitizing at 845 °C (1555 °F). Air cooled. Tempered at 480 °C (895 °F), 2 h. Fine lamellar pearlite (dark) and ferrite (white). (b) Picral, 500×. Sheet, 3.175 mm (1/8 in.) thick. Normalized by austenitizing at 1095 °C (2005 °F). Cooled in air. Structure is pearlite (dark gray) and ferrite (light). **(c)** Picral, 500×. Same as (b), except bar specimen used. Grain size much larger. Pearlite (gray) with network of grain-boundary ferrite (white) and a few side plates of ferrite. (d) Picral, 330×. Forging air cooled from forging temperature of 1205 °C (2200 °F). The structure consists of envelopes of proeutectoid ferrite at prior austenite grain boundaries, with emerging spines of ferrite, in matrix of pearlite. (e) 4% picral, 500×. 50.8 mm (2 in.) bar stock, austenitized at 845 °C (1555 °F), 2 h. Oil quenched, 15 sec. Air cooled, 5 min. Quenched to room temperature. Ferrite at prior austenite grain boundaries. Acicular structure probably upper bainite. Pearlite matrix (dark). (f) 2% nital, 100×. Forging austenitized at 900 °C (1650 °F), 3 h. Air cooled. Tempered at 205 °C (400 °F) for 2 h. At top is layer of chromium plate. Below, layer of martensite, due to overheating during abrasive cutoff. Remaindor, ferrite and pearlite. (g) Picral, 500×. Austenitized at 1205 °C (2200 °F), 10 min. Held at 340 °C (640 °F) for 10 min, for partial isothermal transformation. Cooled in air to room temperature. Lower bainite (dark) in matrix of martensite (white). (h) 2% nital, 500×. 50.8 mm (2 in.) bar stock. Austenitized 2 h at 845 °C (1555 °F). Oil quenched, 15 sec. Air cooled, 3 min. Water quenched to room temperature. Specimen from 3.175 mm (1/8 in.) below surface. Dark stripes at prior austenite grain boundaries are probably upper bainite. Matrix is martensite. (j) 4% picral, 500×. 50.8 mm (2 in.) bar stock. Austenitized 2 1/2 h at 845 °C (1555 °F). Water quenched, 4 sec. Air cooled, 3 min. Water quenched to room temperature. Specimen from 3.175 mm (1/8 in.) below surface. Dark, acicular structure probably lower bainite. Light matrix of martensite. (k) 4% picral, 500×. Same as (j), except somewhat different structure. Gray aggregate probably upper bainite. Fine, acicular dispersion probably lower bainite. Martensite matrix

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

Fig. 11 Low-carbon ferritic steel etched to reveal ferrite grain boundaries. 100×

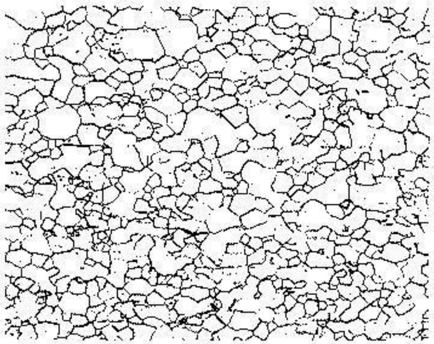


Fig. 17 Lath martensite in a water-quenched 0.20% C steel. 500×

Fig. 18 Pearlite structure in a high-carbon (0.75% C) steel. The cementite lamellae are white; the ferrite is dark. 500×

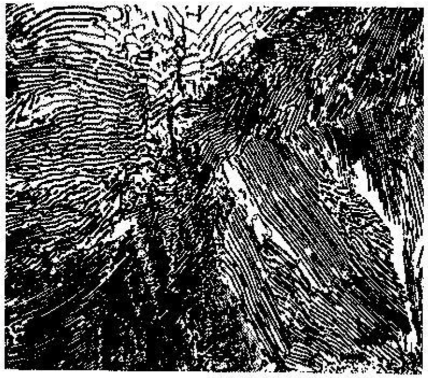
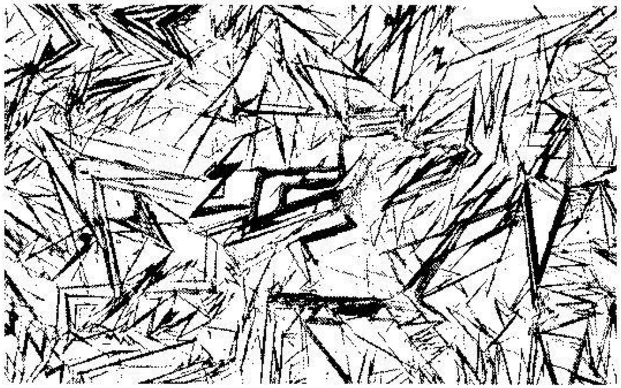


Fig. 20 Plate martensite in an Fe-1.4C alloy. 200×



D2

Chemical Composition. **AISI:** Nominal. 1.50 C, 12.00 Cr, 1.00 Mo, 1.00 V. **AISI/UNS:** Composition: 1.40 to 1.60 C, 0.60 Mn max, 0.60 Si max, 0.30 Ni max, 11.00 to 13.00 Cr, 0.70 to 1.20 Mo, 1.10 V max

Similar Steels (U.S. and/or Foreign). ASTM A681 (D-2); FED QQ-T-570 (D-2); SAE J437 (D2), J438 (D2); (Ger.) DIN 1.2201, 1.2379, 1.2601; (Fr.) AFNOR A35-590 2235 Z 160 CDV 12; (Ital.) UNI X 150 CrMo 12 KU; (Swed.) SS 2310; (U.K.) B.S. 4659 (USA D2), 4659 BD2, 4659 BD2A

Characteristics. Most available and most popular of the D series tool steels. Deep hardening, with low distortion and high safety in hardening. High resistance to softening and medium resistance to decarburizing. Readily nitrided

Forging. Preheat to 650 to 705 °C (1200 to 1300 °F). Start forging at 1010 to 1095 °C (1850 to 2005 °F). Do not forge after temperature of forging stock drops below 925 °C (1695 °F). Cool slowly after forging. Rapid cooling in air from elevated temperatures, such as 925 °C (1695 °F), is not recommended

Recommended Heat Treating Practice

Normalizing. Do not normalize

Annealing. Surface protection in the form of atmospheric gas with proper dew point, nonoxidizing salt bath, or an inert pack material, such as spent pitch coke, is required to avoid decarburization. Heat slowly and uniformly to 870 to 900 °C (1600 to 1650 °F). Use lower limit for small sections and upper limit for large sections. Holding time varies from 1 ¼ h for light sections to 6 h for heavy sections and large charges; about 1 ½ h per inch of thickness is an adequate approximation to follow. For pack annealing, hold for about 1 ½ h per inch of cross section of the pack. Cool slowly to 540 °C (1000 °F) at a rate not to exceed 22 °C (40 °F) per h, after which a faster cooling rate will not affect final hardness. Typical annealed hardness, 217 to 255 HB

Cycle Annealing. Heat to 900 °C (1650 °F) for 2 h. Slow cool to 775 °C (1425 °F) and hold at temperature for 4 to 6 h. Cool in air

Stress Relieving. Optional. Heat to 675 to 705 °C (1245 to 1300 °F) and hold for 1 h per inch of cross section (minimum of 1 h). Cool in air

Hardening. Heat very slowly. Preheat at 815 °C (1500 °F), and austenitize at 980 to 1025 °C (1795 to 1875 °F). Hold at temperature 15 min for small tools to 45 min for large tools. Quench in air and cool as evenly as possible on all sides. A block 76.2 by 152.4 by 254.0 mm (3 by 6 by 10 in.) will harden throughout to 62 to 64 HRC. When salt quenching, quench in salt bath at 540 °C (1000 °F), hold only long enough to equalize temperature, cool in air.

Stabilizing. Optional. For intricate shapes having abrupt changes in section size, stress relieve temper at 150 to 160 °C (300 to 320 °F) briefly before refrigerating at −85 °C (−120 °F). Temper immediately after part reaches room temperature

Tempering. Temper immediately at 205 to 540 °C (400 to 1000 °F) after tool has cooled to about 50 to 66 °C (120 to 150 °F). Double temper,

Recommended Processing Sequence

- Rough machine
- Stress relieve (optional)
- Finish machine
- Preheat
- Austenitize
- Quench
- Stabilize (optional)
- Temper/double temper
- Final grind to size

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

ตารางเทียบเกรดเหล็ก

Grade	DIN	JIS	AISI	ASSAB	BOHLER	BUDERUS	Daido	Hitachi	Koshuha	S&C	Sarrstahl	Thyssen
BS	DIN					Buderus				SC	RÖCHLING	THYSSEN
Ms		SS41			MS		SS41	SS41	SS41			
S50C	C45W	S50C	1050	760	CM50	1730	S50C	S50C	S50C	W345		1730
1545	C105W1	SK5	W1	K100		1545	YK3	YC3	K3		RBH10	1545
2083	X40Cr13	SUS420J2	420J2	STAVAX	M310	2083		KTSM60		RH	RNOH	2083
2311	40CrMnMo7	P20	P20	618	M200	2311	PDS5	HPM2	P20	WAGT	MOUREX	2311
2316	X36CrMo17		431	RAMAX S	M300	2316				R17		2316
2344	X40CrMoV5.1	SKD61	H13	8407	W302	2344	DHA1	DAC	KDA1	DCV	RDC2V	2344
2367	X38CrMoV5.3	SKD62	H10		W303	2367	DHA21			WM30		2367
2379	X155CrVMo12.1	SKD11	D2	XW42	K110	2379	DC11	SLD	KD11	ZESEK	RCC SUPRA	2379
2436	X210CrW12	SKD1	D6	XW5	K105	2436	DC1	CRD		476M	RCC EXTRA	2436
2510	100MnCrW4	SKS93	O2	DF3	K460	2510	GOA	SGT	KS3	477M	RUS3	2510
2379MOD							DC53					2379MOD
2714	56NiCrMoV7	SKT4	L6			2714						2714
2738	40CrMnNiMo8.6.4	P20+Ni	P20+Ni	718		2738		KSTM6UL	Q20	WAGTN		2738
3343	S-6-5-2	SKH9	M2	HSP41	S600	3343	MH51	YXM1	H9	MO5	GIANTM5	3343
5919	15NiCr6	SNC455	3115			5919						5919
5920	18NiCr8	SNCM420		7210		5920	SNCM420	SNCM420	SNCM420	5920		5920
6582	35NiCrMo6	SNCM440	4340	705		6582	SNCM440	SNCM440	SNCM440	6582	MONIC15	6582
7131	16CrMo4	SCM420				7131	SCM420	SCM420	SCM420	7131	EC80	7131
7225	40CrMo4	SCM440	4140	709		7225	SCM440	SCM440	SCM440	7225	MO40	7225
8550	35NiCrMoAl6	SACM				8550				-8519		8550
REX M4	S 6-5-4	SKH53	M4	ASP23				HAP10				
REX 76	S 10-5-3-9		M42	ASP60				HAP40				
CPM3V	S 8-3-2			Chipper								
CPM10V	S 10-5-2		A11Mod.	Vanadis10								

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

ตารางแสดงส่วนผสมของเหล็ก

Grade	DIN	JIS	AISI	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	other	Wear resist.	Toughness	Machinability
Ms		SS41										0	10	10
S50C	C45W	S50C	1050	0.50	0.30	0.70						3	9	9
1545	C105W1	SK5	W1	1.00	0.20	0.20			0.10			4	7	8
2083	X40Cr13	SUS420J2	420J2	0.45	0.40	0.30	13.00	0.20				3	9	8
2311	40CrMnMo7	P20	P20	0.40	0.30	1.50	2.00	0.20				1	8	8
2316	X36CrMo17		431	0.36	0.30		17.00	1.20			Ni-0.5	3	9	8
2344	X40CrMoV5.1	SKD61	H13	0.40	1.05	0.40	5.20	1.40		1.00		3	9	8
2367	X38CrMoV5.3	SKD62	H10	0.38	1.05	0.40	5.00	3.00		0.60		3	9	7
2379	X155CrVMo12.1	SKD11	D2	1.55	0.30	0.30	12.00	0.70		1.00		9	2	3
2436	X210CrW12	SKD1	D6	2.10	0.30	0.80	12.00		0.70			9	1	2
2510	100MnCrW4	SKS93	O2	1.00	0.25	1.10	0.60		0.60	0.10		4	3	8
2379MOD	X100CrMoV8-2			1.00	1.00	0.30	8.00	2.30		0.30		3	3	6
2714	56NiCrMoV7	SKT4	L6	0.55	0.25	0.80	1.10	0.50		0.10	Ni-1.7	3	4	4
2738	40CrMnNiMo8.6.4	P20+Ni	P20+Ni	0.38	0.30	1.45	1.85	0.18			Ni-1.2	2	9	7
3343	S-6-5-2	SKH9	M2	1.05	0.35	0.35	4.00	5.00	6.40	2.00		9	3	5
5919	15NiCr6	SNC15	3115	0.15	0.25	0.50	1.60				Ni-1.60			
5920	18NiCr8	SNCM420		0.18	0.25	0.50	2.00				Ni-2.0	2..6	9	8
6582	35NiCrMo	SNCM440	4340	0.35	0.30	0.60	1.60	0.25			Ni-1.60	2..4		
7131	16CrMo4	SCM420		0.16	0.25	1.15	0.95							
7225	40CrMo4	SCM440	4140	0.40	0.30	0.70	1.10	0.20		1.00				
8550	35NiCrMoAl6	SACM		0.35	0.30	0.50	1.70	0.20			Ni-1.6Al-1.0			
REX M4	S 6-5-4	SKH53	M4	1.42	0.55	0.30	4.00	5.25	5.50	4.00				
REX 76	S 10-5-3-9		M48	1.50	0.30	0.30	3.75	5.25	9.75	3.10	Co-8.5			
CPM3V	S 8-3-2			0.80	0.80	0.50	7.50	1.30		2.75				
CPM10V	S-10-5-2		A11Mod.	2.45	0.90	0.50	5.25	1.30		9.75				

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

การอบ – ชุบแข็ง

เกรด Grade	อบอ่อน Annealing อุณหภูมิ°c	ความแข็ง Hardness HB	อบคลายเครียด Stress relieved อุณหภูมิ°c	อุ่นชิ้นงาน Step1 อุณหภูมิ°c	อุ่นชิ้นงาน Step2 อุณหภูมิ°c	ชุบแข็ง Austenitizing อุณหภูมิ°c	sec/mm.	สารชุบ Quenchant	ความแข็ง Hardness Hrc	อบคืนไฟ Tempering อุณหภูมิ°c	เวลา : ชม.	จำนวนครั้ง	วิธีชุบ case depth ความลึก
Ms													เติมคาร์บอน/ไม่ชุบ
S50C	710	180	550	650		840	30	oil/air	57	220-280	2	2	induction/full
1545	720	180	550	650		810-840	60	oil/air	62-64	180-280	2	2	induction/full
2083	820	230	650	650	850	980-1040	60	oil	52-56	500-530	2	2	ชุบตลอดความหนา
2311	720	230	550	650		840-880	60	oil	50-52	600-650	2	2	preharden
2316	820	255	590	650	850	1010-1050	60	oil	48-52	220-320	2	2	preharden
2344	820	230	650	650	850	1020-1060	30	oil/salt	53-54	550-620	2	2	ชุบตลอดความหนา
2367	820	230	650	650	850	1040-1080	30	oil/air	55-56	600-640	2	2	ชุบตลอดความหนา
2379	860	250	650	650	850	1000-1040	90	oil/air	62-64	500-540	2	2-3	ชุบตลอดความหนา
2436	840	250	650	650	850	940-980	90	oil/salt	63-54	220-260	2	2-3	ชุบตลอดความหนา
2510	830	230	650	650	-	780-820	60	oil/salt	63-64	220-260	2	2	ชุบตลอดความหนา
2379MOD	720	250	650	650	850	1040-1080	90	oil/air	58-62	560-580	2	2	ชุบตลอดความหนา
2714	700	250	650	650		880-910	60	oil	55-57	450-600	2	2	ชุบตลอดความหนา
2738	720	250	600	650		880-910	60	oil	52-55	600-650	2	2	preharden
3343	850	270	700	650	850	1190-1230	90	oil/salt	62-64	540-560	2	3	ชุบตลอดความหนา
5919	700	230	650	650		780-880	60	oil/water	58-62	150-170	2	2	เติมคาร์บอน
5920	700	230	650	650		830-860	60	oil/water	30-38	170-210	2	2	เติมคาร์บอน
6582	700	230	650	650		830-860	60	oil/water	55-58	550-650	2	2	prehard+induction
7131	700	230	650	650		830-860	60	oil/water	30-38	170-210	2	2	เติมคาร์บอน
7225	700	230	650	650		830-860	60	oil/water	55-58	550-650	2	2	prehard+induction
8550	700	230	650	650		830-860	60	oil/water	55-58	550-650	2	2	preharden+ไนไตรด์
REX M4	870	255	700	500	900	1150-1205	90	oil/salt	64-65	540-560	2	3	ชุบตลอดความหนา
REX 76	900	255	700	500	900	1150-1205	90	oil/salt	68-70	565	2	3	ชุบตลอดความหนา
CPM3V	900	255	700	500	900	1030-1130	90	oil/salt	58-63	525	2	3	ชุบตลอดความหนา
CPM10V	900	280	700	500	900	1060-1180	90	oil	63-65	540-570	2	3	ชุบตลอดความหนา
440C	850	255	650	650	850	1000-1040	90	oil	58-62	220-280	2	2	ชุบตลอดความหนา

หมายเหตุ :-
1. การอบอ่อน ให้อบชิ้นงานให้ได้อุณหภูมิตามกำหนด และแช่ไว้นาน 1 ชั่วโมงต่อความหนา 25-50 มิลลิเมตร แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตาโดยไม่มีการเปิดฝาเตาออก
2. การอบคลายความเครียด ให้อบชิ้นงานให้ได้ตามกำหนดแล้วแช่ไว้นาน 1 ชั่วโมงต่อความหนา 50 มิลลเมตร แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตาจนถึง 500 องศา แล้วนำออกมาให้เย็นตัวในอากาศ
3. ข้อมูลที่ถูกต้องของเหล็กแต่ละเกรดให้สอบถามจากผู้ขายเหล็กเนื่องจากบางกรณีอาจมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง
4. อุณหภูมิชุบแข็งที่กำหนดเป็นช่วงอุณหภูมิให้ใช้ค่าต่ำกับชิ้นงานที่ต้องการความเหนียวและใช้ค่าสูงกับชิ้นงานที่ต้องการความแข็งสูง
5. อุณหภูมิการอบคืนไฟ (Tempering) ให้ดูจากกราฟของเหล็กแต่ละเกรด และคุณสมบัติที่ต้องการ

Thank you
for your attention