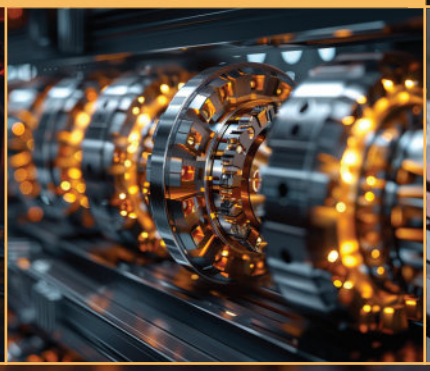
SKYBOOK

e-book

โลหะวิทยา ในงานอุตสาหกรรม

ENGINEERING METALLURGY



โลหะวิทยา
ในงานอุตสาหกรรม

ENGINEERING METALLURGY

คำนำ

หนังสือโลหะวิทยาในงานอุตสาหกรรม (Engineering Metallurgy) จัดทำพร้อมเรียบเรียงขึ้นเพื่อนักศึกษาในสายช่างอุตสาหกรรม สาขาช่างกลโรงงาน ช่างกลโลหะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม ช่างโลหะเทคนิคอุตสาหกรรม สาขางานรองหล่อโลหะ สาขางานรองเครื่องจักรอัตโนมัติ และช่างผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ ระดับชั้น ปวส. 5 (ปวส.หลักสูตร 2 ปี) และระดับชั้น ปวส. 4 (ปวส.หลักสูตร 4 ปี) ซึ่งทางคณะผู้เรียบเรียงได้เขียนเนื้อหาครอบคลุมหลักสูตรสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล และกรมอาชีวศึกษาของทั้ง 2 สถาบัน

ในหนังสือเล่มนี้จะประกอบไปด้วยเนื้อหาวิชาตามหลักสูตรดังนี้คือ เครื่องมือทดสอบในทางโลหะวิทยา คุณสมบัติเชิงกลของโลหะและลักษณะโครงสร้างการเกิดผลึกของโลหะ ไดอะแกรมสมดุลของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์ การอบชุบเหล็กและการทดสอบความแข็ง-ความแข็งแรงของเหล็กที่ชุบในลักษณะต่าง ๆ รวมทั้งการวิเคราะห์คุณสมบัติทางโลหะวิทยา

อนึ่ง หนังสือเล่มนี้สำเร็จผลได้ตามความมุ่งหวัง ทางคณะผู้เรียบเรียงต้องขอก้มกราบแทบเท้าและขออุทิศคุณงามความดีอันประเสริฐยิ่งทั้งหมดนี้แด่คุณพ่อประสิทธิ์และคุณแม่วาณี ประพันธ์พัฒน์ ซึ่งเป็นที่เคารพรักยิ่งของบุตรชายคนโตคนนี้ ด้วยเทอญ

คณะผู้เรียบเรียง

เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์

ขจรศักดิ์ ศิริมัย

ลักษณะรายวิชา

1. **รหัสและชื่อ** 04-431-001 โลหะวิทยาในงานอุตสาหกรรม
   Engineering Metallurgy
2. **สภาพรายวิชา** วิชาชีพพื้นฐานในหลักสูตร ปวส. สาขาวิชาช่างกลโรงงาน
3. **ระดับรายวิชา** ภาคเรียนที่ 2 ชั้นปีที่ 1
4. **พื้นฐาน** -
5. **เวลาศึกษา** 72 คาบเรียนตลอด 18 สัปดาห์ ทฤษฎี 2 คาบ ปฏิบัติ 2 คาบต่อสัปดาห์ และนักศึกษาจะต้องใช้เวลานอกศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง สัปดาห์ละ 3 ชั่วโมง
6. **หน่วยกิต** 3 หน่วยกิต
7. **จุดมุ่งหมายรายวิชา**
   1. เข้าใจและเรียนรู้วิธีการใช้เครื่องมือทดสอบในทางโลหะวิทยา
   2. รู้จักคุณสมบัติเชิงกลของโลหะ และเข้าใจลักษณะโครงสร้างการเกิดผลึกของโลหะ
   3. เข้าใจลักษณะการเปลี่ยนรูปของโลหะและโลหะผสม
   4. รู้จักไดอะแกรมสมดุลของเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์
   5. มีทักษะในการอบชุบเหล็ก และทดสอบความแข็ง-ความแข็งแรงของเหล็กที่ชุบในลักษณะต่าง ๆ
   6. มีกิจนิสัยในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางโลหะวิทยาได้
8. **คำอธิบายรายวิชา**

   ศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในทางโลหะวิทยา คุณสมบัติเชิงกลของโลหะ โครงสร้างของโลหะและการเกิดผลึก การเปลี่ยนรูปของโลหะ คุณสมบัติของโลหะประสม ไดอะแกรมสมดุล ไดอะแกรมของเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ การอบชุบของเหล็ก กรรมวิธีชุบแข็ง

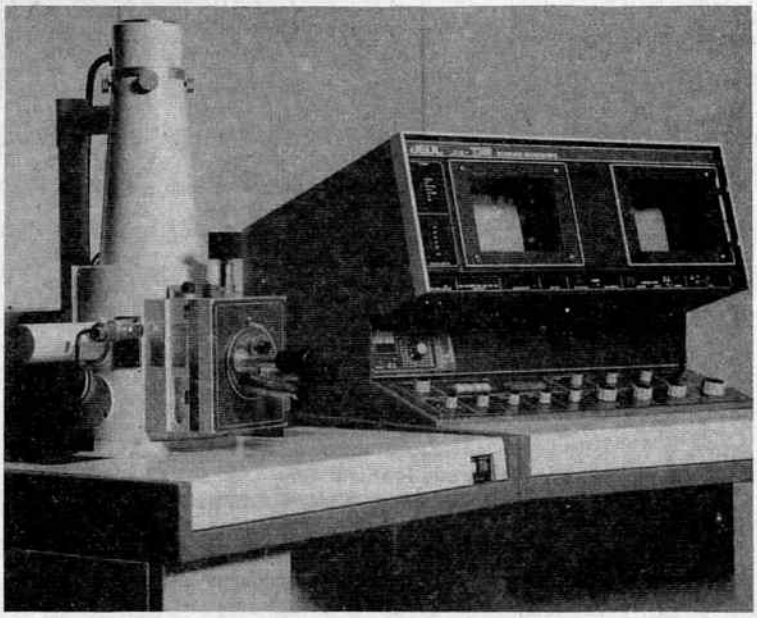
สารบัญ

บทที่ 1

เครื่องมือทดสอบในทางโลหะวิทยา

1.1 เครื่องมือทดสอบในทางโลหะวิทยา

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบในทางโลหะวิทยานั้น นับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการศึกษาในวิชาโลหะวิทยาในงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในขบวนการเลือกใช้วัสดุ (Materials) อย่างเหมาะเจาะหรืออย่างเหมาะสมนั้นต้องอาศัยข้อมูล (Data) มาจากขบวนการทดสอบจากกรรมวิธีแบบต่าง ๆ อาทิเช่น การวัดอุณหภูมิโดยการสังเกตสีของโลหะ, เทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมอิเล็กตริก ไพโรมิเตอร์ การทดสอบความแข็งแบบต่าง ๆ และเครื่องมืออุปกรณ์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา (Microstructure Examination) เป็นต้น



รูปที่ 1.1 *Electron Microscope (SEM)*

1.2 การวัดอุณหภูมิโดยการสังเกตสีของโลหะ

ในการวัดอุณหภูมิโดยการสังเกตดูจากสี (Color) ของโลหะนั้นถือว่าเป็นวิธีการในการประมาณค่าของอุณหภูมิอย่างพอหยาบ ๆ จากการสังเกตดูสีของชิ้นงานนั้น ๆ ดังตารางที่ 1.1

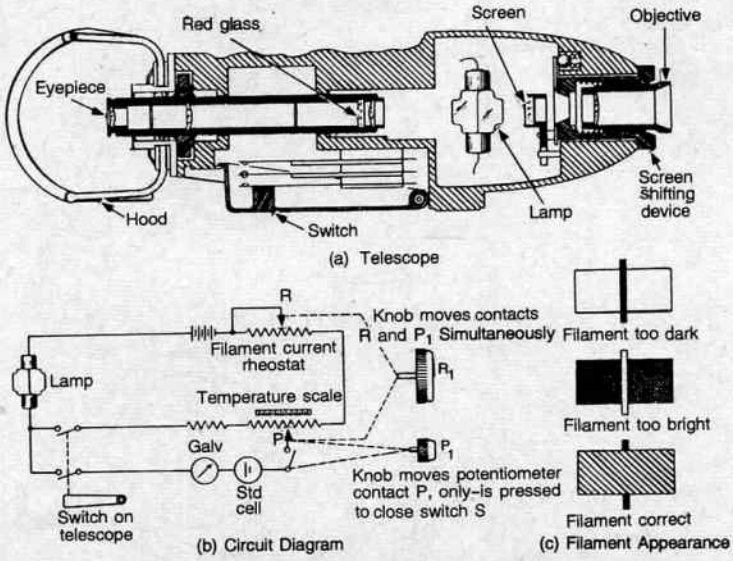
ตารางที่ 1.1 *แสดงสี (Color) ของโลหะ*

สี (Color)	°C	°F
Faint Red	510	950
Dark Red	615	1,150
Dark Cherry	630	1,175
Cherry Red	697	1,300
Bright Cherry	793	1,475
Dark Orange	890	1,650
Orange	945	1,750
Yellow	972	1,800

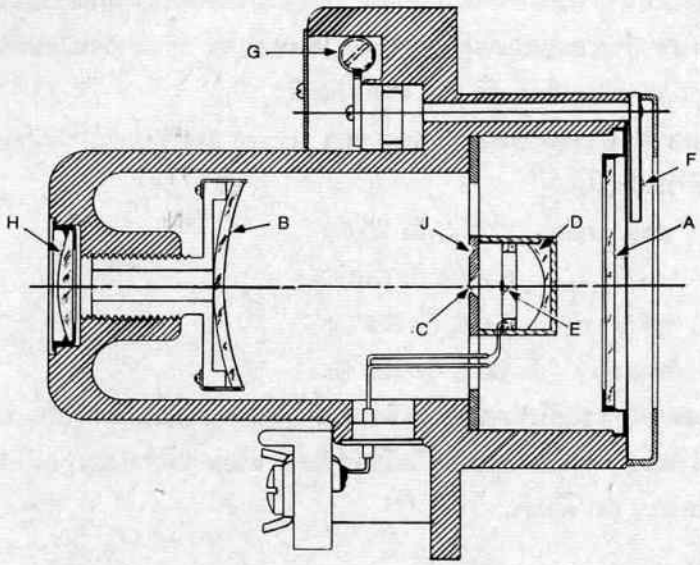
1.3 เทอร์โมมิเตอร์

เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิในทางโลหะวิทยา โดยมีขีดความสามารถในการวัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า 510 °C ได้ดีทีเดียว เทอร์โมมิเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดดังนี้

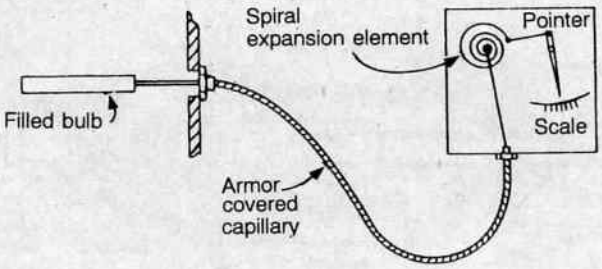
1. ชนิดอาศัยความต้านทาน (Resistance) เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการทำงานโดยอาศัยความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำ (Conductor) โดยจะเพิ่มหรือสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นไปด้วยนั่นเอง มีหลักการโดยการนำตะกั่ว (Lead) มาทำเป็นคอยล์ (Coil) บรรจุใส่ลงไปในหลอดวัสดุทนไฟ โดยมีคอยล์ของโลหะ (Metal) อีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่เป็นความต้านทาน (Resistance) ใช้เป็นตัววัดค่าอุณหภูมิ (Temperature) เช่น ทองแดง (Cu) + พลาตินั่ม (Pt) + นิกเกิล (Ni) และ/หรือทองแดง (Cu) + นิเกิล (Ni) ก็ใช้ได้ดีในการวัดอุณหภูมิ ระหว่าง 65 °C ถึง 257 °C


Red glass
Screen
Objective
Eyepiece
Screen shifting device
Hood
Switch
Lamp
(a) Telescope
R
Knob moves contacts R and P_1 Simultaneously
Filament too dark
Filament current rheostat
R_1
Lamp
Temperature scale
Filament too bright
Galv
P
P_1
Knob moves potentiometer contact P, only-is pressed to close switch S
Std cell
Switch on telescope
Filament correct
(b) Circuit Diagram
(c) Filament Appearance

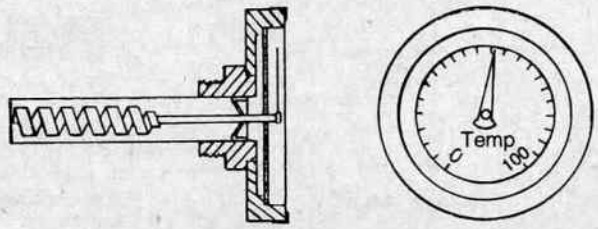
รูปที่ 1.2


G
F
H
B
J
D
A
C
E

รูปที่ 1.3



รูปที่ 1.4



รูปที่ 1.5

2. ชนิดอาศัยการขยายตัวของโลหะ (Metal Expansion) ใช้หลักการในการทำงานโดยการขยายตัวของโลหะจำนวน 2 แผ่น เพราะเกิดการขยายตัวในอัตราส่วนที่ไม่เท่ากันของโลหะทั้งสองมาทำเป็นคอยล์ โดยทำการยึดให้ปลายของข้างหนึ่งให้อยู่กับที่ เข็มจะเคลื่อนที่ไปตามสเกลบนหน้าปัทม์เมื่อได้รับความร้อน ทั้งนี้เกิดจากการขยายตัวของขดลวดที่ทำจากโลหะนั่นเอง ส่วนมากจะนิยมทำมาจากนิกเกิลผสม (Ni Alloy) โดยสามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -75°C ถึง 532°C

3. ชนิดอาศัยการขยายตัวด้วยของเหลว (Liquid Expansion) โดยของเหลว (Liquid) ที่นิยมนำมาบรรจุใส่ในกระเปาะ ได้แก่

3.1 แอลกอฮอล์ (-78°C ถึง 70°C)

3.2 เมอร์คิวรี (-20°C ถึง 510°C)

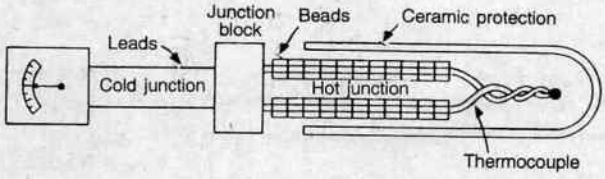
3.3 ครีโอโซสร์ (-6°C ถึง 202°C)

3.4 เพนเทน (30°C ถึง 165°C)

4. ชนิดอาศัยแรงดันของไอน้ำหรือแก๊ส (Gas Expansion) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดโดยอาศัยหลักการโดยความดัน (Pressure) ของแก๊สเมื่อได้รับความร้อน จะใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -125°C ถึง 420°C ได้แก่แก๊สไนโตรเจน (N) เป็นต้น

1.4 เทอร์โมอิเล็คตริก ไฟโรมิเตอร์

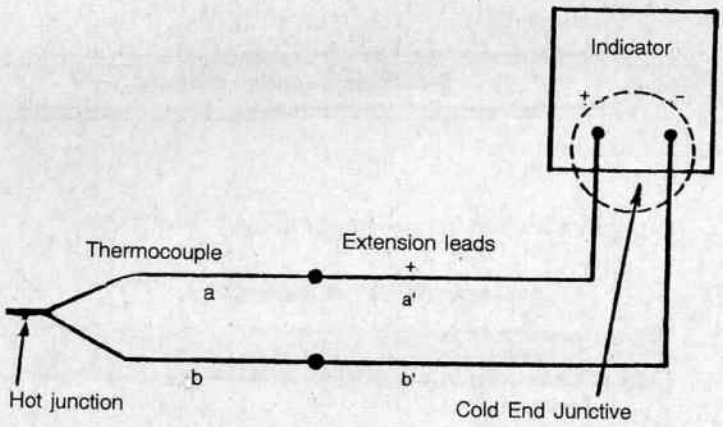
เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิโดยอาศัยพลังงานจากความร้อน เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า เป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเหล็กกล้า (Steel), โลหะวิทยา (Metallurgy) เป็นอย่างยิ่ง เพราะมีขีดความสามารถในการวัดอุณหภูมิได้ถึง 1,650°C เลยทีเดียว



รูปที่ 1.6 *เทอร์โมอิเล็กตริก ไพโรมิเตอร์*

ส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กตริกไพโรมิเตอร์ มีดังนี้คือ

1. Indicating หรือ Recordor ใช้วัดอุณหภูมิและบันทึกค่าอุณหภูมิที่ได้
2. Lead Expansion ใช้หลักการขยายตัวของตะกั่ว (Pb)
3. Junction Box ใช้วัดอุณหภูมิข้างนอกตัวเตา
4. Thermocouple ใช้หลักการวัดอุณหภูมิที่ทำมาจากโลหะ (Metal) และโลหะผสม (Alloy) ที่เป็นชนิดที่แตกต่างกันออกไป



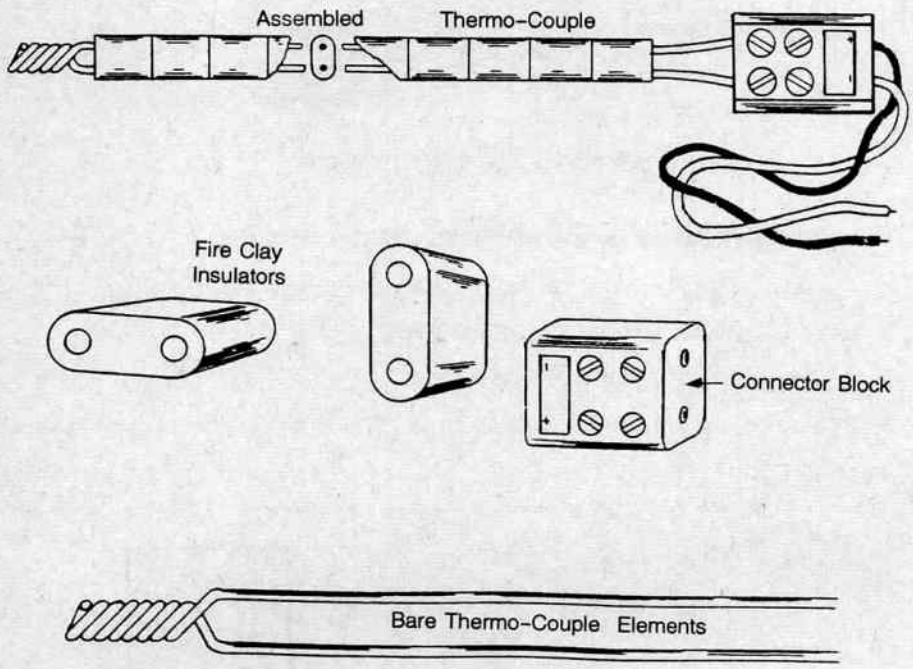
รูปที่ 1.7 *แสดงการทำงานของ Thermocouple*

Platinum - Platinum Rhodium couple, used up to 3000° F., but not recommended for constant temperatures over 2800°F.

Alumel - Chromel couple, not over 2200°F.

Iron - Constantan couple, not over 1400°F.

Copper - Constantan couple, up to 700°F.



รูปที่ 1.8 *แสดงรายละเอียดของเทอร์โมอิเล็กตริคไฟโรมิเตอร์*

ตารางที่ 1.2 *เทอร์โมคัปเปิล*

Materjals	Temp., °F
Chromel-alumel	325-2200
Copper-constantan	325-800
Iron-constantan	325-1400
Platinum-platinum rhodium	32-2880

[a]Constantan is 55 percent Cu, 45 percent Ni.

ชนิดของวัสดุที่นำมาทำเป็น Thermocouple (Thermocouple-Materials) โดยนำเอาวัสดุ 2 ชนิดที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) ที่แตกต่างกันนำมาบิดปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ดังนี้

1. ***Iron - Constantan*** จะประกอบไปด้วย Cu = 54%, Ni = 46% ใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 145°C ถึง 750°C นิยมใช้ได้ในทุก ๆ บรรยากาศ (Atmospheres)

2. ***Chromel - Alumel*** จะประกอบไปด้วย Ni = 90%, Cr = 10% รวมเป็น Chromel และ Ni = 94%, Mn = 3% , Al = 2% และ Si = 1% รวมเป็น Alumel นิยมใช้กันทั่วไป เพราะมีขีดความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนหรือการเติม O_2 ได้ดี (Resistance to Oxidation) ใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 650°C ถึง 1,200°C

ตารางที่ 1.3 *Temperature vs. Electromotive Force* Cmf In millivolts; cold junction 32°F*

Temp, °F	PT + 10 %RH VS. Platinum	Chromel VS. Alumel	Iron VS. Constantan	Copper VS. Constantan
32	0.0	0.0	0.0	0.0
100	0.221	1.52	1.94	1.517
200	0.595	3.82	4.91	3.967
300	1.017	6.09	7.94	6.647
400	1.474	8.31	11.03	9.525
500	1.956	10.57	14.12	12.575
600	2.458	12.86	17.18	15.773
700	2.977	15.18	20.25	19.100
800	3.506	17.53	23.32	
900	4.046	19.89	26.40	
1000	4.596	22.26	29.52	
1100	5.156	24.63	36.72	
1200	5.726	26.98	36.01	
1300	6.307	29.32	39.43	
1400	6.897	31.65	42.96	
1500	7.498	33.93	46.53	
1600	8.110	36.19	50.05	
1700	8.732	38.43		
1800	9.365	40.62		
1900	10.009	42.78		
2000	10.662	44.91		
2100	11.323	47.00		
2200	11.989	49.50		
2300	12.657	51.05		
2400	13.325	53.01		
2500	13.991	54.92		
2600	14.656			
2700	15.319			
2800	15.979			
2900	16.637			
3000	17.292			

*By permission from P.H. Dike, "Thermoelectric Thermometry," p 82, Leeds and Northrup Company, 1954.

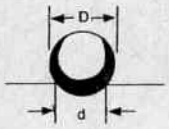
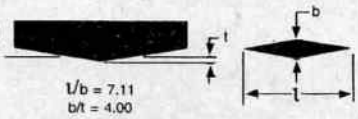
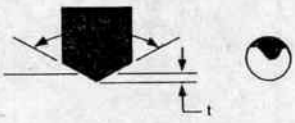
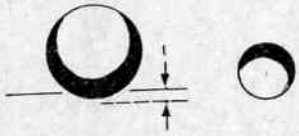
3. ***Copper - Constantan*** จะประกอบไปด้วยทองแดง (Cu) เป็นหลัก + เหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) บ้างเล็กน้อย ใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 250°C ถึง 300°C และเป็นที่รู้จักในนามของ Base-Metal Thermocouples

4. ***Platinum, 10% Rhodium - Platinum*** เรารู้จักกันในนามของ Noble - Metal Thermocouple จะใช้สเกลวัดด้วยรังสี (Radiation) ใช้วัดอุณหภูมิในการถลุง สามารถใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0°C - 1,600°C จึงเหมาะกับงานอุตสาหกรรมในทุก ๆ ประเภททั่ว ๆ ไป

1.5 การทดสอบความแข็ง

เป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะ หรือโลหะผสมอย่างถาวร (Permanent Deformation) โดยเฉพาะที่บริเวณผิวหรือขอบของชิ้นงาน โดยสามารถจำแนกชนิดและประเภทของเครื่องทดสอบความแข็งได้ดังนี้คือ

ตารางที่ 1.4 *Hardness Tests*

Test	Indenter	Shape of Indentation: Side view	Shape of Indentation: Top view	Load	Formula for hardness number
Brinell	10-mm sphere of steel of tungsten carbide			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Diamond pyramid			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$
Rockwell					
A, C, D	Diamond cone			60 kg R_A = 150 kg R_C = 100 kg R_B =	100-500t
B, F, G	$1\frac{1}{6}$ in-diameter steel sphere			100 kg R_D = 60 kg R_F = 150 kg R_G = 100 kg R_E =	130-500t
E	$\frac{1}{8}$ in- diameter steel sphere				

Source : After H.W. Hayden, W.G. Moffatt, and J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials," vol.III,Wiley, 1965, p. 12.

1. Brinell Hardness Test เป็นวิธีการใช้ลูกบอลที่ทำมาจากเหล็กกล้า ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) 10 mm. กดลงบริเวณผิวของชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ให้ได้รอยบุ๋มลึกบนผิวดังกล่าว แล้วอ่านค่าได้จากสเกลที่หน้าปัทม์ตรงเครื่องทดสอบ หรือใช้กล้อง Microscope ส่องดูรอยบุ๋มดังกล่าวเพื่อเทียบค่าได้จากตารางอีกทีก็ได้

โดยทั่วไปถ้าใช้ Load = 3,000 kg จะเหมาะสำหรับโลหะจำพวกเหล็ก (Ferrous Metals) และ Load = 500 kg จะเหมาะสำหรับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous Metals)

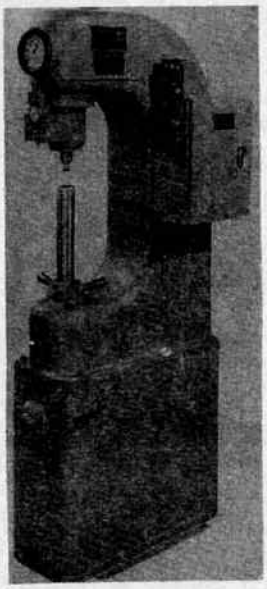
จากรอยบุ๋มที่ได้สามารถนำมาหาค่าความแข็ง (HB) ได้ดังสูตร

$$HB = \frac{L}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

โดยให้ L = Test Load, kg

D = Diameter of ball, mm.

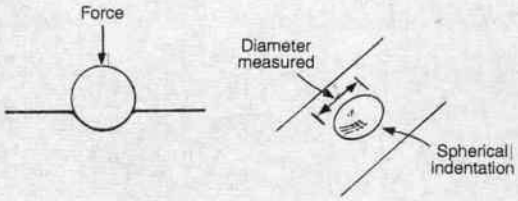
d = Diameter of Impression , mm.



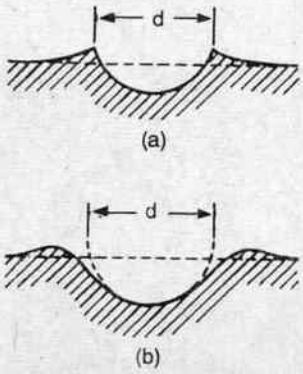
รูปที่ 1.9 *เครื่องทดสอบความแข็ง Brinell*

ตารางที่ 1.5

Brinell 10 mm 3000 kg			Rockwell Number				Superficial Rockwell			Vickers	Sclero-scope	Tensile strength	MOH 10
Indentation (mm)	*Standard*	*Tungsten carbide*	*A 60 kg, Brale*	*B 100 kg, $\frac{1}{16}$ in. Brale*	*C 150 kg, Brale*	*D 100 kg, Brale*	*15 N 15 kg*	*30 N 30 kg*	45 N 45 kg	Pyramid diamond	Number	$x10^3$ psi	Scale
3.25	352	352	69.3	110.0	37.9	53.8	79.3	57.6	40.5	372	51	176	
3.30	341	341	68.7	109.0	36.6	52.8	78.6	56.4	39.1	360	50	170	
3.35	331	331	68.1	108.5	35.5	51.9	78.0	55.4	37.8	350	48	166	
3.40	321	321	67.5	108.0	34.3	51.0	77.3	54.3	36.4	339	47	160	
3.45	311	311	66.9	107.5	33.1	50.0	76.7	53.3	34.4	328	46	155	
3.50	302	302	66.3	107.0	32.1	49.3	76.1	52.2	33.8	319	45	150	6.0
3.55	293	293	65.7	106.0	30.8	48.3	75.5	51.2	32.4	309	43	145	
3.60	285	285	65.3	105.5	29.9	47.6	75.0	50.3	31.2	301	42	141	
3.65	277	277	64.6	104.5	28.8	46.7	74.4	49.3	29.9	292	41	137	
3.70	269	269	64.1	104.0	27.6	45.9	73.7	48.3	28.5	284	40	133	
3.75	262	262	63.6	103.0	26.6	45.0	73.1	47.3	27.3	276	39	129	
3.80	255	255	63.0	102.0	25.4	44.2	72.5	46.2	26.0	269	38	126	
3.85	248	248	62.5	101.0	24.2	43.2	71.7	45.1	24.5	261	37	122	5.5
3.90	241	241	61.8	100.0	22.8	42.0	70.9	43.9	22.8	253	36	118	
3.95	235	235	61.4	99.0	21.7	41.4	70.3	42.9	21.5	247	35	115	
4.00	299	229	60.8	98.2	20.5	40.5	69.7	41.9	20.1	241	34	111	
4.05	223	223		97.3	18.8					234			
4.10	217	217		96.4	17.5					228	33	105	
4.15	212	212		95.5	16.0					222		102	
4.20	207	207		94.6	15.2					218	32	100	



รูปที่ 1.10 *รอยกดจากหัว Ball*



รูปที่ 1.11 *แสดงลักษณะที่แตกต่าง*

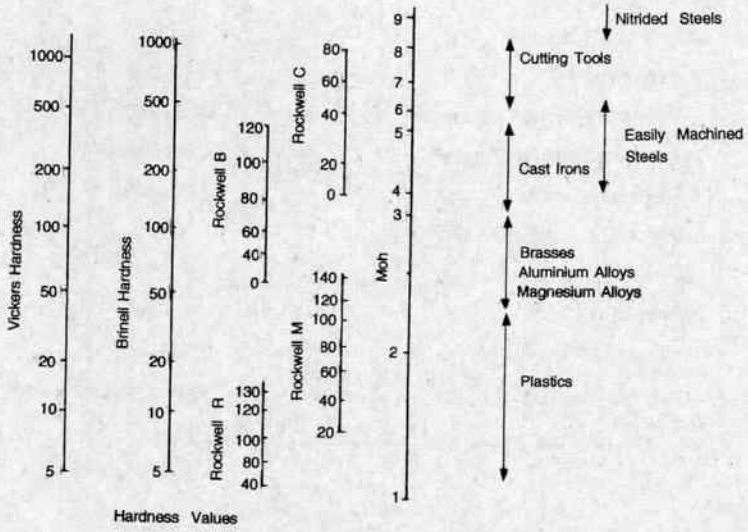
ตารางที่ 1.6 *The Brinell Hardness of Iron Castings Classed by General Microstructure*

TYPE	BHN
Ferritic (annealed) gray iron	110-140
Austenitic irons	140-160
Soft gray iron	140-180
Pearlitic irons	160-220
Pearlitic alloy iron of low alloy content	200-250
Tempered martensitic irons	260-350
Martensitic irons	350-450
White iron, unalloyed (according to carboncontent)	280-500
Alloy white iron	450-550
Martensitic white iron	550-700
Nitrided iron (surface only)	900-1,000

ตารางที่ 1.7 *American Society for Testing and Materials[a] ASTM*

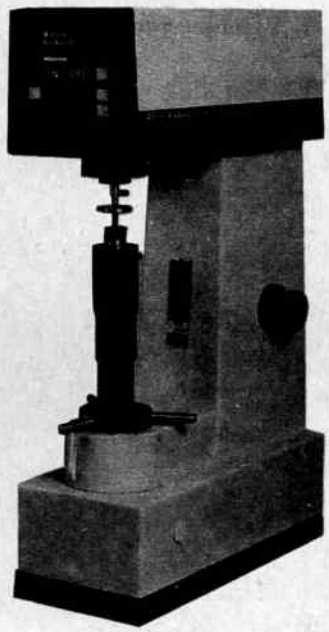
Cast Iron	Structure	T.S. (ksi)	Y.S. (ksi)	%Elongation	Hardness BHN Range
Gray	Ferrite & pearlite	18			165
	Pearlite & ferrite	25			200
	Pearlite	30			215
	Fine pearlite	40			240
		Range	Range	Range	Range
Vermiculite graphite	Max. 20% graph. in modular form	38-60	28-50	1-3	140-270
Ductile	Annealed ferrite	60	40	18	170
	Ferrite-pearlite	80	55	6	220
	Normalized pearlite	100	70	3	240
Malleable	Ferrite + tempered carbon	50/54	32/35	10/18	(max) 155
	Pearlite	60/105	40/90	1/10	150/320
	Annealed ferrite	50	32	10	(max) 155
High alloy	White iron				450/600
High alloy	Gray iron	20/30			100/250
High alloy	Ductile iron	55/60	28/30	6/20	120/275

[a]Consult the ASTM, or SAE, Standards Manual for values to be used in designs. The values are illustrative.
Source: SME Tool and Manufacturing Engineering Handbook, Vol. 3, 4th ed., Table 3-10, p. 3-13. By permission from the Society of Manufacturing Engineers.

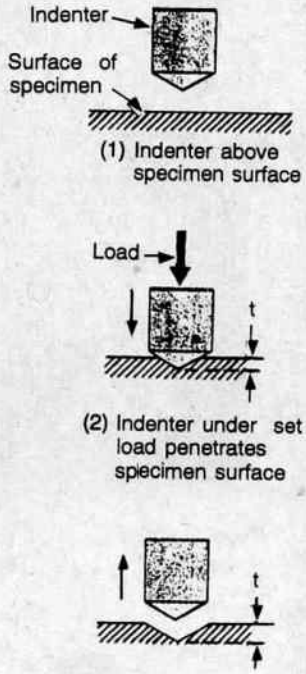


รูปที่ 1.12 *Hardness Values*

2. Rockwell Hardness Test เป็นการทดสอบความแข็งด้วยการใช้หัวกด หรือหัวทดสอบเป็นเพชรรูปกรวย (Diamond Cone) ถ้าเป็นการทดสอบแบบชนิดธรรมดา (Normal Load) จะใช้ Load = 10 kg แต่ถ้าเป็นการทดสอบแบบชนิดพิเศษ (Superficial Tester) จะใช้ Load = 3 kg การอ่านก็จะอ่านได้จากสเกลที่หน้าปัทม์ของเครื่องทดสอบ (Rockwell Scale) นั่นเอง ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้งานได้ดียิ่ง ดังตาราง



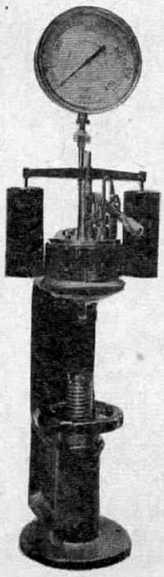
(a)



(b)

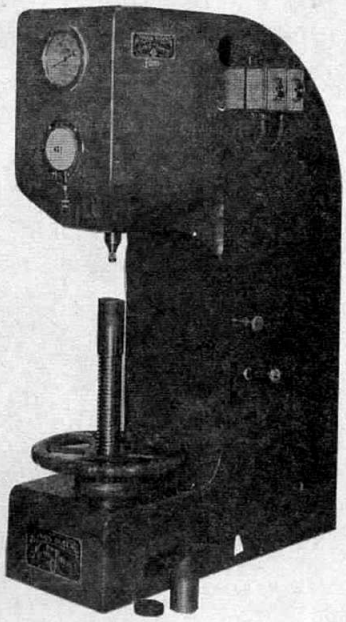
รูปที่ 1.13 *เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell*

Heat Treatment of Metals

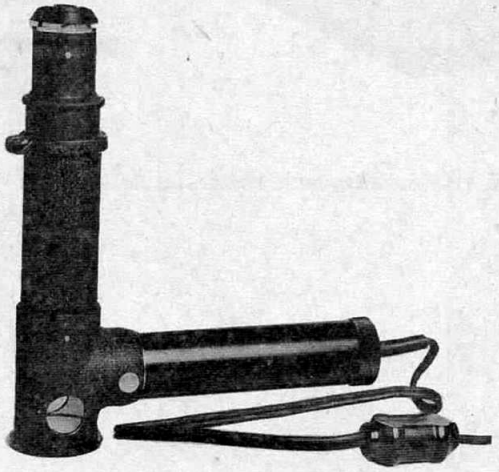


Hand-operated
Brinell Tester

Brinell Hardness Test

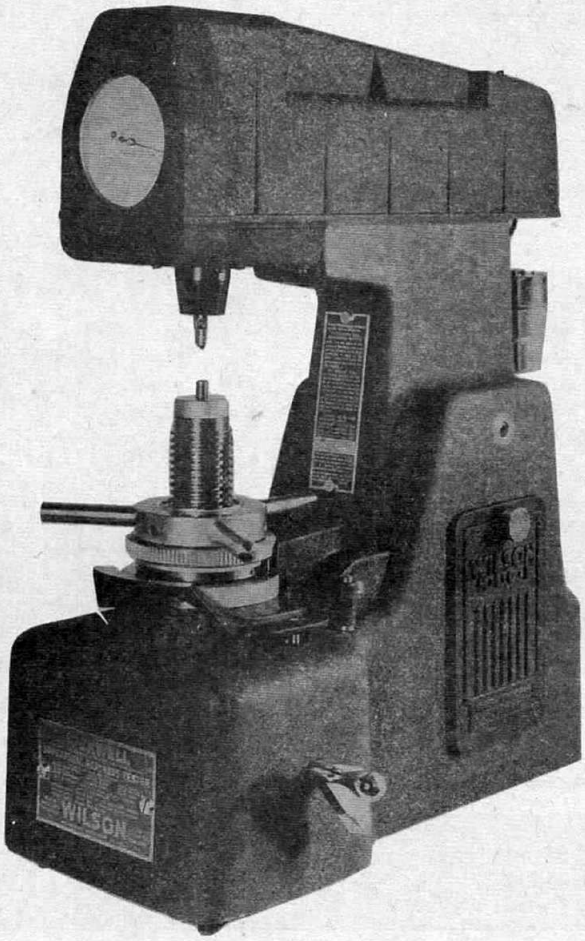


High Production
Brinell Testing Machine



Brinell Microscope

รูปที่ 1.14 *แสดงเครื่องวัดความแข็งแบบต่าง ๆ*



Rockwell Hardness Testing Machine

รูปที่ 1.15

ตารางที่ 1.8 *Hardness Numbers (Steel)*

Brinell 10 mm, 3000 kg			Rockwell Number				Superficial Rockwell			Vickers	Sclero-scope	Tensile Strength	MOH10
Indentation (mm)	Standard	Tungsten carbide	A 60 kg, Brale	B 100kg, $\frac{1}{16}$in. Brale	C 150 kg, Brale	D 100 kg, Brale	15N 15kg	30N 30kg	45N 45kg	Pyramid diamond	Number	x 10^3 psi	Scale
2.25		745	84.1		65.3	74.8	92.3	82.2	72.2	840	91		
2.30		710	83.0		63.3	73.3	91.5	80.4	70.2	840	87		
2.35		682	82.2		61.7	72.0	91.0	79.0	68.5	737	84		
2.40		653	81.2		60.0	70.7	90.2	77.5	66.5	697	81		
2.45		627	80.5		58.7	69.7	89.6	76.3	65.1	667	79	323	8.0
2.50		601	79.8		57.3	68.7	89.0	75.1	63.5	677	77	309	
2.55		578	79.1		56.0	67.7	88.4	73.9	62.1	640	75	297	
2.60		555	78.4		54.7	66.7	87.8	72.7	60.6	591	73	285	7.5
2.65		534	77.8		53.5	65.8	87.2	71.6	59.2	569	71	274	
2.70		514	76.9		52.1	65.0	86.7	70.7	58.0	547	70	263	
2.75	495	495	76.3		51.0	63.8	85.9	69.4	56.1	528	68	253	
2.80	477	477	75.6		49.6	62.7	85.3	68.2	54.5	508	66	243	
2.85	461	461	74.9		48.5	61.7	84.7	67.2	53.2	491	65	235	7.0
2.90	444	444	74.2		47.1	60.8	84.0	65.8	51.5	472	63	225	
2.95	429	429	73.4		45.7	59.7	83.4	64.6	49.9	455	61	217	
3.00	415	415	72.8		44.5	58.8	82.8	63.5	48.4	440	59	210	
1.05	401	401	72.0		43.1	57.8	82.0	62.3	46.9	425	58	202	
3.10	388	388	71.4		41.8	56.8	81.4	61.1	45.3	410	56	195	
3.15	375	375	70.6		40.4	55.7	80.6	59.9	43.6	396	54	188	6.5
3.20	363	363	70.0		39.1	54.6	80.0	58.7	42.0	383	52	182	

ตารางที่ 1.9 *Wilson Cylindrical Correction Chart**

Cylindrical work corrections (approximate only) to be added to observed Rockwell number

Diamond Brale Indenter							
C, D, A Scales	Diameter of Specimen, In.						
	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	1
80	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0
70	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0	0
60	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
50	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5
40	3.5	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0
30	5.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0
20	6.0	4.5	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5
$\frac{1}{16}$-In Ball Indenter							
B, F, G Scales	Diameter of Specimen, In.						
	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	1
100	3.5	2.5	1.5	1.5	1.0	1.0	0.5
90	4.0	3.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.0
80	5.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.5
70	6.0	4.0	3.0	2.5	2.0	2.0	1.5
60	7.0	5.0	3.5	3.0	2.5	2.0	2.0
50	8.0	5.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
40	9.0	6.0	4.5	4.0	3.0	2.5	2.5

*Courtesy of Wilson Mechanical Instrument Division, American Chain & Cable Co.

ตารางที่ 1.10 *The Rockwell Hardness Scales**

Scale	Major Load, kg.	Type of Indenter	Typical Materials Tested
A	60	Diamond cone	Extremely hard materials, tungsten carbides, etc.
B	100	1/16" ball	Medium hard materials, low-and medium-carbon steels, brass, bronze, etc.
C	150	Diamond cone	Hardened steels, hardened and tempered alloys
D	100	Diamond cone	Case-hardened steel
E	100	1/8" ball	Cast iron, aluminum and magnesium alloys
F	60	1/16" ball	Annealed brass and copper
G	150	1/16" ball	Beryllium copper, phosphor bronze, etc.
H	60	1/8" ball	Aluminum sheet
K	150	1/8" ball	Cast iron, aluminum alloys
L		60	1/4" ball Plastics and soft metals such as lead
M	100	1/4" ball	Same as L scale
P	150	1/4" ball	Same as L scale
R	60	1/2" ball	Same as L scale
S	100	1/2" ball	Same as L scale
V	150	1/2" ball	Same as L scale

*Ametek Testing Equipment Systems, East Moline, Ill.

ตารางที่ 1.11 *Chemical Composition and Typical Mechanical Properties of Copper and Some Copper Alloys**

Wrought Alloys													
Material	Form	Composition, %				Tensile Strength, 1000 PSI		Yield Strength 0.5% Offset 1,000 PSI		Elongation, % IN 2 IN.		Hardness, Rockwell B	
		Cu	Zn	Sn	Others	Hard	Soft	Hard	Soft	Hard	Soft	Hard	Soft
Copper	Sheet	99.9+	...	...	...	55	32	48	...	4	50	58	
Gilding metal	Sheet	95.0	5.0	...	...	55	35	45	11	5	38	68	7
Commercial bronze	Sheet	90.0	10.0	...	...	67	37	53	11	3	40	75	10
Red brass	Sheet	85.0	15.0	...	...	80	45	55	15	4	43	85	10
Low bras	Sheet	80.0	20.0	...	...	85	43	65	15	4	50	86	11
	Rod	80.0	20.0	...	...	80	45	60	15	5	50		
Spring brass	Sheet	75.0	25.0	...	...	80	47	60	15	5	45	87	15
Brass	Sheet	70.0	30.0	...	...	86	45	65	15	4	50	87	
Cartridge brass	Sheet	69.0	31.0	...	...	85	46	65	15	4	58	87	22
Yellow brass	Sheet	65.0	35.0	...	...	90	45	70	15	5	60	85	30
Muntz metal	Sheet	60.0	40.0	...	...	80	57	60	15	9	48	87	42
Phosphor bronze	Sheet	96.0	...	4.0	0.25 P	90	45	75	18	4	50	90	30
	Sheet	92.0	...	8.0	+P	110	60	85	25	3	55	99	45
Aluminum brass	Tube	76.0	22.0	...	2 Al	83	62	75	16	17	52	86	33
Aluminum bronze	...	92.0	...	...	8 Al	134	76	100	30	13	55	99	69
Manganese bronze	Rod	68.0	29.0	...	1 Al, 1 Mn, 1 Fe	85	60	50	25	20	45	90	25
Admiralty metal	Tube	71.0	21.0	1.0	...	100	53	98	18	3	60	95	13
Naval brass	Rod	60.0	39.0	0.75	0.25 Pb	62	54	39	15	30	40	55	
Silicon brass	...	78.0	20.0	...	2.0 Si	110	55	83	12	4	60		
Tin brass	...	88.0	10.0	2.0	...	85	...	...	...	3	...	86	

ตารางที่ 1.12 *Approximate Hardness Relations for Steel**

Brinell, 3,000 kg			Vickers Diamond Pyramid	Rockwell, Using Brale				Scleroscope	MOHS	Tensile Strength 1,000 PSI
Diameter MM	Standard Ball	Tungsten Carbide Ball		C 150 KG	D 100 KG	A 60 KG	Superficial 30 N			
2.35	...	682	737	61.7	72.0	82.2	79.0	84		
2.40	...	653	697	60.0	70.7	81.2	77.5	81		
2.45	...	627	667	58.7	69.7	80.5	76.3	79	8.0	323
2.50	...	601	640	57.3	68.7	79.8	75.1	77	...	309
2.55	...	57.8	615	56.0	67.7	79.1	73.9	75	...	297
2.60	...	555	591	54.7	66.7	78.4	72.7	73	7.5	285
2.65	...	534	569	53.5	65.8	77.8	71.6	71	...	274
2.70	...	514	547	52.1	64.7	76.9	70.3	70	...	263
2.75	495	...	539	51.6	64.3	76.7	69.9	...	...	259
	...	495	528	51.0	63.8	76.3	69.4	68	...	253
2.80	477	...	516	50.3	63.2	75.9	68.7	...	...	247
	...	477	508	49.6	62.7	75.6	68.2	66	...	243
2.85	461	...	495	48.8	61.9	75.1	67.4	..	...	237
	...	461	491	48.5	61.7	74.9	67.2	65	...	235
2.90	444	...	474	47.2	61.0	74.3	66.0	...	7.0	226
	...	444	472	47.1	60.8	74.2	65.8	63	...	225
2.95	429	429	455	45.7	59.7	73.4	64.6	61	...	217
3.00	415	415	440	44.5	58.8	72.8	63.5	59	...	210
3.05	401	401	425	43.1	57.8	72.0	62.3	58	...	202
3.10	388	388	410	41.8	56.8	71.4	61.1	56	...	195
3.20	363	363	383	39.1	54.6	70.0	58.7	52	...	182
3.25	352	352	372	37.9	53.8	69.3	57.6	51	...	176
3.30	341	341	360	36.6	52.8	68.7	56.4	50	...	170
3.35	331	331	350	35.5	51.9	68.1	55.4	48	...	166
3.40	321	321	339	34.3	51.0	67.5	54.3	47	...	160
3.45	311	311	328	33.1	50.0	66.9	53.3	46	...	155
3.50	302	302	319	32.1	49.3	66.3	52.2	45	6.0	150
3.55	293	293	309	30.9	48.3	65.7	51.2	43	...	145
3.60	285	285	301	29.9	47.6	65.3	60.3	42	...	141
3.65	277	277	292	28.8	46.7	64.6	49.3	41	...	137
3.70	269	269	284	27.6	45.9	64.1	48.3	40	...	133
3.75	262	262	276	26.6	45.0	63.6	47.3	39	...	129
3.80	255	255	269	25.4	44.2	63.0	46.2	38	...	126
3.85	248	248	261	24.2	43.2	62.5	45.1	37	5.5	122
3.90	241	241	253	22.8	42.0	61.8	43.9	36	...	118
3.95	235	235	247	21.7	41.4	61.4	42.9	38	...	115
4.00	229	229	241	20.5	40.5	60.8	41.9	34	...	111

*Adapted from H.E. Davis, G.E. Troxell, and C. T. Wiskocil. "The Testing and Inspection of Engineering Materials. 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1955; based on "Metals Handbook," 1948 ed. American Society for Metals. Metals Park. Ohio. See ASTM E 140 for additional relations.

ตารางที่ 1.13 *Approximate Hardness Relations for Steel (Continued).*

Brinell. 3,000 kg		Rockwell								
		Brale				Superficial				
Diameter MM	Standard Ball	D 100 kg	A 60 kg	B 100 Kg 1/16-IN. Ball	E 100 Kg 1/8-IN Ball	30 N Brale	30 T 1/16-IN. Ball	Scleroscope	MOHS	Tensile Strength, 1,000 PSI
4.05	223	40	60	97	...	41	80.5	33	...	108
4.10	217	39	60	96	...	40	81.0	32	...	105
4.15	212	38	59	95	...	39	79.0	31	...	102
4.20	207	37	59	94	...	38	78.5	31	...	100
4.25	202	37	58	93	110	37	78.0	30	...	98
4.30	197	36	58	92	110	36	77.2	29	...	96
4.35	192	35	57	91	109	35	77.0	28	5.0	94
4.40	187	34	57	90	109	34	76.0	28	...	92
4.45	183	34	56	89	109	33	75.5	27	...	90
4.50	179	33	56	88	108	32	75.0	27	...	88
4.55	174	33	55	87	108	31	74.5	26	...	86
4.60	170	32	55	86	107	30	74.0	26	...	84
4.65	166	32	54	85	107	30	73.5	25	...	82
4.70	163	31	53	84	106	29	73.0	25	...	81
4.75	159	31	53	83	106	28	72.8	24	...	79
4.80	156	30	52	82	105	27	71.5	24	...	77
4.85	153	..	..	81	105	..	71.0	23	...	76
4.90	149	..	..	80	104	..	70.0	23	4.5	75
4.95	146	..	..	79	104	..	69.5	22	...	74
5.00	143	..	..	78	103	..	69.0	22	...	72
5.05	140	..	..	76	103	..	68.0	21	...	71
5.10	137	..	..	75	102	..	67.0	21	...	70
5.15	134	..	..	74	102	..	66.0	21	...	68
5.20	131	..	..	73	101	..	65.0	20	...	66
5.25	128	..	..	71	100	..	64.0	..	...	65
5.30	126	..	..	70	100	..	63.5	..	...	64
5.35	124	..	..	69	99	..	62.5	..	...	63
5.40	121	..	..	68	98	..	62	..	...	62
5.45	188	..	..	67	97	..	61	..	...	61
5.50	116	..	..	65	96	..	60	..	...	60
5.55	114	..	..	64	95	..	59	..	...	59
5.60	112	..	..	63	95	..	58	..	...	58
5.65	109	..	..	62	94	..	58	..	...	56
5.70	107	..	..	60	93	..	57	..	...	55
5.75	405	..	..	58	92	..	55	..	...	54
5.80	103	..	..	57	91	..	54	..	...	53

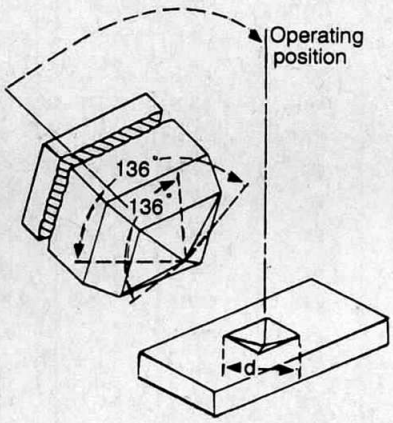
3. Vickers Hardness Test จะใช้หัวกดเป็นเพชรรูปพีระมิด (Square - Based Diamond Pyramid) ที่มีมุม 136° ระหว่างด้านของหน้าเพชรโหลดที่ใช้ทั่ว ๆ ไปจะนิยมเลือกใช้ระหว่าง 1 ถึง 120 kg ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาทดสอบอีกด้วย

ค่าความแข็งจะหาได้จากอัตราส่วนของแรงที่ใช้ในการกด : พื้นที่ของขนาดรอยกด (บุ๋ม) มีหน่วยเป็น mm^2 โดยหาได้จากเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มแล้วแทนค่าสูตร ดังต่อไปนี้

$$HV = \frac{1.854\ L}{d^2}$$

โดยให้ L = Applied load, kg

d = Diagonal length of square-impression, mm



รูปที่ 1.16 *รอยกดของหัวเพชรพีระมิด*

ตารางที่ 1.14 *Typical Applications of Indentation Hardness Tests**

Brinell	Rockwell	Rockwell Superficial	Vickers	Microhardness
Structural steel and other rolled sections Most castings, including steel, cast iron, and aluminum Most forgings	Finished parts, such as bearings, bearing races, valves, nuts, bolts, gears, pulleys, rolls, pins, pivots, stops, etc. Cutting tools, such as saws, knives, chisels, scissors Forming tools Small castings and forgings Sheet metal Large-diameter wire Electrical contacts Plastic sheet or parts Case-hardened parts Cemented carbides	Same as standard Rockwell except where shallower penetration is necessary, as in: Thin case-hardened parts, to .010 in. Thin materials down to .006 in. Cemented carbides Powdered metals	Same as Rockwell and Rockwell Superficial except where higher accuracy or shallower penetration is necessary, as in: Thin case-hardened parts, .005 to .010 in. Thin materials down to .005 in. Highly finished parts to avoid a removal operation Thin sections, such as tubing Weak structures Plating thickness	Plated surfaces Coatings, such as lacquer, varnish or paint Foils and very thin materials down to .001 in. To establish case gradients Bimetals and laminated materials Very small parts or areas, such as watch gears, cutting tool edges, thread crests, pivot points, etc. Very brittle or fragile materials (Knoop indenter), such as silicon, germanium, glass, tooth enamel Opaque, clear or translucent materials Powdered metals To investigate individual constituents of a material To determine grain or grain boundary hardness

* Ametek/Testing Equipment Systems, East Moline,Ill.

4. Microhardness Test เป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่มีผิวบาง ๆ ได้ดี ยิ่งงานขนาดเล็ก ๆ ทั่ว ๆ ไป โดยใช้หัวกดทำมาจากเพชรรูปพีระมิด (The Knoop Diamond–Pyramid Indenter) ที่มีมุม 172° 30' และ 130° (Transverse Angles) และใช้โหลดประมาณ 1 ถึง 1,000 gm. ทั้งนี้ก็แล้วแต่ขนาดของชิ้นงานที่จะนำมาทำการทดสอบด้วย

การหาค่าความแข็ง หาได้จากใช้กล้องไมโครสโคปส่องดูขนาดรอยกด (รอยบุ๋ม) ของชิ้นงานทดสอบ (Specimen) แล้วนำค่ามาคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$HK = \frac{14.229L}{d^2}$$

โดยให้ L = Applied load, kg

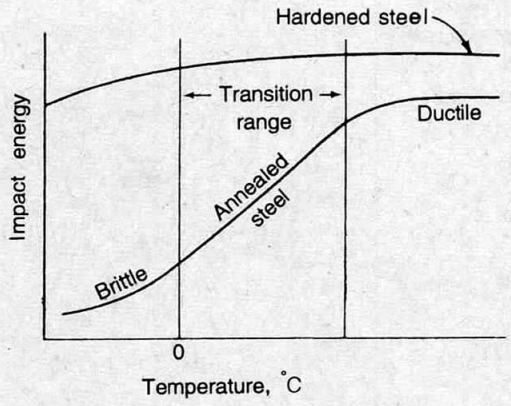
d = Length of long diagonal, mm

5. Impact Test เป็นการทดสอบแบบแรงกระแทก โดยวิธีการปล่อยให้ลูกตุ้มเป็นโหลด ในการเหวี่ยงมากระแทกกับชิ้นงานทดสอบตรงแนวที่ผ่าหรือบาก (Notch) เอาไว้เรียบร้อยแล้ว จนชิ้นงานทดสอบเกิดการขาดหรือหักออกจากกัน

การทดสอบแบบวิธีดังกล่าวนี้ สามารถแบ่งวิธีการทดสอบได้เป็น 2 แบบคือ

1. Charpy จะปล่อยให้ตุ้มน้ำหนัก (Load) วิ่งมากระทบกับชิ้นงานทดสอบในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับแนวผ่าหรือบากไว้

2. Izod จะปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักวิ่งมากระทบกับชิ้นงานทดสอบตรงส่วนปลายของชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นด้านเดียวกับแนวผ่าหรือบากไว้



รูปที่ 1.17 *กราฟ Transition Range*

ตารางที่ 1.15 *Some Properties of Selected General-Purpose Thermoplastics*

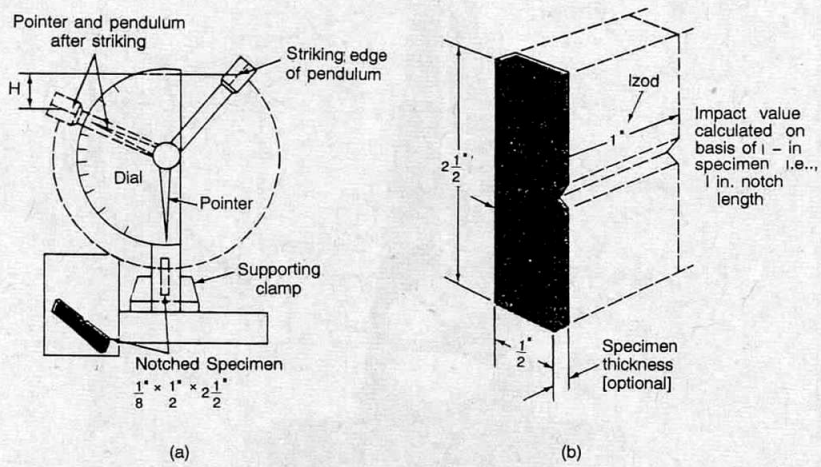
Material	Density, g/cm³	Tensile strength, x 1000 psi*	Impact strength, Izod, ft . lb/in†	Dielectric strength, V/mil‡	Max-use temp. (no load) °F	Max-use temp. (no load) °C
Polyethylene:						
Low-density	0.92-0.93	0.9-2.5	...	480	180-212	82-100
High-density	0.95-0.96	2.9-5.4	0.4-14	480	175-250	80-120
Rigid, chlorinated PVC	1.49-1.58	7.5-9	1.0-5.6		230	110
Polypropylene, general-purpose	0.90-0.91	4.8-5.5	0.4-2.2	650	225-300	107-150
Styrene-acrylonitrile (SAN)	1.08	10-12	0.4-0.5	1775	140-220	60-104
ABS, general-purpose	1.05-1.07	5.9	6	385	160-200	71-93
Acrylic, general-purpose	1.11-1.19	11.0	2.3	450-500	130-230	54-110
Cellulosics, acetate	1.2-1.3	3-8	1.1- 6.8	250-600	140-220	60-104
Polytetrafluoroethylene	2.1-2.3	1-4	2.5-4.0	400-500	550	288

*1000 psi = 6.9 MPa.

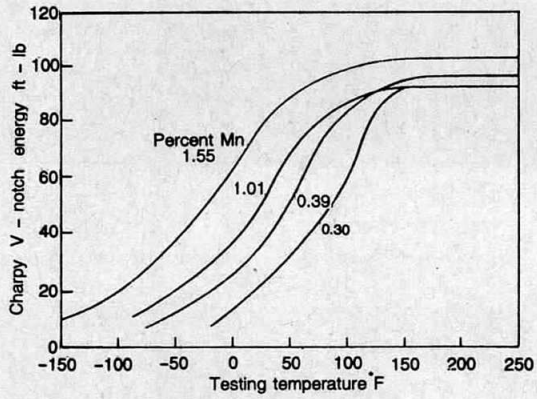
†Notched Izod test: 1 ft. lb/in = 53.38 J/m.

‡1 V/mil = 39.4 V/mm.

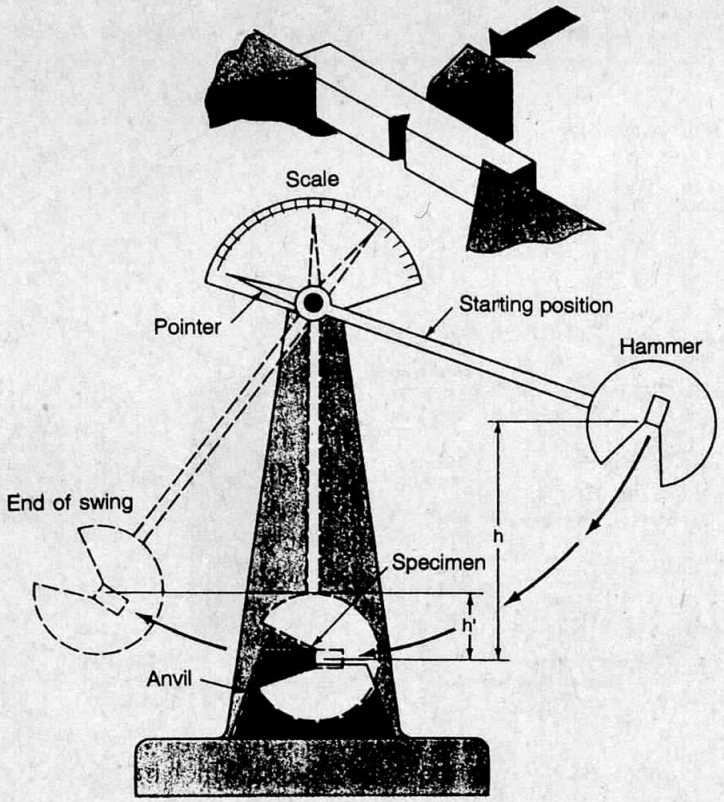
Source : Materials Engineering, May 1972.



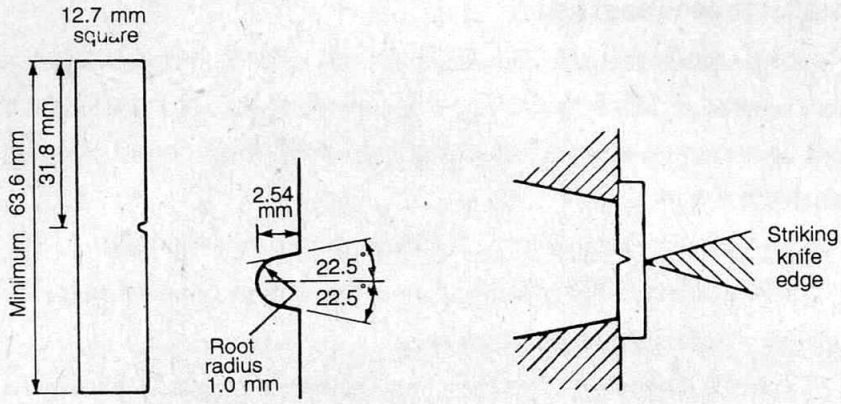
รูปที่ 1.8 *แสดงการบากชิ้นงานกรรมวิธี Izod Test*



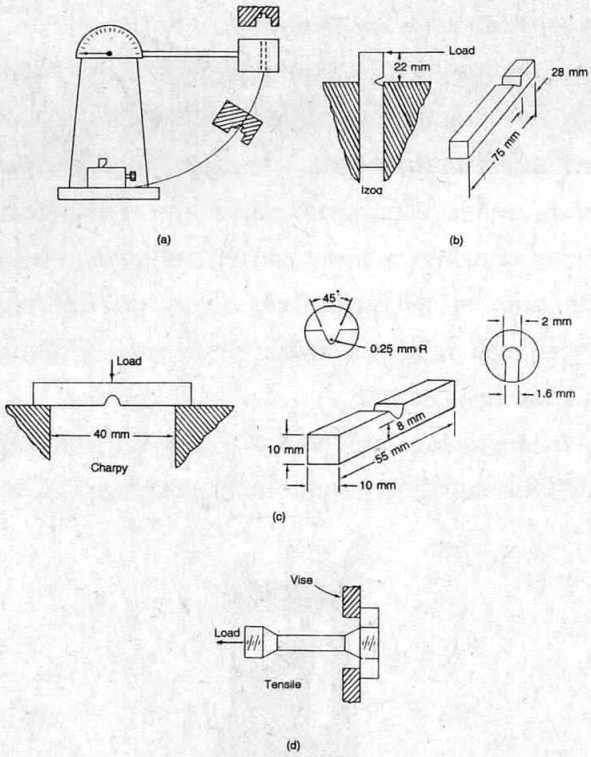
รูปที่ 1.19



รูปที่ 1.20 *แสดงการทำงานของเครื่องทดสอบ Impact*



รูปที่ 1.21 *รอยบากแบบ Izod Test และการเตรียมชิ้นงานแบบ Charpy Test*



รูปที่ 1.22 *ภาพรวมการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบต่าง ๆ*

1.6 การศึกษาโครงสร้างของโลหะ

การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallography) หมายถึง เป็นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Examination) หรือโครงสร้างเล็ก ๆ ของโลหะด้วยกล้องไมโครสโคปเพื่อขยายดูรูปร่างของเม็ดเกรน (Grain) และบรรดาสารหรือสิ่งที่เจือปนอยู่ในเนื้อของโลหะที่ได้หลังการหล่อ-หลอมโลหะ หรือการรีดโลหะด้วยกรรมวิธีแบบต่าง ๆ

การศึกษาดูโครงสร้างของโลหะนั้น จะแบ่งวิธีการออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ

1. วิธีแบบไมโคร เป็นการใช้กล้องขยายดูโครงสร้างที่มีขนาดกำลังขยายตั้งแต่ 40 เท่า (4 x) ลงมา จะเป็นการศึกษาดูโครงสร้างของโลหะแบบหยาบ ๆ

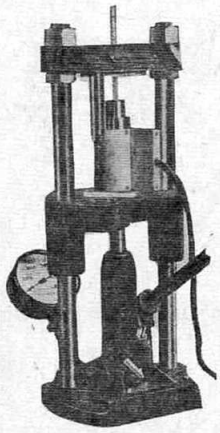
2. วิธีแบบมาโคร เป็นการใช้กล้องขยายดูโครงสร้างที่มีขนาดกำลังขยายตั้งแต่ 40 เท่า (4 x) ขึ้นไป จะเป็นการศึกษาดูโครงสร้างของโลหะแบบละเอียดมาก

ในขบวนการศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Micro Structure) มีวิธีการ และขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มต้น ดังนี้

1. การเตรียมหรือการตัดชิ้นทดสอบ (Sawing) ชิ้นงานที่จะเตรียมมาทำการตัดเพื่อใช้เป็นสเปกซีเมนนั้น ต้องรู้จักสังเกตดูก่อนทุกครั้งว่าเป็นโลหะแข็งหรือโลหะอ่อน เพื่อที่จะได้เลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตัดได้ถูก เช่น ตัดด้วยเลื่อยมือ ตัดด้วยเลื่อยกลหรือล้อตัดไฟเบอร์ (Abrasive cutt off wheel)

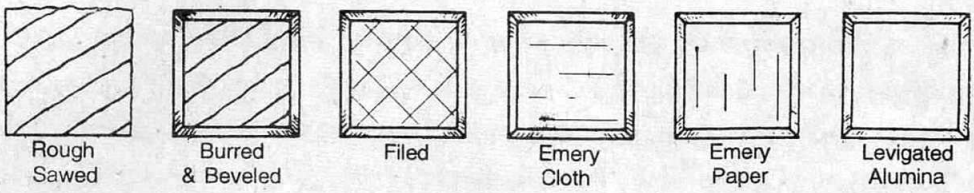
2. การตัดหรืออัดชิ้นงานทดสอบ (Mounting) ในกรณีชิ้นทดสอบมีขนาดเล็กหรือรูปร่างบางมาก เช่น ใบมีด แผ่นทองเหลือง หรือเส้นลวดทองแดง ฯลฯ ซึ่งทำให้เราไม่สามารถจับต้องในการทำงานได้โดยสะดวก ให้ใช้วิธีการอัดด้วยวัสดุจำพวกพลาสติก เช่น ถ้าเป็นจำพวก Thermosetting Resin จะได้แก่ Bakelite จะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ส่วนใหญ่จะเป็นสีดำมันเงา นำมาใส่ในบล็อกรูปทรงกระบอกเพื่อหุ้มผิวชิ้นงานที่มีขนาดบาง ๆ ดังกล่าว โดยใช้ความร้อนในการทำให้ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 150°C และใช้แรงอัด (Pressure) ประมาณ 4,000 PSI

ส่วนจำพวก Thermoplastic Resin จะได้แก่ Lucite จะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ใส ๆ หรือขาว ๆ จะใช้หลักการในการอัดในบล็อกรูปทรงกระบอก โดยใช้อุณหภูมิและแรงอัดเหมือน ๆ กันกับ Bakelite



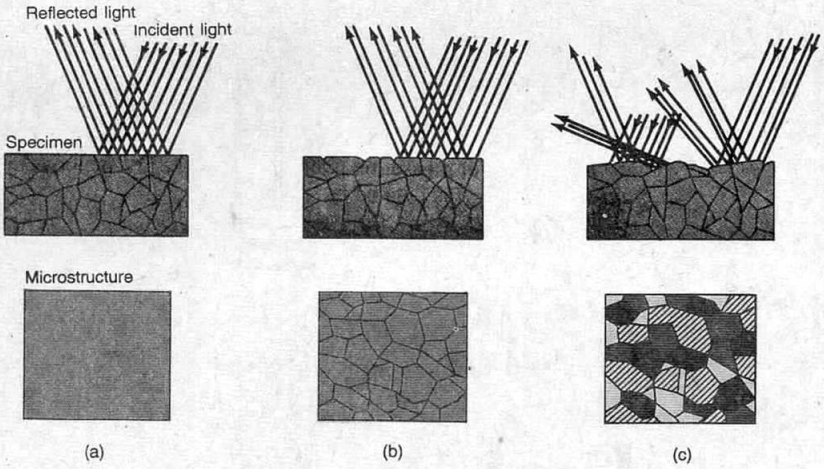
Mounting Press

รูปที่ 1.23 *เครื่องอัด Bakelite*



รูปที่ 1.24 *แสดงภาพเรียงลำดับในการขัด Specimen*

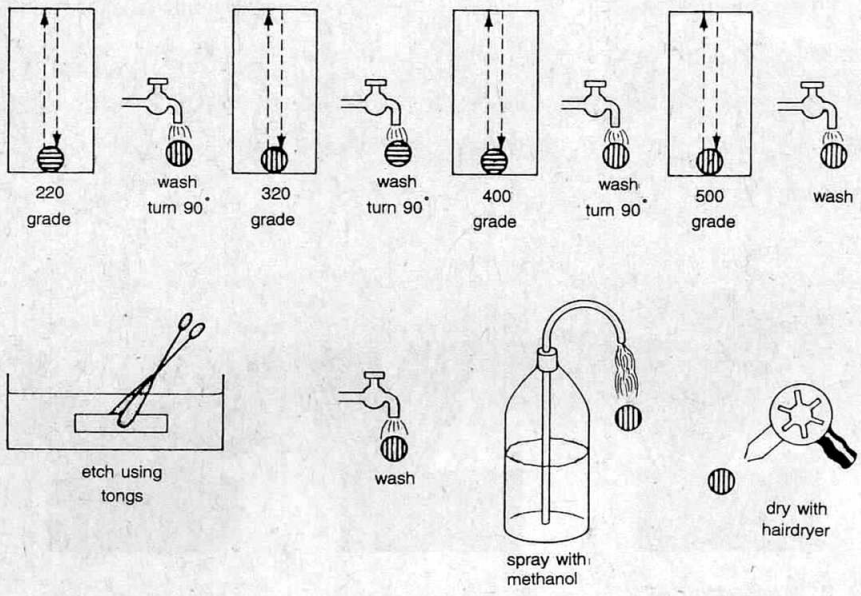
3. วิธีการขัดชนิดหยาบ (Hand Grinding) จะทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำโดยมีน้ำวิ่งผ่านบริเวณผิวหน้าสเปกซีเมนและกระดาษทรายน้ำโดยตลอดเวลาที่ทำการขัดหยาบ โดยเรียงลำดับนัมเบอร์ของกระดาษทรายน้ำตั้งแต่ขนาดเม็ดทรายหยาบ ๆ ไปหาขนาดเม็ดทรายละเอียด ๆ เช่น เริ่มตั้งแต่ No. 150, 180, 220, 240, 320, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 เป็นต้น โดยที่นัมเบอร์ที่มีขนาดเม็ดละเอียดจะมีตัวเลขเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



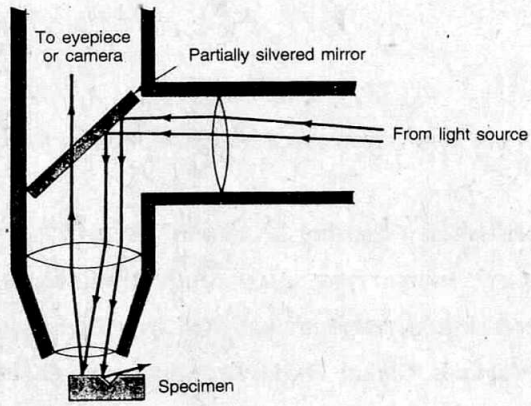
รูปที่ 1.25 *แสดงการหักเหของแสงเพื่อสังเกตผิวหน้าเรียบของชิ้นงานขัด*

4. วิธีการขัดชนิดมัน (Polishing) เมื่อขัดด้วยกระดาษทรายน้ำจนผ่าน No. 1,200 (ละเอียด) มาแล้ว ก็จะนำสเปกซีเมนดังกล่าวมาทำการขัดบนล้อผ้าสักหลาดที่ผนึกติดกับจานล้อขัดที่ใช้มอเตอร์ในการขับประมาณ 300 RPM. และต้องคอยเติมสารช่วยขัดเงา (Abrasive Particles) ที่มีทั้งชนิดที่เป็น Aluminum Oxide, Copper - Based Materials, Cerium Oxide และ Magnesium Oxide เป็นต้น

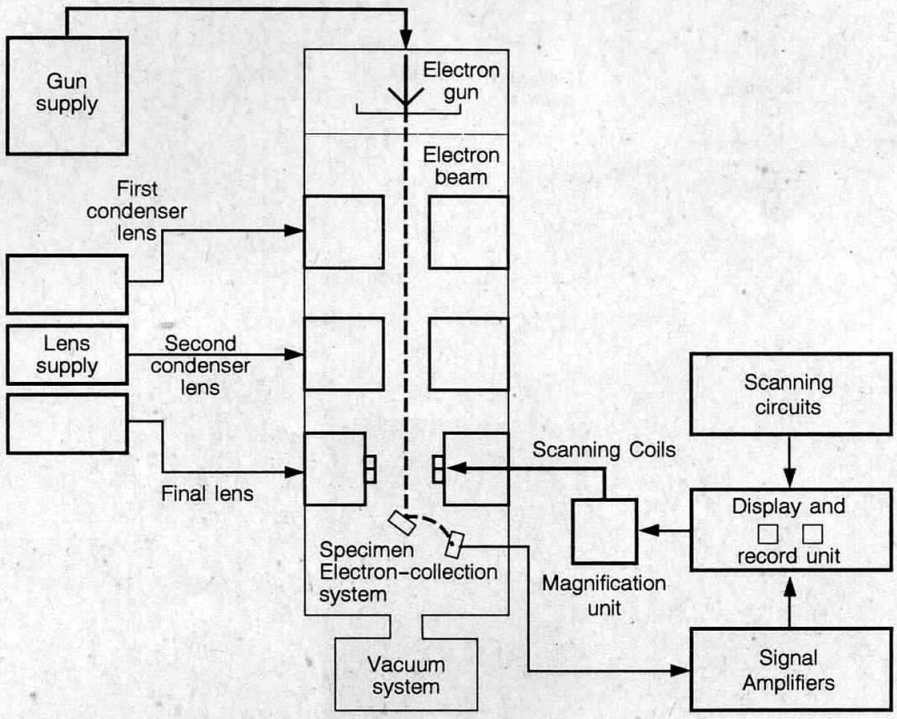
5. วิธีการกัดกรด (Etching) หลังจากผ่านขบวนการขัดชนิดมัน (ละเอียด) มาแล้วก็จะนำสเปกซีเมนดังกล่าวมาทำการกัดด้วยกรด 2% Nital (เป็น Steels ทั่ว ๆ ไป) ซึ่งจะมีส่วนผสมระหว่างกรดไนตริก (HNO_3) ปริมาณ 2% ผสมกับเมทิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 98% เพื่อให้เจือจางลงกว่าเดิม โดยใช้เวลาในการกัดกรดประมาณ 15-20 วินาที ให้สังเกตดูผิวหน้าสเปกซีเมนจะเป็นสีเทาดำเป็นใช้ได้ เมื่อเสร็จแล้วให้รีบจุ่มหรือล้างลงในเมทิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง เพื่อชำระล้างคราบที่หลงเหลือจากขบวนการกัดกรดอีกครั้ง



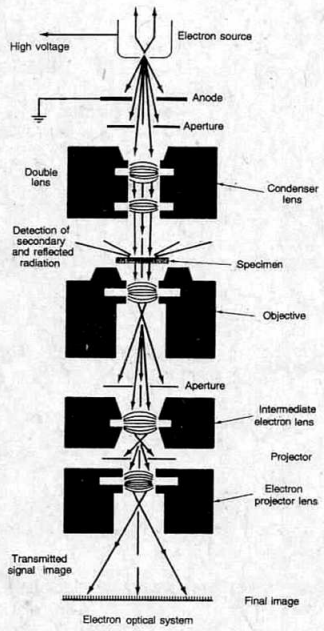
รูปที่ 1.26 *การขัดมัน + การกัดกรด*



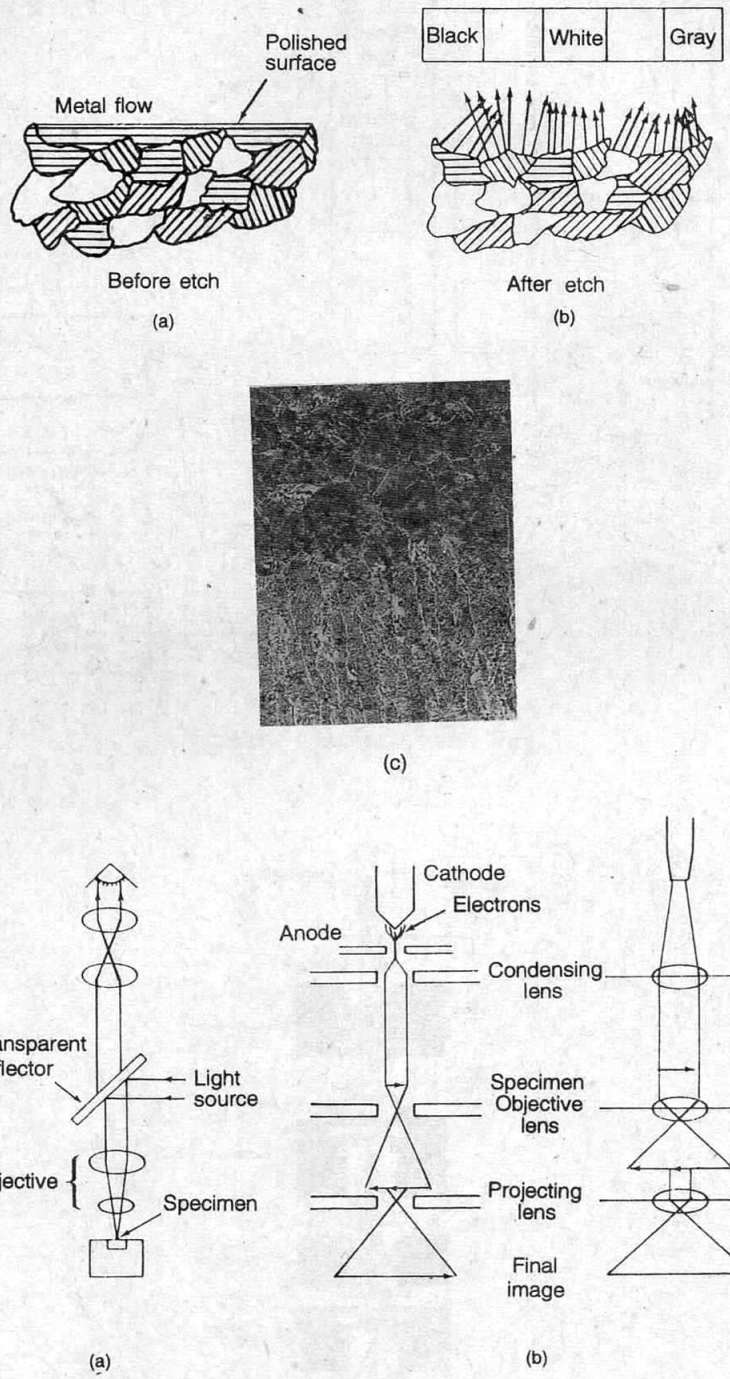
รูปที่ 1.27 *การทำงานของไมโครสโคป*



รูปที่ 1.28 *แสดงการทำงานของเลนส์*



รูปที่ 1.29 *SEM*



รูปที่ 1.30 *แสดง Specimen ก่อนและหลังกัดกรดรวมทั้งเปรียบเทียบการทำงานของกล้อง*