

บทที่ 5

คุณสมบัติเชิงกลของโลหะ

(MECHANICAL PROPERTIES OF METALS)

ในบทนี้จะกล่าวถึงเรื่อง คุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ในแง่วิศวกรรมศาสตร์อาจแยกกลุ่มไปได้หลายอย่าง เช่น คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับคุณสมบัติเชิงกลนั้น หมายถึง คุณสมบัติที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปของวัสดุ เมื่อถูกแรงภายนอกกระทำในลักษณะต่าง ๆ กัน เช่น ถูกแรงดึง แรงกด แรงเฉือน หรือถูกแรงกระทำเป็นจังหวะ เป็นต้น

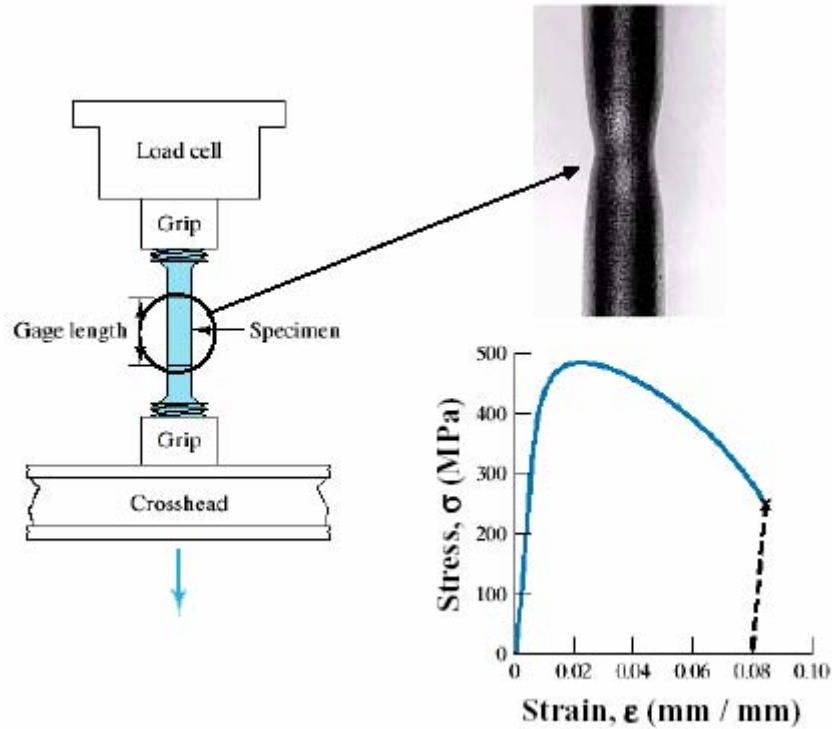
5.1 คุณสมบัติการเปลี่ยนรูป (Deformation Property)

ลักษณะการเปลี่ยนรูปที่เป็นพื้นฐานอาจจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

5.1.1 คุณสมบัติการเปลี่ยนรูปอีลาสติก (Elastic deformation property) หมายถึง การเปลี่ยนรูปที่สามารถคืนตัวได้อย่างสมบูรณ์ (Reversible) เมื่อแรงกระทำนั้นถูกปลดออกไป เช่น เมื่อถูกดึงวัสดุจะยืดตัวออกจนถึงระยะหนึ่งแล้วก็หยุด เมื่อปลดแรงวัสดุก็จะหดตัวสู่ความยาวเดิม ส่วนใหญ่การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกเกิดจากแรงกระทำที่ไม่สูงนัก และการเปลี่ยนรูปดังกล่าวมักจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของแรง โดยปกติเรามักจะถือว่าการเปลี่ยนรูปในช่วงอีลาสติกนี้จะเกิดขึ้นโดยทันทีเมื่อมีแรงกระทำแต่ที่จริงแล้วการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นเมื่อถูกแรงกระทำหรือการคืนรูป เมื่อหยุดแรงกระทำล้นต้องใช้เวลาอันหนึ่งเสมอ ในโลหะส่วนมากระยะเวลานี้จะสั้นมากจนวัดไม่ได้ แต่ในวัสดุบางชนิด เช่น ยาง ส่วนที่เปลี่ยนช้า ๆ คือขึ้นกับเวลา (Time Dependent) นี้อาจมีมากพอจนวัดได้ คุณสมบัติการเปลี่ยนรูปโดยขึ้นกับเวลานี้ เรียกว่า Anelasticity แต่ก็ยังเป็นส่วนหนึ่งของการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก เพราะจะคืนตัวโดยสมบูรณ์ได้ในที่สุด

5.1.2 คุณสมบัติการเปลี่ยนแบบพลาสติก (Plastic deformation property) หมายถึงการเปลี่ยนรูปของวัสดุในลักษณะที่คืนกลับที่เดิมไม่ได้ (Irreversible) เมื่อปลดแรงกระทำที่วัสดุ จะกลับคืนขนาดมาได้เพียงบางส่วนเท่านั้น โดยมีส่วนหนึ่งที่เปลี่ยนไปอย่างถาวร (Permanent set) ตัวอย่างเช่น การดึงโลหะด้วยแรงที่มีขนาดสูง โลหะจะยืดตัวออกถึง

จุดหนึ่งแล้วก็หยุดครั้นเมื่อปลดแรงโลหะก็จะหดตัวกลับไปได้บ้าง แต่ก็ยังยาวกว่าของเดิมเล็กน้อย ลักษณะเช่นนี้เกิดจากแรงกระทำที่มีขนาดสูงกว่าในช่วงอีลาสติก



ภาพที่ 5.1 การทดสอบวัสดุและกราฟที่เกิดจากแรงดึง

5.2 ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม

(Engineering Stress and Engineering Strain in Metals)

5.2.1 ความเค้น (Engineering Stress, σ)

หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงที่มากกระทำ(F) ต่อพื้นที่ตัดของชิ้นงานก่อนดึง(A_0)

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

หน่วยของความเค้น

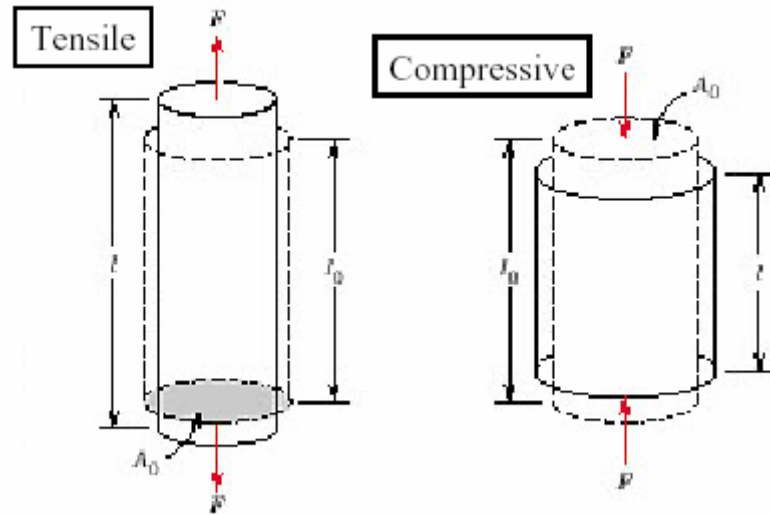
US มีหน่วยเป็น lb /in² หรือ psi

SI มีหน่วยเป็น N/m² หรือ Pa

ซึ่ง

$$1 \text{ psi} = 6.89 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ Mpa}$$



ภาพที่ 5.2 แท่งโลหะที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมถูกแรงดึงและแรงดัน

ตัวอย่างที่ 1 แท่งอลูมิเนียมกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.500 นิ้ว มีแรงมากกระทำที่ปลายทั้งสองด้าน 2500 ปอนด์ ให้คำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นในแท่งอลูมิเนียมนี้

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{A_0} \\ &= \frac{2500 \text{ lb}_f}{\left(\frac{\pi}{4}\right)(0.500)^2} \\ &= 12,700 \frac{\text{lb} / \text{in}^2}{f}\end{aligned}$$

5.2.2 ความเครียด (Engineering Strain, ϵ)

หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนแปลง (Δl) ต่อความยาวเดิม (l_0) แสดงดังภาพ ดังนั้นสูตรของความเครียดจึงเป็น

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

หน่วยของความเครียด

US มีหน่วยเป็น นิ้ว ต่อ นิ้ว (in / in)

SI มีหน่วยเป็น เมตร ต่อ เมตร (m / m)

แต่โดยทั่วไปแล้วในการบอกค่าของความเครียดนั้นจะนิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของความเครียด (percent strain หรือ percent elongation) ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned}\% \text{ engineering strain} &= \text{engineering strain} \times 100\% \\ &= \text{elongation}\end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2 แท่งอลูมิเนียมมีความกว้าง 0.500 นิ้ว และหนา 0.040 นิ้ว มีความยาว 8 นิ้ว ซึ่งบนแท่งอลูมิเนียมนี้ได้ติด gage ยาว 2 นิ้ว ตรงกลางแท่งอลูมิเนียม เมื่อถูกแรงกระทำแล้วปรากฏว่า gage มีความยาวเพิ่มขึ้นเป็น 2.65 นิ้ว จงหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้น และเปอร์เซ็นต์ของความเครียด

$$\begin{aligned}\text{Engineering strain } \epsilon &= \frac{l - l_0}{l_0} \\ &= \frac{2.65 - 2.00}{2.00} = \frac{0.65}{2.00} = 0.325 \\ \% \text{ elongation} &= 0.325 \times 100\% = 32.5\%\end{aligned}$$

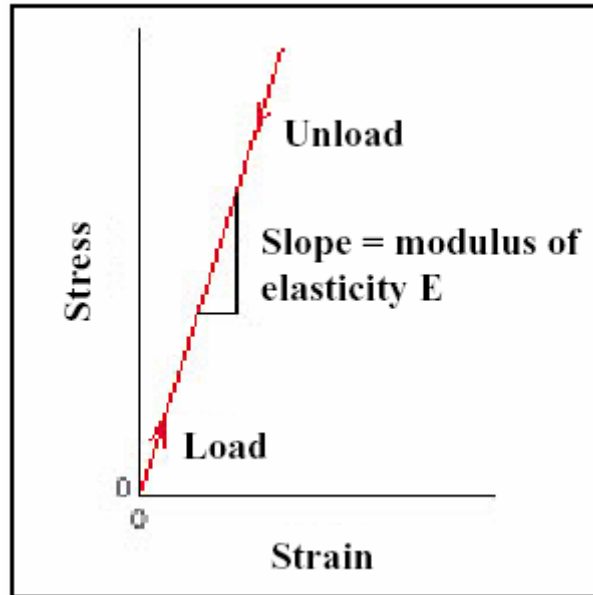
กฎของฮุค (Hooke' Law)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงของการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกของโลหะและโลหะผสมต่าง ๆ จะเป็นแนวเส้นตรง ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke' Law)

$$\sigma = E\epsilon$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

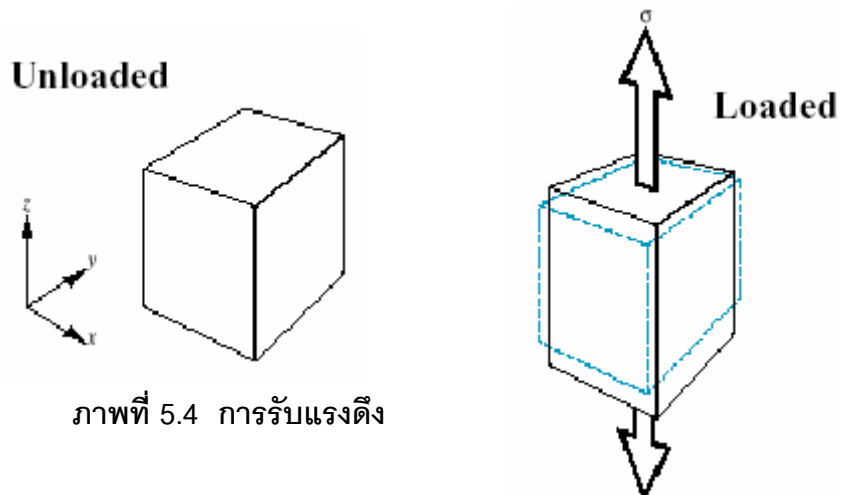
ซึ่งค่า E คือสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น หรือ Modulus of elasticity หรือ Modulus of elasticity หรือ Young' modulus ซึ่งแสดงถึงความแข็งแกร่งของวัสดุ เช่น แสดงถึงความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปชั่วคราวขณะได้รับแรงดึง



ภาพที่ 5.3 อัตราส่วนตามกฎของฮุก

5.2.3 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson' Ratio, ν)

การเสียรูปอย่างอีลาสติก อีกลักษณะหนึ่งคือ ในขณะที่มีการดึงหรือกดในแนวแกน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดในแนวด้านขวาง จากการทดลองพบว่าถ้าแท่งวัตถุถูกดึงให้ยืดในแนวแกนขนาดของมันทางด้านขวางจะลดลง ซึ่งอัตราส่วนระหว่างหน่วยการเสียรูป (Unit deformation) หรือความเครียดในสองแนว ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์ ν ซึ่งกำหนดว่า



ภาพที่ 5.4 การรับแรงดึง

$$\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$$

เมื่อ ϵ_x เป็นความเครียดที่เกิดจากความเค้นและแรงในแนวแกน x เท่านั้น และ ϵ_y, ϵ_z เป็นความเครียดที่เกิดขึ้นตามมาในแนวที่ตั้งฉากกับแกนของที่แรงกระทำ เครื่องหมายลบใส่ไว้เพื่อให้เห็นว่าเราต้องการค่า ν เป็นบวก เพราะว่าเมื่อมีแรงดึงในแนว x ค่า ϵ_x เป็นบวก ส่วนในแนวที่ตั้งฉากกับการดึงจะมีการหดตัว ซึ่ง ϵ_y และ ϵ_z จะมีค่าเป็นลบ

สำหรับค่าอัตราส่วนปริมาตรของนั้นสำหรับวัสดุในอุดมคติจะมีค่าเท่ากับ 0.5 แต่สำหรับวัสดุจริง ๆ นั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.40 ซึ่งมีค่าประมาณ 0.3 สำหรับตารางแสดงค่าอัตราส่วนปริมาตรของโลหะ และโลหะผสมบางชนิด

ตารางที่ 5.1 แสดงค่า E, G และ ν

Material	Modulus of elasticity 10^{-6} psi (Gpa)	Shear modulus 10^{-6} psi (Gpa)	Poisson's ratio
Aluminum alloys	10.5(72.4)	4.0(27.5)	0.31
Copper	16.0(110)	6.0(41.4)	0.33
Steel(plain carbon and low-alloy)	29.0(200)	11.0(75.8)	0.33
Stainless steel(18-8)	28.0(193)	9.5(65.6)	0.28
Titanium	17.0(117)	6.5(44.8)	0.31
Tungsten	58.0(400)	22.8(157)	0.27

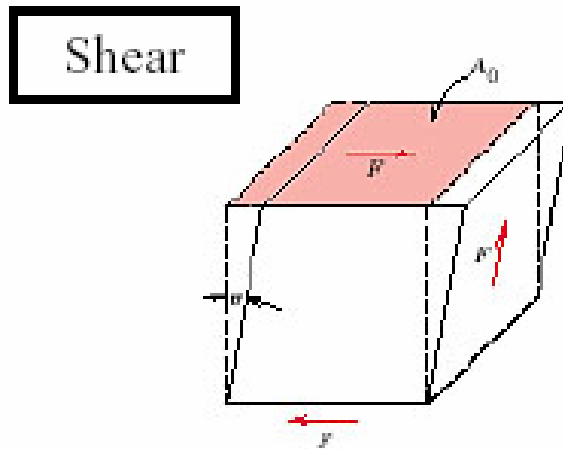
5.2.4 ความเค้นเฉือน (Shear Stress, τ)

เกิดจากการที่วัสดุถูกแรงกระทำลักษณะที่เป็นแรงเฉือน (Shear force) แสดงดังภาพ จะเห็นว่าแรงเฉือน (Shear force, F) กระทำบนพื้นที่ A_0 ดังนั้นค่าความเค้นเฉือน τ จะมีค่าเท่ากับ

$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

หน่วยของความเค้นเฉือน

US	มีหน่วยเป็น	lb _f /in ² หรือ psi
SI	มีหน่วยเป็น	N/m หรือ Pa



ภาพที่ 5.5 แสดงความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน

5.2.5 ความเครียดเฉือน (Shear Strain, γ)

แรงเฉือนจะทำให้เกิดการเสียรูปในแนวเฉือนได้เหมือนกับแรงดึงในแนวแกนเช่นกัน แต่รายละเอียดในการเกิดการเสียรูปจะแตกต่างกันมาก ชิ้นวัสดุที่โดนกระทำโดยแรงดึงจะมีความยาวเปลี่ยนแปลงไป แต่เมื่อโดนแรงเฉือนความยาวจะไม่เปลี่ยนแปลงแต่จะทำให้รูปร่างบิดเบี้ยวไป เช่น ถ้าแต่เดิมมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ก็กลายเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ดังแสดงในภาพอาการบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นอาจ จะมองในลักษณะที่ว่าเมื่อโดนแรงเฉือน ผิวบนเคลื่อนตัวออกไปเป็นระยะ a ในแนวของแรงเฉือน โดยกำหนดว่าหน้าตัดนี้อยู่สูงขึ้นมาเท่ากับระยะ h ดังนั้นความเครียดเฉือนเฉลี่ยได้จากการเอาค่า a หารด้วยค่า h ซึ่งจะได้ว่า

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan \theta$$

สำหรับวัสดุในช่วงอีลาสติกความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน τ กับความเครียดเฉือน γ เรียกว่า modulus of elasticity in shear หรือ modulus of rigidity ซึ่งเป็นดังความสัมพันธ์

$$\tau = G\gamma$$

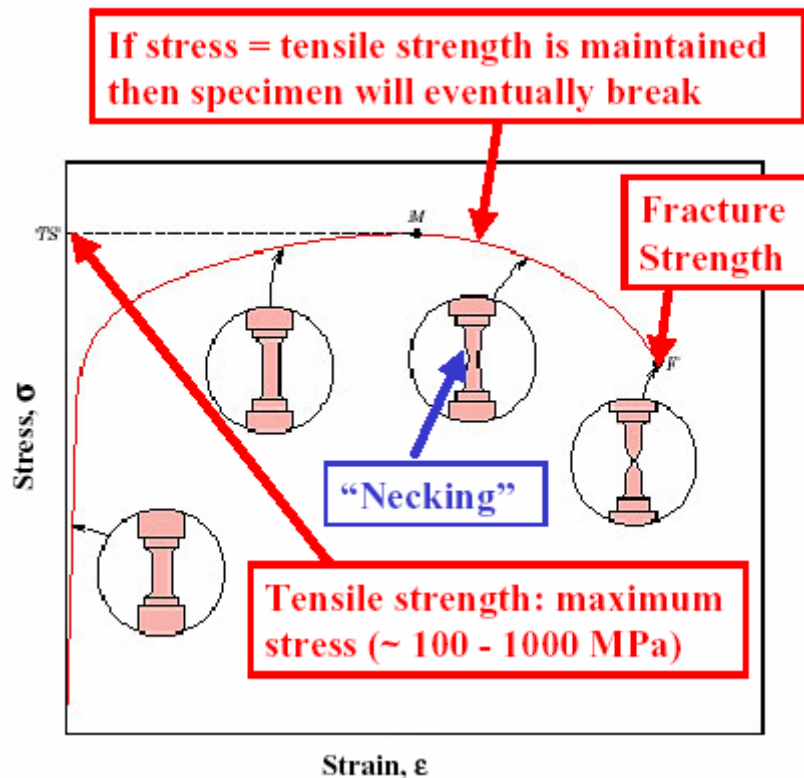
ซึ่งค่า G เป็นค่า Modulus of elasticity in shear

5.3 การทดสอบด้วยแรงดึง และแผนภาพความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียด

(The Tensile Test and The Engineering Stress-Strain Diagram)

การทดสอบด้วยแรงดึง จัดเป็นการทดสอบแบบสถิตย์ (Static load test) อย่างหนึ่งที่ใช้กันแพร่หลายมาก เพราะจัดทำได้ง่าย ให้ข้อมูลพื้นฐานได้มาก สามารถดัดแปลงให้เหมาะกับวัสดุรูปต่างๆ กันได้และผลการทดสอบมีมาตรฐานที่เทียบกันได้ทั่วไป

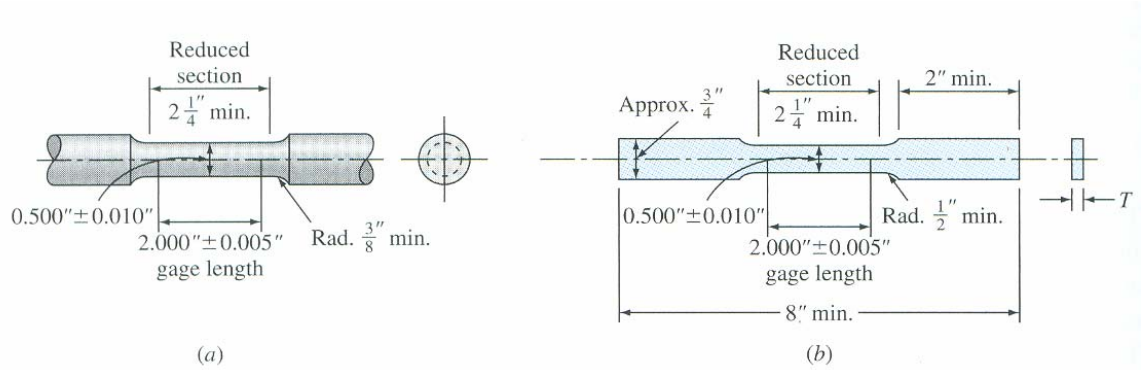
วิธีการทดสอบก็คือ นำชิ้นตัวอย่าง (Specimen) มาทดลองดึงในเครื่องทดสอบ โดยเริ่มดึงขึ้นทีละน้อย ๆ จากศูนย์เรื่อยไปจนกว่าชิ้นตัวอย่างจะขาด พร้อมกันนั้นก็วัดส่วนที่ยืดออกเทียบกับแรงกระทำ แล้วนำไปเขียนกราฟระหว่างความเค้น และความเครียดทางวิศวกรรม เพื่อหาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ



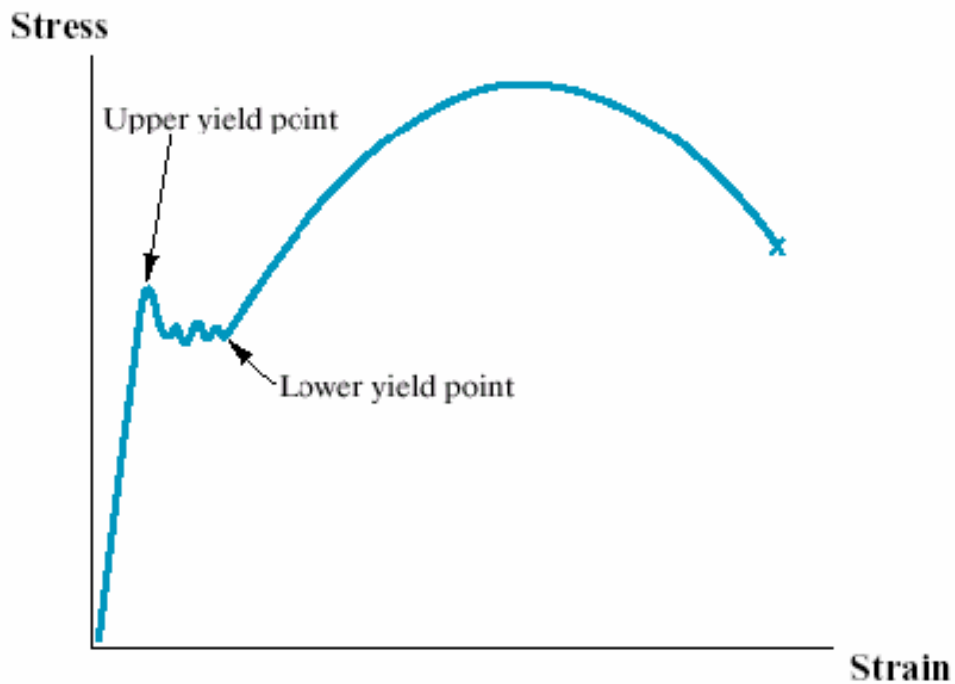
ภาพที่ 5.6 แสดงลักษณะของ specimen เมื่อถูกแรงดึง

โดยปกติแล้วจะมีเครื่องบันทึกติดอยู่กับเครื่องทดสอบเสมอ เพื่อบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างแรงและขนาดการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน (โดยอัตโนมัติ) ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดึง มักจะเกี่ยวข้องกับความเค้น (Engineering Stress) และความเครียด (Engineering Strain) เสมอ กราฟที่ได้จากการทดสอบจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-

ความเครียด เรียกว่า แผนภาพความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด (Engineering Stress-Strain Diagram)



ภาพที่ 5.7 แสดงขนาดชิ้นงานมาตรฐานสำหรับทดสอบแรงดึง



ภาพที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

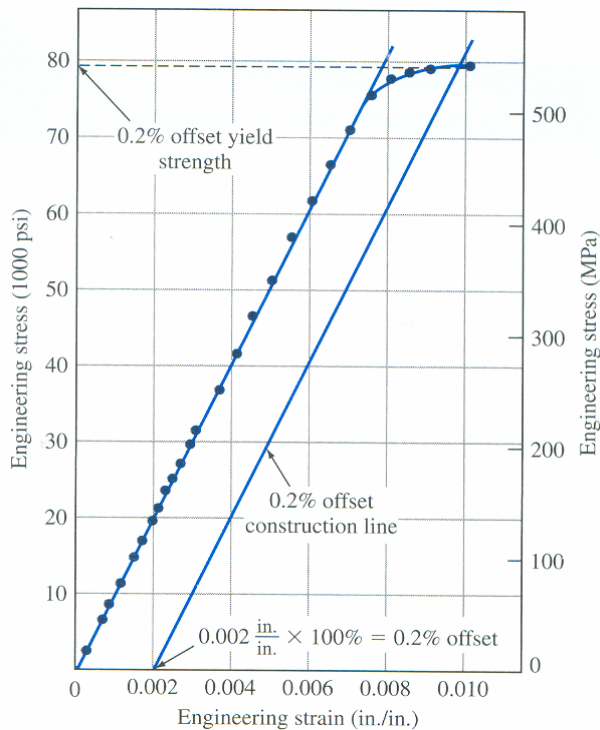
จากภาพแสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรมของเหล็กกล้าชนิดเหนียว ซึ่งเราอาจแบ่งกราฟที่ได้ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ในช่วง O-A-B เป็นช่วงอีลาสติก (Elastic range) ระยะ OA กราฟจะเป็นเส้นตรง แต่จาก A ถึง B กราฟจะ

โค้งเล็กน้อย ส่วนที่สองคือ ตั้งแต่จุด B ออกไปจนถึงจุดขึ้นตัวอย่างขาดจากกัน เรียกว่าช่วงพลาสติก (Plastic range) ในระยะนี้กราฟจะเป็นเส้นโค้ง

- ขีดจำกัดสัดส่วน (Proportional limit) หมายถึงค่า ความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติกที่วัสดุยังคงมีความเค้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด (กราฟเป็นเส้นตรงในรูปที่ 5.6 ขีดจำกัดสัดส่วนคือ ความเค้นที่จุด A)

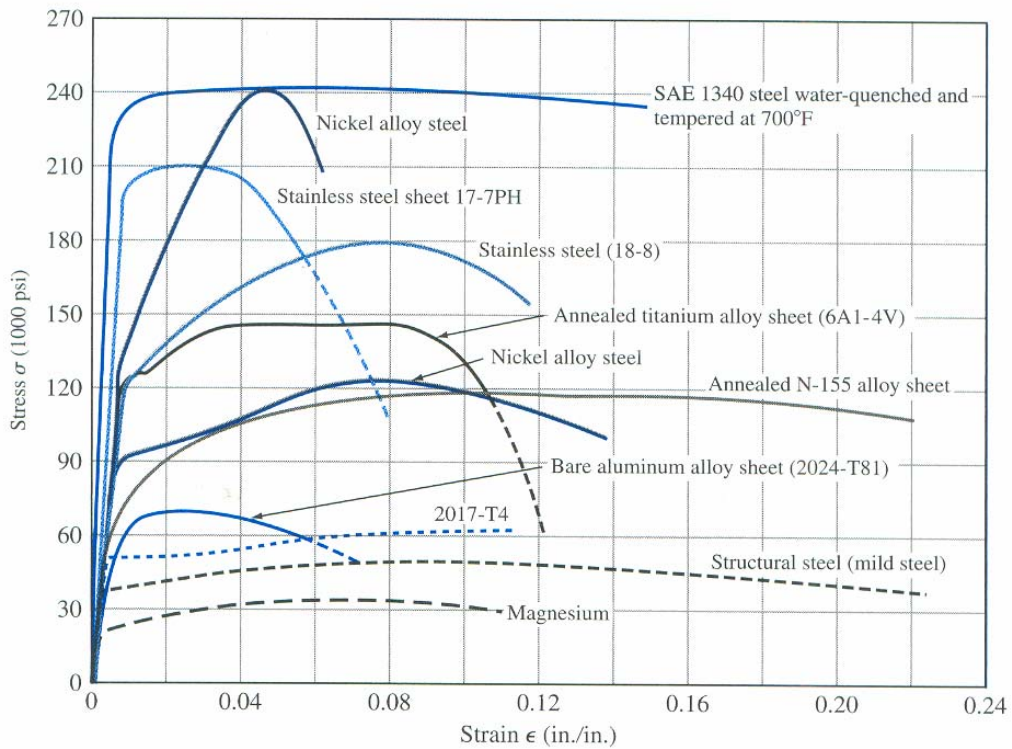
- พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) หมายถึงค่า ความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้โดยยังคงคุณสมบัติอีลาสติกอยู่ ในรูปที่ 5.ค พิกัดความยืดหยุ่นก็คือ ความเค้นที่จุด B ซึ่งอยู่สูงกว่าจุด A เล็กน้อยในช่วงพลาสติก (Plastic range)

หมายถึง ช่วงระยะที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปที่ถาวร เมื่อปลดแรงกระทำมันจะกลับคืนสู่ความยาวเดิมไม่ได้ การคืนตัวจะเป็นแต่เพียงส่วนที่เป็นอีลาสติกเท่านั้น จากรูปที่ 5.6 หากวัสดุได้รับแรงกระทำจนยืดออกมาจนถึงจุด X เมื่อปล่อยแรงมันจะคืนตัวกลับมาในแนว XY ซึ่งขนานกับแนว OA โดยประมาณ วัสดุที่มีการยืดตัวออกอย่างถาวรเท่ากับ OY ซึ่งมีค่าประมาณ 0.2% ของความเครียดและเรียกความเครียด OY ว่า ระยะคราก (Offset) และสามารถหาความแข็งแรงที่จุดครากได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.9



ภาพที่ 5.9 แสดง 0.002% Offset line

- จุดครากตัว (Yield Point) การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกอาจเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา ดังแสดงดังรูปที่ 5.8 ที่จุด C เรียกว่า จุดครากบน (Upper yield point) ที่จุดนี้วัสดุจะยืดตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องเพิ่มแรง และดูเหมือนว่าจะใช้แรงน้อยลงจนกระทั่งกราฟจะมีลักษณะโค้งลงไปสู่จุด D ซึ่งเรียกว่าจุดครากล่าง (Lower yield point) เหตุที่เป็นดังนี้เพราะในช่วงนี้อะตอมของเหล็กไม่เพียงแต่ขยายระยะห่างจากกันและกันเท่านั้น แต่แถวหรือชั้นของอะตอมในผลึก หรือเกรนก็อาจเลื่อนผ่านกันได้ การยืดตัวออกจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว (ระยะ C-D) แต่ในไม่ช้าการเลื่อนเหล่านี้ก็เริ่มช้าลง เพราะเกิดการขัดกันทั้งในบริเวณภายในเกรนเอง ซึ่งอาจเป็นเพราะอะตอมของธาตุอื่นขวางอยู่ หรือตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งแนวการเลื่อนในแต่ละเกรนอาจจะขัดกันเพราะต่างเกรนก็มีการวางตัวไปในทิศทางที่ต่าง ๆ กัน ดังนั้นวัสดุจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และต้องเพิ่มแรงกระทำเพื่อให้วัสดุยืดตัวต่อไปอีก ในโลหะบางประเภทที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น ทองแดง อลูมิเนียม นิกเกิล เป็นต้น การยืดตัวออกในช่วงพลาสติก จะมีลักษณะค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.10 จะไม่มีจุด C และ D ให้เห็นชัดเจน และแม้แต่จุดพิกัดความยืดหยุ่นเองก็กำหนดได้ยาก ดังนั้นในกรณีเช่นนี้จึงมักจะถือเอาค่าขีดจำกัดสัดส่วนเป็นจุดครากตัวด้วย



รูปที่ 5.10 แสดง Engineering stress-strain curves ของโลหะและโลหะผสม

- ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate tensile strength) จากรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าที่จุด E เป็นจุดสูงสุดของกราฟ ความเค้นที่จุดนี้เป็นค่าสูงสุดที่วัสดุจะรับได้โดยไม่เกิดการแตกหัก หลังจากจุด E กราฟจะโค้งลงมาจนถึงจุด F ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุขาดออกจากกัน ค่าความเค้นที่จุด F เรียกว่า ความแข็งแรงแตกหัก (Breaking strength)

ความเค้นและความเครียดที่แท้จริง (True stress and True strain)

ความเค้นที่แท้จริง (True stress) เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำบนชิ้นงานทดสอบต่อพื้นที่หน้าตัดขณะรับแรงกระทำอยู่นั้น ดังจะเขียนเป็นสูตรทั่วไปได้ดังนี้

$$\text{True stress } \sigma_t = \frac{F}{A_i}$$

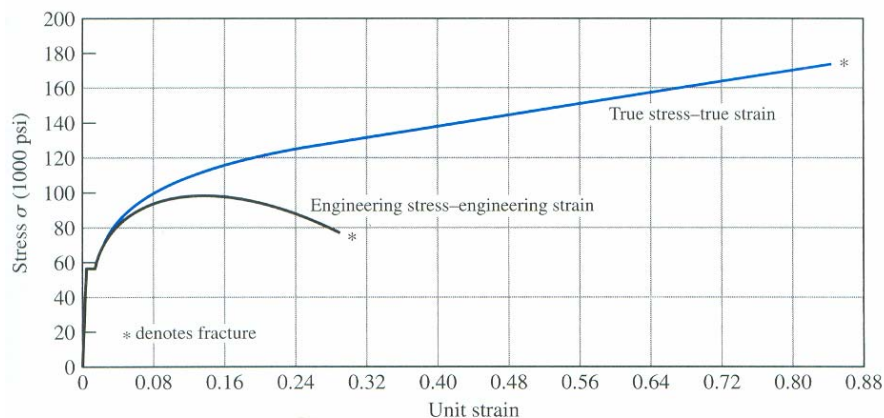
ความเครียดที่แท้จริง (True strain) เป็นผลรวมอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงส่วนย่อย (ความยาว) ต่อความยาวเดิม โดยรวมตั้งแต่ความเครียดของงานก่อนรับแรงจนถึงความเครียดขณะทดสอบ โดยจะเขียนเป็นสูตรทั่วไปได้ดังนี้

$$\text{True strain, } \epsilon_t = \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

ซึ่งค่า l_0 เป็นความยาวของ gage ตอนที่เริ่มต้น และ l_i เป็นความยาวของ gage ขณะที่ กำลังทดสอบ และถ้าเราสมมุติว่าปริมาตรของ gage มีค่าคงที่แล้วก็จะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า $l_0 A_0 = l_i A_i$ หรือ

$$\frac{l_i}{l_0} = \frac{A_0}{A_i} = \epsilon_t = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_i}$$

จากภาพที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบของกราฟที่ได้ระหว่าง engineering stress-strain และ true stress-strain ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ



รูปที่ 5.11 แสดง engineering stress-strain และ true stress-strain curves ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

ตัวอย่างที่ 3 ให้หาค่าของ engineering stress, engineering strain, true stress และ true strain จากข้อมูลต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{แรงกระทำที่ใช้} &= 17,000 \text{ lb} & \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ} &= 0.500 \text{ นิ้ว} \\ \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นทดสอบขณะแรงกระทำ } 17,000 \text{ lb}_f &= 0.472 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดตอนเริ่มต้น} = A_0 = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} (0.500)^2 = 0.196 \text{ in}^2$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดภายใต้แรงกระทำ} = A_i = \frac{\pi}{4} d^2 (0.472)^2 = 0.175 \text{ in}^2$$

$$\text{สมมติว่าปริมาตรของ gage มีค่าคงที่ดังนั้น} \quad l_i/l_0 = A_0/A_i$$

$$\text{Engineering stress} = \frac{F}{A_0} = \frac{17,000}{0.196} = 86,750 \text{ psi}$$

$$\begin{aligned} \text{Engineering strain} &= \frac{\Delta l}{l} = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{A_0}{A_i} - 1 \\ &= \frac{0.196}{0.175} - 1 = 0.12 \end{aligned}$$

$$\text{True stress} = \frac{F}{A_i} = \frac{17,000}{0.175} = 97,000 \text{ psi}$$

$$\begin{aligned} \text{True strain} &= \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_i} = \ln \frac{0.196}{0.175} \\ &= \ln 1.12 = 0.113 \end{aligned}$$

5.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ความแข็งของวัสดุเป็นสมบัติทางกลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่จะบ่งบอกถึงกำลังวัสดุ ความยากง่ายเมื่อถูกแปรรูป และความต้านทานต่อการกดให้เกิดรอยบุ๋มบนผิวของวัสดุ สำหรับวัสดุที่เป็นโลหะแข็ง เป็นคุณสมบัติที่ชี้ให้เห็นถึงการตอบสนองของโลหะต่อกรรมวิธีทางกล (Mechanical treatment) หรือ กรรมวิธีทางความร้อนที่กระทำต่อโลหะเพื่อปรับปรุงคุณภาพของโลหะนั้น ๆ

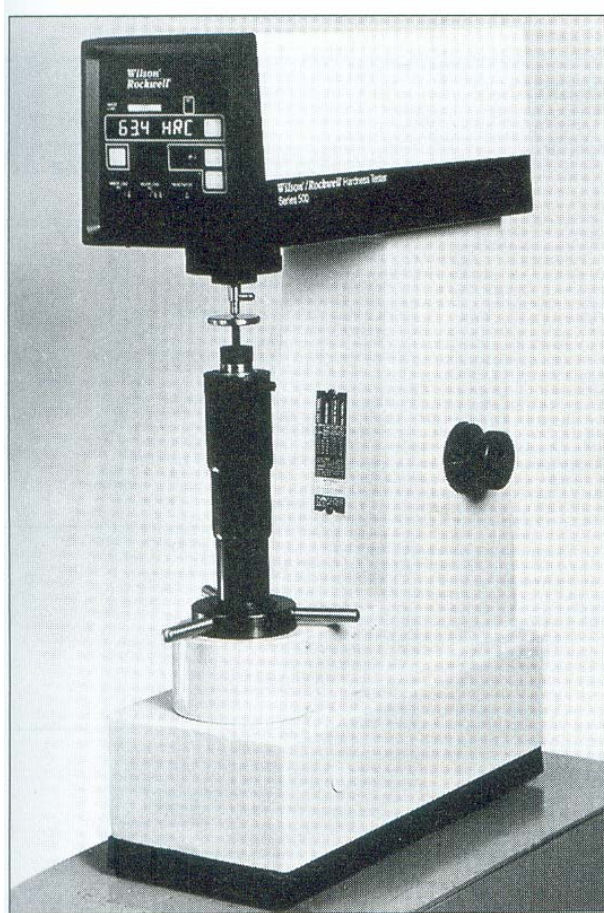
การทดสอบความแข็งมีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมมีดังนี้

1. การวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness test) เป็นการทดสอบโดยกดลูกบอลเหล็กกล้าด้วยแรง P ให้ฝังลงไปบนผิวงาน ภายในช่วงเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นเอาแรงออก รอยที่ลูกบอลฝังจมลงไปยังปรากฏที่ผิวงาน ดังรูปที่ 5.10

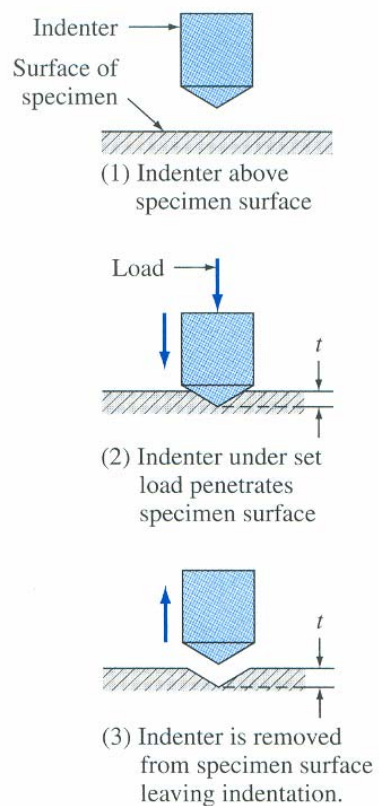
ค่าความแข็งคิดจากแรงกด P หารด้วยพื้นที่ของผิวโค้งที่บุ๋มลงไป

$$\text{BHN} = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

- เมื่อ P คือแรงกดที่ผิวโลหะ (ส่วนมากเป็น 3,000 กิโลกรัม)
 D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวบอลล์ (ปกติเป็น 10 มิลลิเมตร)
 d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยนูนบนผิวโลหะ
 หน่วยของ BHN จะเป็น กก./ตร.ม. แต่โดยทั่วไปไม่นิยมเขียนหน่วยกำกับ



(a)



(b)

ภาพที่ 5.12 แสดงเครื่องมือวัดความแข็งของร็อคเวลล์และการใช้หัวเพชรวัดความแข็ง

2. การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker hardness test) มีตัวกดเป็นรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ยอดปิระมิด ทำมุม ระหว่างด้านตรงข้าม 136 องศา หัวปิระมิดทำด้วยกากเพชร แรงที่ใช้กดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ต้องการวัด คือ ตั้งแต่ 1 – 120 กิโลกรัม หลักการก็เช่นเดียวกัน คือ ออกแรงกดหัวปิระมิตลงบนผิวโลหะที่สะอาดราบเรียบ จนเกิดรอยนูนบนผิวโลหะเป็นรูปปิระมิต (กदनานไม่น้อยกว่า 30 วินาที) จากนั้นก็

วัดความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มซึ่งมีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สมมติว่าวัดได้ d_1 มิลลิเมตร และในการหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์จะแทนค่าในสูตร

$$VHN = \frac{1.72p}{d_1^2}$$

หน่วยของ VHN จะเป็น กก./ตร.มม.

3. การวัดความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell hardness test) การวัดความแข็งแบบร็อคเวล เป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน เพราะสามารถอ่านค่าความแข็งของโลหะจากเครื่องวัดได้ทันที โดยไม่ต้องคำนวณภายหลังการทดสอบเหมือนวิธีข้างต้น การวัดความแข็งแบบนี้ใช้ความลึกของรอยบุ๋มที่เกิดจากการกดของหัวกดแทนที่จะวัดพื้นที่ของรอยบุ๋มดังวิธีแบบอื่นดังได้กล่าวมาแล้ว

การทดสอบแบบร็อคเวลมีหลายสเกลดังนี้

- สเกล A ใช้หัวกดเพชรรูปกรวย แรงกด 50 กก. เหมาะกับวัสดุแข็งและบาง
- สเกล B ใช้หัวกดบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง (เส้นผ่าศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว) และแรงกด 100 กก. (minor 100 กก. major 90 กก.)
- สเกล C ใช้เพชรรูปกรวย เป็นหัวแรงกด 150 กก. (minor 10 กก. major 140 กก. และนอกจากนี้ยังมีอีกหลายสเกลแต่ไม่ค่อยนิยมใช้กัน แสดงดังตารางที่ 5.2 และมีเครื่องทดสอบพิเศษสำหรับทดสอบความแข็งของงานบางหรือ ผิวงานที่แข็งแต่บาง

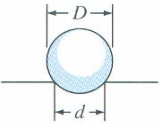

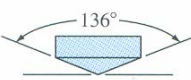
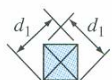
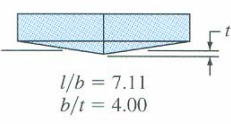
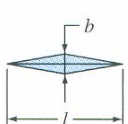
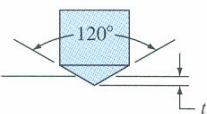

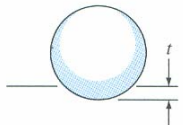

4. การวัดความแข็งแบบ Knoop microhardness เป็นการวัดค่าความแข็งของงานบางหรืองานที่มีผิวแข็งบาง งานขนาดเล็กหรือเมื่อต้องการวัดความแข็งแต่ละเกรน เครื่องทดสอบใช้หัวกดแบบเพชรรูปปิระมิด และใช้แรงกดน้อย ๆ (1 –200 กรัม) และการจะหาค่า KHN หาได้จากสูตร

$$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$$

เมื่อ P เป็นแรงกด, กรัม

l ความยาวของเส้นทแยงมุม, ไมครอน

ตารางที่ 5.2 แสดงการวัดความแข็งแบบต่าง ๆ

Test	Indenter	Shape of indentation		Load	Formula for hardness number
		Side view	Top view		
Brinell	10 mm sphere of steel or 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 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$ } 100-500f
B } F } G }	$\frac{1}{16}$ -in.-diameter steel sphere			100 kg 60 kg 150 kg 100 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$ } 130-500f
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.

5.5 ความทนทาน และการทดสอบแบบกระแทก

(Toughness and Impact Testing)

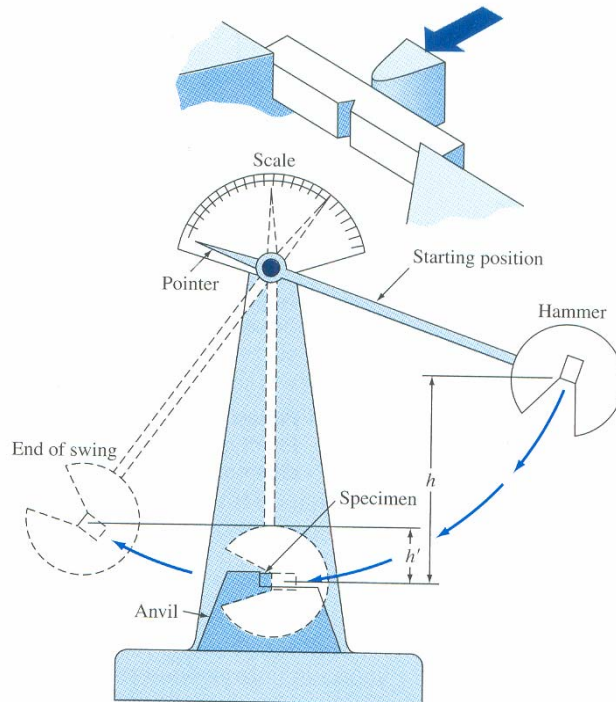
- ความทนทาน (toughness)

หมายถึงความทนทานต่อการกระแทกและยืดออกโดยไม่หักง่าย ๆ ของวัสดุ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่วัสดุสามารถรับไว้ได้ทั้งหมดตั้งแต่เริ่มถูกแรงกระทำไปจนหักขาดซึ่งหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของ Stress-strain curve

- การทดสอบการกระแทก (Impact Test)

การทดสอบแบบนี้เพื่อวัดพลังงานที่จำเป็นในการหักขาดของรอยบากมาตรฐาน (Standard notched) บนแท่งวัสดุ โดยภาวะที่กระทำเป็นแบบ Impulse load และ

สิ่งนี้คือการหาค่าของความหนาของรอยบากของวัสดุ ภาพที่ 5.13 แสดงอุปกรณ์ทดสอบความหนาและรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบกระแทกมาตรฐาน ชิ้นตัวอย่างทดสอบถูกวางบนหน้ารับสองหน้าที่ขนานกัน ลูกตุ้มที่หนักถูกปล่อยจากระดับความสูงที่ทราบค่ามากระแทกชิ้นตัวอย่างจนหักก่อนที่จะแกว่งขึ้นไปจากค่ามวลของลูกตุ้ม และความต่างของระดับความสูงเริ่มต้น และสุดท้าย พลังงานที่ใช้การทำให้หักขาดหรือพลังงานรับไว้โดยชิ้นตัวอย่างก่อนหักสามารถคำนวณหาได้



ภาพที่ 5.13 แสดงการทดสอบของเครื่องทดสอบแบบกระแทก

การทดสอบแบบกระแทกนี้ร่อยของการแตกหักอาจจะเป็นแบบเปราะ หรือแบบเหนียวก็ได้ ถ้าเป็นแบบเปราะ เมื่อสังเกตรอยแตกหักจะไม่มีเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) และจะมีลักษณะเหมือนผลึกติดอยู่ตามผิว

ส่วนรอยแตกหักแบบเหนียว ผิวหน้าจะมีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous) และมักจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร หรือบางที่อาจจะพบรอยแตกหักที่มีทั้ง 2 ลักษณะปะปนกันอยู่

ชนิดของรอยแตกหักขึ้นอยู่กับสภาวะ และอุณหภูมิของการทดสอบ สภาวะแรงความเค้น, ความเร็วในการให้แรง ซึ่งสภาวะเหล่านี้อาจทำให้โลหะบางชนิดเปลี่ยนสภาพจากโลหะเหนียว ไปเป็นโลหะเปราะได้

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

