

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 โลหะผสมแมกนีเซียม

แมกนีเซียมเป็นโลหะที่เบา (ความหนาแน่น =  $1.74 \text{ g/cm}^3$ ) และเป็นคู่แข่งที่สำคัญของอะลูมิเนียม (ความหนาแน่น =  $2.70 \text{ g/cm}^3$ ) สำหรับงานที่ต้องการใช้โลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม แมกนีเซียมและโลหะผสมแมกนีเซียมก็มีข้อเสียมากมายทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง สิ่งแรกก็คือ เรื่องของราคาซึ่งมีราคาแพงกว่าอะลูมิเนียม และแมกนีเซียมถูกนำไปหล่อได้ยากเพราะในสภาวะหลอมละลายแมกนีเซียมจะเผาไหม้ในอากาศและจำเป็นต้องมีการใช้ Flux ในระหว่างการหล่อ นอกจากนี้แมกนีเซียมยังมีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำและความต้านทานต่อการ creep, ความล้าและการสึกกร่อนไม่ดี เนื่องจากแมกนีเซียมมีโครงสร้างผลึกแบบ HCP ซึ่งมีระบบการ slip เพียง 3 ระบบเท่านั้น ทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นได้ยากที่อุณหภูมิห้อง ส่วนข้อดีของแมกนีเซียมคือ เนื่องจากแมกนีเซียมมีความหนาแน่นต่ำ จึงมักถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น งานด้านอวกาศ และอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ ตารางที่ 2.1 และ 2.2 แสดงสมบัติทางกายภาพ ราคาของแมกนีเซียมเปรียบเทียบกับโลหะอื่นๆ บางชนิดและค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 2.1

สมบัติทางกายภาพและราคาของโลหะทางวิศวกรรมบางชนิด

| Metal     | Density at 20°C,<br>g/cm <sup>3</sup> | Melting<br>point,<br>°C | Crystal<br>structure          | Cost, \$/lb (1994) |
|-----------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Magnesium | 1.74                                  | 651                     | HCP                           | 1.53               |
| Aluminum  | 2.70                                  | 660                     | FCC                           | 0.75               |
| Titanium  | 4.54                                  | 1675                    | HCP $\rightleftharpoons$ BCC† | 3.50–4.50†         |
| Nickel    | 8.90                                  | 1453                    | FCC                           | 3                  |
| Iron      | 7.87                                  | 1535                    | BCC $\rightleftharpoons$ FCC§ | 0.23–0.26¶         |
| Copper    | 8.96                                  | 1083                    | FCC                           | 1.13               |

\*Prices vary with time.

†Transformation occurs at 883°C.

‡Price is for a large amount.

§Transformation occurs at 910°C.

¶Prices vary with time.

ที่มา : Principles of Materials Science & Engineering – กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ท็อป/

แมคกรอ-ฮิล, 2549

ตารางที่ 2.2  
ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25°C

|                                                     | Oxidation (corrosion) reaction                                       | Electrode potential, $E^\circ$<br>(volts vs. standard<br>hydrogen electrode) |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>More cathodic</b><br>(less tendency to corrode)  | $\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3e^-$                        | +1.498                                                                       |
|                                                     | $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^-$    | +1.229                                                                       |
|                                                     | $\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2e^-$                        | +1.200                                                                       |
|                                                     | $\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + e^-$                            | +0.799                                                                       |
|                                                     | $2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2e^-$                     | +0.788                                                                       |
|                                                     | $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$                    | +0.771                                                                       |
|                                                     | $4(\text{OH})^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^-$ | +0.401                                                                       |
|                                                     | $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e^-$                        | +0.337                                                                       |
|                                                     | $\text{Sn}^{2+} \rightarrow \text{Sn}^{4+} + 2e^-$                   | +0.150                                                                       |
|                                                     | $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e^-$                          | 0.000                                                                        |
| <b>More anodic</b><br>(greater tendency to corrode) | $\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2e^-$                        | -0.126                                                                       |
|                                                     | $\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2e^-$                        | -0.136                                                                       |
|                                                     | $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2e^-$                        | -0.250                                                                       |
|                                                     | $\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2e^-$                        | -0.277                                                                       |
|                                                     | $\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2e^-$                        | -0.403                                                                       |
|                                                     | $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$                        | -0.440                                                                       |
|                                                     | $\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3e^-$                        | -0.744                                                                       |
|                                                     | $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e^-$                        | -0.763                                                                       |
|                                                     | $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3e^-$                        | -1.662                                                                       |
|                                                     | $\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2e^-$                        | -2.363                                                                       |
|                                                     | $\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + e^-$                            | -2.714                                                                       |

\* Reactions are written as anodic half-cells. The more negative the half-cell reaction, the more anodic the reaction is and the greater the tendency for corrosion or oxidation to occur.

ที่มา : R.E. Davis, K.D. Gailey, and K.W. Whitten, "Principles of Chemistry", CBS College Publishing, 1984, p. 635

### 2.1.1 การแยกโลหะผสมแมกนีเซียม

โลหะผสมแมกนีเซียมแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ โลหะผสมแมกนีเซียมแบบ wrought ซึ่งอยู่ในลักษณะของ sheet, plate, extrusion และ forgings และโลหะผสมแบบหล่อทั้ง 2 แบบจะมีทั้งลักษณะที่สามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้และไม่ได้

โลหะผสมแมกนีเซียมมักจะมีการถูกเรียกโดยการระบุด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ 2 ตัว และตามด้วยตัวเลข 2 หรือ 3 ตัว ตัวอักษรจะหมายถึงธาตุอัลลอยด์หลัก 2 ชนิดที่มีอยู่ในโลหะผสม โดยตัวอักษรตัวที่หนึ่งจะแสดงถึงธาตุอัลลอยด์ที่มีความเข้มข้นมากที่สุด และตัวอักษรที่สองจะแสดงถึงธาตุอัลลอยด์ที่มีความเข้มข้นมากเป็นอันดับที่สอง ส่วนตัวเลขตัวที่หนึ่งที่ตามหลังตัวอักษรจะหมายถึงร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุอัลลอยด์ของตัวอักษรตัวที่หนึ่ง (ถ้ามีตัวเลขเพียง 2 ตัว) และตัวเลขตัวที่สองจะหมายถึงร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุอัลลอยด์ของ

ตัวอักษรตัวที่สอง ถ้ามีตัวอักษร A, B เป็นต้น ตามหลังตัวเลข จะหมายถึงมีการปรับปรุงโลหะผสมนั้นด้วยวิธี A และ B ตัวอักษรที่ใช้ในโลหะผสมแมกนีเซียมมีดังนี้คือ

|   |   |             |   |   |              |   |   |          |
|---|---|-------------|---|---|--------------|---|---|----------|
| A | = | อะลูมิเนียม | K | = | เซอร์โคเนียม | M | = | แมงกานีส |
| E | = | rare earths | Q | = | เงิน         | S | = | ซิลิคอน  |
| H | = | ทอเรียม     | Z | = | สังกะสี      | T | = | ดีบุก    |

### 2.1.2 โครงสร้างและสมบัติ

เนื่องจากแมกนีเซียมมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ HCP ดังนั้นเมื่อโลหะผสมแมกนีเซียมผ่านกระบวนการ cold working โลหะผสมแมกนีเซียมนี้จะสามารถถูก cold worked ได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น และอาจจะเกิดการ slip ขึ้นที่ระนาบอื่นที่ไม่ใช่ระนาบที่ฐาน (basal Planes) ได้ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น โลหะผสมแมกนีเซียมจึงมักถูก hot-work มากกว่า cold-work

อะลูมิเนียมและสังกะสีมักจะนิยมเติมลงในแมกนีเซียม เพื่อทำให้เกิดเป็นโลหะผสมแมกนีเซียมแบบ wrought ทั้งอะลูมิเนียมและสังกะสีจะทำให้แมกนีเซียมแข็งแรงขึ้นนอกจากนี้อลูมิเนียมยังสามารถรวมกับแมกนีเซียมทำให้เกิดตะกอน  $Mg_{17}Al_{12}$  ขึ้น ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจะสามารถทำให้โลหะผสม Mg-Al แข็งแรงขึ้นโดยการเกิด age-hardening ทอเรียมและเซอร์โคเนียมก็สามารถเกิดตะกอนกับแมกนีเซียมได้เช่นกัน และสามารถผลิตเป็นโลหะที่สามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง  $427^{\circ}\text{C}$  ( $800^{\circ}\text{F}$ )

โลหะผสมแมกนีเซียมสำหรับงานหล่อถูกผลิตขึ้น โดยใช้ส่วนผสมของอะลูมิเนียมและสังกะสีเป็นธาตุอัลลอยด์ เพราะธาตุเหล่านี้จะมีผลทำให้โลหะแข็งแรงขึ้น และถ้าเติมธาตุอัลลอยด์จำพวก rare-earth เช่นเซอร์เรียม จะทำให้เกิดโครงสร้างร่างตาข่ายของขอบเกรนที่แข็งแรง

## 2.2 กระบวนการอัดฉีด (Extrusion) ของโลหะและโลหะผสม

โดยมากใช้กับกระบวนการผลิตของพวกพลาสติก โดยวัสดุนั้นจะถูกบังคับอัดด้วยความดันสูงเพื่อบังคับให้ออกทาง open die แต่ถ้าเป็นโลหะหรือโลหะผสม จะใช้วิธีนี้ได้กับโลหะที่กำลังร้อน เพราะมันจะมีความต้านทานต่ำจึงมักจะทำให้เป็นโลหะแท่งกลม หรือทำเป็นท่อกลวง โดยนำโลหะที่หลอมไว้มาใส่ไว้ในที่พัก (billet) ของภาชนะบรรจุ (container) แล้วจึงจะถูกอัดด้วยตัวดัน (ram) ให้ออกทางตาย (die) เช่นการผลิตแท่งหรือท่อทองแดง อะลูมิเนียมหรือโลหะผสม แม้จะมีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอก็ทำได้

โดยกระบวนการอัดฉีดมี 2 แบบคือ

1. Direct extrusion

2. Indirect extrusion

สำหรับ indirect extrusion จะใช้แรงและ power น้อยกว่า direct extrusion เพราะมีความฝืดน้อยกว่าแต่ก็มีข้อจำกัดกว่า direct extrusion

กระบวนการอัดขึ้นรูปยังใช้ได้ดีกับพวก non-ferrous metals เช่น Al, Cu หรือพวกโลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ และยังใช้ได้กับแก้ว ถ่าน และ stainless steel โดยผลิตเป็นท่อกลวง

## 2.3 ความเค้นและความเครียดของโลหะ

ถ้าเอาโลหะมาดึงในทิศทางเดียว (uniaxial tensile force) จะทำให้โลหะเปลี่ยนรูปได้ และถ้าเลิกดึงแล้วโลหะนั้นกลับมามีรูปร่างเดิมหรือมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเรียกว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) แต่ถ้ากลับสู่สภาพเดิมไม่ได้ 100% เรียกว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบถาวร (Plastic deformation) ในระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนรูปนี้ อะตอมจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ การเปลี่ยนแปลงแบบนี้บางครั้งก็เป็นสิ่งที่วิศวกรต้องการมากเพราะสามารถนำไปผลิตสิ่งของต่างๆ ได้ถ้าไม่มีแตกหักและเป็นไปตามต้องการ เช่น การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ต่างๆ จากเหล็กกล้า เช่น กันชน กระโปรง และประตูรถยนต์ เป็นต้น สามารถอัดขึ้นรูปโดยไม่แตกหัก

### 2.3.1 ความเค้นทางวิศวกรรม

ถ้านำโลหะแท่งยาว  $l_0$  และมีพื้นที่หน้าตัด  $A_0$  ดึงด้วยแรง  $F$  ตามแนวแกน  $F$  ดังภาพที่

2.1

ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress,  $\sigma$ )

$$= \frac{F(\text{Ave. uniaxial tensile force})}{A_0(\text{original cross-section area})}$$

โดยที่หน่วยที่ใช้วัดค่าของความเค้นมีดังต่อไปนี้

ปอนด์ต่อตารางนิ้ว = lb/in<sup>2</sup> หรือ psi

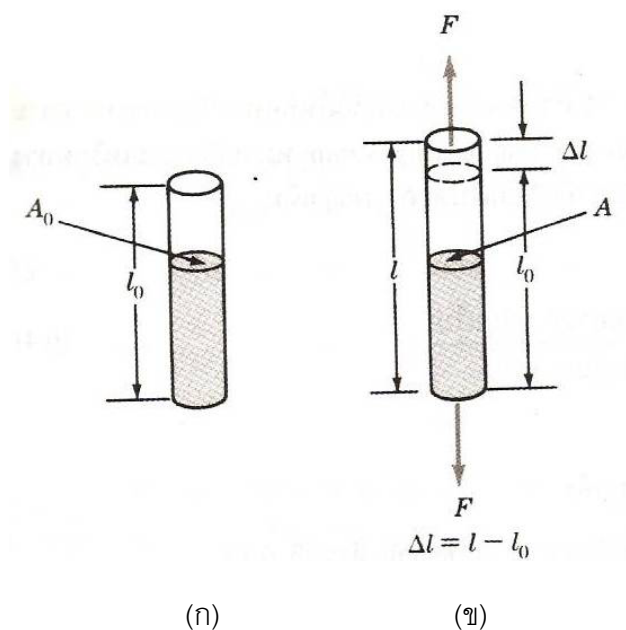
ปาสคาล (Pascal), นิวตัน/เมตร<sup>2</sup>

$$1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$$

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

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

$$1000 \text{ psi} = 1 \text{ ksi} = 6.89 \text{ MPa}$$



ภาพที่ 2.1

แสดงการยืดของแท่งโลหะที่ถูกดึง (ก) เมื่อไม่มีการดึง (ข) เมื่อถูกดึงด้วยแรง  $F$  ทำให้ความยาวเพิ่มขึ้นจาก  $l_0$  เป็น  $l$

ที่มา : Principles of Materials Science & Engineering – กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ที่อป/  
แมคกรอ-ฮิล, 2549

### 2.3.2 ความเครียดทางวิศวกรรม

เมื่อแท่งโลหะถูกดึงในทิศทางเดียว ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ทำให้แท่งโลหะยาวขึ้นในทิศทางที่แรงกระทำ ความยาวที่เพิ่มขึ้นนี้เรียกว่า ความเครียด (strain) จากคำนิยามของคำว่า Engineering strain หมายถึง ความเครียดทางวิศวกรรมที่เกิดจากแรงดึงโลหะ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

$$\text{ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress, } \sigma) = (l - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0$$

= ความยาวที่เปลี่ยนไป/ความยาวเดิม

|       |       |   |                                  |
|-------|-------|---|----------------------------------|
| เมื่อ | $l_0$ | = | ความยาวเดิมของตัวอย่าง           |
|       | $l$   | = | ความยาวใหม่หลังจากตัวอย่างถูกดึง |

ค่าความเครียดทางวิศวกรรมจะไม่มีหน่วย ในทางปฏิบัติของอุตสาหกรรมมักจะเปลี่ยนความเครียดทางวิศวกรรมให้เป็นเปอร์เซ็นต์ความเครียด หรือใช้หน่วยที่วัดความเครียดทางวิศวกรรม U.S. Customary: นิ้วต่อนิ้ว (in/in) SI : เมตรต่อเมตร (m/m) เปอร์เซ็นต์ความยาวที่เปลี่ยนแปลง

$$\begin{aligned}\% \text{ความเครียดทางวิศวกรรม} &= \text{ความเครียดทางวิศวกรรม} \times 100\% \\ &= \% \text{ความยาวที่เปลี่ยนแปลง}\end{aligned}$$

### 2.3.3 การทดสอบแรงดึงและแผนภาพความเค้นความเครียดทางวิศวกรรม

การทดสอบแรงดึง (tensile test) ใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมด้วยการใช้วิธีการดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้นๆ ด้วยอัตราคงที่ สารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะแตกต่างกันไปสำหรับโลหะ อาจทำเป็นแผ่นหรือเป็นแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 นิ้ว และใช้ gauge length ข้อมูลของแรงสามารถหาได้จากกราฟของการทดสอบแรงดึง ซึ่งเป็นกราฟระหว่างความเค้นทางวิศวกรรมกับความเครียดทางวิศวกรรม จะทำให้สามารถหา tensile strength ได้

โดยสมบัติเชิงกลของโลหะและโลหะผสมเป็นเรื่องที่สำคัญสำหรับวิศวกรในการออกแบบโครงสร้าง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงมีดังนี้

#### 1. Modulus of Elasticity

ในการดึงโลหะ ในช่วงแรกโลหะจะมีการเปลี่ยนรูปแบบ elastic แต่ถ้าปัดแรงที่กระทำต่อตัวอย่างออกไป ตัวอย่างนั้นจะกลับคืนสู่ความยาวเริ่มต้น สำหรับโลหะ maximum elastic deformation มักจะมีน้อยกว่า 0.5% โดยทั่วไปโลหะ และโลหะผสมจะแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของความเค้นและความเครียดในช่วงของ elastic ของ engineering stress-strain diagram ซึ่งอธิบายได้ด้วย Hooke's law ดังภาพที่ 2.2 ซึ่งได้อธิบายไว้ดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma \text{ (stress)} &= E \epsilon \text{ (strain)} \\ E &= \text{modulus of elasticity} \\ &= \text{Young's modulus} \\ \text{หรือ } E &= \sigma \text{ (stress)} / \epsilon \text{ strain (หน่วยเป็น psi หรือ Pa)}\end{aligned}$$

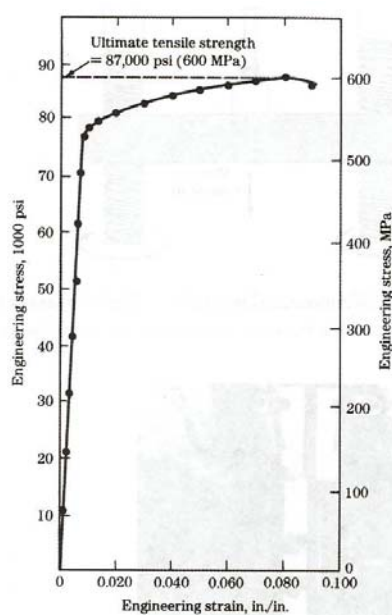
### ตารางที่ 2.3

แสดงค่าของ Elastic Constants ของ Isotropic Materials ที่อุณหภูมิห้อง

| Materials        | Modulus of elasticity<br>$10^{-6}$ psi (GPa) | Shear Modulus<br>$10^{-6}$ psi (GPa) | Poisson's ratio |
|------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Aluminium alloys | 10.5 (72.4)                                  | 4.0 (27.5)                           | 0.31            |
| Copper           | 16.0 (110)                                   | 6.0 (41.4)                           | 0.33            |
| Steel            | 29.0 (200)                                   | 11.0 (75.8)                          | 0.33            |
| Stainless steel  | 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            |

ที่มา : Principles of Materials Science & Engineering – กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ที่อป/

แมคกรอ-ฮิล, 2549



ภาพที่ 2.2

แสดงลักษณะของกราฟ stress-strain diagram จากการทดสอบ strength ของโลหะผสม อะลูมิเนียม (7075-T6) ขนาดเพลต 5/8 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 นิ้ว และใช้ gauge length 2 นิ้ว (จาก Aluminum Company of America)

ที่มา : Principles of Materials Science & Engineering – กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ที่อป/

แมคกรอ-ฮิล, 2549

modulus elasticity นี้จะเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของโลหะหรือโลหะผสม (ดูตารางที่ 2.3) โลหะที่มี modulus elasticity จะแข็งไม่่ง่าย เช่น เหล็กมีค่า modulus elasticity  $30 \times 10^6$  psi (207 GPa) ขณะที่โลหะผสมอะลูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าประมาณ  $10\text{--}11 \times 10^6$  psi (69-76 GPa) โปรดสังเกตว่าในช่วง elastic ของ stress strain diagram ค่า modulus จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อ stress เพิ่มขึ้น

## 2. Yield Strength

เป็นค่าที่มีความสำคัญที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างของวิศวกร เพราะมันเป็นค่าความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมที่สำคัญต่อการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นอย่างถาวร จาก stress-strain curve ไม่มีจุดที่แน่นอนที่แสดงให้เห็นถึงจุดที่ elastic strain สิ้นสุด และ plastic strain เริ่มต้น จึงได้เลือกเอา yield strength เป็นความแข็งแรงของโลหะ หรือเมื่อโลหะมีปริมาณ plastic strain เกิดขึ้นจำนวนหนึ่งแน่นอน สำหรับการออกแบบโครงสร้างของวิศวกรอเมริกัน ได้กำหนดให้ 0.2% ของ plastic strain ที่เกิดขึ้นใน stress-strain diagram ตามภาพที่ 2.2

0.2% yield strength นี้อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า 0.2% offset yield strength แต่ในอังกฤษใช้ 0.1% offset การหา yield strength ให้ลากเส้นตรงขนานกับเส้น stress-strain diagram ดังภาพที่ 2.2 ตรงจุด 0.002 นิ้ว/นิ้ว (เมตร/เมตร) ไปตัด curve ข้างบนจะได้ yield strength 78000 psi การเลือกใช้ 0.2% offset เป็นไปตามข้อตกลงกันอาจใช้ที่จุดอื่นก็ได้ที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบถาวรเพียงเล็กน้อย เช่น เลือกใช้ 0.1% offset ซึ่งเป็นที่นิยมมากในอังกฤษ

## 3. Ultimate tensile Strength

เป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ โดยพิจารณาจาก engineering stress-strain curve ดังภาพที่ 2.1 ถ้านำตัวอย่างวัสดุซึ่งอาจเป็นโลหะหรือโลหะผสมไปดึง จะเห็นว่าตรงกลางจะเล็กลง เกิดเป็นคอคอด (necking) ดังภาพที่ 2.3 และถ้าดึงต่อไปความเค้นทางวิศวกรรมจะลดลง เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น ในที่สุดก็จะขาด ความเค้นทางวิศวกรรมหาได้จากพื้นที่หน้าตัดเดิม ( $A_0$ ) ของตัวอย่าง

ภาพที่ 2.3 แสดงการเกิดคอคอดที่ตรงกลางของตัวอย่างเหล็ก เมื่อนำไปดึงก่อนที่จะขาดออกจากกัน จากภาพที่ 2.2 ultimate tensile strength หาได้โดยการลากเส้นขนานกับแกน strain ของ stress-strain curve จากจุดสูงสุดไปตัดแกน stress จะได้ค่า ultimate tensile strength บางครั้งเรียกว่า tensile strength จากภาพที่ 2.2 แสดง ultimate tensile strength ของโลหะผสมอะลูมิเนียมซึ่งมีค่า 87000 psi

ค่านี้ไม่ค่อยได้ใช้มากนักสำหรับงานออกแบบก่อสร้าง โดยเฉพาะโลหะอ่อน (ductile alloy) เนื่องจากมีการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรขึ้นอย่างมากก่อนที่จะถึง ultimate tensile strength อย่างไรก็ตาม ultimate tensile strength สามารถบ่งชี้ได้ว่าโลหะนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ ถ้าโลหะนั้นมีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุนจะทำให้ค่า strength ลดลงกว่าค่าปกติ



ภาพที่ 2.3

แสดงการเกิดคอคอดของตัวอย่างเหล็กกล้า (mild steel) ซึ่งเป็นแท่งกลม แต่หลังจากถูกดึงตามแนวแกนจนเกือบถึงจุดแตกหัก หน้าตัดของตัวอย่างจะลดลงเกิดคอคอดตรงกลาง

ที่มา : Principles of Materials Science & Engineering – กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ท้อป/

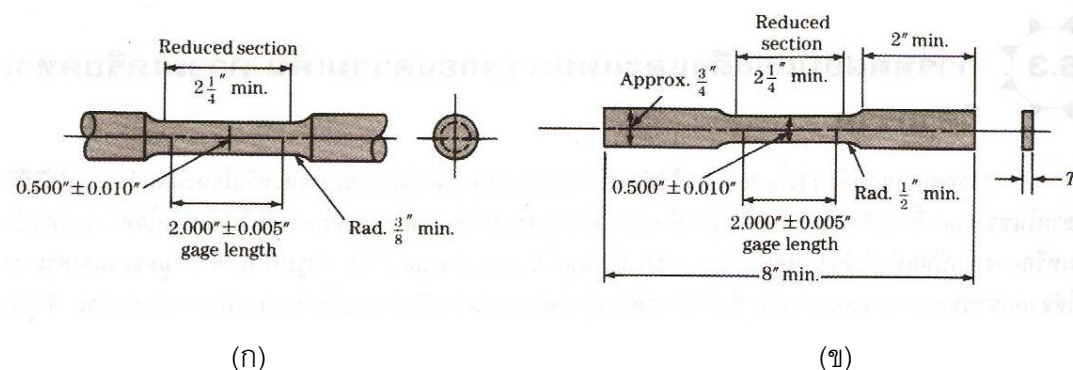
แมคกรอ-ฮิล, 2549

#### 4. Percent elongation (% ความยาวยืด)

ปริมาณความยืดที่เกิดจากการนำตัวอย่างไปดึง เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความอ่อน (ductile) ของโลหะ ความอ่อนตัวของโลหะโดยทั่วไปแสดงด้วยเปอร์เซ็นต์ความยืด (percent elongation) โดยเริ่มจาก gauge length ที่ใช้กันคือ 2.0 นิ้ว (5.1 cm) ดังภาพที่ 2.4 โดยทั่วไปโลหะยิ่งอ่อน ยิ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดมาก แสดงว่าโลหะนั้นเปลี่ยนรูปมาก ตัวอย่างเช่น โลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เป็นแผ่นหนา 0.0062 นิ้ว (1.6 cm) จะมี % elongation สูงถึง 35% แต่ถ้าเป็น aluminum alloy (high strength) 7075-T6 ที่หนาเท่ากัน จะมี % elongation เพียง 11% ความยาวของโลหะที่ยืดออกสามารถวัดได้ด้วย extensometer ซึ่งเป็นการวัดอย่างต่อเนื่อง หรืออาจจะวัดด้วย calipers โดยเอาตัวอย่างที่ดึงจนขาดมาต่อเข้าด้วยกันแล้วหาความยืดสุดท้าย เปอร์เซ็นต์ความยืดสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\% \text{ elongation} &= ((\text{final length} - \text{Initial length}) \times 100\%) / \text{Initial length} \\ &= ((l - l_0) \times 100\%) / l_0\end{aligned}$$

% elongation ณ จุดที่ขาดมีความสำคัญทางด้านวิศวกรรมมาก เพราะนอกจากจะทำให้ทราบว่าโลหะนั้นอ่อนเพียงใด ยังเป็นดัชนีชี้ให้ทราบว่าโลหะนั้นมีคุณภาพอย่างไรด้วย โดยที่ % elongation ต่ำกว่าปกติ เช่น โลหะนั้นอาจมีความพูนหรืออาจเกิดความชำรุดเสียหายเนื่องจากให้ความร้อนสูงเกินไป



ภาพที่ 2.4

แสดงตัวอย่างของขนาดที่จะใช้ทดสอบแรงดึง

(ก) ขนาดมาตรฐานที่มีลักษณะกลม gage length ยาว 2 นิ้ว

(ข) ขนาดมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นแผ่น gage length ยาว 2 นิ้ว

ที่มา : H.E. McGannon (ed.) ASTM standards, 1968 "The Marking Shaping and Treating of Steel", 9<sup>th</sup> ed., United States Steel, 1971, p. 1220)

## 5. Percent reduction in area

พวกโลหะหรือโลหะผสมที่อ่อนอาจแสดงได้ด้วยค่า % reduction in area ตามปกติ ค่านี้จะได้จากการทำการทดสอบแรงดึง โดยเริ่มต้นด้วยตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 นิ้ว (12.7 cm) เมื่อถึงจนขาด วัดเส้นผ่านศูนย์กลางอีกครั้งหนึ่งก็จะหาค่านี้ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}\% \text{ reduction in area} &= ((\text{initial area} - \text{final area}) \times 100\%) / \text{area} \\ &= ((A_0 - A_f) \times 100\%) / A_f\end{aligned}$$

% area reduction นี้จะลดลงเมื่อโลหะมี defect เช่น โลหะมีความพูน เป็นต้น ซึ่งเหมือนกับ % elongation

## 2.4 การเกิดรอยแตกของโลหะ

การเกิดรอยแตกเป็นการแยกตัวหรือการแตกของของแข็งออกเป็นหลายๆส่วนเมื่อมีความเค้น โดยทั่วไปการเกิดรอยแตกของโลหะแบ่งออกได้เป็น 2 พวกคือ

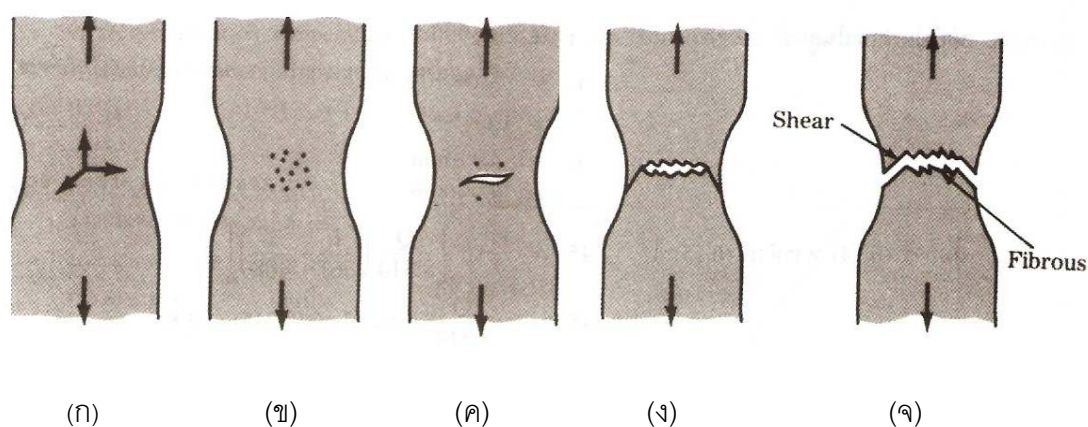
### 2.4.1 การเกิดรอยแตกของโลหะอ่อน (ductile fracture)

เกิดขึ้นหลังจากที่เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรด้วยการดึง ถ้าความเค้นเกิดขึ้นกับตัวอย่างเกิน ultimate tensile strength เป็นเวลานานพอควร จะทำให้โลหะเกิดรอยแตกขึ้น ซึ่งมีลักษณะที่เห็นได้ชัด 3 ลักษณะด้วยกันคือ

1. ลักษณะเว้าเข้าไปและมีช่องว่างเกิดขึ้นที่บริเวณนั้น (ดังภาพที่ 2.5 (ก) และ (ข))

2. ช่องว่างที่เกิดขึ้นรวมตัวกันมากขึ้นเป็นรอยแตกที่ตรงกลางแล้วมาสู่ผิวของตัวอย่าง เป็นแนวตั้งฉากกับทิศทางแรงดึง (ดังภาพที่ 2.5 (ค))

3. เมื่อรอยแตกดำเนินมาใกล้กับผิว ทิศทางจะเปลี่ยนไปเป็นมุม 45 องศา ทำให้เกิดแตกออกเป็นพื้นปลาขึ้น (cup and cone result) (ดังแสดงในภาพที่ 2.5 6.40 (ง) และ (จ) และภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5

แสดงลักษณะขั้นตอนของการเกิดรอยแตกเป็นพื้นปลาของโลหะอ่อน

ที่มา : G. Dieter, "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill 1976, p. 278)



ภาพที่ 2.6

แสดงการเกิดรอยแตกขึ้นภายในที่บริเวณส่วนหัวของทองแดงที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งเป็น polycrystalline (Magnification 9x)

ที่มา : K.E. Puttick, Philos. Mag. 4:964 (1959)



ภาพที่ 2.7

แสดงการแตกหักแบบเหนียวเกิด cup and cone อะลูมิเนียม

ที่มา : Principles of Materials Science & Engineering – กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ที่อป/

แมคกรอ-ฮิล, 2549

### 2.4.2 การเกิดรอยแตกของโลหะแข็ง (Brittle fracture)

มีโลหะและโลหะผสมหลายชนิดที่มีการเกิดรอยแตกแบบนี้ คือมีลักษณะเฉพาะของการเกิดรอยแตกตามระนาบผลึกที่เรียกว่า cleavage planes แม้จะเกิดการเปลี่ยนรูปเพียงเล็กน้อย เช่น โลหะที่มีโครงสร้างผลึกเป็น HCP เมื่อเกิดรอยแตกจะเป็นการแตกชนิดนี้ และโลหะอีกหลายชนิดที่มีโครงสร้างเป็น BCC เช่น เหล็ก  $\alpha$ , โมลิบดีนัม และทังสเตนก็มีการแตกแบบเดียวกัน การเกิดรอยแตกของโลหะแข็งมีขั้นตอนของการเกิดรอยแตก 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1. การเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจะเกิดขึ้นตาม slip plane (การเลื่อนไถลเป็นแถบ) ที่ถูกขวางกั้น
2. ความเค้นเฉือนจะถูกสะสมมากขึ้นที่ slip plane ที่ถูกขวางกั้น ก่อให้เกิดรอยแตกเล็กๆ ขึ้นมาก่อน
3. เมื่อความเค้นดำเนินต่อไป การเกิดรอยแตกเล็กๆ จะเกิดมากขึ้นจนเป็นรอยแตกเด็ดขาด

การเกิดรอยแตกนี้ดูเหมือนจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบ คือถ้าหากมีอุณหภูมิต่ำและมีความเครียดสูง ขอบที่จะเกิดรอยแตกเป็นแบบ brittle fracture รวมทั้งที่บริเวณมีรอยบาก (notch) ด้วย

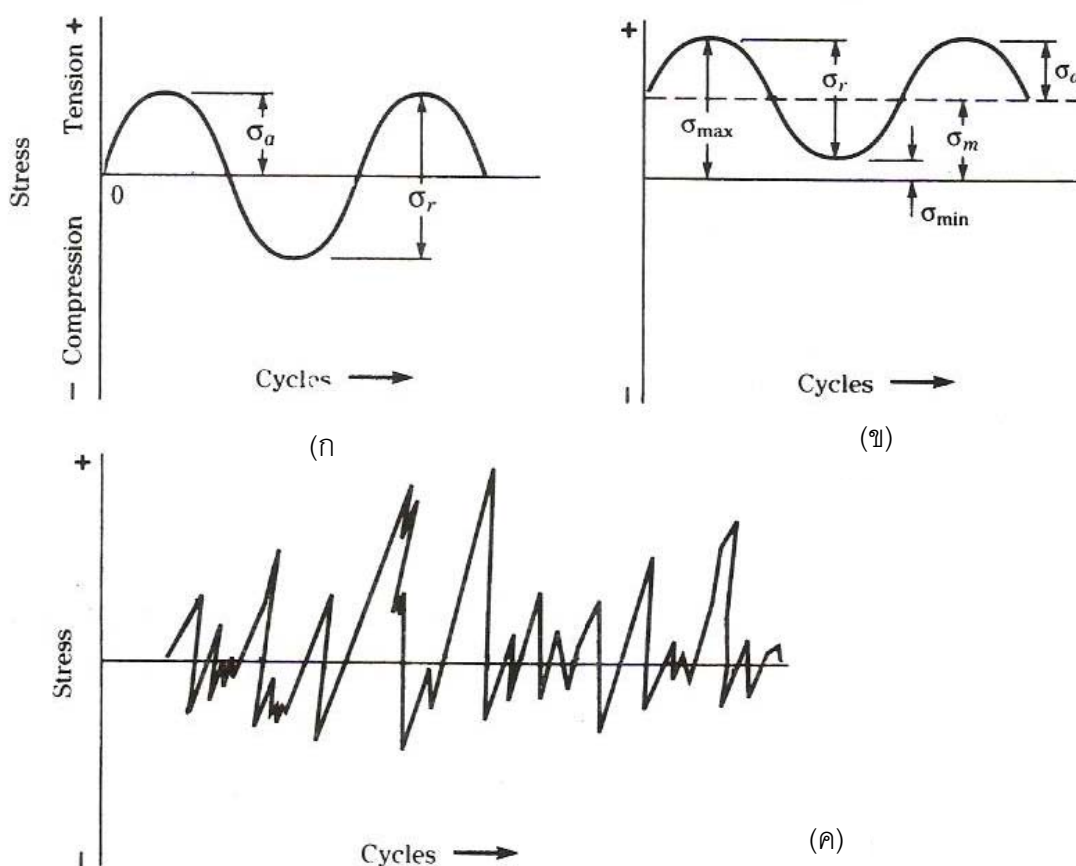
## 2.5 ความล้าของโลหะ

เมื่อนำโลหะไปใช้ทำอุปกรณ์ หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรหรือเครื่องมือกลต่างๆ ที่ต้องใช้งานที่เกิดความเค้นอย่างต่อเนื่อง หรือเกิด cyclic stresses จะทำให้โลหะนั้นเกิดการแตกหักได้ แม้ว่าจะใช้งานที่มีความเค้นต่ำๆ โดยที่โลหะนี้สามารถทนได้อย่างดีเมื่อใช้ความเค้นสูงๆ เพียงครั้งคราว เรียกว่าการแตกหักจากความล้า (fatigue failure) ปรากฏการณ์เช่นนี้จะพบเสมอๆ ที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เคลื่อนไหวดำเนินตลอดเวลา เช่น พวงเพลา ชาร์ป เกียร์ เป็นต้น โดยทั่วไป 80 เปอร์เซ็นต์ของเครื่องจักรเสียเป็นเพราะเกิดจากความล้า

### 2.5.1 Cyclic stresses

การที่จะนำ fatigue stress หรือการทดสอบความล้าไปประยุกต์ใช้จริงๆ อาจจะหาค่าได้แตกต่างกันมาก วิธีการที่ใช้ทดสอบความล้าในงานอุตสาหกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวกับการบิดตามแกนหรือความเค้นจากการงอ (flexural stress) นั้นมีอยู่หลายวิธี ภาพที่ 2.8 แสดงกราฟของ fatigue stress เทียบกับจำนวนรอบ

จากนิยามของ tensile stress ให้เป็น + (positive) และ compressive stress เป็น - (negative) สุดท้ายจะเห็นว่า cyclic stress อาจจะไม่เปลี่ยนแปลงโดยไม่มีค่าความถี่และความสูง และความถี่แสดงในภาพที่ 2.8 (ค)



ภาพที่ 2.8

แสดงลักษณะของกราฟที่ได้จาก fatigue stress เทียบกับจำนวนรอบ (ก) เป็นแบบ reversed stress cycle สมบูรณ์คือ stress จาก tension จะเท่ากับ stress จาก compression (ข) เป็น stress ที่เกิดจาก tensile ทั้งหมดหรือเป็น stress cycle ที่  $\sigma_{max}$  เท่ากับ  $\sigma_{min}$  (ค) เป็น random stress cycle หรือ stress cycle ที่เกิดไม่แน่นอน

ที่มา : Principles of Materials Science & Engineering – กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ห่อป/

แมคกรอ-ฮิล, 2549

ความไม่คงที่ของ stress cycle แสดงด้วยค่าเฉพาะด้วยตัวแปรต่างๆที่สำคัญมีดังนี้

1. Mean stress ( $\sigma_m$ ) หมายถึงค่าเฉลี่ยตามพีชคณิตของค่า stress สูงสุดและต่ำสุดใน fatigue cycle นั้น

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$$

2. Range stress ( $\sigma_r$ ) เป็นความแตกต่างของ  $\sigma_{max}$  กับ  $\sigma_{min}$

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

3. Stress amplitude ( $\sigma_a$ ) เป็นค่าครึ่งหนึ่งของค่า stress cycle

$$\sigma_a = \sigma_r/2 = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$$

4. Stress Ratio (R, อัตราส่วนความเค้น) เป็นอัตราส่วนของค่า stress ต่ำสุดกับค่า stress สูงสุด

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$$

## 2.5.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สำคัญที่เกิดในโลหะอ่อนจากกระบวนการล้า

เมื่อนำโลหะอ่อนที่มีเนื้อเดียวไปกระทำการด้วย cyclic stress โครงสร้างที่สำคัญจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการล้ามีดังนี้

1. เริ่มการเกิดแตกขึ้น (crack initiation) เป็นจุดเริ่มแรกของความเสียหายที่เกิดขึ้นจากความล้า

2. การแตกที่เกิดจาก slipband จะเริ่มขยายตัวขึ้น (slipband crack growth) การเกิดรอยแตกเริ่มแรกเนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ยังไม่อาจเปลี่ยนกลับได้อย่างสมบูรณ์ การเปลี่ยนรูปร่างถาวรในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแล้วสลับไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้ผิวเกิดสัน (ridge) และร่อง (groove) เรียกว่า slipband extrusion และ slipband intrusions เกิดขึ้นบนผิวโลหะหรือภายในเนื้อโลหะเรียกว่าขั้นแรก (stage I) ของการเกิดรอยแตกที่โตขึ้นจากความล้า อัตราการเกิดรอยแตกโตขึ้นโดยทั่วไปจะเกิดช้ามาก (เช่น  $10^{-10}$  เมตรต่อรอบ)

3. การขยายรอยแตกให้โตขึ้นบนระนาบที่มี tensile stress สูง สำหรับโลหะพวกที่เป็นพวก polycrystalline การเกิดรอยแตกระหว่าง stage I เพียง 2-3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเกรน ก่อนที่จะเปลี่ยนทิศทางไปตั้งฉากกับทิศทางที่เกิด stress สูงสุด ในขั้นที่สองนี้ (stage II) รอยแตกจะขยายตัวค่อนข้างรวดเร็ว (เป็นไมโครเมตรต่อรอบ) การวิเคราะห์จากการผ่าชิ้นงานจะทำให้ได้ประโยชน์ในการหาจุดกำเนิดและทิศทางการแตกร้าว

4. ความเสียหายของโลหะอ่อนสูงสุด (Ultimate ductile failure) เมื่อรอยแตกครอบคลุมพื้นที่เพียงพอ ส่วนที่เหลือไม่สามารถรับแรงกระทำได้ การแตกหักสุดท้ายและก่อให้เกิดความเสียหาย

### 2.5.3 แฟกเตอร์บางอย่างที่มีผลต่อ Fatigue strength ของโลหะ

มีแฟกเตอร์อื่นที่สำคัญนอกจากองค์ประกอบทางเคมีซึ่งมีผลต่อ fatigue strength ของโลหะหรือโลหะผสมคือ

1. Stress concentration ถ้าโลหะหรือโลหะผสมมีส่วนที่ทำให้ stress เกิดมากขึ้น (stress raisers) เช่นมี ตำหนิ รอยแตก รู ร่องลึก หรือส่วนที่มีคม ดังนั้น fatigue failures สามารถทำให้เกิดขึ้นน้อยได้ด้วยการออกแบบให้มี stress raisers น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้

2. ความขรุขระของผิว (surface roughness) ผิวของโลหะยิ่งเรียบเท่าใด fatigue strength ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้นเพราะถ้าเกิดผิวขรุขระทำให้เกิด stress raisers หรือทำให้เกิด fatigue crack ได้ง่ายขึ้น

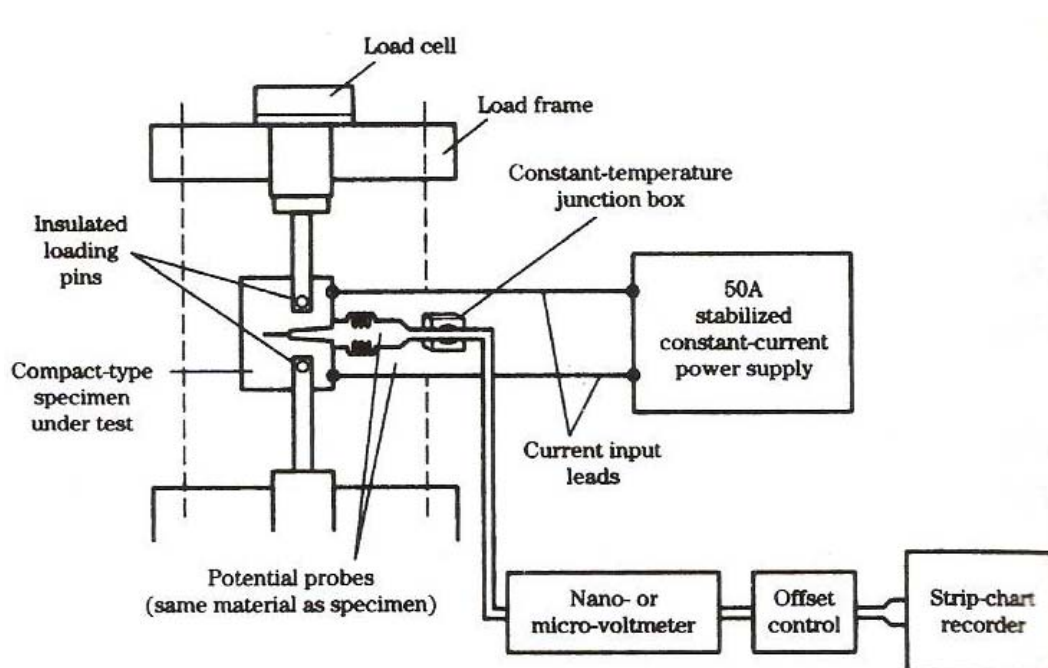
3. สภาพผิว (surface condition) โดยมาก fatigue failures มักจะเริ่มเกิดขึ้นจากผิวของโลหะ ดังนั้นถ้าผิวของโลหะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปอย่างมาก จะมีผลต่อ fatigue strength มากด้วย เช่น การทำให้ผิวของเหล็กแข็งขึ้นด้วยการทำ carburizing และ nitriding จะทำให้ fatigue life ยาวขึ้น แต่ถ้าการทำ decarburizing หรือด้วยการใช้ความร้อนให้อ่อนตัวลง จะทำให้ fatigue life สั้นลง บางครั้งการอัดเข้าไปที่ผิวของโลหะให้เหมาะสมก็อาจช่วยเพิ่ม fatigue life ได้อีกด้วย

4. สภาพแวดล้อม ในระหว่างที่โลหะเกิด cyclic stress ในสภาพแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อน (corrosive environment) สารเหล่านี้จะไปเร่งให้เกิดการแตกหักจากความล้าเร็วขึ้น ผลรวมที่ได้จากสารกัดกร่อน และการเกิด cyclic stresses เรียกว่า corrosion fatigue

### 2.6 อัตราการทวีรอยแตก

ข้อมูลเกี่ยวกับความล้าของโลหะและโลหะผสมส่วนมากจะเป็น cyclic fatigue สูงๆ (คือ fatigue life มีค่ามากกว่า  $10^4$  ถึง  $10^5$  cycles) ที่ได้จาก stress ที่ระบุโดยมีจำนวน cycles ที่ทำให้เกิดการแตกหัก นั่นคือเป็น S-N curves อย่างไรก็ตามในการทดสอบเหล่านี้ตัวอย่างมักจะใช้ลักษณะที่เรียบๆ หรือที่มีรอยบากก็ได้แต่ก็จะทำให้เกิดความยากลำบากที่จะบอกความแตกต่างระหว่าง fatigue crack initiation กับ fatigue crack propagation life ดังนั้นวิธีการวัด fatigue life จึงได้พัฒนาขึ้นใหม่ โดยทำตำหนิหรือรอยบากกับวัสดุที่จะทดสอบเสียก่อน

การทำตำหนิหรือรอยแตกกับวัสดุก่อนนำไปทดสอบจะช่วยลด หรือตัดปัญหาเกี่ยวกับ crack initiation ของ fatigue life ให้หมดไปได้ ดังนั้น fatigue life นี้ควรจะสั้นกว่าเพื่อให้สามารถทำนายได้ว่า fatigue life ของวัสดุที่มีการทำตำหนิและใช้สภาวะที่เป็น cyclic stress action ด้วยวิธีทางกลศาสตร์ การทดลองเพื่อจะวัดอัตราการขยายตัวของการแตกร้าว (crack growth rate) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ด้วยการทำให้เกิด cyclic fatigue action เป็นไปในทิศทางขึ้น-ลง ตามแนวตั้ง แล้ววัดความยาวของรอยแตก โดยอาศัยการวัดความเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากรอยแตกที่กว้างขึ้นและยาวขึ้น



ภาพที่ 2.9

แสดงแผนภาพการทดสอบความล้าของวัสดุด้วย direct-current electrical potential crack monitoring system ที่มีจำนวน cycle สูง

ที่มา : "Metals Handbook", Vol. 8 9<sup>th</sup> ed., American Society for Metals, 1985, p.388