

### บทที่ 3

## การเปลี่ยนรูปของโลหะ (Deformation of Metals)

**Deformation** หมายถึงการเปลี่ยนขนาดหรือลักษณะของวัตถุภายใต้แรงกระทำ ไม่ว่าจะ เป็นแรงดึง, อัด, บิด, และเฉือน

เมื่อโลหะได้รับแรงกระทำจะเริ่มเกิดความเค้นขึ้นภายใน ความเค้นที่เกิดจากแรงดึงเรียก ความเค้นดึง (tensile stress) ที่เกิดจากแรงอัดเรียกว่า ความเค้นอัด (compressive stress) เกิด จากแรงบิดเรียกว่า ความเค้นบิด (torsional stress) และเกิดจากแรงเฉือนเรียกว่า ความเค้นเฉือน (Shear stress)

เมื่อให้แรงกระทำแก่โลหะจนเปลี่ยนรูปไป พอเอาแรงออกและโลหะกลับคืนสู่สภาพ เดิมได้ แสดงว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวเท่านั้นเรียกว่า การเปลี่ยนรูปชั่วคราว (elastic deformation) เมื่อโลหะได้รับแรงกระทำและเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง แม้จะเอาแรง ออกก็ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เรียกว่า การเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation)

### 3.1 Elastic Deformation

เป็นการเปลี่ยนรูปไปชั่วคราว เนื่องจากได้รับแรงอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (elastic range) เมื่อ เอาแรงออก วัสดุจะคืนสู่รูปเดิม การเปลี่ยนแปลงแบบนี้ไม่ได้เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง ภายในโครงสร้างของโลหะ เพียงแต่เมื่อให้แรงเข้าไปจะทำให้อะตอมเปลี่ยนไปบ้างเล็กน้อยเท่า นั้น

เมื่อให้แรงดึงแก่วัสดุ จะทำให้ระยะระหว่างอะตอมเพิ่มขึ้น แต่ถ้าให้แรงอัดระยะอะตอม จะลดลง เมื่อเอาแรงออกอะตอมก็จะกลับสู่ตำแหน่งเดิม

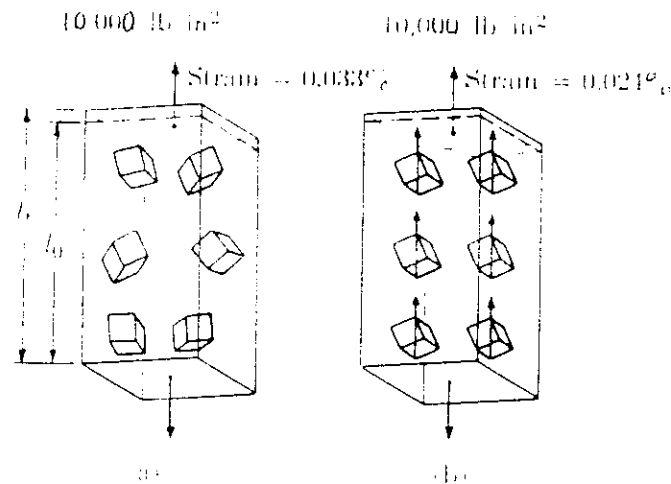
โลหะบางชนิดมีปรากฏการณ์แตกต่างออกไปคือ เมื่อเอาแรงออกแล้ว อะตอมจะไม่กลับ สู่สภาพเดิม แม้ว่าแรงที่กระทำมีเพียงเล็กน้อยก็ตามเหตุการณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า viscous flow ซึ่ง เกรนของโลหะไม่เปลี่ยนรูปทรง เพียงแต่บางผลึกถูกผลึกอื่นเข้าไปแทนที่

#### 3.1.1 คุณสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ

วัสดุข้างส่วนมากจะมีคุณสมบัติตามลักษณะของเกรน ซึ่งแต่ละเกรนล้วนแต่มีคุณสมบัติ ขึ้นกับทิศทาง (Anisotropic) โลหะผสมโดยทั่วไปประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กๆ หลายล้านผลึก ถ้าหากผลึกเรียงตัวไม่สม่ำเสมอคุณสมบัติจะเหมือนกันทุกทิศทาง แต่ในบางกรณีเช่นงานหล่อ, งาน หลีด หรืองานที่ผ่านกรอบชุบ อาจจะมีผลึกเรียงตัวสม่ำเสมอ โดยทั่วไปแล้วงานแท่งมักมีผลึก เรียงตัวสม่ำเสมอทั้งหมด

Cobalt	$30 * 10^6$	$-7.4 * 10^3$
Copper	$16 * 10^6$	$-5.5 * 10^3$
Iron	$30 * 10^6$	$-8.0 * 10^3$
Lead	$2.6 * 10^6$	$-2.7 * 10^3$
Magnesium	$6.3 * 10^6$	$-2.6 * 10^3$
Molybdenum	$47 * 10^6$	$-6.3 * 10^3$
Nickel	$30 * 10^6$	$-10 * 10^3$
Osmium	$80 * 10^6$	-
Titanium	$15 * 10^6$	$-10 * 10^3$
Tungsten	$60 * 10^6$	$-6.0 * 10^3$
Sintered carbide (94% wc , 6 % Co)	$100 * 10^6$	$-4.7 * 10^3$
Elinvar (36% Ni , 12% Cr+W,balance Fe)	$24 * 10^6$ (yield strength , 65,000 lb / in <sup>2</sup> )	0
Invar (36% Ni , balance Fe)	$21 * 10^6$ (yield strength , 50,000 lb / in <sup>2</sup> )	$+ 10 * 10^3$
Ni - span C (42% Ni , 5.5% Cr , 2.5% Ti , balance Fe)	$27 * 10^6$ (yield strenght , 180,000 lb / in <sup>2</sup> )	0

ค่ายังส์โมดูลัสนี้ ใช้บอกคุณสมบัติของลวดสปริงได้ เพราะลวดสปริงก็มีความยืดหยุ่น เช่น เปรียบเทียบสปริงที่ทำด้วยลวดคอปเปอร์นิเคิล ซึ่งมีค่ายังส์โมดูลัส = 10,000,000 PSI กับสปริงที่ทำด้วยลวดเหล็กเหนียวซึ่งมีค่า ยังส์โมดูลัส = 30,000,000 PSI ขนาดเท่ากัน สปริงเหล็กเหนียวมีค่ายังส์โมดูลัสสูงกว่า ต้องใช้ stress มากกว่าถึง 3 เท่าจึงจะทำให้ยืดออกเป็นความยาวเท่ากัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าลวดสปริงคอปเปอร์นิเคิลมีความคงทนเพียง 1/3 ของลวดสปริงเหล็กเหนียว



รูป 3.1 อิทธิพลของการเรียงตัวของผลึกที่มีต่อคุณสมบัติของแท่งเหล็ก

- (a) การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ  
(b) การเรียงตัวสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 3.1 แสดงว่าเมื่อผลึกเรียงตัวสม่ำเสมอ แท่งเหล็กจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ในรูป b จะเห็นว่าเกรนเล็กๆ ในแท่งเหล็กจะเรียงตัวตามทิศทาง (111) ที่ได้รับแรงกระทำ ดังนั้นการยืดตัวในแนวทิศทางนี้จึงน้อยกว่าแท่งเหล็ก ที่มีผลึกเรียงตัวไม่สม่ำเสมอ

สิ่งสำคัญที่สุดที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติยืดหยุ่นของโลหะผสมที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม คือ ค่ายังส์โมดูลัส (Young's Modulus : E) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ stress และ strain ดังนี้

$$E = \text{Young's Modulus}$$

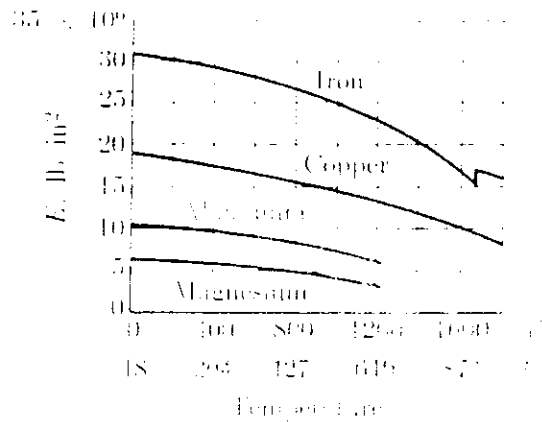
$$E = q/\epsilon \text{ PSI} , q = \text{Tensile stress}$$

$$\epsilon = \text{strain}$$

และในตาราง 3.1 แสดงค่าคุณสมบัติยืดหยุ่นของโลหะต่างๆ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติช่วงยืดหยุ่นของโลหะและโลหะผสม

Material	Young's modulus E at 20°C (68°F), lb/in	Temperature coefficient dE/dT in the range 0 - 100°C lb/in/°C
Aluminium	$10 \times 10^6$	$-4.4 \times 10^3$
Beryllium	$37 \times 10^6$	$-5.8 \times 10^3$



รูป 3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่ายังส์โมดูลัสของโลหะบริสุทธิ์ต่างๆ

การเพิ่มค่ายังส์โมดูลัสอาจทำได้โดย ทำให้เหล็กเรียงตัวสม่ำเสมอหรือเปลี่ยนส่วนผสมของวัสดุเท่านั้น ส่วนวิธีอื่นยังไม่มีใครค้นพบ ดังนั้นถ้าหากแท่งเหล็กเหนียวที่กำหนดให้แท่งหนึ่งเกิดเสียรูปมากเกินไป (เมื่อได้รับแรง) เราไม่สามารถลดการเสียรูปนี้ให้น้อยกว่าเดิมได้โดยการอบชุบหรือเติมธาตุพิเศษ แต่อาจทำให้ค่ายังส์โมดูลัสนี้ลดลงได้ โดยการเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening), ยูเทคตอยแตกตัว (eutectoid decomposition), และขึ้นรูปขณะเย็น (cold - working) หรือการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีอื่นที่ทำให้เกิดความเค้นภายในวัสดุ นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิใช้งานจะทำให้ค่ายังส์โมดูลัสลดลง (ดูรูปที่ 3.2) ดังนั้นถ้าลดอุณหภูมิค่ายังส์โมดูลัสจะเพิ่มขึ้น ผลเนื่องจากอุณหภูมินี้จะเห็นได้ชัดเจนในกรณีของ Bourdon tubes และสปริงขนาดเล็ก งานดังกล่าวจึงควรทำด้วยโลหะผสมที่มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (dE/dT) ต่ำเช่น Elinvar และ NI - Span - C การคำนวณขนาดการเปลี่ยนแปลงค่ายังส์โมดูลัส เนื่องจากความร้อนของเหล็กทำได้ดังนี้

ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 และ 100° C (32 และ 212° C) ค่ายังส์โมดูลัสลดลง

$$\begin{aligned} 100 * dE/dT &= 100 (8.0 * 10^3) \\ &= 800,000 \text{ PSI} \end{aligned}$$

ซึ่งในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวค่าสำหรับ Elinvar และ NI - Span - C จะคงที่

ถ้าส่วนผสมเคมีเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ยังส์โมดูลัสเปลี่ยนไปด้วย ถ้าไม่มี Intermetallic compounds การแปรผันของยังส์โมดูลัสเนื่องจากส่วนผสมเปลี่ยนไปนั้น จะเป็นแนวเส้นตรงตัดข้ามแผนการณีสมดุลย์ เช่น การณีสารละลายของแข็งโมลิบดีนัม-ทังสเตน (ดูรูป 3.3 a) และ

ระบบยูเทคติกของตะกั่วดีบุก (รูปที่ 3.3 b) ถ้าในระบบมี Intermetallic compound กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างยังส์โมดูลัสและส่วนผสมจะไม่ต่อเนื่อง ดังกรณีของระบบแมกนีเซียม-ดีบุก (รูปที่ 3.3 c)

### 3.2 การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation)

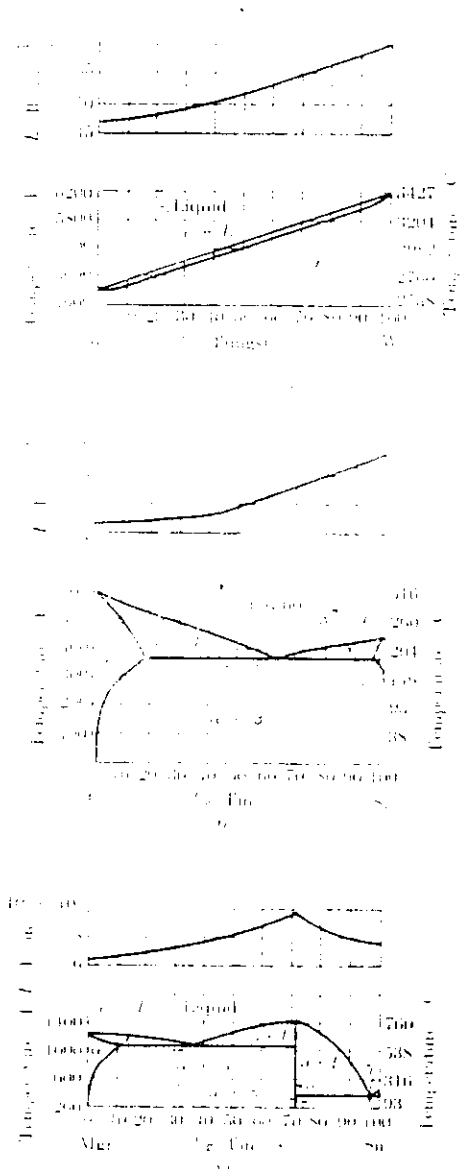
ถ้าโลหะได้รับแรงเกินกว่าช่วงยืดหยุ่นโลหะนั้นจะไม่กลับสู่สภาพเดิมอีก และจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation or Plastic flow) ขึ้นในโลหะภายใต้แรงนั้น ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมเกิดการเคลื่อนไหวแทนที่อะตอมอื่นภายในเกรน

ตัวอย่างการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโลหะก็คือ การขึ้นรูป เช่น การกดอัดขึ้นรูปส่วนต่างๆของเครื่องจักร, การรีดขึ้นรูป, การม้วนโลหะแผ่น, การตีลวดและการตีขึ้นรูป

การเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในผลึกเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ การเลื่อน (slip) และทวินนิง (Twinning)

#### 3.2.1 การเลื่อน (SLIP)

เมื่อวัสดุเหนียวได้รับแรงกระทำเกินช่วงยืดหยุ่นจะเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวร ดังรูปที่ 3.4 เป็นผลึกเดี่ยวของสังกะสีที่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างไปเมื่อนำไปดึง



รูปที่ 3.3 การแปรผันของยังส์โมดูลัสเนื่อง  
จากส่วนผสมเคมี

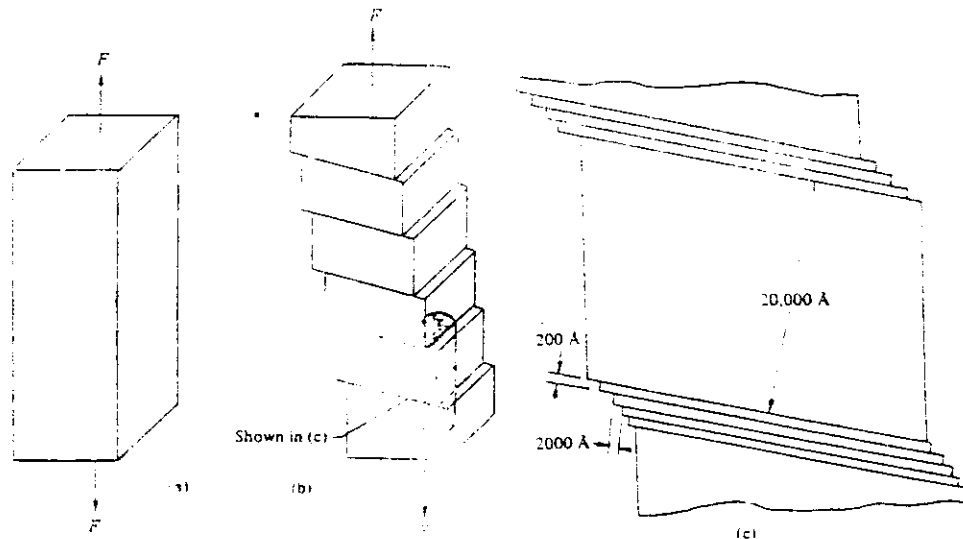
- a. ระบบสารละลายของแข็ง
- b. ระบบยูเทคติก
- c. ระบบ Intermetallic compound



จากรูปจะเห็นว่าผลึกจะเกิดการเลื่อนผ่านซึ่งกันและกัน และบริเวณที่เลื่อนผ่านกันนั้นจะมีลักษณะเป็นแถบขนาดเล็กละเอียด

### รูปที่ 3.4 การเลื่อนในผลึกเดี่ยวของสังกะสี

จากรูปที่ 3.5 เป็นผลึกเดี่ยวเมื่อได้รับแรงในรูป a ผิวผลึกยังเรียบอยู่ เมื่อเพิ่มแรงมากขึ้นจะเกิดความเค้นสูงกว่าช่วงยืดหยุ่น จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร โดยระนาบผลึกจะเกิดการเลื่อนผ่านกัน มองเห็นเป็นเส้นเรียกว่า เส้นเลื่อน (Slip) (รูป b) ผลึกทั้งหมดจะเกิดการเลื่อนซึ่งกันและกันตามจำนวนระนาบที่ขนานกันเมื่อเอาแรงกระทำออกก็จะยังปรากฏเป็นเส้นเลื่อนอยู่เช่นเดิม จึงถือว่าเป็นการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงตรวจสอบจะพบว่าการเลื่อนไม่ได้เกิดขึ้นเพียงระนาบเดียวเท่านั้น แต่เกิดขึ้นกับระนาบจำนวนมากในบริเวณแคบๆ ระนาบเลื่อนที่อยู่ใกล้ชิดกันนั้นเรียกว่าแถบเลื่อน (Slip band) (ดูรูป c)

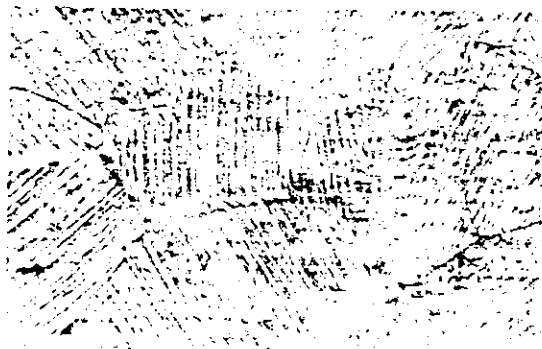


### รูปที่ 3.5 การเกิดแถบเลื่อน (Slip band) ขณะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

- ผลึกเดี่ยวภายใต้แรงดึง
- แถบเลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดความเค้นมากกว่าช่วงยืดหยุ่น
- ขยายบริเวณแถบเลื่อนในรูป b

วัสดุที่มีหลายผลึกก็จะเกิดในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ 3.6 เป็นงานอดูมิเนียมที่เกิดจากการเลื่อนอย่างถาวร แต่ละเกรนจะมีเส้นขนานกันมากมาย เส้นขนานเหล่านี้เรียกว่าเส้นเลื่อน

(Slip line) หรือแถบเลื่อน (Slip band) บางเกรนจะมีเส้นเลื่อนอยู่ 2 กลุ่มและจะไม่เกิดตลอดชิ้นงาน แต่จะหยุดอยู่แค่ขอบเกรน ทั้งนี้เพราะว่าแต่ละเกรนมีทิศทางการเรียงตัวต่างกันและกลุ่มของระนาบเลื่อนในแต่ละเกรนจะไม่อยู่ในเส้นตรงเดียวกัน



เมื่อสังเกตดูกลไกของการเลื่อนจะเห็นว่ามีความแข็งแรงของระนาบเลื่อนออกได้ 2 แรงคือ และ โดยแรงจะมีทิศทางขนานกับแนวระนาบเลื่อน ส่วนแรง จะตั้งฉากกับระนาบเลื่อน

รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในผลึกออลูมิเนียมโดยเกิดการเลื่อนขึ้นภายในแต่ละเกรน (ขยาย 60 เท่า)

เมื่อสังเกตดูกลไกของการเลื่อนจะเห็นว่ามีความแข็งแรงของระนาบเลื่อนออกได้ 2 แรงคือ และ โดยแรงจะมีทิศทางขนานกับแนวระนาบเลื่อน ส่วนแรง จะตั้งฉากกับระนาบเลื่อน



เป็นมุมระหว่างระนาบเลื่อนและระนาบในแนวนอนเห็นว่า ก็คือแรงเฉือน (Shear force) บนระนาบเลื่อนและเป็นแรงที่ตั้งฉากกับแรงเฉือน

จากรูปจะเห็นได้ว่า

$$F_s = F \cos \phi \dots\dots\dots(1)$$

$$F_n = F \cos \phi \dots\dots\dots(2)$$

$$\phi = 90^\circ$$

$$\phi + \phi = 90^\circ$$

รูปที่ 3.7 ผลึกท่อนล่างสุด

ในรูป 3.5 b แรงดึงบน

ผิวหน้าสามารถแตกออกได้ สมการที่ 1 เป็นสภาวะง่ายๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับแรงดึงระนาบต่างๆ 2 แรงคือ  $F_s$  และ  $F_n$  แรงเฉือน ภายต่างๆของผลึกจะได้รับทั้งแรงดึงและแรงเฉือนและมีขนาดบนระนาบเลื่อนขึ้นอยู่กับ ขึ้นอยู่กับแรง ที่ให้แก่ผลึกและตำแหน่งของระนาบที่ทำมุม

ความเค้นเฉือนและมุม  $\phi$  ตัวอย่าง ผลึกเดี่ยวของอลูมิเนียมยาว 6 นิ้ว มีพื้นที่หน้าตัด 2 ตารางนิ้ว มีค่าทิศทางตามแนวแกนคือทิศทาง {100} ดังรูป ถ้าผลึกนี้ได้รับแรง 500 ปอนด์ตามค่าทิศทาง {100}

- ก. จงหาแรงเฉือนระนาบ (110) ในทิศทาง [100]
- ข. จงหาความเค้นเฉือน (shear stress) บนระนาบ (110) ในทิศทาง [110]

วิธีทำ รูปแรกแสดงผลึกของอลูมิเนียมเมื่อได้รับแรง

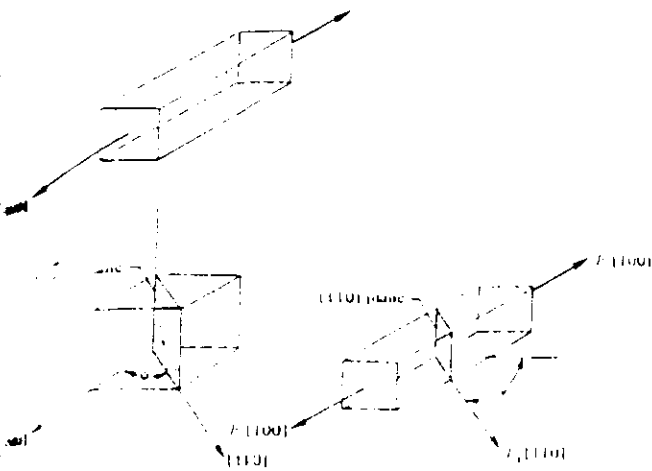
รูปที่สอง แสดงหน่วยเซลล์ fcc ของ และแสดงระนาบพร้อมทิศทางที่โจทย์กำหนด

รูปที่สาม แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง

แรงเฉือน (F) และแรงกระทำ (F) มุม ในรูปที่สอง จะมีค่าเท่ากับ 45°

ก. จากสมการ 1

$$\begin{aligned}
 F_s &= F \cos \\
 &= 500 \cos 45^\circ \\
 &= 353.3 \text{ ปอนด์}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.8

ข. หากความเค้นเฉือน (τ) บนระนาบในทิศทาง [110]

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Shear force}}{\text{Shear area}} \\
 &= \frac{\text{แรงเฉือน}}{\text{พ.ท.ที่ได้รับแรงเฉือน}} \\
 &= \frac{F_s}{A_{\text{shear}}}
 \end{aligned}$$

Ashear เป็นพื้นที่ที่ได้รับแรงเฉือนของระนาบ (110) ซึ่งขึ้นอยู่กับหน้าตัดของแท่งงาน และ มุมว่าแรงกระทำและทิศทางการเฉือน ให้ A = พ.ท.หน้าตัดของแท่งงาน

จากรูปที่ 3.8 แสดงว่า

$$\begin{aligned}
 A_{\text{shear}} &= \frac{A}{\cos} \\
 \text{ดังนั้น} &= \frac{F_s}{A/\cos} = \frac{F_s \cos}{A} \dots\dots\dots 3. \\
 &= \frac{(353.3)(0.707)}{2} \\
 &= 125 \text{ PSI}
 \end{aligned}$$

3.2.1.1 กลไกของการเลื่อน

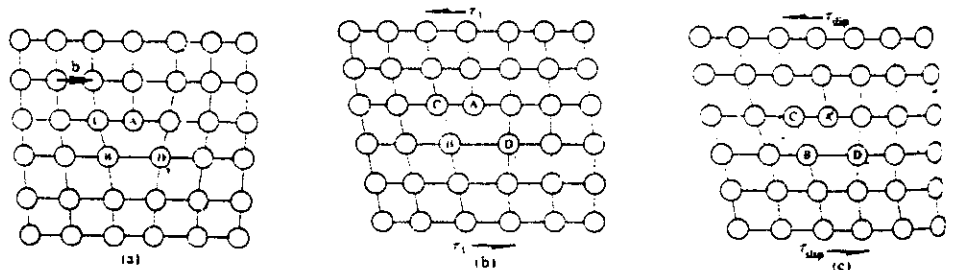
เมื่อวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรจะเกิดการเลื่อน (Slip) จากที่กล่าวมาข้างต้น



เห็นว่าการเลื่อนเป็นผลลัพธ์เนื่องจากความเค้นเฉือน ก็ไม่สามารถทำให้ทุกระนาบของอะตอมเลื่อนผ่านกันได้ เพราะวัสดุเองก็มีความต้านแรงเฉือน (Shear strength) ต่อด้านไว้เช่นเดียวกัน

การเลื่อนมีสาเหตุเนื่องมาจาก Edge dislocation จากรูปที่ 3.9 , a แสดงระนาบของอะตอมที่มี dislocation เกิดขึ้น ลองพิจารณาอะตอม A, B, C, และ D เมื่อผลึกได้รับความเค้น (รูป b) อะตอมจะจัดเรียงตัวกันใหม่โดยอะตอม c จะเคลื่อนไปทางซ้ายมือ ทำให้ระยะระหว่างอะตอม C และ B เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พลังงานของแรงยึดเหนี่ยว B - C จะเพิ่มขึ้นด้วย ขณะเดียวกันระยะทางระหว่าง A - B ลดลง (อะตอม A - B เคลื่อนเข้าใกล้กัน) แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง A - B จึงแข็งแรงขึ้น พลังงานที่ต้องการเพื่อผลักให้อะตอม B - C ออกจากกันจะต้องมากกว่าพลังงานที่จะผลักอะตอม B ไม่ให้เข้าใกล้กัน จึงจะทำให้อะตอม A - B เข้าใกล้กันได้ เมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นจะได้ลักษณะดังรูป C ซึ่งระยะ A - B เท่ากับระยะ B - C ถ้าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยจะได้ลักษณะดังรูป d ซึ่งระยะระหว่าง B - A จะสั้นกว่าระยะระหว่าง B - C อะตอม A จึงยึดเหนี่ยวกับอะตอม B ส่วนอะตอม C จะเป็นส่วนล่างสุดของระนาบส่วนเกิน (Extra half plane) และ dislocation เคลื่อนไป 1 ช่องอะตอม ความเค้นเฉือนเกิดขึ้นผลึกอย่างต่อเนื่องกัน จะทำให้ระนาบอะตอมเลื่อนออกจนปรากฏขึ้นบนผิวงาน ระนาบที่เกิดการเลื่อน เรียกว่า Slip planes รูป e แสดง dislocation หลังจากเกิดการเลื่อนตัวไปจนถึงผิวแล้ว ทำให้ผิวงานเกิดเป็นชั้น เรียกว่า Slip plane โดยส่วนที่ยื่นออกไปจะเท่ากับ Burgers vector ของ dislocation

รูปที่ 3.9 การเลื่อนที่เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของ Dislocation



a) Edd dislocation

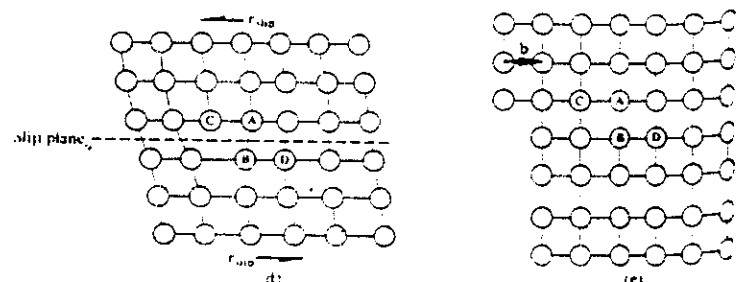
ในผลึก b คือ Bruger vector

b. ความเค้น ทำให้อะตอม A และ B เข้าใกล้กัน

c. ความเค้นเพิ่มขึ้น  $AB = BD$

d. Dislocation เคลื่อนไปทางซ้ายมือและจะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ เมื่อมีแรงกระทำ

e. Dislocation ปรากฏที่ผิวหน้าของผลึก



รูปที่ 3.10 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของ dislocation และ Burgers vector ทั้ง 2 ต่างก็ตั้งฉากกับ dislocation line (เป็น Edge dislocation และถ้า Burgers vector ก็ตั้งฉากกับ dislocation line

และตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่จัดเป็น Screw dislocation มีบางที่เกิดขึ้นทั้ง 2 อย่าง เรียกว่าแบบผสม (Mixed location)








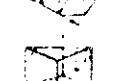



รูปที่ 3.11 (a) เป็นผลึกที่สมบูรณ์และถูกระนาบอื่นไปตัด เกิดการเลื่อนไปเป็นระยะเดียวกับ Burgers (b) ดังรูป โครงสร้างที่ได้จะเกิด Edge dislocation ขึ้นที่ผิวด้านหนึ่ง อีกด้านเป็น screw dislocation ส่วนจุดอื่นบนเส้นเป็นแบบผสม (Mixed dislocation)

Dislocation line (รูปที่ 3.11 , b) เป็นขอบระหว่าบริเวณที่อะตอมอยู่คงที่และจำนวนอะตอมที่เลื่อนไป

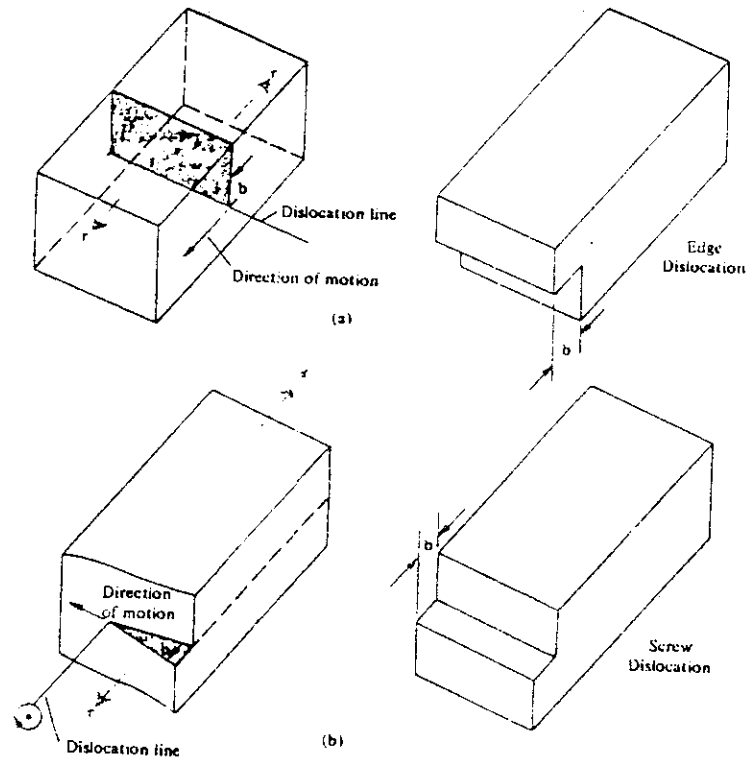
### 3.2.1.2 ระบบการเลื่อน (SLIP SYSTEM)

จะหา slip system ได้เมื่อกำหนดระนาบเลื่อนและทิศทางของการเลื่อน วัสดุที่มี slip system มาก จะเกิด dislocation มากกว่าวัสดุที่มี Slip system น้อย

ตารางที่ 3.2 แสดง Slip system ในโครงผลึกต่างๆ

Structure	Slip plane	Slip direction	Number of slip systems	
fcc	{(111)}	{[110]}	$4 \times 3 = 12$	
bcc	{(110)}	{[111]}	$6 \times 2 = 12$	
	{(211)}	{[111]}	$12 \times 1 = 12$	
	{(321)}	{[111]}	$24 \times 1 = 24$	
hcp	{(0001)}	{[1120]}	$1 \times 3 = 3$	
	{(1010)}	{[1120]}	$3 \times 1 = 3$	
	{(1011)}	{[1120]}	$6 \times 1 = 6$	
NaCl	{(110)}	{[110]}	$6 \times 1 = 6$	
	{(001)}	{[110]}	$6 \times 1 = 6$	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	{(0001)}	{[1120]}	$1 \times 3 = 3$	
	{(1010)}	{[1120]}	$3 \times 1 = 3$	

ระบบการเคลื่อนที่แสดงในตาราง เป็นเพียงระบบที่เกิดในอุณหภูมิต่ำเท่านั้น (เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีระบบการเคลื่อนที่มากขึ้นด้วย)



รูปที่ 3.10 การเคลื่อนที่ของ Edge และ Screw dislocation เมื่อได้รับความเค้นเฉือน (Shear stresses)

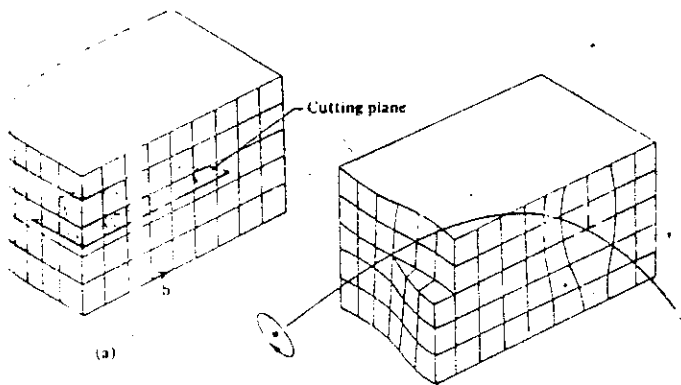
a) Edge dislocation      b) Screw dislocation

\* dislocation line หมายถึงแนวเส้นที่เกิด dislocation (บริเวณรอยต่อระหว่างผลึกที่เกิดการเคลื่อนและไม่เกิดการเคลื่อน,  $b$  ก็คือ Burger vector, direction of motion หมายถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของ dislocation

และจะต้องต่อเนื่องผ่านผลึกออกไป นั่นคือ dislocation line จะไม่สิ้นสุดอยู่ภายในผลึกแต่จะเกิดเนืองออกไปสิ้นสุดอยู่ที่ผิวผลึกหรือเกิดเป็นห่วง (closed loop) ภายในผลึกนั้น ดังรูปที่ 3.12 แสดง dislocation loop ภายในผลึกโดยแสดงผลึกไว้เพียงครั้งเดียว

ผลึกที่แสดงเอาไว้ในรูป ที่จริงแล้วเป็นชิ้นเดียวกันแต่ตัดแยกออกมาให้เห็นชัดเจน จะเห็นว่าชิ้นขวามือจะมี loop อยู่หนึ่งเส้น (1/4) และมีลักษณะเหมือนกับในรูปที่ 3.11 b เมื่อ

dislocation loop ขยายผ่านชั้นซ้ายมือ จะทำให้เกิด Edge dislocation ขึ้น แต่ในชั้นขวามือ ระยะเวลาเกินจะอยู่ข้างบนระนาบเลื่อน และในชั้นซ้ายมือระยะเวลาเกินจะอยู่ด้านล่างจึงต้องกำหนดเครื่องหมายสำหรับ dislocation ขึ้นมา

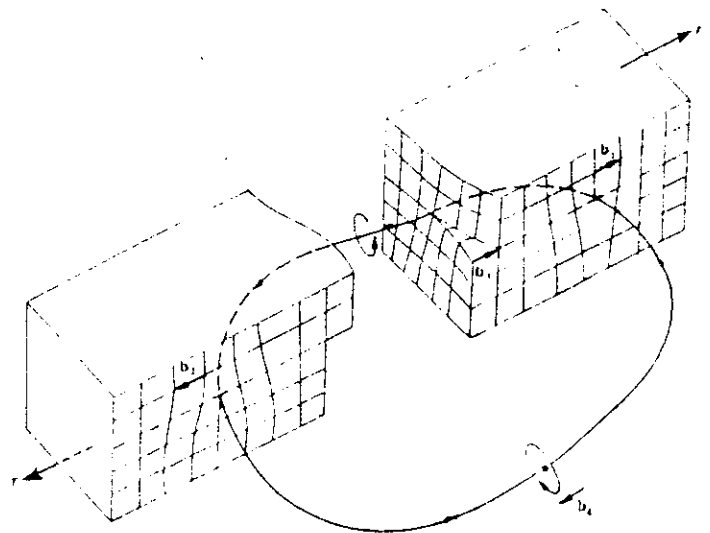


รูปที่ 3.11 Mixed dislocation

- a. ผลึกสมบูรณ์และระนาบตัด
- b. แสดง dislocation line ด้านหนึ่งจะเป็นแบบ Edge อีกด้านหนึ่งจะเป็นแบบ Screw นอกนั้นเป็นแบบผสม

เมื่อให้ความเค้นเลื่อนแก่

Burger vector  $b_1$  จะเลื่อนทางขวา ขณะที่ส่วนอื่นเคลื่อนที่ไปทาง จึงทำให้มีเครื่องหมายตรงกันข้าม



รูปที่ 3.12 dislocation loop

เมื่อกำหนดให้ทิศทางของ dislocation loop ดังแสดงในรูป Burgers circuit ที่ผิวผลึกขวามือจะเป็นลักษณะคล้ายเกลียวหมุนกันเข้าไปทางขวามือตาม dislocation line จะได้ทิศทางของเป็นบวก (T) เป็นเครื่องหมายแทน Edge dislocation ที่เกิดบนระนาบเลื่อนถือเป็นบวก และ T เครื่องหมายแทน Edge dislocation ที่เกิดได้ระนาบเลื่อนถือเป็นลบ) ส่วน Burger vector ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามจึงถือเป็นลบ ส่วน Burgers vector ของ Screw dislocation คือ  $b_3$  คำนี้ถึงส่วนที่ตัดออกไป จะได้ Burgers vector  $b_4$  ส่วนทิศทางกับ  $b_3$

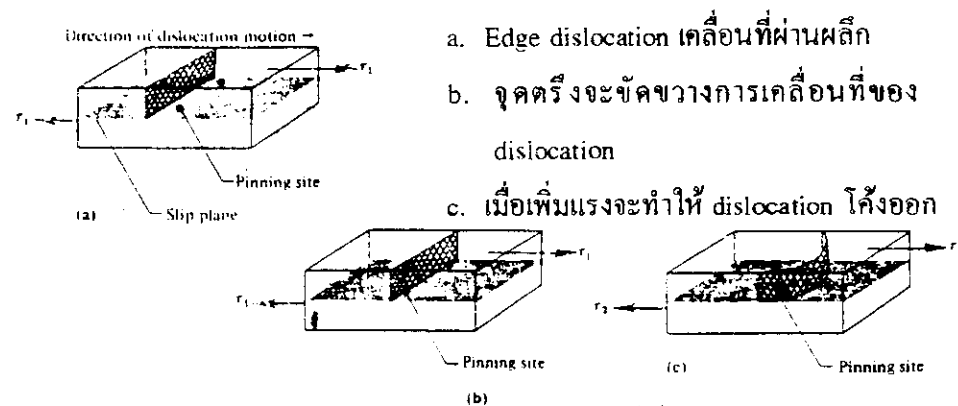
### 3.2.1.3 แหล่ง Dislocation

โลหะแต่ละชนิดจะมี dislocation อยู่ประมาณ 10 - 10 dislocation/cm อรามิคจะมี dislocation ต่ำกว่า ในของแข็งที่มีการยึดหยุ่นมากๆ จะมี dislocation น้อย จึงไม่พอที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรได้ เมื่อของแข็งได้รับแรงจนเกินช่วงยืดหยุ่นและเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างถาวรนั้นจะมีจำนวน dislocation เพิ่มขึ้น เมื่อตรวจสอบดูด้วยกล้อง

จุลทรรศน์จะเห็นว่าความหนาแน่นของ dislocation จะเพิ่มเมื่อวัสดุเปลี่ยนรูป ดังนั้นแหล่งกำเนิดของ dislocation ต้องอยู่ในของแข็งนั่นเอง ซึ่งเรียกว่า Frank-Read Source

ในกรณีของ Frank-Read Source ภายในผลึกจะต้องมีบริเวณหนึ่งที่ dislocation ไม่สามารถเลื่อนผ่านไปได้ เรียกว่าจุดตรึง (Pinning site) ซึ่งจะเป็นตัวคอยขัดขวางการเคลื่อนที่ของ dislocation จุดตรึงอาจจะเป็นบริเวณที่มีอะตอมสารมลทินสะสมกันอยู่เป็นจุดที่ dislocation ตัด หรือเป็นบริเวณที่มีเฟสที่สองอยู่ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในตอนหลัง เนื่องจากว่าจุดตรึงที่มีอยู่ในผลึกจะทำให้ dislocation เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ดังนั้นของแข็งที่มีจุดตรึง ดังกล่าวจะมี flow stress สูงขึ้น ให้จุดจำนน (yield point) สูงขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าควบคุมจุดตรึงได้ ก็สามารถควบคุมคุณสมบัติทางวัสดุได้เช่นกัน

รูปที่ 3.13 การขัดขวางการเคลื่อนที่ของ dislocation



- Edge dislocation เคลื่อนที่ผ่านผลึก
- จุดตรึงจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของ dislocation

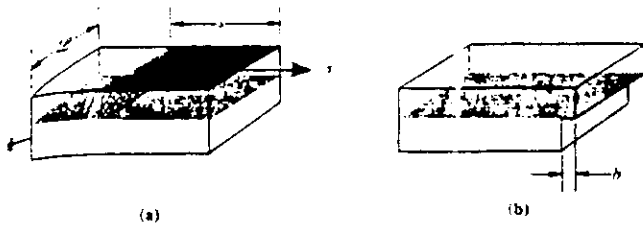
c. เมื่อเพิ่มแรงจะทำให้ dislocation โค้งออก

รูปที่ 3.13 แสดงระนาบส่วนเกินของ Edge dislocation ที่เลื่อนผ่านผลึก โดยแรงเฉือน (T1) เป็นตัวกระทำ เมื่อเคลื่อนที่มาถึงจุดตรึง dislocation จะไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้อีก นอกจากจะเพิ่มแรงเฉือน เป็น T2 (รูป c) dislocation จะพยายามเคลื่อนที่ต่อไปแต่ไปในบริเวณที่ไม่มีจุดตรึงเลยโค้งออก ถ้าเพิ่มแรงมากขึ้น dislocation จะยิ่งโค้งมากขึ้น

ดังนั้นจะเห็นว่าเหตุที่ dislocation โค้งออกไปนั้น เนื่องจากมีแรงกระทำซึ่งเป็นแรงเฉือน และใช้สัญลักษณ์เป็น T

จากรูปที่ 3.14 ให้ Edge dislocation ยาว อยู่ห่างจากขอบของผลึก = (รูป a) ส่วนในรูป b เมื่อ dislocation เคลื่อนที่ออกไปจากผลึกแล้ว และเกิดเป็นชั้นที่ผิวผลึก ที่ต้องการเพื่อให้เกิดเป็นชั้นขึ้นที่ผิวผลึกสามารถหาได้ 2 วิธี ซึ่งจะพิจารณาทั้งสองวิธี เพื่อหาแรงบน dislocation

จากรูปที่ 3.14 พื้นที่ที่ต้องรับแรงเฉือนคือ S โดยพื้นที่ดังกล่าวต้องเคลื่อนผ่านกันและระยะทาง b ดังนั้น Workdone ที่ใช้เคลื่อน dislocation ไปที่ผิวงานคือ  $\tau fsb$

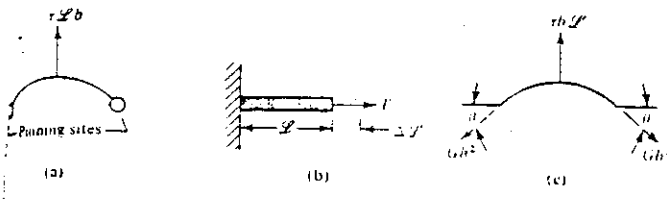


รูปที่ 3.14 แผนภาพที่ใช้หาแรงบน dislocation

ให้  $f$  เป็นแรงที่กระทำบน dislocation  
 Workdone ที่จะเคลื่อน dislocation  
 ผ่านผลึกไปคือ  $fs$   
 ทั้งสองปริมาณที่กล่าวมาก็คืองานที่ใช้  
 ในการเคลื่อน dislocation ไปยังผิวจะได้ว่า

$$fs = \tau fbs$$

$$f = \tau \zeta b$$

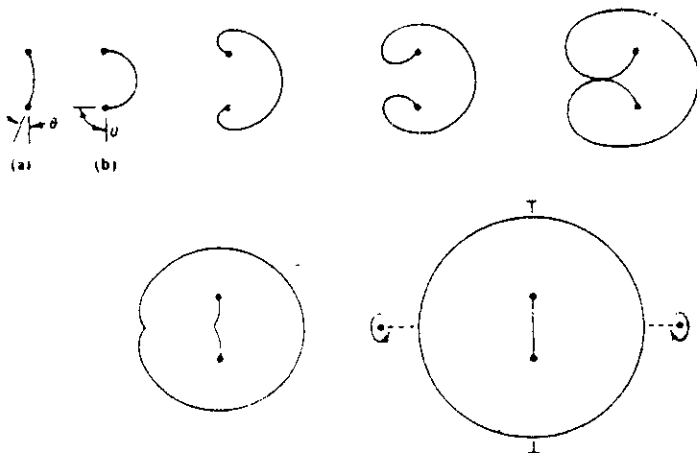


รูปที่ 3.15 แรงบน dislocation

เมื่อ  $f$  เป็นแรงบน dislocation  
 $\tau$  เป็น applied shear stress  
 รูปที่ 3.15 เป็นเพียงบางส่วนของ  
 dislocation ที่อยู่ติดระหว่างจุดตรึง แรง  
 $\tau \zeta b$  ที่กระทำบน dislocation จะเท่ากับแรง

ขัดขวางของจุดตรึงและมีทิศทางตรงกันข้ามเพราะ dislocation ไม่เคลื่อนที่

เรากำลังพิจารณาการเคลื่อนที่ของ dislocation ในวัสดุเมื่อ Shear stress เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ dislocation โค้งออกไป (ดูรูปที่ 3.16) จนกลายเป็น dislocation loop โดยจะขยายออกไป และเกิดขึ้นมาใหม่เรื่อยๆ จึงถือว่าเป็นแหล่งของ dislocation ชนิดหนึ่ง



รูปที่ 3.16 แสดง Frank-Read source ของ dislocation

- a. จุดตรึง 2 จุดจะขัดขวาง dislocation เอาไว้และเริ่มโค้งออก เมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น
- b. ความเค้นเฉือนเพิ่ม dislocation ยิ่งเพิ่ม จนกระทั่งมุม  $\theta = 90^\circ$  และเมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นอีก dislocation ก็ยิ่งโค้งออกจนกลายเป็นห่วงของ dislocation แรงให้แก่ วัสดุ และยังทำให้เกิด dislocation ที่สามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของ dislocation อื่นๆ ได้

ถ้า dislocation ทั้งหมดที่เกิดขึ้นไม่ปรากฏที่ผิว แสดงว่ายังคงเหลืออยู่ในวัสดุ ความหนาแน่นของ dislocation ในวัสดุจะเพิ่มขึ้น จุดตรึงหรือ Pinning site ที่มีอยู่ภายในวัสดุจะช่วยลดการเคลื่อนที่ของ dislocation เพิ่ม Flow stress เพิ่มจุดจำนน เพิ่มความแข็งแรง

### 3.2.1.4 การปีนและการกระโดดข้าม (CLIMB AND CROSS SLIP)

เมื่อในผลึกมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของ Dislocation มากๆ Dislocation จะหลีกเลี่ยงจากระนาบเลื่อนเดิมไปสู่ระนาบเลื่อนใหม่ก็ได้ เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้โดยสะดวก เปลี่ยนระนาบเลื่อนของ dislocation เกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ Climb และ Cross slip

Climb เกิดในกรณีของ Edge dislocation

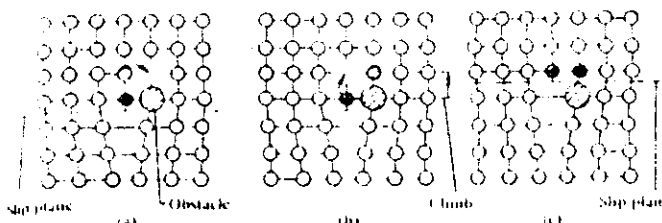
Climb slip เกิดในกรณีของ Screw dislocation

Edge dislocation มี Burgers vector ตั้งฉากกับ dislocation line จะอยู่ในระนาบเลื่อนนั้นอาจเปลี่ยนแปลงไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.17

ในรูป a แสดงลักษณะของ Edge dislocation เมื่อเจอกับสิ่งกีดขวางโดยสมมุติว่าบนระนาบเลื่อนจะเคลื่อนไปทางขวามือ สิ่งกีดขวางที่มีอยู่จะเป็นเสมือนจุดครึ่ง dislocation จึงเคลื่อนที่ไปได้ยาก จะเคลื่อนที่ต่อไปได้ ก็ต่อเมื่อเปลี่ยนระนาบเลื่อนใหม่เท่านั้น แต่ในกรณีนี้บริเวณใกล้ๆ ระบายส่วนเกินจะต้องมีที่ว่างอยู่ด้วย เช่นในรูป a จะมีที่ว่างอยู่เหนือจุดครึ่ง เมื่อ dislocation เคลื่อนมาติดลอบอยู่จุดครึ่งอะตอมหนึ่งในระนาบส่วนเกินจะย้ายไปยังตำแหน่งที่ว่างนั้น หรืออาจกล่าวได้ว่าอะตอมนั้นเคลื่อนที่ไปทางขวา หรือจุดว่างเคลื่อนไปทางซ้าย แต่โดยที่จริงแล้วอะตอมเป็นตัวเคลื่อนทำให้เกิดที่ว่างขึ้นในระนาบส่วนเกิน อะตอมที่ส่วนล่างสุดของระนาบส่วนเกินจะเคลื่อนไปแทนจุดว่างที่อยู่ถัดขึ้นไป (รูป b) จุดว่างจะย้ายไปอยู่ส่วนล่างของระนาบส่วนเกิน ทำให้ระนาบเลื่อนเคลื่อนสูงขึ้นเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอม (รูป c) และสามารถเคลื่อนที่ไปบนระนาบใหม่ได้อย่างง่ายดาย ขบวนการดังกล่าวเรียกว่า Dislocation climb

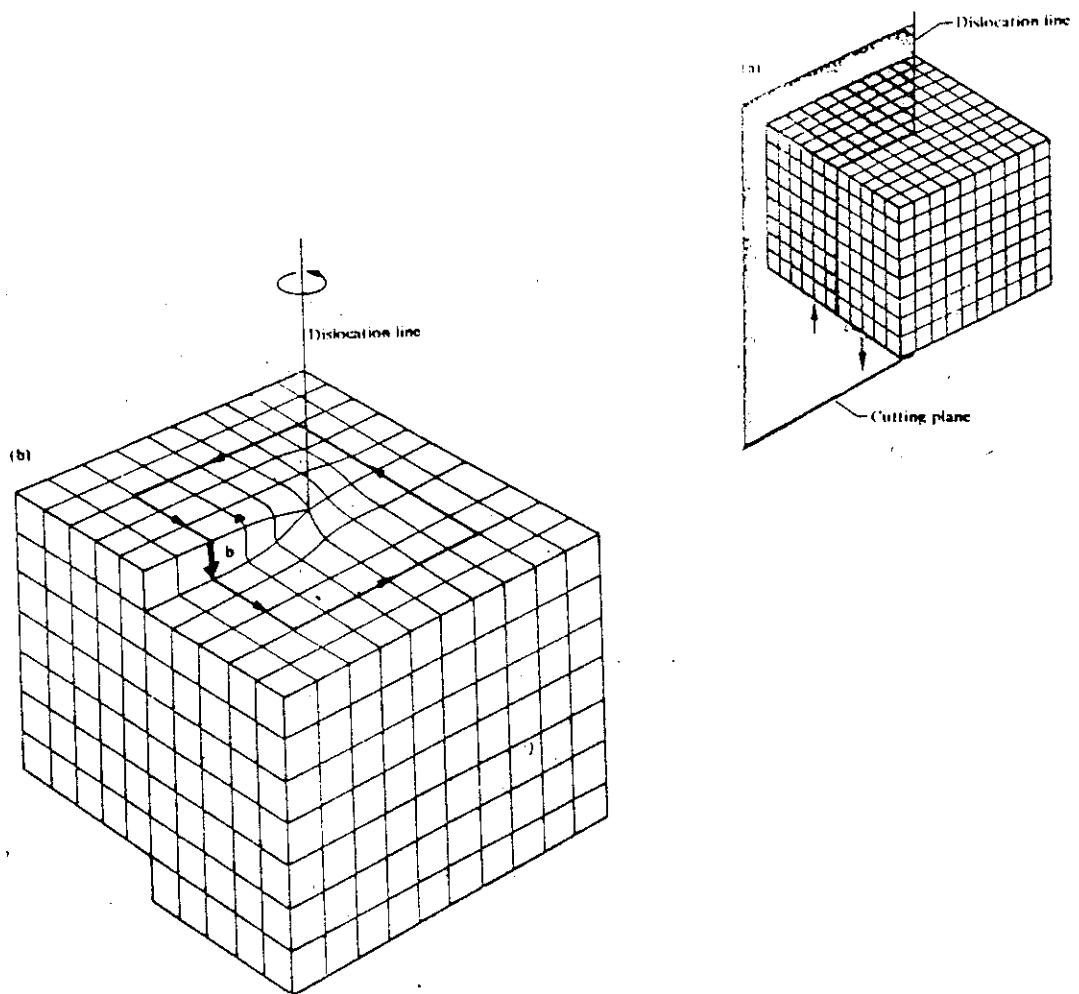
การเกิด Dislocation climb จะต้องมีที่ว่างอยู่ด้วย ซึ่งจำนวนที่ว่างจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม และที่ว่างเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้น Dislocation climb จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อุณหภูมิสูงจะเกิดง่าย

เมื่อ Screw dislocation เจอกับสิ่งกีดขวางจะสามารถหลีกเลี่ยงได้ง่ายกว่า Edge dislocation Screw dislocation จะมี Burgers Vector ขนานกับ dislocation ดังรูป 4.5 ดังนั้นระนาบเลื่อนของ Screw dislocation จึงไม่จำเป็นต้องขนานดังเช่นในกรณีของ Edge dislocation Screw dislocation สามารถหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางได้ โดยขบวนการที่เรียกว่า Cross-slip



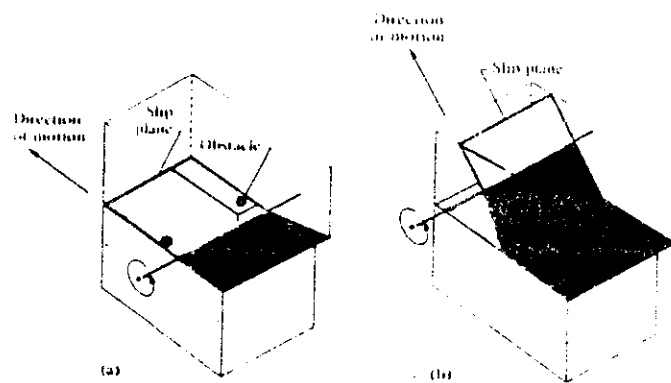
จากรูปที่ 3.19 Screw dislocation จะเคลื่อนที่ได้ง่ายตามระนาบเลื่อน โดยมีจุดตัดค้ำเป็นสิ่งกีดขวางและสามารถหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางนี้ไปได้ถ้า dislocation เปลี่ยนระนาบใหม่

รูปที่ 3.17 การเกิด dislocation climb a. Edge dislocation ถูกครึ่งเอาไว้ b. ที่ว่างเคลื่อนย้ายมายังระนาบเลื่อน c. ที่ว่างเคลื่อนไปถึงส่วนล่างของระนาบส่วนเกิน ทำให้สามารถเกิดการเคลื่อนต่อไปได้ง่ายดายแม้ว่าจะมีสิ่งกีดขวางอยู่ก็ตาม



รูปที่ 3.18 การเกิด Screw dislocation

รูป b. Screw dislocation จะสามารถข้ามสิ่งกีดขวางจากระนาบเลื่อนหนึ่งไปยังระนาบหนึ่ง ระนาบที่ dislocation เคลื่อนย้ายไปนั้นจะตัดกับกับระนาบเลื่อนเดิม แต่ความเค้นเฉือนมากกว่า



รูปที่ 3.19 การเกิด Cross slip



3.2.1.5 การเกิด STRAIN HARDENING ของโลหะ

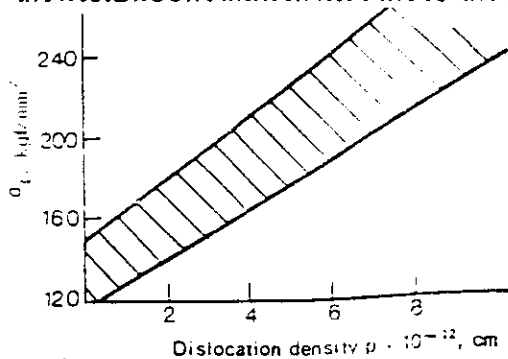
จากแผนกภาพความเค้น-ความเครียด ถ้าแรงกระทำไม่เกินจุดจำนน (yield line) พอลอแรงออกลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปจะกลับสู่สภาพเดิม แต่ถ้าแรงกระทำมากกว่า yield limit เกิดความเค้นเท่ากับ ซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรแล้ว พอลอแรงออกโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปจะไม่คืนสู่สภาพเดิม และจะมีการเปลี่ยนแปลงคค้ำงอยู่เท่ากับ  $\alpha$  ถ้าโลหะได้รับความเค้นซ้ำอีกจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรน้อยลง และจุด yield limit จะเพิ่มขึ้นจนถึง ถ้าจะให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรขึ้น ต้องใช้แรงมากขึ้นแสดงว่าโลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การที่โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหลังจากเกิดเปลี่ยนรูปถาวรนี้เรียกว่า Strain hardening

ดังได้กล่าวในตอนต้นแล้วว่า การเปลี่ยนรูปถาวรเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ dislocation

Dislocation เพียงคู่เดียวที่เคลื่อนที่ไปจะทำให้เกิด dislocation ใหม่ขึ้นมาหลายร้อยคู่ จึงทำให้ dislocation ในโลหะมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ทำให้โลหะมีความแข็งแรงสูงขึ้น (ความแข็งแรงประลัยหรือ Ultimate strength เพิ่มขึ้น ดูรูปที่ 3.20)

การแปรผันของคุณสมบัติเชิงกลของทองแดงและอลูมิเนียม เนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวร แสดงไว้ในรูปที่ 3.20 เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น (และพื้นที่หน้าตัดลดลง) ความแข็งแรงประลัย ( $\sigma_t$ ) จะเพิ่มขึ้นและค่า elongation ( $\delta$ ) ลดลง นอกจากนี้การเปลี่ยนรูปถาวรยังเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอีกหลายอย่างในโครงสร้างของโลหะ

การเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรในโลหะจะทำให้เกรนบิดเบี้ยวและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ โดยเกรนจะเบนออกจากแนวการเรียงตัวของเกรนเดิมจนกระทั่งแกนของเกรนที่มีความแข็งแรงสูง

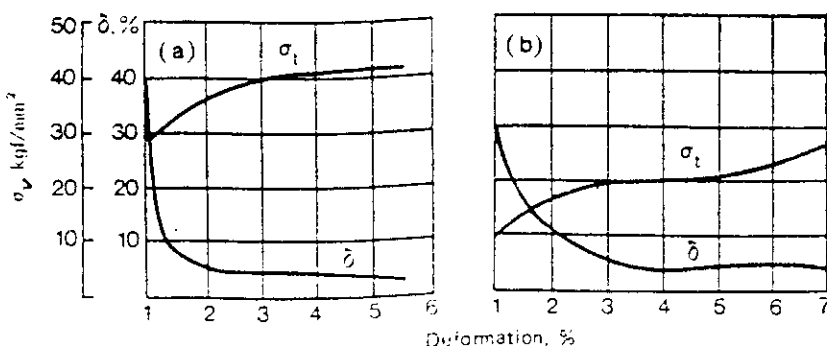


รูปที่ 3.20 อิทธิพลของความหนาแน่นของ Dislocation ที่มีต่อความแข็งแรงของเหล็ก

สุดจะมีทิศทางเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของการเปลี่ยนรูป

เมื่อการเปลี่ยนรูปถาวรเพิ่มขึ้น เกรนจะเปลี่ยนรูปมากขึ้น จนในที่สุดจะเปลี่ยนรูปอย่างสมบูรณ์ 100% โดยเกรนจะมีทิศทางเรียงตัวใหม่เหมือนกัน

การเปลี่ยนรูปถาวรไม่ได้ทำให้เกรนละเอียดขึ้น แม้เกรนจะเปลี่ยนรูปไป จากลักษณะ



รูปที่ 3.21 อิทธิพลของการเปลี่ยนรูปถาวรต่อคุณสมบัติเชิงกลของทองแดง (a) และอลูมิเนียม (b)

เดิมที่มีขนาดเท่ากันทุกทิศทาง (Equi-axed) มาเป็นรูปร่างที่แบนออกไปและมีขนาดในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน (Nonequi-axed) แต่ยังมีปริมาตรเท่าเดิม

เมื่อเกิด dislocation ขึ้นในโลหะ ผลึกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนตัวไปแทนที่ผลึกอีกส่วนหนึ่ง ถ้าเกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น ผลึกจะเคลื่อนที่มากขึ้นจนปรากฏเป็นระนาบเฉือนหรือ Shear planes อย่างชัดเจน เมื่อดูจากโครงสร้างจุลภาคจะเห็น Shear planes ดังกล่าวเป็นแนวเส้นอยู่ภายในแต่ละเกรน (รูปที่ 4.5 , b) ซึ่งเรียกว่า (Cherbnov-Luders slip lines หรือ Luders band)

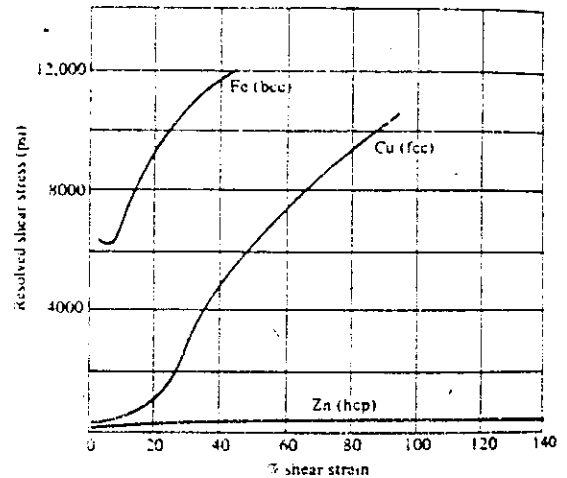
การไหลตัวของผลึกดังกล่าวทำให้โครงสร้างเกรนเปลี่ยนแปลงลักษณะที่เคยเป็นแบบแผ่นโมเสกจะเปลี่ยนไปและการเรียงตัวจะผิดแผกไปจากเดิมมากขึ้น

ความเค้นภายในบริเวณต่างๆ จะเพิ่มขึ้นด้วย

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ โลหะจึงมีความหนาแน่นลดลง เมื่อเกิด deformation มากขึ้น รูปที่ 3.22 แสดงผลจากการทดสอบหาความหนาแน่นของเหล็กบริสุทธิ์ที่นำไปดึงจนขาด โดยบริเวณรอยขาดจะเกิด deformation มากที่สุด (9) และบริเวณใกล้กับปลายที่จับกับแท่งจะไม่เกิด deformation เลย (1) จากค่าความหนาแน่นของแต่ละจุดจะเห็นว่า เดิมเหล็กมีความหนาแน่น 7.870 gm/cm แต่ในบริเวณที่ใกล้เข้าไปหารอยขาดซึ่งแต่ละส่วนจะมี deformation เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นั้นค่าความหนาแน่นจะลดลง โดยบริเวณหมายเลข 9 ซึ่งเกิด deformation มากที่สุดนั้นมีความหนาแน่นลดลงเหลือเพียง 7.735 gm/cm

การที่เหล็กมีความหนาแน่นลดลงเมื่อเกิด deformation มากขึ้นนั้น เนื่องจากภายในเกรนและระหว่างเกรนมีช่องว่างมากขึ้นซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Destruction

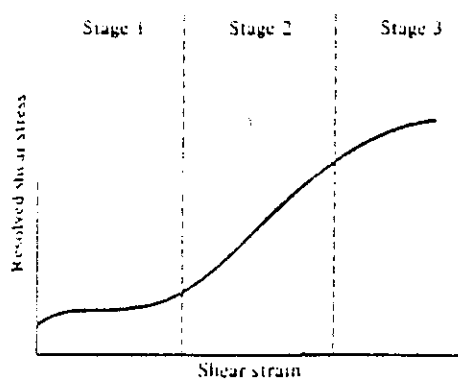
Density	
9	7.735
8	7.842
7	7.846
6	7.850
5	7.856
4	7.863
3	7.861
2	7.869
1	7.870



รูปที่ 3.23 Stress-strain curve ของโลหะบริสุทธิ์ 3 ชนิด

รูปที่ 3.22 อิทธิพลของ Plasticdeformation ที่มีต่อความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบด้วยแรงดึง

จากรูปที่ 3.23 แสดง stress-strain diagram ของ โลหะบริสุทธิ์ 3 ชนิดโดยไม่คำนึงถึงช่วงบริเวณยืดหยุ่น ผลึกเหล่านี้จะมีการเรียงตัวในลักษณะที่ทำให้เริ่มเกิดการเลื่อนขึ้นก่อนในระนาบเลื่อนขึ้นก่อนในระนาบเลื่อนที่เกิดได้ง่ายที่สุด นั่นคือบน Slip system หนึ่งจะมี resolve shear stress เกิดขึ้นมากกว่า Slip system เกิดขึ้นมากกว่า slip system อื่นๆ จากรูปแสดงว่ากราฟขึ้นอยู่กับการสร้างผลึก และการเรียงตัวของผลึก ถ้าผลึกเรียงตัวในลักษณะที่ทำให้เกิดระนาบเลื่อน พร้อมกันหลายระนาบแล้วกราฟจะแตกต่างออกไป รูป 3.24 แสดง stress-strain curve ที่ตัดช่วงจำกัดการยืดหยุ่นออกไป กราฟจะแบ่งเป็น 3 ส่วนแสดงอัตรา Work hardening แตกต่างกันจะหาอัตรา Work hardening ได้เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นจนความเครียดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.24 แสดง Stress-strain curve

ตอนที่ 1 ต่อมาความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพราะ dislocation เกิดการตัดผ่านซึ่งกันและกัน (dislocation interfection และ jog formation) ทำให้อัตรา Work hardening ต่ำ ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของ dislocation เพิ่มขึ้น

ในตอนท้ายของขั้นตอนที่ 1 จะเกิดความเค้นสูงพอ ดังนั้นความเค้นเลื่อนบน slip system หนึ่งจะมีมากกว่าในอีกระบบหนึ่ง จากตาราง 3.2 แสดงว่า slip system ที่ง่ายที่สุดในผลึก fcc จะตัดผ่านซึ่งกันและกัน ดังนั้น dislocation ที่เคลื่อนที่ตามระบบเหล่านี้จะตัดกันด้วย dislocation หลายส่วนจะกลายเป็น Partial dislocation ที่มีลักษณะการเรียงซ้อนกันผิดปกติ ทำให้ dislocation กอรวมกันอยู่บน slip system ทั้งสอง นอกจากนี้ยังทำให้ dislocation เคลื่อนที่ยากขึ้น

ในขั้นตอนที่ 2 Slip system มีมากขึ้น ซึ่ง Slip system นั้นจะต้องเกิดการเลื่อนได้ง่าย ดังเช่นในผลึก fcc ได้แก่  $(111)$ ,  $[\bar{1}10]$  ซึ่งมีอยู่ 12 ระบบ บริเวณที่เกิด Work

Work hardening ทำให้ความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุ ลักษณะที่เกิดขึ้นในโลหะทั้ง 3 ชนิด (รูปที่ 5.23) จะสามารถอธิบายได้โดยอาศัยรูปที่ 5.24 ดังนี้

3.2.1.6 ผลึก fcc (ทองแดง)

ขั้นตอนที่ 1 จะเกิดการเลื่อนไปได้ง่าย เพราะทองแดงบริสุทธิ์มากจึงมีจุดครึ่งอยู่น้อย เพียงเกิดความเค้นต่ำๆ ก็สามารถทำให้เกิด

dislocation ได้ง่าย อัตราการเกิด work hardening ยังคงที่ ดังแสดงตามกราฟในขั้น

hardening จะมีลักษณะเหมือน เส้นตรงเพราะกราฟของ stress-strain เกือบจะเป็นเส้นตรง อัตรา Work hardening สูงกว่าในขั้นตอนแรก แสดงว่า dislocation เคลื่อนที่ช้าลงเมื่อ ความเครียด (หรือ dislocation density) เพิ่มขึ้น เพราะว่า dislocation เกิดการตัดผ่านกันมากขึ้น

ในขั้นตอนที่ 3 วัสดุจะเกิด Work hardening ต่อเนื่องไปเรื่อยๆ แต่มีอัตราต่ำลง กราฟ ในขั้นตอนนี้จะมีลักษณะโค้งเหมือนฉิวรูปไข่ บริเวณนี้จะมีความเค้นสูงพอที่จะทำให้ Screw dislocation เกิด Cross-slip ไปได้ ในขั้นตอนที่ 3 นี้ dislocation จะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าใน ขั้นตอนที่ 2

### 3.2.1.7 ผลึกหกเหลี่ยม (hcp)

กราฟในรูปที่ 3.23 แสดงว่าผลึกสังกะสี ยังคงอยู่ในขั้นตอนที่ 1 ตลอดเวลาที่ เกิดการเปลี่ยนแปลงระนาบที่จะเกิดการเลื่อนได้ง่ายคือ ระนาบฐาน (Basal plane) เพราะระนาบ ฐานตัดกัน (ตาราง 3.2) การเลื่อนไม่ได้เกิดบนระนาบที่ตัดกัน จึงได้กราฟออกมาดังแสดงในรูป

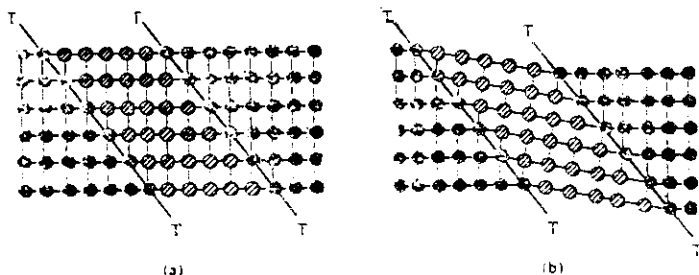
### 3.2.1.8 ผลึก bcc (เหล็ก)

จากตาราง 3.2 แสดงว่า bcc มี slip system จำนวนมาก โดยแต่ละระนาบจะ เกิดการเลื่อนได้ง่ายกว่าระนาบเลื่อนอื่นๆ ถ้า Slip system หลายระบบมีปฏิกิริยามากขึ้น dislocation จะตัดผ่านกันมากยิ่งขึ้น อาจมากกว่าในกรณีของ fcc

อัตราการเกิด Work hardening ในขั้นตอนที่ 1 และ 2 ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ dislocation บน Slip system ที่เกิดการเลื่อนได้ง่ายที่สุด ( $(110)$ ,  $[111]$ ) กับ Slip system ถัดไป ( $(211)$ ,  $[111]$ ) ดังนั้นจะเห็นว่าลักษณะของกราฟในรูปที่ 3.23 ขึ้นอยู่กับการเรียง ตัวของผลึกในตอนต้นของขั้นตอนที่ 2 จะเห็นได้ว่า Work hardening เกิดขึ้นในผลึก bcc เนื่องจาก dislocation ตัดผ่านซึ่งกันและกัน เมื่อมี Slip system มากๆ จะทำให้ Screw dislocation เกิด Cross-slip ได้ง่ายขึ้น ถ้าเกิด Cross-slip แสดงว่าเกิด Work hardening ถึง ขั้นตอนที่ 3 แล้ว และโดยทั่วไปจะเกิดความเครียดต่ำกว่าในผลึก fcc

## 3.2.2 TWINNING

การเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรนั้น สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะการเลื่อน (slip) และลักษณะที่เรียกว่า twinning



รูปที่ 3.25 การเปลี่ยนรูปแบบ twinning

- ผลึกสมบูรณ์แสดงระนาบ twinning (ยังไม่เกิด)
- บริเวณระหว่างระนาบ twinning เกิดบิดเบี้ยวเสียรูปไป

จากรูป a เป็นผลึกที่ยังไม่เกิด twinning ระบายตามแนวเส้น T-T ทั้ง 2 ด้านนั้นคือ ระบาย twin อะตอมที่ระบายสีดำซึ่งอยู่ด้านนอกระบาย twin เป็นตำแหน่งเดิมขณะที่ยังไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนอะตอมที่ขีดเส้นหน้าตัดเอาไว้ซึ่งอยู่ระหว่างระบาย twin นั้น จะมีตำแหน่งเปลี่ยนแปลง เมื่อเกิด twinning ระบายได้รับความเค้น twin ระบายหนึ่งจะเคลื่อนที่ขนานไป กับอีกระบายหนึ่ง บริเวณระหว่าง twin จะเกิดการเลื่อนอย่างสม่ำเสมอ (รูป b) ส่วนของผลึก ภายนอกระบาย twin จะไม่เกิดตัว เพียงแต่เคลื่อนมีไปเท่านั้น เช่นในรูปที่ 3.25 อะตอมที่อยู่ ซ้ายมือของระบาย twin (ระบายจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลง ส่วนอะตอมที่อยู่ด้านขวามือของระบาย (ระบายขวา) จะเลื่อนลงสู่ระดับต่ำกว่าที่ปรากฏก่อน เปลี่ยนแปลงลักษณะที่ปรากฏในรูป b จะเห็นว่าที่ขีดเส้นหน้าตัด จะดูเหมือนเป็นภาพในกระจก ของอะตอมที่ระบายสีดำแต่ละกลุ่ม โดยมีระบาย twin ทำหน้าที่เป็นระบายสะท้อนจึงเรียกการ เปลี่ยนแปลงลักษณะนี้ว่า TWIN

Twinning เกิดในผลึก bcc และ fcc เมื่อนำไปขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ เช่นเมื่อผลึก bcc เกิดความเครียดที่อัตราสูงมากที่อุณหภูมิห้อง เช่นลักษณะที่เกิดขึ้นในขบวนการการขึ้นรูปด้วยแรง ระเบิด (explosive Forming) โดยทั่วไปแล้ว การเปลี่ยนแปลงแบบ Twinning ไม่ค่อยเกิดกับผลึกสี่ เหลี่ยมลูกบาศก์ นอกจากกรณีที่มีอุณหภูมิต่ำจริงๆ หรือใช้กลวิธีขึ้นรูปอย่างรวดเร็วเท่านั้น

Twinning มักจะเกิดในผลึก hcp เป็นส่วนใหญ่ ดังในตารางที่ 3.2 ที่อุณหภูมิห้องผลึก จะมีระบบเลื่อนเพียง 3 ระบบเท่านั้น และระบายที่เลื่อนได้ง่ายคือ ระบายฐานจะสังเกตเห็นว่า ใน hcp จะเกิด twinning ขึ้นบนระบาย (1012) ในทิศทาง [1011] Twinning ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ผลึกระหว่างระบาย twin จัดเรียงตัวกันใหม่และดังนั้นระบายฐานที่อยู่ในบริเวณนี้จึงมีการ เรียงตัวที่สามารถ dislocation slip ได้ง่าย การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นเนื่องจาก twinning มี น้อย แต่บางกรณีของผลึก hcp ที่มีความเหนียวมาก อาจเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก twinning ได้ มาก

### 3.3 COLD WORKING และ WORKING

**Cold Working** : หมายถึงการรีด, ขึ้นรูปหรือใช้วิธีอื่นๆ เพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปไปอย่างถาวร ที่อุณหภูมิต่ำ โดยไม่เกิดผลึกใหม่ (ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่)

**Hot Working** : หมายถึงการรีด, ขึ้นรูปหรือใช้วิธีอื่นๆ เพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปไปอย่างถาวร ที่อุณหภูมิสูง โดยมีการเกิดผลึกใหม่ (ใช้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่)

#### 3.3.1 การแปรรูปขณะเย็น (COLD WORKING)

เมื่อนำโลหะไปรีด, ดึงหรืออัดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ ถือได้ว่าเป็นการแปรรูปขณะเย็น (cold working) โลหะส่วนมากจะแปรรูปขณะเย็นที่อุณหภูมิห้อง แม้

ว่าการแปรรูปดังกล่าวจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นบ้างก็ตาม แต่ก็ยังต่ำกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ การแปรรูปขณะเย็นจะทำให้เกรนหดตัวและมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย แต่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรง, ความสามารถบดแต่งด้วยเครื่องจักร, ความเที่ยงตรงของขนาด และความสวยงามของผิวโลหะเนื่องจากการแปรรูปขณะเย็นเกิดออกไซด์ได้มาก จึงสามารถรีดแผ่นโลหะได้บางกว่าการแปรรูปขณะร้อน

### 3.3.1.1 ผลของการแปรรูปขณะเย็น

โลหะทุกชนิดจะมีโครงสร้างเป็นผลึก โดยมีลักษณะเป็นเกรนขนาดต่างๆ แต่ละเกรนประกอบด้วยหน่วยเซลล์มากมาย และหน่วยเซลล์ก็ประกอบด้วยอะตอม อะตอมภายในเกรนเดียวกันจะจับเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ แต่จะแตกต่างกันในแต่ละเกรน เมื่อนำวัสดุไปแปรรูปขณะเย็น อาจทำให้เกรนแตกแยกออกจากกัน, อะตอมเคลื่อนที่ไป และเกรนบิดตัวบริเวณใดที่มีความเครียดเหนือขั้วระหว่างอะตอมน้อยที่สุด จะเกิดการเลื่อนหรือเกิดการเปลี่ยนรูปแบบ Twinning

การแปรรูปขณะเย็นต้องใช้ความดันสูงกว่าการแปรรูปขณะร้อนมาก โลหะที่ผ่านขบวนการแปรรูปขณะเย็น จะแกร่งกว่าและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรก็ต่อเมื่อเกิดความเค้นมากกว่าช่วงยืดหยุ่น การแปรรูปขณะเย็นจะไม่เกิดผลึกใหม่ ดังนั้นเกรนที่เกิดการบิดตัวหรือแตกหักจะไม่มีโอกาสคืนสู่สภาพเดิม เมื่อเกรนจะเปลี่ยนรูปไปก็จะมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงนั้นมากขึ้น จึงทำให้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่าเกิด Work หรือ Strain hardening

จำนวน Clod work ที่โลหะจะทนทานได้ขึ้นอยู่กับ ductility ของโลหะ ยิ่งโลหะ ductility มากก็ยังสามารถนำไปแปรรูปขณะเย็นได้ดี โลหะบริสุทธิ์จะแปรรูปขณะเย็นได้ดีกว่าโลหะผสม เพราะเมื่อโลหะมีธาตุผสมมากขึ้นอัตราการเกิด strain hardening จะเพิ่มขึ้นทันที

เมื่อนำโลหะไปแปรรูปขณะเย็นจะเกิดความเค้นตกค้างอยู่ภายในอย่างรุนแรง ซึ่งจำเป็นต้องขจัดออกก่อนนำไปใช้งาน โดยนำโลหะไปอบที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ ซึ่งเกรนหรือคุณสมบัติของโลหะไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าหากอบจนถึงอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ จะช่วยขจัดผลจากการแปรรูปขณะเย็นนี้ได้ คุณสมบัติของโลหะจะกลับสู่สภาพเดิมก่อนรีด

### 3.3.1.2 ข้อดีและขอบเขตของการแปรรูปขณะเย็น

ผลิตภัณฑ์ส่วนมากที่ผ่านการแปรรูปขณะร้อนมาแล้ว มักจะนำไปแปรรูปขณะเย็นอีก เช่นโลหะแผ่นที่ผ่านการรีดร้อนมักจะอ่อน, ผิวไม่เรียบ ขนาดไม่เที่ยงตรง และคุณสมบัติไม่ดี จึงต้องนำไปรีดเย็นเป็นขั้นตอนสุดท้าย จึงทำให้ขนาดแน่นอนขึ้น, ไม่เกิดออกไซด์แผ่นโลหะมีผิวเรียบ งานที่ไม่ต้องการชุบก็อาจนำมารีดเย็น จะทำให้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น วัสดุเหนียวสามารถอัดขึ้นรูปขณะเย็นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ การแปรรูปขณะเย็นต้องใช้เครื่องจักรที่มีกำลังมากกว่าการแปรรูปขณะร้อน แต่หากใช้แรงมากไปโลหะจะเปราะบางบางที่ต้องนำไปอบก่อน (anneal) ก่อน

### 3.3.1.3 ผลจากการแปรรูปขณะเย็น

1. เกิดความเค้นตกค้าง ต้องนำไปอบก่อน
2. โครงสร้างเกรนบิดตัวหรือแตกหัก
3. ความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น
4. อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ของเหล็กกล้าเพิ่มขึ้น
5. ผิวเรียบดีขึ้น
6. ขนาดเที่ยงตรง

### 3.3.2 การแปรรูปขณะร้อน (HOT WORKING)

โลหะที่หล่อออกมาเป็นแท่ง (Ingot) จะใช้ประโยชน์ได้น้อย จึงต้องนำไปแปรรูปเสียก่อน นำแท่งโลหะไปแปรรูปขณะเย็นจะทำได้ยาก ถ้านำไปแปรรูปขณะร้อนจะทำได้ง่ายกว่า แต่มักมจะเกิด และข้อบกพร่องอื่นๆ มากมาย จึงต้องนำเอาโลหะที่แปรรูปขณะร้อนมาแล้วไปทำการแปรรูปเย็น เพื่อให้ผิวงานดีขึ้น, ขนาดถูกต้องขึ้นและปรับปรุงคุณสมบัติทางกล

การแปรรูปขณะร้อนจะทำให้โลหะอยู่ในสภาวะพลาสติก จนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์นับว่าเป็นวิธีหนึ่งที่ประหยัดและได้ผลดี เพราะใช้พลังงานน้อย, เครื่องจักรเล็กหรือน้อย

การที่ต้องแปรรูปโลหะขณะร้อนเพื่อการประหยัดแล้ว ยังมีโลหะบางชนิด เช่น W, Mo และที่จำเป็นต้องแปรรูปขณะร้อนเท่านั้น เพราะหากแปรรูปขณะเย็น มักจะเกิดการแตกร้าวเสมอหรือทำการแปรรูปขณะร้อนก่อน เพื่อปรับปรุงโครงสร้างที่ได้จากการหล่อหลังจากนั้นจึงนำไปแปรรูปขณะเย็นเป็นขั้นตอนสุดท้าย

#### 3.3.2.1 ข้อดีของการแปรรูปขณะร้อน

1. ขจัดรูพรุนได้ดี เช่นแท่งอินทก๊อต ปกติจะมีรูพรุนอยู่มากมาย เมื่อนำไปรีดจะช่วยขจัดรูพรุน
2. สารมลทินที่ฝังตัวอยู่จะแตก และกระจายไปทั่วเนื้อโลหะ
3. เกรนที่หยาบหรือยาวจะละเอียดกว่าเดิม เนื่องจากการแปรรูปขณะร้อนในช่วงอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ต้องทำการแปรรูปจนกระทั่งอยู่ในช่วงต่ำสุดของอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ เพื่อให้ได้เกรนละเอียด
4. ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล เนื่องจากเกรนละเอียดกว่าเดิมและทำให้เนื้อโลหะสม่ำเสมอขึ้น เหล็กรีดจะมีความแข็งแรงสูงสุดในทิศทางของการไหลของเนื้อโลหะ
5. ใช้พลังงานน้อยกว่าเมื่อแปรรูปขณะเย็น

#### ข้อเสียของการแปรรูปขณะร้อน

1. เกิดออกไซด์หรือสะเก็ดที่ผิวงานอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวไม่ดี
2. ขนาดไม่เที่ยงตรง
3. อุปกรณ์ราคาสูงแต่ประหยัดกว่าการแปรรูปขณะเย็น

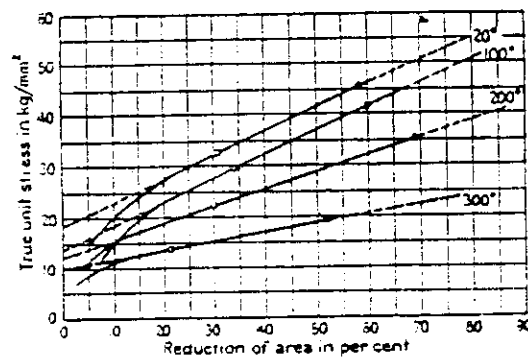
3.3.2.2 การแปรรูปขณะร้อนคืออะไร ?

การแปรรูปขณะร้อนจะเกิดปรากฏการณ์ขึ้น 2 อย่างคือ

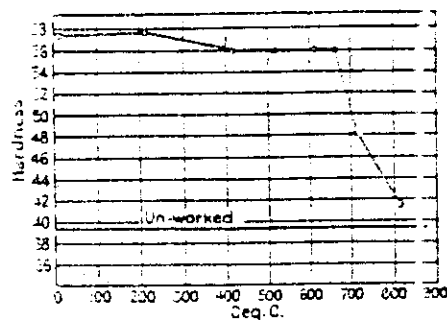
- งานมีความแข็งเพิ่มขึ้น (Hardening) เนื่องจากการเปลี่ยนรูป
- งานอ่อนลง (Softening) เนื่องจากการ annealing

ปรากฏการณ์ทั้งสองที่กล่าวมาจะเกิดขึ้นในขณะเดียวกัน ณ อุณหภูมิใดๆ ถ้าหากเกิดเปลี่ยนรูปเร็วกว่าที่เกิด softening โลหะจะแข็งขึ้น

จากรูปที่ 3.26 แสดงว่าเมื่อนำทองแดงไปทดลองดึง ให้เปลี่ยนรูปอย่างช้าๆที่ทองแดงอ่อนลงจะเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม จากกราฟจะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 400°C อัตราอ่อนตัวจะเท่ากับเพิ่มความแข็ง และหลังจากนั้นโลหะสามารถเปลี่ยนรูปไปได้อีกอย่างค่อนเนื่องโดยความเค้นไม่เพิ่ม ผลเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว (เช่น กรณีตีขึ้นรูป) อุณหภูมิที่อัตราอ่อนตัวและเพิ่มความแข็งเท่ากัน (800°C) ดังแสดงในรูปที่ 3.27 แม้ว่าโลหะจะมีอุณหภูมิสูงเกือบถึงจุดหลอมก็ยังคงเกิด Work hardening เสมอ แต่อัตราการเกิดลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ทั้งนี้เพราะว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าจะเกิด slip system มากกว่า และผลึกเสถียรน้อยกว่า



รูปที่ 3.26 เมื่อนำทองแดงไปดึงที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น (เมื่อ true unit stress เพิ่มขึ้นแสดงว่าความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย)



รูปที่ 3.27 ความแข็งของทองแดงหลังจากอบชุบ เมื่อตีขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างๆ



### 3.3.2.3 อุณหภูมิขั้นสุดท้าย

ถ้าหากการแปรรูปเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ขณะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ ขณะเกรนเย็นตัวลงเกรนจะเติบโตขึ้น (Grain growth) ทำให้งานมีเกรนหยาบ เมื่อนำไปทดลองดึงความสามารถที่จะลดขนาดหน้าตัดหรือความสามารถยืดตัวจะต่ำ และถ้าหากการแปรรูปยังคงเกิดขึ้นขณะที่งานมีอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ ซึ่งความเป็นพลาสติกของโลหะมีน้อย โลหะอาจแตกง่ายได้ง่าย เมื่อนำงานแปรรูปเย็นไปทดลองดึงจะเห็นว่าจุดจำนน (yield point) ของโลหะจะสูงขึ้น แต่ความสามารถยืดตัวลด ถ้าทำการแปรรูปขั้นสุดท้ายที่อุณหภูมิเหมาะสมจะได้เกรนละเอียดซึ่งจะอยู่สูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่เล็กน้อย และเนื่องจากอุณหภูมิที่ใจกลางงานสูงกว่าอุณหภูมิผิวงาน จึงต้องถือเอาอุณหภูมิที่ผิวงานเป็นหลัก นอกนั้นเกรนที่ใจกลางจะหยาบกว่าที่ผิว รูปที่ 3.27 แสดงผลของอุณหภูมิขั้นสุดท้ายที่มีต่อความแข็งของงานในรูปทองแดง

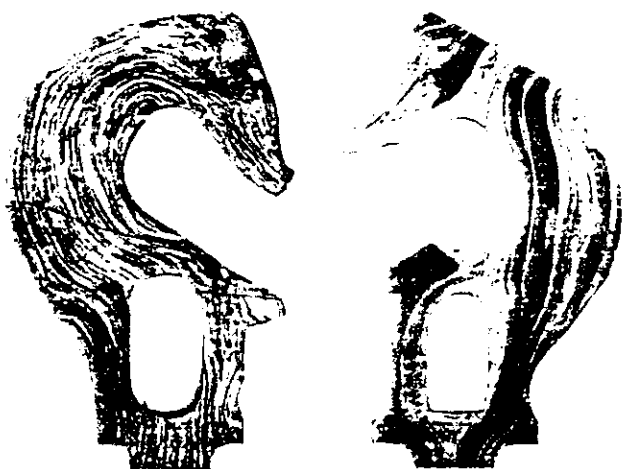
### 3.3.2.4 ความสามารถแปรรูปของโลหะที่อุณหภูมิต่างๆ

ดังกล่าวในตอนต้นแล้วว่า ความสามารถแปรรูปของโลหะจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มและความต้านทานต่อการแปรรูปจะลดลง ดังนั้นการตีขึ้นรูป, รีดขึ้นรูป และกดอัดขึ้นรูป จึงมักจะทำกับโลหะงาน (แต่ไม่เสมอไป) การอัดขึ้นรูปจะทำได้เร็วเป็น 2 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $10^{\circ}\text{C}$  การแปรรูปขณะงานใช้พลังงานต่ำ และเกิดการแตกร้าวน้อยกว่า

### 3.3.2.5 คุณสมบัติของโลหะที่ผ่านการแปรรูปขณะร้อน

การแปรรูปขณะร้อนนอกจากช่วยประหยัดแล้ว ยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างและคุณสมบัติของโลหะที่ได้จากการหล่อ โดยทำให้เกรนละเอียดสม่ำเสมอขึ้น

งานแปรรูปขณะร้อน (เช่น เหล็กแผ่น) ปกติจะมีความแข็งแรงและสามารถนำไปขึ้นรูปได้ดี ในทิศทางของการรีด แต่ในทิศทางอื่นจะขึ้นรูปได้ไม่ดี ฟิล์มและสารมลทินที่เกาะตามขอบเกรนและแทรกตัวอยู่ภายในเกรน จะถูกรีดออกไปเป็นเส้นยาว และก่อตัวเป็นระนาบที่มีความอ่อนแอที่สุด จึงอาจเกิดการแตกร้าวตามแนวขนานกับผิวงานมากกว่าที่จะแตกร้าวตามแนวตั้งฉากผิวงาน



รูปที่ 3.28 ตะขอซ้ายมือได้จากการตีขึ้นรูป ส่วนขวามือได้จากการตีขึ้นรูปงานขามือ จะแตกร้าวได้ง่ายกว่า

จากรูปข้างบนเป็นตะขอ 2 อันที่ผลิตด้วยกรรมวิธีแตกต่างกัน โดยซ้ายมือผลิตโดยการตีขึ้นรูป ส่วนขวามือใช้วิธีตัดเป็นรูปร่างจากแผ่นโลหะ ดูจากโครงสร้างจะเห็นว่าอันซ้ายมือมีโครงสร้างเป็นแนวตามตัวตะขอ แต่ขวามือโครงสร้างเป็นแนวตัด ซึ่งอาจเกิดการแตกร้าวตามแนวตัดได้ง่ายกว่าตะขออันขวามือจึงมีโอกาสพังได้ง่ายกว่าอันซ้ายมือ

#### เอกสารอ้างอิง

1. Read-Hill, Robert E. , PHYSICAL METALLURGY PRINCIPLE, 2md ed  
Litton Educational Publishing, Inc.New York, 1973
2. Gulyaev., A., PHYSICAL METALLURGY Vol I. MIR Publishers, Mo,  
1980