

บทที่ 1

สมบัติทางกลของโลหะ

(Mechanical Properties of Metals)

1. บทนำ (introduction)

เนื้อหาเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลต่างๆของวัสดุ ประกอบด้วยคำนิยามของสมบัติทางกลต่างๆ รายละเอียดและการอธิบายคำศัพท์เกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงกล ความเครียดและแรงเค้นภายใต้สภาวะรับน้ำหนัก การเคลื่อนตัว พฤติกรรมการยืดหยุ่นและการเสียรูปถาวร ความแข็งแรงและสมบัติอื่นๆ ที่สะท้อนความแข็งแรงของวัสดุ ผลกระทบของการขึ้นรูปเย็น ต่อความแข็งแรงของวัสดุ การเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุด้วยสารละลายของแข็ง ความจุพลังงานและฮิสเทอเรซิส และความเสียหาย โดยมีคำอธิบายและสูตรคำนวณต่างๆ ที่จำเป็นต่อการทำความเข้าใจตลอดเนื้อหา ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานและประสบการณ์ในการทดสอบวัสดุ

2. สมบัติเชิงกลเบื้องต้น (mechanical properties)

2.1 สมบัติเชิงกล (mechanical properties) คือสมบัติที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำ สมบัติเหล่านี้ปกติจะอธิบายด้วยทอมที่เกี่ยวข้องกับแรงเค้นหรือความเครียดหรือทั้งสองทอม

2.2 การทดสอบวัสดุ (materials testing) คือการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีและกระบวนการที่ใช้ในการหาค่าหรือกำหนดค่าของสมบัติเชิงกลของวัสดุอย่างถูกต้องแม่นยำ และเชื่อถือได้ ในเบื้องต้นได้แก่การหาค่าแรงกระทำหรือน้ำหนัก และการยืดออกของชิ้นทดสอบอันเนื่องมาจากแรงกระทำนั้น ซึ่งทั้งสองค่านี้คือแรงเค้นและความเครียดตามลำดับ

2.3 ความแข็งแรง (strength) คือความสามารถของวัสดุในการต้านทานหรือรับแรงโดยปราศ จากความเสียหาย ความเสียหายในที่นี้อาจอยู่ในรูปของการแตกหักเสียหายอันเนื่องมาจากแรงเค้นที่สูงหรือจากการเสียรูปที่มากเกินไป ซึ่งจะหาค่าได้ในรูปของแรงเค้นสูงสุด (maximum stress) ที่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย โดยสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดความแข็งแรง ทั้งนี้แล้วแต่รูปแบบของแรงที่กระทำ

2.4 สติฟเนส (Stiffness) คือความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปภายใต้แรงกระทำในช่วงยืดหยุ่น (elastic state) โดยสามารถวัดได้จากค่าโมดูลัส (modulus) ในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (elasticity)

2.5 ความแข็ง (hardness) คือความต้านทานของวัสดุต่อการกดเป็นรอยหรือต่อการขีดสีของพื้นผิว ค่าความแข็งอาจนำไปใช้ในการพิจารณาเป็นค่าความแข็งแรงของวัสดุได้ เช่น การนำเหล็กไปขีดบนไม้และนำไม้ไปขีดบนเหล็ก พบว่าไม้เกิดเป็นรอยขีดขูดได้ง่ายมากในขณะที่เหล็กไม่เป็นรอยขีดขูดปรากฏให้เห็น นั่นแสดงว่าเหล็กมีความแข็งมากกว่าไม้

2.6 การเสียรูปแบบยืดหยุ่น (elasticity) คือความสามารถของวัสดุในการเสียรูปและคืนรูปอย่างสมบูรณ์โดยไม่ปรากฏการเสียรูปถาวรเมื่อนำแรงที่กระทำออก อย่างเป็นตัวอย่างวัสดุที่มีการเสียรูปแบบยืดหยุ่นได้สูงภายใต้สภาวะทั่วไป ซึ่งสามารถยืดออกได้หลายเท่าตัวเมื่อเทียบกับความยาวเดิมก่อนนิยขาด และเมื่อนำแรงกระทำออกจะกลับคืนสู่สภาพเดิม

2.7 การเสียรูปถาวร (plasticity) คือความสามารถในการเสียรูปของวัสดุเหนือช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น โดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย เช่นการเป่าหมากฝรั่งเป็นการทดสอบการเสียรูปถาวรของหมากฝรั่ง เมื่อเป่าลมหมากฝรั่งจะพองเป็นลูกโป่งและเมื่อเอาลมออกพบว่าลูกโป่งหมากฝรั่งจะแฟบลงโดยไม่กลับคืนสู่สภาพเดิม นั่นแสดงว่าหมากฝรั่งเกิดการเสียรูปเกินช่วงเสียรูปแบบยืดหยุ่นเข้าสู่การเสียรูปถาวร โดยแรงลมที่เป่าต้องไม่เกินความแข็งแรงแตกหัก (breaking strength) ของหมากฝรั่ง

2.8 ความจุพลังงาน (energy capacity) คือความสัมพันธ์ของความแข็งกับสติฟเนสของวัสดุซึ่งหาค่าโดยการวัดความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานหรือรับแรงที่กระทำซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

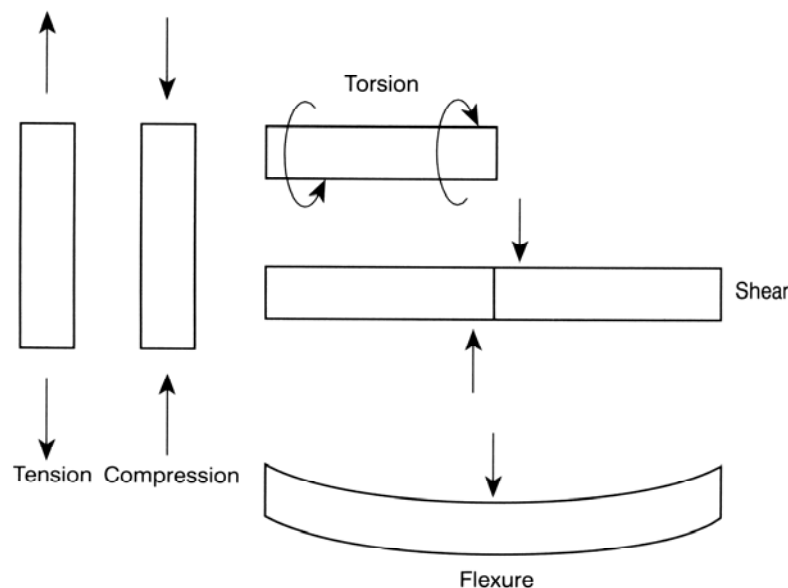
- เรซิลีเียน (resilience) คือความจุพลังงานในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น
- ความแกร่ง (toughness) คือพลังงานที่จำเป็นในการทำให้วัสดุแตกหักเสียหาย

3. สภาวะการทดสอบเชิงกล (mechanical test conditions)

การทดสอบสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่ได้กล่าวข้างต้นนั้นไม่มีวิธีใดที่สามารถทำการตรวจวัดได้ทั้งหมดในวิธีการเดียว และจำนวนครั้งของการทดสอบเป็นสิ่งสำคัญในการที่จะจำลองสภาวะการทดสอบให้เป็นแบบเดียวกันกับการใช้งานวัสดุ ตัวแปรหลักๆ ในทางทฤษฎี

3.1 น้ำหนักที่ใช้ทดสอบหรือกรรมวิธีในการใส่น้ำหนัก ปกติจะใช้เป็นตัวกำหนดหรือแยกประเภทของกระบวนการทดสอบทางกล โดยมีสามตัวแปรที่ใช้ในการนิยามกรรมวิธีการใส่น้ำหนักคือ ประเภทของแรงเค้นที่ให้กับชิ้นทดสอบ อัตราการใส่น้ำหนักหรือแรงเค้น และจำนวนรอบของการใส่น้ำหนัก

3.1.1 ประเภทของแรงเค้นหรือน้ำหนักเบื้องต้นที่ให้กับชิ้นทดสอบมีห้าประเภท ได้แก่ การดึง (tension) การอัด (compression) การบิด (torsion) การเฉือน (shear) และการคดงอ (flexure) ในการทดสอบการดึงและการอัดเป็นการทดสอบที่ใช้ตรวจวัดผลกระทบที่มีต่อหน้าตัด (cross section) ของชิ้นทดสอบ การทดสอบการบิดเป็นการใส่น้ำหนักกับชิ้นทดสอบด้วยการบิดเกลียว ส่วนการทดสอบการเฉือนเป็นการใส่น้ำหนักโดยการเฉือนหรือการตัดด้วยใบตัดคู่หรือกรรไกร และการทดสอบการคดงอเป็นการใส่น้ำหนักแบบดึงด้านบนและแบบอัดด้านล่างของชิ้นทดสอบสลับกัน ซึ่งกระบวนการทดสอบเหล่านี้จะได้กล่าวในรายละเอียดในบทต่อไป และการใส่น้ำหนักในแบบพื้นฐานต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แรงกระทำแบบต่างๆ

3.1.2 อัตราการใส่น้ำหนักหรือแรงเค้นกับชั้นทดสอบสามารถแบ่งออกได้สามกลุ่มได้แก่ การทดสอบแบบสภาวะคงที่ (static test) การทดสอบแบบใช้ระยะเวลา (long-time test) และการทดสอบแบบเคลื่อนไหว (dynamic test)

- การทดสอบแบบสภาวะคงที่เป็นการใส่น้ำหนักกับชั้นทดสอบอย่างรวดเร็ว แต่ทั้งนี้ผลการทดสอบต้องไม่ได้รับผลกระทบจากแรงเฉื่อยของการใส่น้ำหนัก การทดสอบแบบนี้โดยทั่วไปจะทดสอบตามแนวยาวของชั้นทดสอบในระยะเวลาไม่กี่นาทีจนถึงหลายชั่วโมง และการทดสอบเชิงกลโดยส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบแบบสภาวะคงที่

- การทดสอบแบบใช้ระยะเวลาเป็นการทดสอบที่ใช้ระยะเวลานานๆ เช่นการทดสอบการคราก (creep) เป็นต้น

- การทดสอบแบบเคลื่อนไหวคือการทดสอบที่ใส่น้ำหนักกับชั้นทดสอบแบบทันทีทันใดและผลการทดสอบได้รับผลกระทบจากแรงเฉื่อย (inertial forces) ยกตัวอย่างเช่นการทดสอบการกระแทก (impact test) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความแกร่ง (toughness) ของวัสดุ

3.1.3 จำนวนรอบของการใส่น้ำหนักสามารถแบ่งออกได้สองลักษณะคือการใส่ น้ำหนักค่าเดียว (single-load application) กับชั้นทดสอบเพียงครั้งเดียว แล้วศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น ส่วนการทดสอบการล้า (fatigue test) เป็นการใส่น้ำหนักแบบดึงและอัดสลับกัน โดยจะศึกษาผลกระทบของการใส่น้ำหนักแบบสลับไปมานี้เป็นค่าความแข็งแรงการล้าของวัสดุ โดยค่าแรงดึงกับแรงอัดจะบันทึกเป็นการทดสอบความทนทาน (endurance test) และตัวแปรสำคัญที่ต้องทำการบันทึกไว้เช่นกันคือจำนวนรอบของการใส่ น้ำหนัก

3.2 สภาพะของการทดสอบ ในการทดสอบมีสภาวะการทดสอบสองส่วนคือสภาวะของชั้นทดสอบขณะทดสอบและสภาวะแวดล้อมในการทดสอบ สภาวะการทดสอบได้แก่ รูปทรง ขนาด สภาพสุดท้ายของชั้นทดสอบ อุณหภูมิ ความดัน และความชื้น โดยสภาวะการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิจะแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม คือการทดสอบที่อุณหภูมิห้องซึ่งเกี่ยวข้องกับการทดสอบโดยส่วนใหญ่ การทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เช่นการทดสอบกับเครื่องยนต์เจ็ท ท่อไอพ่นของจรวด (rocket booster) เกราะกันความร้อน (heat shielding) ฉนวน (insulation) เป็นต้น และการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำได้แก่การทดสอบความเปราะ (brittleness) ความเหนียว (ductility) และความเป็นฉนวน (insulation) เป็นต้น

วัสดุบางอย่างประพฤติตัวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสถานะความชื้น (humidity or moisture) ของสิ่งแวดล้อม เช่น วัสดุไม้ซึ่งเป็นท่อส่งน้ำ (hygroscope) หมายถึงไม้จะดูดซับความชื้นเมื่ออยู่ในสถานะที่เปียกชื้นและคายน้ำออกไปเมื่ออยู่ในสถานะแวดล้อมที่แห้ง ดังนั้น การทดสอบในบรรยากาศที่มีความชื้นซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบให้ระบุสถานะแวดล้อมที่สำคัญๆ ในขณะที่ทำการทดสอบ การระบุสถานะการทดสอบนี้เป็นสิ่งสำคัญคือเมื่อทำการทดสอบภายใต้สถานะที่เป็นมาตรฐาน ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบในแบบเดียวกันภายใต้สถานะเดียวกันควรจะสามารถเปรียบเทียบกันได้ ในขณะที่เดียวกันการทดสอบอาจกระทำภายใต้สถานะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะต้องกำหนดและปรับการทดสอบให้ได้ตามมาตรฐานเพื่อให้สามารถเชื่อถือได้ สถานะเหล่านี้รวมถึงการทดสอบฉีดพ่นน้ำเกลือ (salt spray test) กับวัสดุเคลือบสีและการทดสอบการกัดกร่อน (corrosion test) ได้แก่อ่างที่ใช้จำลองสถานะกัดกร่อนและสถานะไอน้ำหรือในสารเคมีอื่นๆ ที่แตกต่างกัน ซึ่งใช้จำลองสถานะและการเปลี่ยนแปลงของสถานะแวดล้อมในการใช้งานของวัสดุในแบบต่างๆ

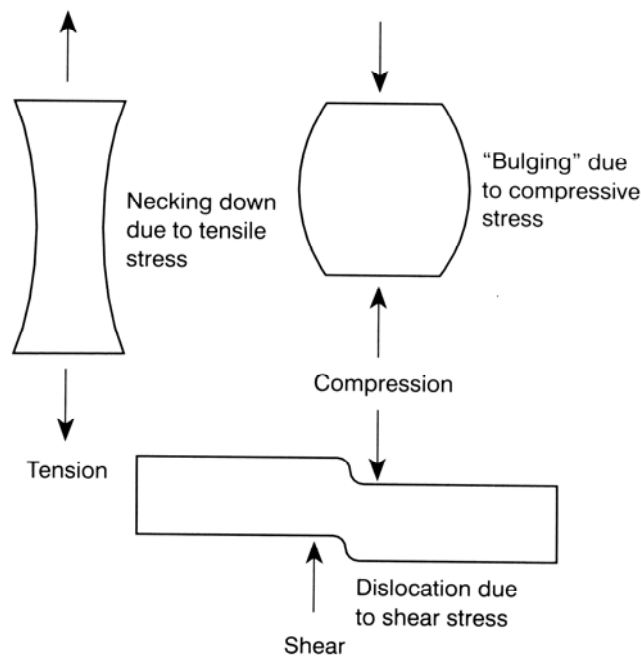
เมื่อกำหนดสถานะต่างๆ ในการทดสอบ สถานะทางกายภาพของวัสดุรวมถึงขนาดทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และคุณลักษณะต่างๆ ที่ปรากฏ ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดรายละเอียดหรือรูปแบบของการทดสอบ และการกำหนดวิธีการทดสอบ การจับยึดชิ้นทดสอบและอุปกรณ์เสริมภายนอกอื่นๆ ที่จำเป็นในระหว่างการทดสอบ

วัตถุประสงค์ของกระบวนการทดสอบที่เป็นมาตรฐานคือให้สถานะทั้งหมดเป็นค่าคงที่ ยกเว้นการทดสอบภายใต้สถานะอื่นๆ การเปลี่ยนแปลงของสถานะต่างๆ ภายใต้การทดสอบจะถูกรวบรวมและบันทึกในรูปแบบที่เป็นมาตรฐาน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถจำแนกผลการทดสอบได้โดยตรง

4. แรงเค้นและความเครียด (stress and strain)

ในการทดสอบวัสดุให้ใส่น้ำหนักแล้ววัดผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยน้ำหนักจะวัดในรูปแบบของแรงกระทำ เช่น น้ำหนักปอนด์ (pounds-weight, lbf) หรือนิวตัน (N) ยกเว้นในกรณีของการทดสอบการบิดซึ่งจะวัดเป็นปอนด์ฟุต (foot-pounds, ft-lb) หรือนิวตันเมตร (N.m)

แรงเค้น (stress) นิยามได้เป็นความเข้มของแรงที่กระจายอยู่ภายในหรือส่วนประกอบของแรงที่ต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ แรงเค้นปกติจะวัดในหน่วยของแรงต่อหน่วยพื้นที่ ได้แก่ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in.²) หรือ เมกะพาสกาล (MPa) แรงเค้นสามรูปแบบพื้นฐานได้แก่แรงเค้นดึง (tension) อัด (compression) และเฉือน (shear) ซึ่งสองอันแรกเป็นแรงเค้นโดยตรง (direct stress) รูปแบบของแรงเค้นพื้นฐานได้แสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แรงเค้นแบบต่างๆ

การคำนวณแรงเค้นจะขึ้นอยู่กับหน้าตัด (cross-section) เริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ในการทดสอบแรงดึงและแรงอัด ชิ้นทดสอบจะรับแรงที่กระจายตัวในแบบเดียวกัน โดยแรงเค้นคำนวณได้จากน้ำหนักที่วัดได้หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นน้อยสุดดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma = F/A$$

- เมื่อ
- σ คือแรงเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบ (lb/in.² หรือ MPa)
 - F คือน้ำหนักหรือแรงที่ให้กับชิ้นทดสอบ (lb หรือ N)
 - A คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (in.² หรือ mm²)

แรงต้องเขียนเป็นนิวตันก่อนที่จะแปลงเป็นเมกะพาสคาล โดย 1 เมกะพาสคาลเท่ากับ 145 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 1 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเท่ากับ 0.006895 เมกะพาสคาล

ตัวอย่างที่ 1.1

เส้นลวดยาว 12 นิ้ว ซึ่งแขวนไว้ในแนวตั้ง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 นิ้ว และรับน้ำหนัก 100 ปอนด์ ถามว่าแรงเค้นที่เกิดขึ้นในเส้นลวดมีค่าเท่ากับเท่าไร

$$\begin{aligned}\text{จาก } \sigma &= F/A \\ &= (100 \text{ lb}) / [\pi \times (0.05)^2 \text{ in.}^2] \\ &= 12,739 \text{ lb/in.}^2 \text{ หรือ } 87.86 \text{ MPa}\end{aligned}$$

การเสีรูปร่างบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของวัสดุอันเนื่องจากแรงเค้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การดูดซับความชื้นและอื่นๆ การเสีรูปร่างจะพิจารณาเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นของขนาดซึ่งจะวัดในหน่วยของความยาว ยกเว้นในการทดสอบการคดงอและการบิด ในการทดสอบการคดงอ การหักงอจะวัดจากตำแหน่งเริ่มต้นของการทดสอบที่กำหนดไว้ ส่วนการทดสอบการบิดการเสีรูปร่างจะวัดจากมุมการบิดเป็นเกลียวในหน่วยเรเดียน (radian)

ความเครียด (strain) นิยามได้เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดเชิงเส้นของวัสดุที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแรงเค้นต่อหน่วยความยาว ดังนั้นความเครียดเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในเรื่องขนาดของชิ้นทดสอบที่เป็นผลมาจากการใส่น้ำหนักให้กับชิ้นทดสอบ ซึ่งคำนวณได้โดยการวัดอัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเริ่มต้นดังสมการ

$$\epsilon = (l_f - l_0) / l_0$$

เมื่อ ϵ คือความเครียด

l_f คือความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) หลังการทดสอบ

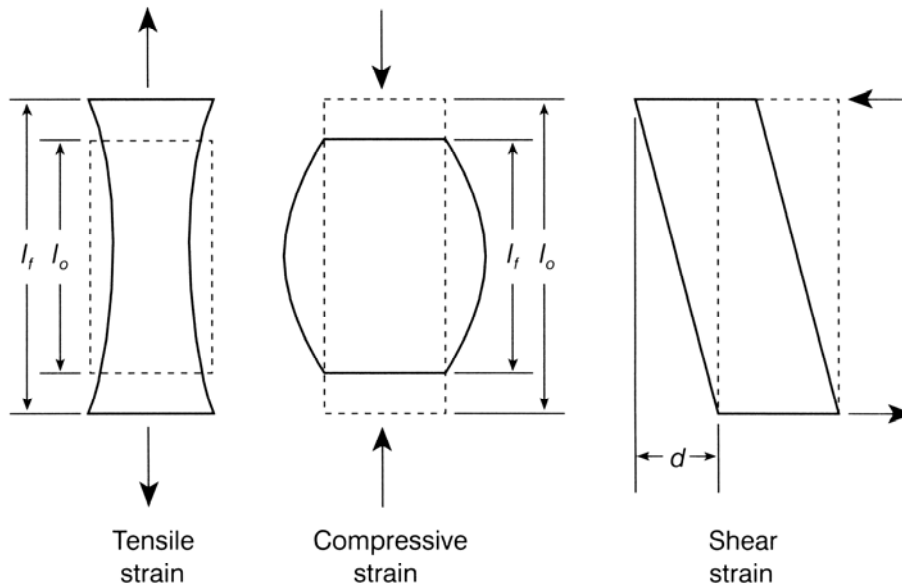
l_0 คือความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) เริ่มต้น

ตัวอย่างที่ 1.2

เส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 นิ้ว ยาว 12 นิ้ว และรับน้ำหนักขนาด 100 ปอนด์ ซึ่งทำให้เส้นลวดยืดออก 0.1 นิ้ว ถ้าวัดความเครียดของเส้นลวดมีค่าเท่าไร

$$\begin{aligned}\text{จาก } \epsilon &= (l_f - l_0) / l_0 \\ &= (12.10 \text{ in.} - 12.00 \text{ in.}) / 12.00 \text{ in.} \\ &= 0.00833\end{aligned}$$

โดยทั่วไปความเครียดจะไม่มีหน่วยแต่ถ้าใส่หน่วยปกติจะเป็น mm/mm หรือ in./in. ซึ่งอาจทำให้สับสนได้ การวัดความเครียดจะอยู่ในทิศทางเดียวกันกับการใส่แรงและวัดในแนวขนานกับชิ้นทดสอบภายใต้แรงเค้น ยกเว้นกรณีของความเครียดเฉือน (shearing strain) ซึ่งจะวัดขนานกับแรงเฉือน ความเครียดเฉือนคำนวณจากขนาดในแนวตั้งฉากกับแรงเฉือน และแสดงค่าเป็นเรเดียน ความเครียดสามประเภทได้แสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ความเครียดทั้งสามแบบ

ความคงรูป (permanent set) คือการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของวัสดุหรือการเสีรูปโดยที่ไม่คืนกลับไปสู่รูปเดิมเมื่อนำแรงกระทำออก ตัวอย่างกระป๋องโซดาจะเกิดการโค้งงอแบบคงรูปถ้ามีคนน้ำหนัก 200 ปอนด์ขึ้นไปเหยียบอยู่ด้านบน และเมื่อคนขยับออกการเสีรูปของกระป๋องยังคงอยู่ ความเครียดคือการเปลี่ยนแปลงของความสูงของกระป๋องซึ่งเกิดจากการเหยียบของคนหารด้วยความสูงเริ่มแรกของกระป๋อง

แรงเค้นและความเครียดที่ได้อธิบายข้างต้นเรียกว่า **แรงเค้นและความเครียดปรากฏ (nominal stress and strain)** เนื่องจากเป็นแรงเค้นและความเครียดที่เปรียบเทียบกับขนาดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ส่วน **แรงเค้นและความเครียดแท้จริง (true stress and strain)** คำนวณโดยเปรียบเทียบกับขนาดของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปตามการรับแรงของชิ้นทดสอบ

เมื่อชิ้นทดสอบรับแรงเค้นดึงหรืออัดในทิศทางที่กำหนด ความเครียดที่เกิดขึ้นในทางเดียวกันเรียกว่า **ความเครียดแนวแกน (axial strain)** อย่างไรก็ตามความเครียดจะเกิดแนวตั้งฉากกับแรงเค้นดึงและอัดซึ่งเรียกว่า **ความเครียดด้านข้าง (lateral strain)** การใ้ น้ำหนักในแกนเดียวขณะที่ชิ้นทดสอบอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (elastic range) อัตราส่วนความเครียดด้านข้างต่อความเครียดในแนวแกนเรียกว่า **อัตราส่วนพัชของ (Poisson's ratio, P.R.)** ดังสมการ

$$P.R. = (\text{lateral strain}) / (\text{axial strain})$$

ตัวอย่างที่ 1.3

จงหาอัตราส่วนพัชของของวัสดุที่ปรากฏค่าความเครียดด้านข้างเท่ากับ 0.002 และความเครียดแนวแกนเท่ากับ 0.005

$$\begin{aligned} \text{จาก } P.R. &= (\text{lateral strain}) / (\text{axial strain}) \\ &= 0.002 / 0.005 \\ &= 0.4 \end{aligned}$$

เมื่อเกิดการยืดออกในแนวแกนจะเกิดการหดตัวด้านข้างและในทางกลับกันก็เช่นเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้จากการดึงยืดขึ้นยาง ในขณะที่เกิดการยืดออกในแนวแกนจะเกิดการหดตัวทางด้านข้าง ช่วงของค่าอัตราส่วนพัชของของวัสดุโครงสร้างโดยทั่วไปทั้งหมดเท่ากับ 0.25 ถึง 0.7

5. สติฟเนส (Stiffness)

สติฟเนสของวัสดุวัดได้จากความสามารถในการต้านทานการเสียรูปภายใต้แรงกระทำ ซึ่งหาค่าได้เป็นอัตราส่วนของแรงเค้นต่อความเครียด กล่าวคือวัสดุที่ต้องใช้แรงเค้นมากกว่าเพื่อให้ได้ความเครียดตามที่กำหนดถือว่าเป็นวัสดุที่มีสติฟเนสมากกว่า

วัสดุจะอยู่ภายใต้แรงเค้นปกติในช่วงขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วน (proportion limit) อัตราส่วนของแรงเค้นต่อความเครียดเรียกว่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ E โมดูลัสของความยืดหยุ่นจะอิงกับค่าสติฟเนสของวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามแรงเค้นสามประเภท คือการดึง การอัดและการเฉือน ทำให้มีโมดูลัสของความยืดหยุ่นสามแบบ คือโมดูลัสการดึง (modulus in tension) โมดูลัสการอัด (modulus in compression) และโมดูลัสการเฉือน (modulus in shear) ภายใต้แรงเค้นดึงสติฟเนสของวัสดุ มักเรียกว่ายังโมดูลัส (Young's modulus) ยังโมดูลัสเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียดในช่วงขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วน ดังสมการ

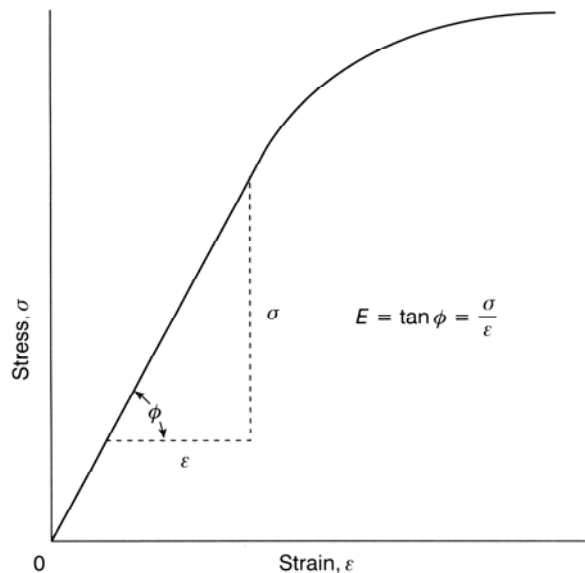
$$E = \sigma / \epsilon$$

ตัวอย่างที่ 1.4

คำนวณหาค่ายังโมดูลัสของเส้นลวดที่ใช้ในตัวอย่างที่ 1.3 โดยค่าแรงเค้นในช่วงขีดจำกัดแบบสัดส่วนเท่ากับ 300 lb/in.² และค่าความเครียดเท่ากับ 0.005

$$\begin{aligned} \text{จาก } E &= \sigma / \epsilon \\ &= (300 \text{ lb/in.}^2) / 0.005 \\ &= 60,000 \text{ lb/in.}^2 \text{ หรือ } 414 \text{ MPa} \end{aligned}$$

วัสดุที่มีค่ายังโมดูลัสสูงคือวัสดุที่มีค่าสติฟเนสสูง โมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) เป็นแบบเดียวกันกับยังโมดูลัส ซึ่งสามารถหาค่าโดยการคำนวณความชันของกราฟแรงเค้นกับความเครียด (stress-strain curve) ของวัสดุในช่วงที่เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ในทอมโมดูลัสของความยืดหยุ่นเป็นช่วงที่อาจสังเกตได้ยาก ตารางที่ 1.1 แสดงค่ายังโมดูลัสต่างๆไปของวัสดุบางชนิด โดยค่าโมดูลัสของเหล็กหล่อจะมีค่าเป็นช่วงซึ่งจะ



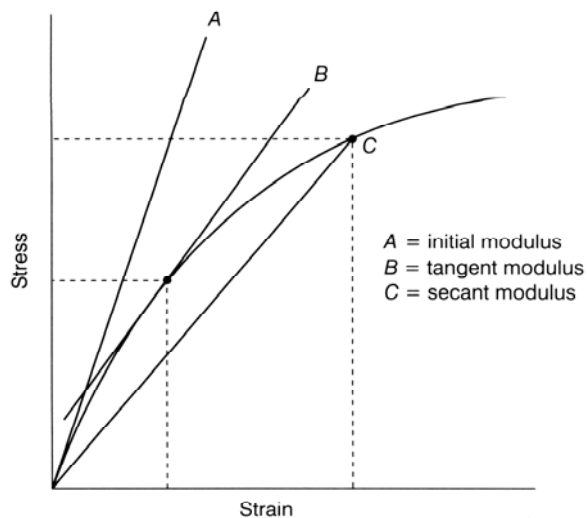
รูปที่ 1.4 การคำนวณค่ายังโมดูลัส

กราฟแรงเค้นกับความเครียดของวัสดุบางอย่างไม่ปรากฏส่วนที่เป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าต่างๆ ด้วยวิธีที่ต่างไป ตัวอย่างเช่นกราฟของคอนกรีตและเหล็กหล่อซึ่งไม่เป็นเส้นตรง การหาค่าโมดูลัสต้องทำการลากเส้นตรงแทนเจนต์ที่บริเวณจุดเริ่มต้นของกราฟแรงเค้นกับความเครียด เรียกว่า **โมดูลัสแทนเจนต์เริ่มแรก (initial tangent modulus)** และเส้นตรงแทนเจนต์ที่ลากบนกราฟเดียวกันนี้ที่บริเวณอื่นๆ ของกราฟเรียกว่า **โมดูลัสแทนเจนต์ (tangent modulus)** ส่วนเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นไปตัดอีกจุดหนึ่งบนกราฟแรงเค้นความเครียด ค่าอัตราส่วนแรงเค้นกับความเครียดที่จุดตัดนั้นเรียกว่า **โมดูลัสยืดหยุ่นแบบซีแคนต์ (secant modulus of elasticity)** โมดูลัสต่างๆ เหล่านี้ได้แสดงในรูปที่ 1.5 โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุโดยทั่วไปมีหน่วยเป็นจิกะปาสคาล (gigapascals, GPa) โมดูลัสของวัสดุภายใต้แรงเค้นเฉือนปกติจะเป็นสองในห้าของแรงเค้นในแนวแกน

โมดูลัสของความยืดหยุ่นจะขึ้นอยู่กับช่วงของการยืดหยุ่นของวัสดุ และไม่มีกราฟวัดสติฟเนสในช่วงที่เป็นการเสียรูปถาวร (plastic range) ของวัสดุ

Material	Modulus of Elasticity	
	(10^6 lb/in. ²)	(GPa)
Aluminum	10.4	72
Brass (70–30)	16	110
Cast iron	13.4–21	92–145
Copper	16	110
Glass	10.4	72
Granite	7.3	50
Inconel	31	214
Lead	2.4	16.5
Limestone	8.5	59
Magnesium	6.7	46
Marble	8	55
Molybdenum	50	345
Monel	25	172
Nickel	30	207
Polyethylene	11.5	79
Quartz	10	69
Silver	11	76
Stainless steel	28.5	196.5
Tin	8	55
Titanium	15.5	107
Tungsten	59	407
Zirconium	12.5	86

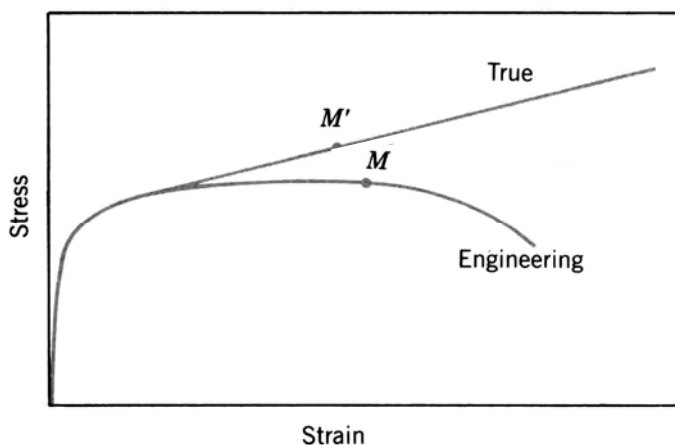
ตารางที่ 1.1 ค่ายังโมดูลัสทั่วไปของวัสดุต่างๆ



รูปที่ 1.5 การหาค่าโมดูลัสแบบต่างๆ

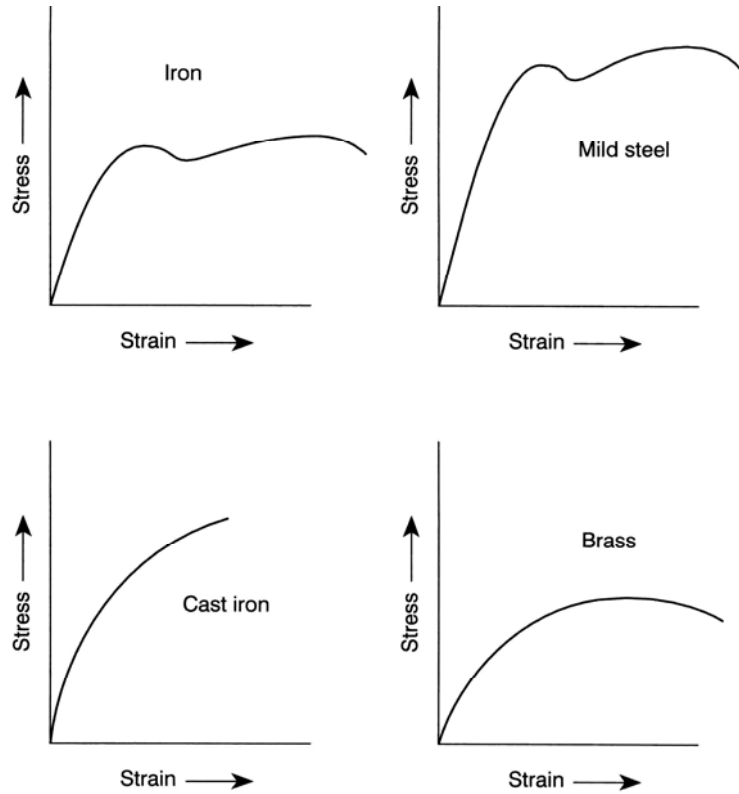
6. ไดอะแกรมแรงเค้นกับความเครียด (stress-strain diagram)

ไดอะแกรมแรงเค้นกับความเครียดหรือกราฟแรงเค้นกับความเครียดเป็นการพล็อตแรงเค้นหรือน้ำหนักที่ใส่กับความเครียดที่เกิดขึ้น แรงเค้นปกติจะพล็อตเป็นแกน X และความเครียดจะพล็อตเป็นแกน Y ไดอะแกรมแรงเค้นกับความเครียดจะพล็อตครอบคลุมแรงกระทำต่อการยืดออก (extension) การอัด การดัดงอ และการบิดเกลียว ไดอะแกรมเหล่านี้สามารถพล็อตด้วยมือจากข้อมูลที่ได้รับจากการอ่านค่าแรงกระทำกับการใช้เครื่องวัดความเครียด (strainometer) หรือการพล็อตอัตโนมัติของเครื่องทดสอบโดยใช้เกดวัดระยะยืดอิเล็กทรอนิกส์ (electronic strain gauge) แต่เนื่องจากการพล็อตกราฟแรงเค้นกับความเครียดนั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการหาค่าแรงเค้น กล่าวคือถ้าแรงเค้นที่นำมาพล็อตหาจากแรงที่กระทำเทียบกับพื้นที่หน้าเริ่มต้นตลอดการทดสอบซึ่งเรียกว่าแรงเค้นปกติ (nominal stress) เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะได้กราฟแรงเค้นความเครียดทางวิศวกรรม (engineering stress strain curve) หรือกราฟแรงเค้นความเครียดปกติ (nominal stress strain curve) ซึ่งใช้ในการทดสอบแรงดึงทั่วไป แต่ถ้าค่าแรงเค้นหาจากแรงกระทำเทียบกับพื้นที่หน้าตัดแท้จริงที่เปลี่ยนไปตามแรงที่กระทำที่เพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบซึ่งเรียกว่าแรงเค้นแท้จริง (true stress) กราฟที่ได้จะเรียกว่ากราฟแรงเค้นความเครียดแท้จริง (true stress strain curve) กราฟนี้ปกติไม่นิยมใช้เนื่องจากมีความยุ่งยากในการทดสอบกราฟแรงเค้นความเครียดทั้งสองแบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.6 โดย M และ M' เป็นตำแหน่งที่วัสดุเกิดคอคอดก่อนแตกหัก



รูปที่ 1.6 กราฟแรงเค้นความเครียดแท้จริงและกราฟแรงเค้นความเครียดทางวิศวกรรม

เนื่องวัสดุมีสมบัติทางกลที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิงจึงมีการตอบสนองต่อแรงที่กระทำแตกต่างกัน ทำให้ได้กราฟแรงเค้นความเครียดที่ต่างกันอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 1.7

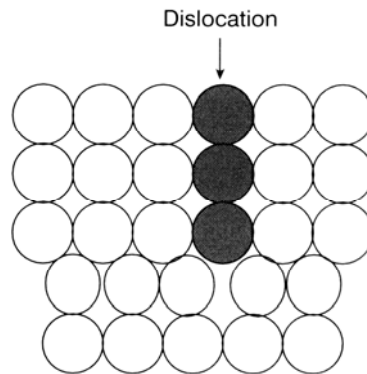


รูปที่ 1.7 กราฟแรงเค้นความเครียดของโลหะต่างๆ

7. กระบวนการเลื่อน (slip systems)

การเสีรูปร่าง (plastic deformation) เป็นการเลื่อนของจุดบกพร่องต่างๆในโครงสร้างผลึกของวัสดุที่เรียกว่าดิสโลเคชัน (dislocation) ซึ่งเกิดขึ้นในโลหะทุกชนิด การเปลี่ยนตำแหน่งของพันธะระหว่างอะตอมเป็นเหตุทำให้เกิดการเสีรูปร่างมากกว่าการเกิดการแตกร้าวของโลหะ การเสีรูปร่างจะเกิดขึ้นเมื่อโลหะรับแรงเกินแรงยึดเหนี่ยวของพันธะระหว่างอะตอม

ดิสโลเคชันเป็นอะตอมหรือบางส่วนของแถวอะตอมซึ่งไม่เต็มแถวในโครงผลึก ดังแสดงในรูปที่ 1.8 แถวอะตอมที่ไม่สมบูรณ์เหล่านี้เป็นเหตุทำให้เกิดพันธะที่ไม่สมบูรณ์และเกิดการเบนของแถวอะตอมที่สมบูรณ์รอบๆ โดยการแทรกของแถวอะตอมที่มีแถวอะตอม



รูปที่ 1.8 ภาพจำลองดิสโลเคชัน

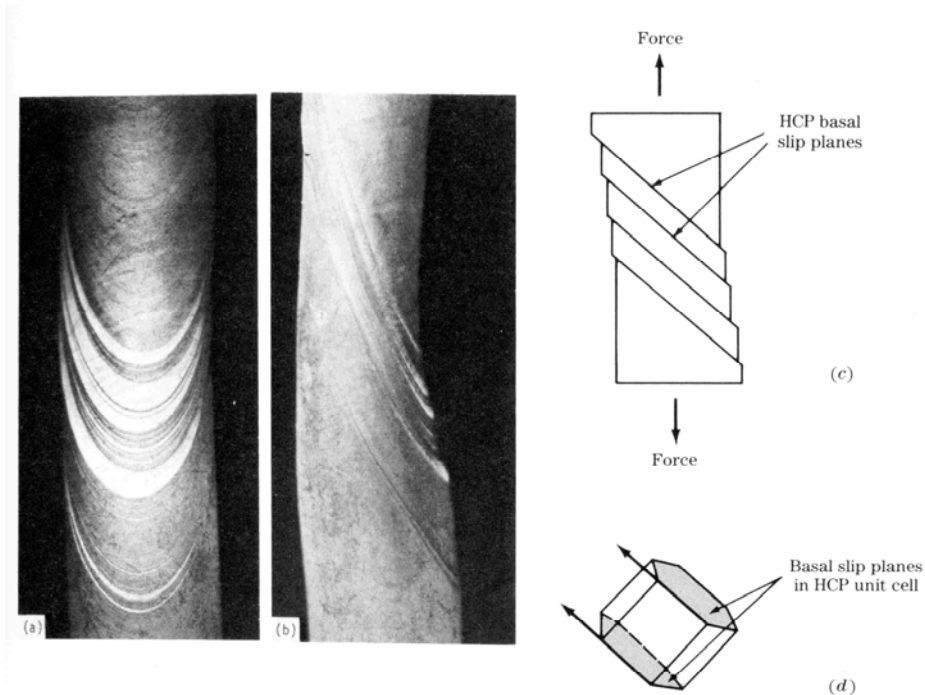
เมื่อดิสโลเคชันเคลื่อนไปที่พื้นผิวผลึกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของระยะระหว่างอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่าการเลื่อน (slip) เนื่องจากมีบางส่วนของผลึกเคลื่อนผ่านเนื้อส่วนอื่นๆ ในโครงผลึก และเป็นการสิ้นสุดของดิสโลเคชันเริ่มแรก ภายใต้สภาวะแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีดิสโลเคชันใหม่เกิดขึ้น กระบวนการเหล่านี้สามารถสังเกตเห็นได้ในกระบวนการเสียรูปถาวรของวัสดุภายใต้สภาวะการรับแรง การเพิ่มแรงเค้นเป็นสิ่งจำเป็นในการเคลื่อนดิสโลเคชันผ่านเนื้อวัสดุไปที่พื้นผิว และเมื่อเอาแรงกระทำออกหรือดึงไว้ด้วยแรงกระทำคงที่ดิสโลเคชันทั่วทั้งวัสดุจะหยุดการเคลื่อนที่

การเลื่อนจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกว่าวัสดุมีแรงมากพอที่จะต้านแรงกระทำ เช่นการเลื่อนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในชั้นทดสอบแรงดึงร่วมกับการลดลงของพื้นที่หน้าตัดจนเกิดการแตกหัก การเลื่อนในชั้นทดสอบโลหะตลอดแนวระนาบการเลื่อนทำให้เกิดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดซึ่งเป็นการเลื่อนของดิสโลเคชันตลอดชั้นทดสอบ เมื่อดิสโลเคชันเหล่านี้ลดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุถึงจุดหนึ่ง พันธะของอะตอมที่เหลื่ออยู่จะไม่สามารถรับแรงที่กระทำได้ต่อไป ชั้นทดสอบจะเกิดการแตกหัก

7.1 การเสียรูปถาวรของโลหะผลึกเดี่ยว

7.1.1 แถบการเลื่อนและแนวการเลื่อนของผลึกบนพื้นผิวโลหะ

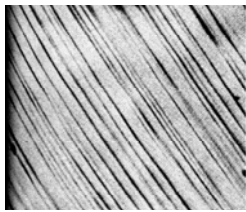
เริ่มแรกพิจารณาการเสียรูปแบบถาวรของแท่งผลึกเดี่ยวของสังกะสี โดยการใส่แรงเค้นให้เกินขีดจำกัดยืดหยุ่น (elastic limit) ผลการทดสอบผลึกสังกะสีหลังเกิดการเสียรูปได้แสดงไว้เป็นลำดับขั้นตามที่ปรากฏบนพื้นผิว ซึ่งเรียกว่าแถบการเลื่อน (slip bands) (รูป 1.9a และ b) การเกิดแถบการเลื่อนเป็นผลมาจากการเลื่อนหรือการเสียรูปแบบเฉือนของอะตอมโลหะบนระนาบผลึกเฉพาะเรียกว่าระนาบการเลื่อน (slip planes) พื้นผิวผลึกเดี่ยวของสังกะสีเป็นตัวอย่างการเกิดแถบการเลื่อนที่ชัดเจนมาก เนื่องจากการเลื่อนที่เกิดขึ้นในผลึกเหล่านั้นตอนเริ่มต้นถูกจำกัดอยู่บนพื้นฐานของระนาบผลึก HCP (รูป 1.9c และ d)



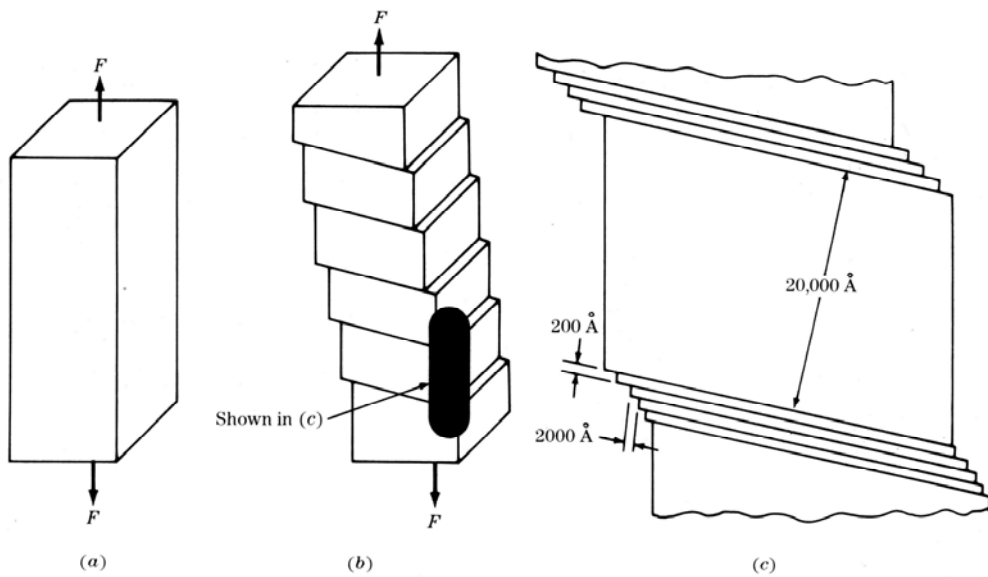
รูปที่ 1.9 การเสียรูปถาวรของผลึกเดี่ยวสังกะสี

- ภาพแถบการเลื่อนด้านหน้าของชิ้นทดสอบ
- ภาพแถบการเลื่อนด้านข้างของชิ้นทดสอบ
- ภาพจำลองด้านข้างของระนาบการเลื่อนในโครงผลึก HCP
- ระนาบการเลื่อนในหน่วยเซลล์ของโครงผลึก HCP

ในผลึกเดี่ยวของโลหะ FCC ซึ่งเหนียว เช่นทองแดงและอะลูมิเนียม การเลื่อนเกิดขึ้นในลักษณะหลายระนาบ เสมือนกับการเกิดเป็นรูปแบบของแถบการเลื่อนซ้ำๆกันบนพื้นผิวของโลหะ เมื่อโลหะเกิดการเสียรูปเป็นรูปแบบเดียวกันเป็นจำนวนมากๆ (รูป 1.10) และสังเกตพื้นผิวของโลหะที่เกิดการเลื่อนให้ใกล้ยิ่งขึ้นด้วยกำลังขยายสูงๆ พบว่าการเลื่อนที่เกิดขึ้นบนหลายๆระนาบการเลื่อนเหล่านั้นด้วยแถบการเลื่อน (รูป 1.11) ชั้นการเลื่อนที่ละเอียดเหล่านี้เรียกว่าแนวการเลื่อน ซึ่งปกติประกอบด้วยอะตอมประมาณ 50 ถึง 500 อะตอมต่อหนึ่งชั้น ในขณะที่แถบการเลื่อนปกติถูกแยกกันประมาณ 10000 เส้นผ่านศูนย์กลางอะตอม เป็นเรื่องที่ต้องระวังเพราะบ่อยครั้งที่ใช้แถบการเลื่อนสลับกับแนวการเลื่อน



รูปที่ 1.10 รูปแบบแถบการเลื่อนบนพื้นผิวผลึกเดี่ยวทองแดง หลังเกิดการเสียรูปร้อยละ 0.9 (100x)

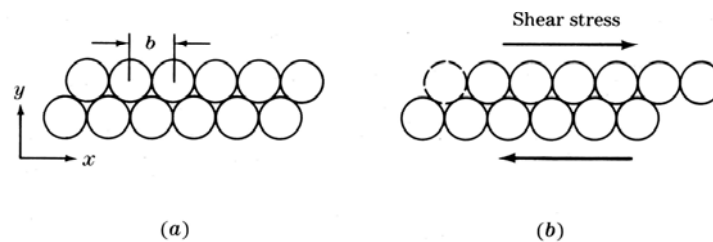


รูปที่ 1.11 แสดงการเกิดแถบการเลื่อนระหว่างการเสียรูปถาวร

- (a) ภาพผลึกเดี่ยวภายใต้แรงเค้นดึง
- (b) แถบการเลื่อนเกิดขึ้นหลังจากแรงกระทำเกินแรงเค้นจำนน
- (c) ภาพขยายรูป (b) การเลื่อนจำนวนมากในระนาบ close packed ที่เรียงตัวขนานกัน

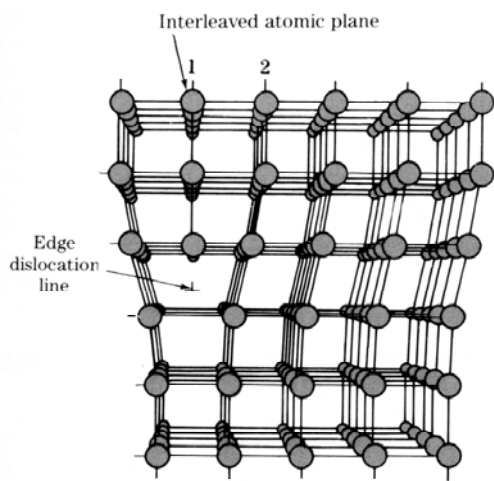
7.1.2 การเสีรูปร่างในผลึกโลหะจากกลไกการเลื่อน

รูปที่ 1.12 แสดงรูปแบบอะตอมบริเวณหน้าการเลื่อนของหนึ่งแถบอะตอมที่เลื่อนผ่านเหนืออะตอมอื่นในผลึกโลหะที่สมบูรณ์ จากการคำนวณความแข็งแรงของผลึกโลหะจากรูปแบบที่กำหนดนี้พบว่ามีความแข็งแรงประมาณ 1000 ถึง 10000 เท่าของความแข็งแรงเนียนที่ได้จากการทดสอบ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากลไกการเลื่อนของอะตอมในลักษณะเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ไม่ถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องจากการเสีรูปร่างที่ความแข็งแรงเนียนต่ำของผลึกโลหะขนาดใหญ่ นั้นต้องมีผลึกที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งเรียกว่าดิสโลเคชัน (dislocation) ปรากฏอยู่อย่างหนาแน่น ดิสโลเคชันเหล่านี้จะมีปริมาณมากขึ้น (ประมาณ 10^6 cm/cm^3) ในขั้นตอนการแข็งตัวของโลหะ และเพิ่มมากขึ้นอีกเมื่อผลึกโลหะเกิดการเสีรูปร่าง ดังนั้นผลึกที่เกิดการเสีรูปร่างอย่างมากอาจมีดิสโลเคชันสูงถึง 10^{12} cm/cm^3 รูปที่ 1.13 แสดงขั้นตอนของเอ็ดจิสโลเคชัน (edge dislocation) ที่ทำให้เกิดหน่วยการเลื่อนภายใต้แรงเฉือนต่ำ โดยการเลื่อนด้วยกระบวนการนี้ต้องการแรงเค้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากมีกลุ่มอะตอมเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เลื่อนผ่านเหนืออะตอมอื่นๆ ในผลึกโลหะ

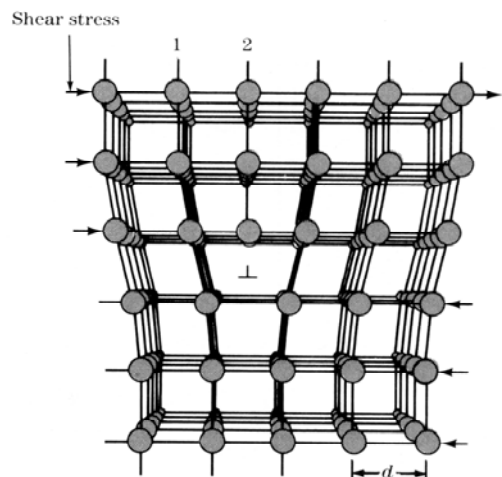


รูปที่ 1.12 ภาพจำลองการเลื่อนของกลุ่มอะตอมในผลึกโลหะ

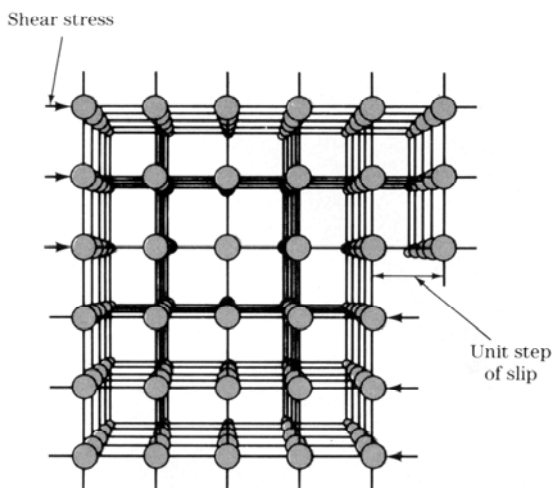
นอกจากนี้ยังมีสกรูดิสโลเคชัน (screw dislocation) ที่เกิดจากแรงเค้นเฉือนที่กระทำแล้วทำให้เกิดบิดตัวดังแสดงในรูปที่ 1.14a จะเห็นว่าด้านหน้าครึ่งบนมีการเลื่อนไปทางขวาหนึ่งระยะอะตอม ซึ่งเกิดจากการบิดของอะตอมในลักษณะคล้ายเกลียวตลอดแนวเส้นตรงการเคลื่อน AB ดังแสดงในรูปที่ 1.14b แต่ดิสโลเคชันที่พบในวัสดุที่เป็นผลึกนั้นส่วนใหญ่จะไม่ใช่แบบเอ็ดจิสโลเคชันหรือสกรูดิสโลเคชันเพียงอย่างเดียว หากแต่จะเกิดร่วมกันเป็นดิสโลเคชันผสม (mixed dislocation) ดังแสดงในรูปที่ 1.15a และ b ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้วัสดุเกิดการเสีรูปร่างในระดับมหภาคอันเนื่องมาจากกลไกการเลื่อนของดิสโลเคชันในแบบ



(a) An edge dislocation, pictured as formed by an extra half plane of atoms.

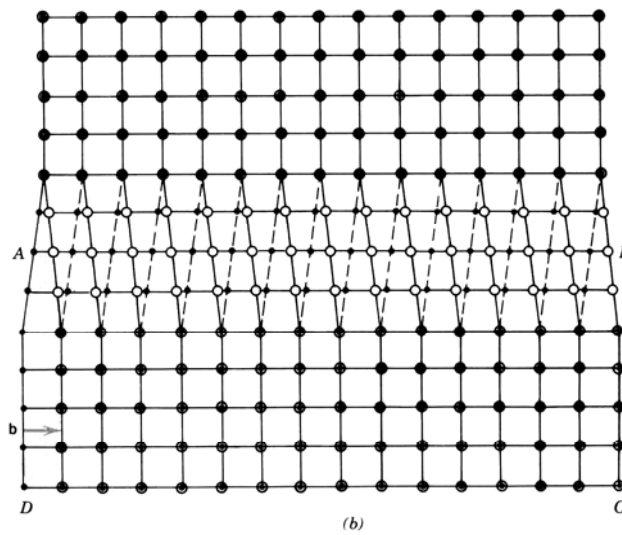
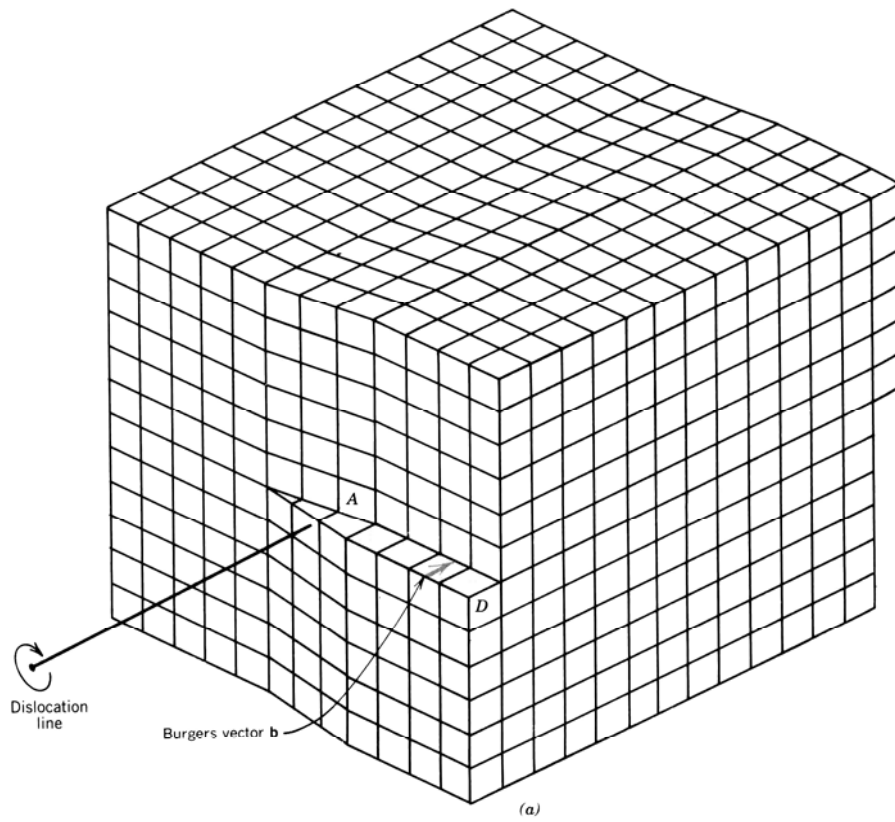


(b) A low stress causes a shift of atomic bonds to free a new interlayered plane.

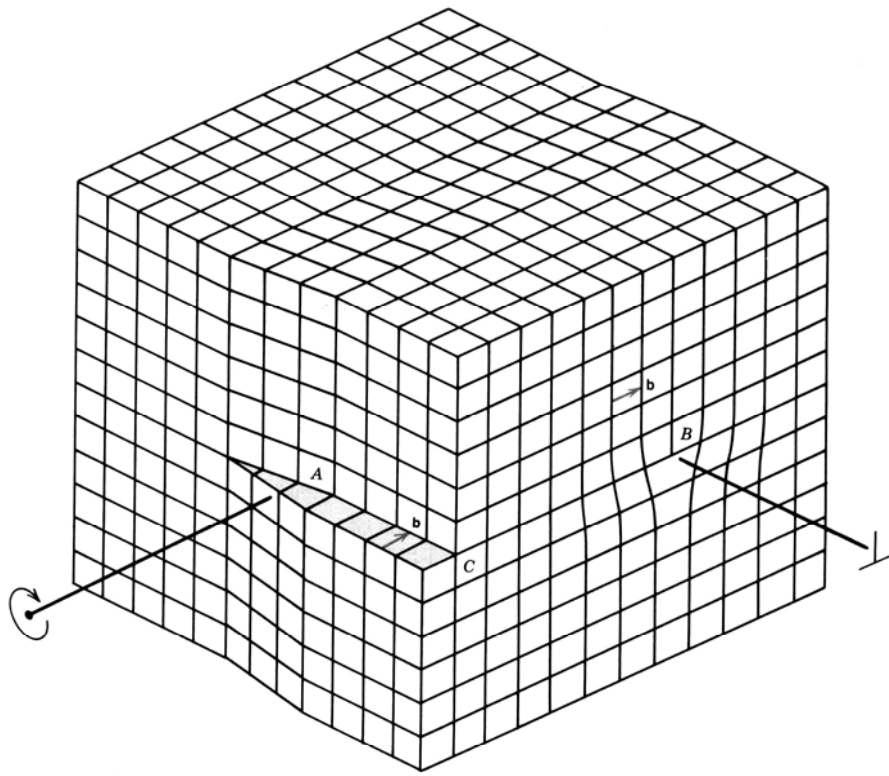


(c) Repetition of this process causes the dislocation to move across the crystal.

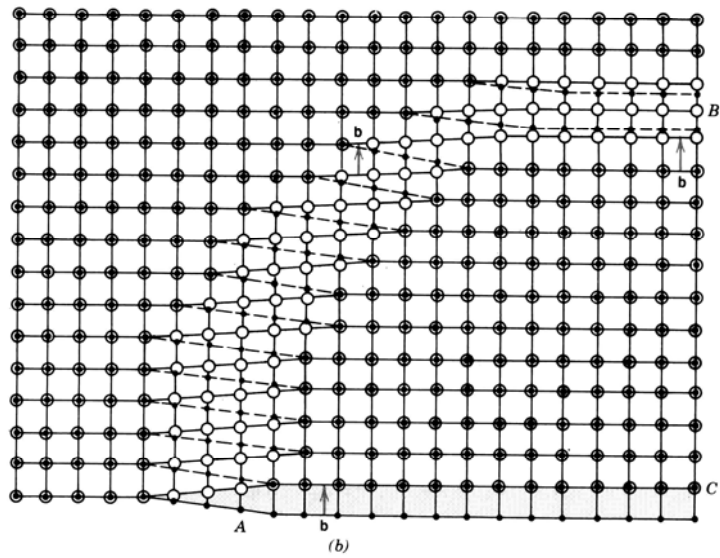
รูปที่ 1.13 แสดงขั้นตอนของกระบวนการ
 การเลื่อนของดิสโลเคชันภายใต้
 สภาวะแรงเค้นต่ำ
 (a) เอดดิสโลเคชันจากการเรียง
 อะตอมครึ่งระนาบในผลึกโลหะ
 (b) การเลื่อนของอะตอมบริเวณ
 เอดดิสโลเคชันภายใต้แรงเค้นต่ำ
 (c) ภาพผลึกหลังดิสโลเคชันเลื่อน
 ผ่านตลอดโครงสร้างผลึก



รูปที่ 1.14 (a) ลักษณะสกรูตีสโตเคชันในผลึก (b) ภาพจากมุมมองด้านบนของสกรูตีสโตเคชันในรูป (a)

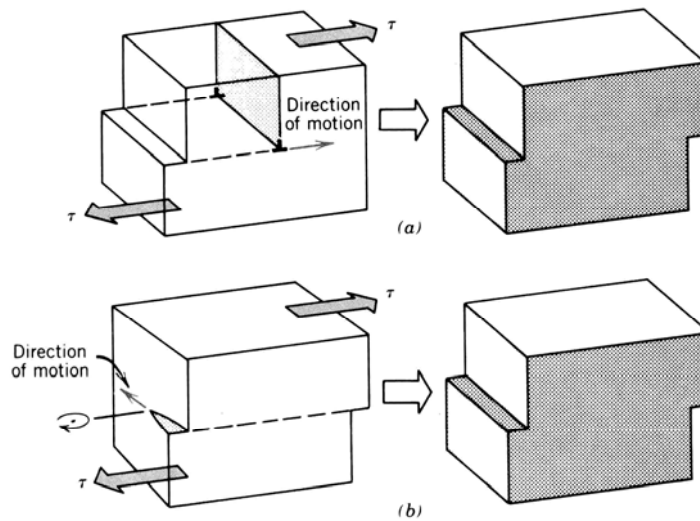


(a)



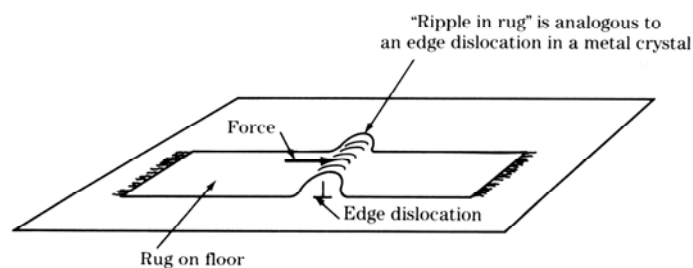
(b)

รูปที่ 1.15 (a) ลักษณะการเกิดเอ็ดดิสโลเคชัน สกรูดิสโลเคชันและดิสโลเคชันผสม (b) ภาพ
 ด้านบนของการเกิดดิสโลเคชันในแบบต่างๆ



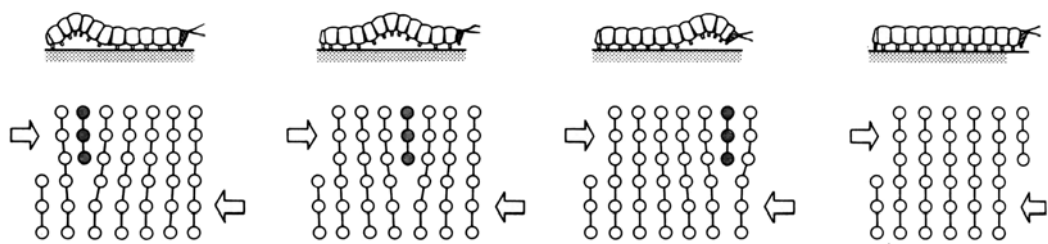
รูปที่ 1.16 ทิศทางการเคลื่อนของเอดจิสโลเคชัน (a) และของสกรูคิสโลเคชัน (b) รวมทั้งการเสียดรูปถาวรระดับมหภาคอันเนื่องมาจากกลไกการเคลื่อนทั้งสอง

อุปมาเหตุการณ์การเคลื่อนของคิสโลเคชันในโครงผลึกโลหะภายใต้แรงเค้นเฉือนได้โดยจำลองเป็นการเคลื่อนของผ้าพรมด้วยการกระเพื่อมตามขวางไปในแนวยาวของพรมจากการสับที่ปลายด้านหนึ่ง ในความเป็นจริงอาจเป็นไปได้ในการเคลื่อนระลอกคลื่นในพรมเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างพื้นกับพรม อย่างไรก็ตามถ้าอุปมาคลื่นในพรมเป็นคิสโลเคชันในผลึกโลหะ พรมจะเลื่อนโดยผลักระลอกคลื่นในพรมผ่านผืนพรมในแนวขวาง (รูปที่ 1.17)



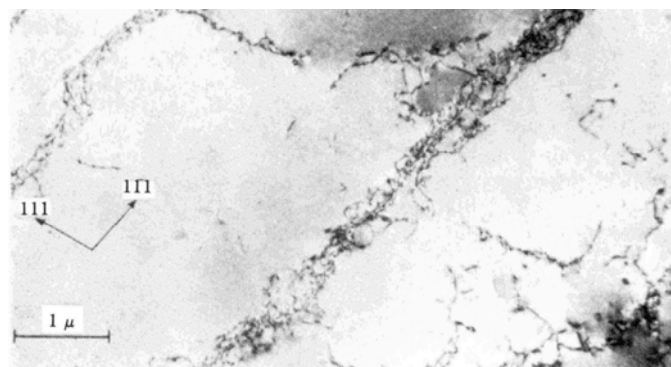
รูปที่ 1.17 ภาพเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของคิสโลเคชันกับการเคลื่อนของลูกคลื่นในพรม

หรืออาจเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ของตัวหนอนดังรูปที่ 1.18 กล่าวคือตัวหนอนจะเคลื่อนโดยการโก่งปล้องส่วนปลายด้านหลังขึ้น แล้วผลัปล้องกับขาซุดหลังสุดไปข้างหน้าหนึ่งก้าว ขณะเดียวกันก็จะยกปล้องและขาซุดถัดไปขึ้นพร้อมกับก้าวไปข้างหน้าหนึ่งก้าว เป็นเช่นนี้ไป



รูปที่ 1.18 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันกับการเคลื่อนที่ของตัวหนอน

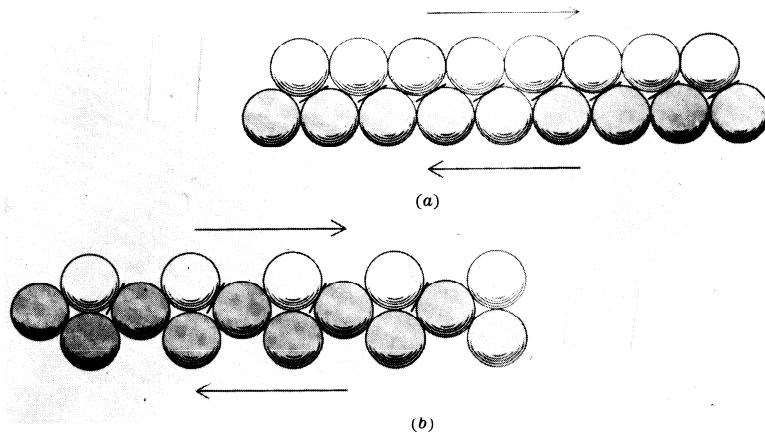
ดิสโลเคชันในผลึกโลหะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยการนำแผ่นฟลอยโลหะบางๆ มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน โดยภาพที่ปรากฏจะเป็นเส้นหลายเส้นจากการรบกวนลำแสงอิเล็กตรอนของอะตอมที่ไม่เป็นระเบียบบริเวณดิสโลเคชัน รูปที่ 1.19 แสดงรูปแบบผนังเซลล์ลวดตาที่เป็นแบบเดียวกันของดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นจากการเสีรูปลักษณ์น้อยของชิ้นตัวอย่างอะลูมิเนียม จะเห็นว่าเซลล์ค่อนข้างอิสระจากดิสโลเคชัน แต่ถูกแยกออกจากกันด้วยผนังดิสโลเคชันที่หนาแน่นสูง



รูปที่ 1.19 โครงสร้างเซลล์ดิสโลเคชันในชิ้นตัวอย่างอะลูมิเนียมที่มีการเสีรูปลักษณ์น้อย


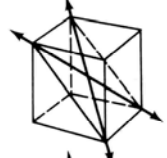
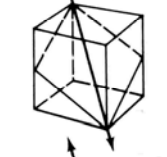
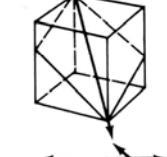
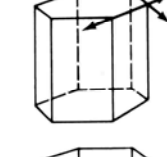
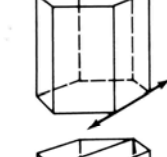
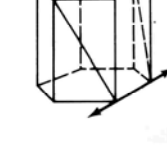
7.1.3 ระบบการเลื่อน

ดิสโลเคชันทำให้เกิดการแทนที่ของอะตอมบนระนาบการเลื่อน โครงผลึกในทิศทาง การเลื่อนของ โครงผลึกนั้น ปกติระนาบการเลื่อนเป็นระนาบที่ผนึกกันแน่นที่สุด และการ เลื่อนในตัวระนาบการเลื่อนนี้เกิดได้มากที่สุด โดยการเลื่อนมักเกิดกับระนาบผลึก close- packed เนื่องจากต้องการแรงเฉือนในการแทนที่ของอะตอมน้อยกว่าระนาบผลึกที่มีความหนาแน่นต่ำ (รูปที่ 1.20) อย่างไรก็ตามถ้าการเลื่อนบนระนาบ close-packed ถูกจำกัด เช่นจากการให้แรงเค้นสูงเฉพาะบางบริเวณ ระนาบที่มีการผนึกอะตอมต่ำกว่าจะเกิดการเลื่อน แต่การเลื่อนมักเกิดขึ้นในทิศทางของ close-packed เสมอ เนื่องจากในการเคลื่อนอะตอมจากตำแหน่งหนึ่งไปอีกตำแหน่งหนึ่งถ้าอะตอมอยู่ใกล้กว่าจะใช้พลังงานในการเลื่อนน้อยกว่า

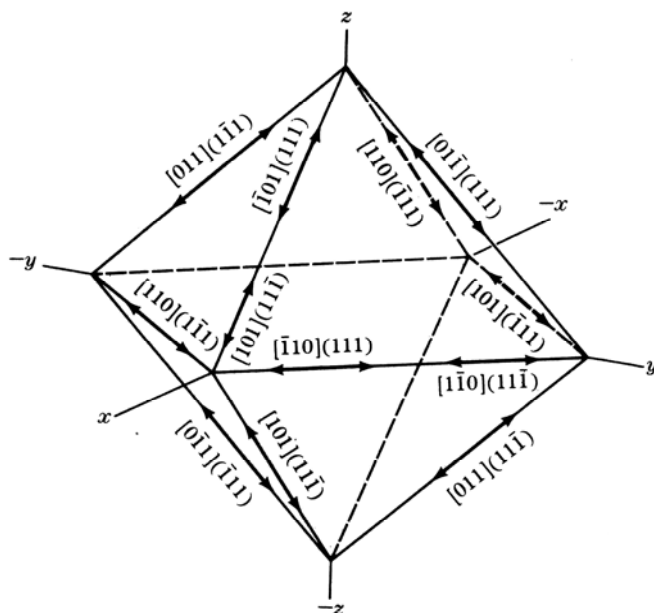


รูปที่ 1.20 การเลื่อนของอะตอม (a) ระนาบ close-packed (b) ระนาบไม่ใช่ close-packed

เมื่อรวมระนาบการเลื่อนกับทิศทาง การเลื่อนจะเรียกว่าระบบการเลื่อน การเลื่อนใน โครงผลึกโลหะขึ้นอยู่กับจำนวนของระบบการเลื่อนซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละ โครงผลึก ตารางที่ 1.2 เป็นระนาบการเลื่อนและทิศทาง การเลื่อนของ โครงผลึก FCC BCC และ HCP สำหรับโลหะที่มีโครงผลึกเป็น FCC การเลื่อนจะเกิดบนระนาบ octahedral $\{111\}$ close packed ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ close-packed ยังมีระนาบ octahedral อื่นๆในโครงผลึก FCC (รูปที่ 1.21) ระนาบประเภท $\{111\}$ ที่ตรงข้ามผิวหน้าของ octahedral ที่ขนานกับระนาบอื่นๆ จะพิจารณาในแบบเดียวกับระนาบการเลื่อน $\{111\}$ ดังนั้นระนาบการเลื่อนมีเพียงสี่ประเภทที่แตกต่างกันในโครงผลึก FCC แต่ละระนาบประเภท (111) ประกอบด้วยสามทิศทาง การเลื่อน

Structure	Slip plane	Slip direction	Number of slip systems	
FCC: Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γ Fe, ...	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	$4 \times 3 = 12$	
BCC: α Fe, W, Mo, β brass	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$6 \times 2 = 12$	
α Fe, Mo, W, Na	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$12 \times 1 = 12$	
α Fe, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$24 \times 1 = 24$	
HCP: Cd, Zn, Mg, Ti, Be, ...	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$1 \times 3 = 3$	
Ti (prism planes)	{10 $\bar{1}$ 0}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$3 \times 1 = 3$	
Ti, Mg (pyramidal planes)	{10 $\bar{1}$ 1}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$6 \times 1 = 6$	

ตารางที่ 1.2 ระบบการเลื่อนของโครงสร้างผลึกแบบต่างๆ



รูปที่ 1.21 แสดงระนาบและทิศทางการเลื่อนของโครงผลึก FCC

โครงสร้าง BCC ไม่ใช่โครงสร้าง close packed และไม่มีระนาบที่หนาแน่นอะตอมมากที่สุดเหมือนกับโครงสร้าง FCC ระนาบ (110) มีความหนาแน่นอะตอมสูงสุดและการเลื่อนมักเกิดบนระนาบนี้ อย่างไรก็ตามการเลื่อนในโลหะ BCC จะเกิดบนระนาบ (112) และ (113) เนื่องจากระนาบการเลื่อนในโครงสร้าง BCC ไม่ใช่ close packed เหมือนในกรณีของโครงสร้าง FCC ดังนั้นการเลื่อนในโลหะ BCC จำเป็นต้องใช้แรงเค้นเฉือนสูงกว่าใน FCC ทิศทางการเลื่อนในโลหะ BCC จะเกิดในทิศ (111) เนื่องจากมีระนาบการเลื่อนแบบ (110) ซึ่งแต่ละแบบสามารถเลื่อนในสองทิศทางของ (111) จะได้เป็นหกคู่รวมเป็นสิบสองระบบการเลื่อน $(\bar{1}10)(111)$

ในโครงสร้าง HCP ระนาบพื้นฐาน (0001) เป็นระนาบ close packed และเป็นระนาบการเลื่อนปกติของโลหะ HCP เช่น Zn Cd และ Mg ซึ่งมีอัตราความยาวแกน c/a ที่สูง (ตาราง 1.2) อย่างไรก็ตามสำหรับโลหะ HCP เช่น Ti Zr และ Be ซึ่งมีอัตราความยาวแกน c/a ต่ำ การเลื่อนปกติจะเกิดบนระนาบปริซึม (10 $\bar{1}0$) และพีระมิด ($\bar{1}011$) ในกรณีเหล่านี้ทั้งหมดทิศทางการเลื่อนยังคงเป็น (1120) จำนวนระบบการเลื่อนที่จำกัดในโลหะ HCP เป็นตัวกำหนดสมบัติความเหนียว

7.1.4 แรงเค้นเฉือนวิกฤตที่กำหนดสำหรับผลึกเดี่ยวของโลหะ

แรงเค้นที่ต้องการใช้เพื่อให้เกิดการเลื่อนในผลึกเดี่ยวของโลหะบริสุทธิ์โดยหลักจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกของโลหะ คุณลักษณะของการเกิดพันธะระหว่างอะตอม อุณหภูมิ ณ จุดที่เกิดการเสียรูป และการจัดเรียงทิศทางของระนาบการเลื่อนที่ไวซึ่งสัมพันธ์กับแรงเฉือน การเลื่อนจะเริ่มเกิดขึ้นภายในผลึกเมื่อใส่แรงเฉือนบนระนาบผลึกในทิศทางที่เลื่อนจนถึงระดับที่ต้องการ เรียกว่า แรงเฉือนวิกฤตกำหนด หัวใจสำคัญค่านี้ถือเป็นค่าแรงเค้นจำนวนของผลึกเดี่ยวและเป็นค่าที่เท่ากับค่าแรงเค้นจำนวนของโลหะแบบหลายผลึก หรือโลหะผสมที่กำหนดโดยกราฟแรงเค้นความเครียด (stress - strain curve) จากการทดสอบแรงดึง

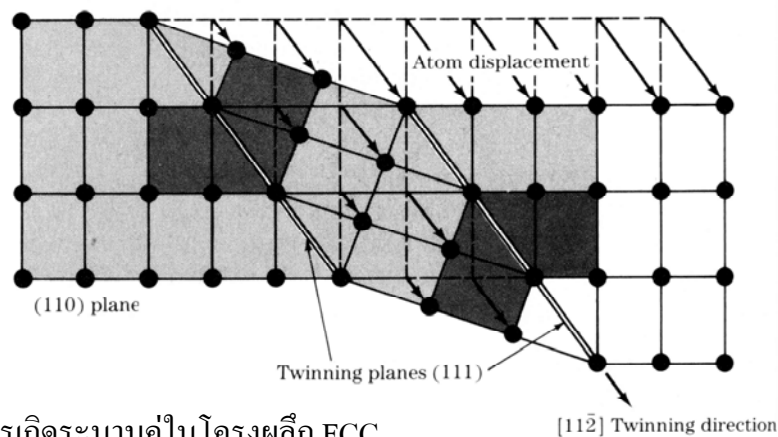
ตารางที่ 1.3 แสดงค่าแรงเค้นเฉือนวิกฤตกำหนดของผลึกเดี่ยวของโลหะบริสุทธิ์บางชนิดที่อุณหภูมิห้อง โลหะ HCP เช่น Zn Cd และ Mg มีแรงเค้นเฉือนวิกฤตกำหนดต่ำระหว่าง 18 ถึง 77 g/mm² ในทางตรงกันข้ามโลหะไทเทเนียม HCP กลับมีค่าที่สูงถึง 1400 g/mm² ซึ่งทำให้เชื่อได้ว่าการเกิดบางพันธะโควาเลนต์ผสมกับพันธะโลหะทำให้ได้ค่าแรงนี้สูง โลหะ FCC บริสุทธิ์ เช่น Ag และ Cu มีค่าแรงนี้ต่ำคือ 48 และ 65 g/mm² ดังที่คาดไว้ เนื่องจากระบบการเลื่อนที่ซ้อนกันอยู่มาก

Metal	Crystal structure	Purity, %	Slip plane	Slip direction	Critical shear stress, g/mm ²
Zn	HCP	99.999	(0001)	[11 $\bar{2}$ 0]	18
Mg	HCP	99.996	(0001)	[11 $\bar{2}$ 0]	77
Cd	HCP	99.996	(0001)	[11 $\bar{2}$ 0]	58
Ti	HCP	99.99	(1010)	[11 $\bar{2}$ 0]	1400
		99.9	(1010)	[11 $\bar{2}$ 0]	9190
Ag	FCC	99.99	(111)	[1 $\bar{1}$ 0]	48
		99.97	(111)	[1 $\bar{1}$ 0]	73
		99.93	(111)	[1 $\bar{1}$ 0]	131
Cu	FCC	99.999	(111)	[1 $\bar{1}$ 0]	65
		99.98	(111)	[1 $\bar{1}$ 0]	94
Ni	FCC	99.8	(111)	[1 $\bar{1}$ 0]	580
Fe	BCC	99.96	(110)	[1 $\bar{1}$ 1]	2800
			(112)		
			(123)		
Mo	BCC	...	(110)	[1 $\bar{1}$ 1]	5000

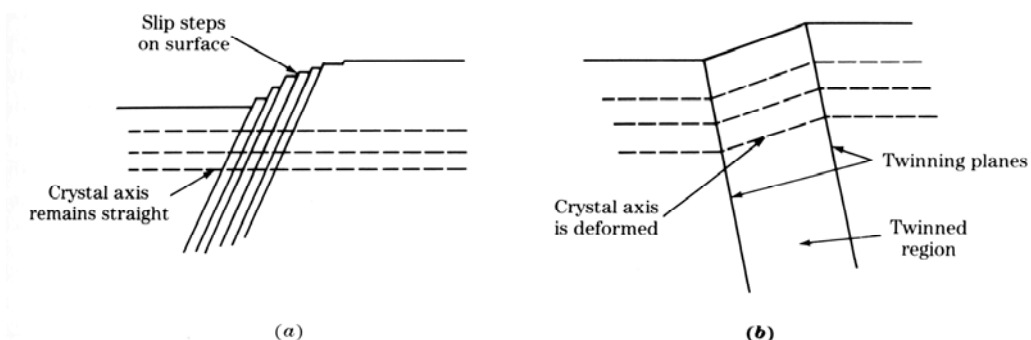
ตารางที่ 1.3 ระบบการเลื่อนที่อุณหภูมิห้องและแรงเค้นเฉือนวิกฤตของโลหะผลึกเดี่ยว

7.1.5 การเกิดระนาบคู่ (twinning)

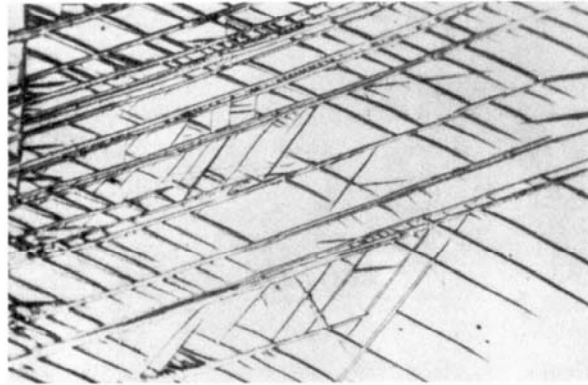
กลไกการเสียรูปถาวรของโลหะที่สำคัญเป็นลำดับสองคือการเกิดระนาบคู่ (twinning) โดยบางส่วนของผลึกจะเกิดการเสียรูปในลักษณะที่เป็นภาพสะท้อนในกระจกเงาของผลึกที่ไม่เสียรูปที่อยู่ติดกัน (รูปที่ 1.22) ระนาบผลึกที่สมมาตรกันของส่วนที่เกิดการเสียรูปกับส่วนที่ไม่เสียรูปของผลึกโลหะเรียกว่าระนาบคู่ (twinning plane) การเกิดระนาบคู่เป็นการเคลื่อนที่เกิดขึ้นในทิศทางที่เรียกว่าทิศทางระนาบคู่ (twinning direction) โดยอะตอมทั้งหมดที่เคลื่อนไปอยู่อีกด้านหนึ่งของระนาบการเคลื่อนจะเคลื่อนไปในระยะที่เท่ากัน และขณะที่การเกิดระนาบคู่จะเคลื่อนไปอย่าง เป็นสัดส่วนกับระยะของอะตอมจากคู่ระนาบ (รูปที่ 1.22) รูปที่ 1.23 เป็นตัวอย่างของความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนกับการเกิดระนาบคู่บนพื้นผิวโลหะหลังเกิดการเสียรูป โดยการเคลื่อนจะเคลื่อนไปในลักษณะที่เป็นขั้นลำดับ (รูปที่ 1.23a) ในขณะที่ระนาบคู่จะเคลื่อนไปเพียงเล็กน้อยซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการเสียรูปของผลึก (รูปที่ 1.23b) รูปที่ 1.24 แสดงการเกิดระนาบคู่บนพื้นผิวของโลหะไทเทเนียม



รูปที่ 1.22 ภาพการเกิดระนาบคู่ในโครงผลึก FCC



รูปที่ 1.23 ภาพจำลองการเสียรูปแบบต่างๆ (a) การเกิดการเคลื่อน (b) การเกิดระนาบคู่



รูปที่ 1.24 การเสีรูปร่างแบบระนาบคู่ของไทเทเนียม 99.77% (150x)

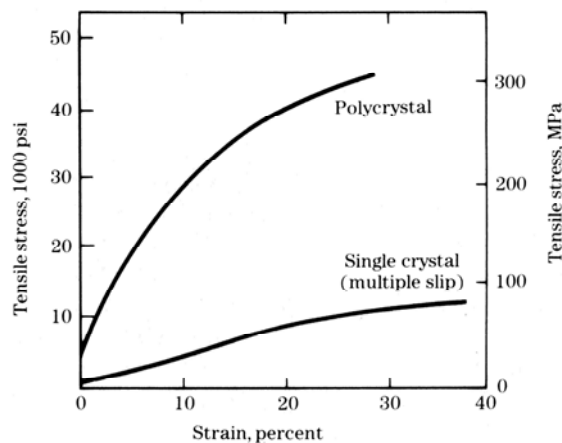
การเกิดระนาบคู่ถือเป็นการเสีรูปร่างเพียงส่วนน้อยเมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของผลึกโลหะ และปริมาณการเสีรูปร่างที่เกิดจากระนาบคู่ก็นับเป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับการเสีรูปร่างทั้งหมด อย่างไรก็ตามบทบาทสำคัญของการเกิดระนาบคู่ในการเสีรูปร่างคือการเปลี่ยนการจัดเรียงทิศทางผลึกที่อาจนับเป็นระบบการเลื่อนแบบใหม่เพิ่มเติมจากเดิมในการจัดเรียงทิศทางที่เกิดจากแรงเค้นเฉือน ซึ่งจะช่วยให้เกิดการเลื่อนได้มากขึ้น จากสามโครงสร้างผลึกหลักๆทางโลหะคือ BCC FCC และ HCP การเกิดระนาบคู่มีความสำคัญที่สุดกับโครงสร้างผลึก HCP เนื่องจากจำนวนระบบการเลื่อนของโครงสร้างผลึกที่มีอยู่น้อย และถึงแม้ว่าจะมีการเกิดระนาบคู่ช่วยในระบบการเลื่อนเพิ่มขึ้น โลหะ HCP เช่น Zn และ Mg ก็ยังคงมีความเหนียวต่ำกว่าโลหะ BCC และ FCC ซึ่งมีระบบการเลื่อนที่มากกว่า

การเสีรูปร่างแบบระนาบคู่จะเกิดที่อุณหภูมิห้องสำหรับโลหะ HCP ส่วนการเกิดระนาบคู่ในโลหะ BCC เช่น Fe Mo W Ta และ Cr นั้นสามารถเกิดได้ถ้ามีการเสีรูปร่างที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ดังนั้นการเกิดระนาบคู่ในผลึกโลหะ BCC เหล่านี้ที่อุณหภูมิห้องจะพบได้ในโลหะเพียงบางชนิดเท่านั้นและต้องได้รับแรงเค้นที่สูงมากๆ โลหะ FCC มีแนวโน้มในการเกิดการเสีรูปร่างแบบระนาบคู่ที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามการเกิดการเสีรูปร่างแบบระนาบคู่สามารถเกิดขึ้นในโลหะ FCC บางชนิด ถ้ามีระดับแรงเค้นสูงและมีอุณหภูมิต่ำเพียงพอ ยกตัวอย่างผลึกทองแดงที่เกิดการเสีรูปร่างที่ 4 องศาเคลวิน ที่ระดับแรงเค้นสูงสามารถทำให้เกิดการเสีรูปร่างแบบระนาบคู่ได้

7.2 การเลือกรูปแบบถาวรของโลหะหลายผลึก

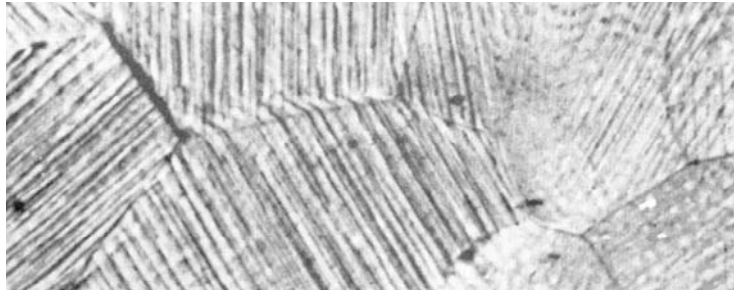
7.2.1 ผลกระทบของขอบเขตเกรนที่มีต่อความแข็งแรงของโลหะ

โลหะผสมทางวิศวกรรมทั้งหมดเป็นแบบหลายผลึก โลหะและโลหะผสมผลึกเดี่ยวส่วนใหญ่จะใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการวิจัย และมีเฉพาะบางกรณีเท่านั้นที่นำไปใช้ในทางวิศวกรรม ขอบเขตเกรนจะทำให้โลหะและโลหะผสมแข็งแรงขึ้น โดยจะขบวนการเคลื่อนของดิสโลเคชัน ยกเว้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากโลหะเริ่มอ่อนตัว ดังนั้นการนำโลหะไปใช้งานในส่วนที่ต้องการความแข็งแรงจำเป็นต้องทำให้เกรนมีขนาดเล็กละเอียด รูปที่ 1.25 เป็นการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงจากกราฟแรงเค้นความเครียดของทองแดงบริสุทธิ์แบบผลึกเดี่ยวและแบบหลายผลึกที่อุณหภูมิห้อง สังเกตที่ทุกระยะการยืดของทองแดงหลายผลึกจะแข็งแรงมากกว่าทองแดงผลึกเดี่ยว และเมื่อเทียบที่ร้อยละการยืด 20 พบว่าความแข็งแรงดึงของทองแดงหลายผลึกเท่ากับ 40 ksi (276 MPa) ในขณะที่ทองแดงผลึกเดี่ยวมีค่าเพียง 8 ksi (55 MPa)

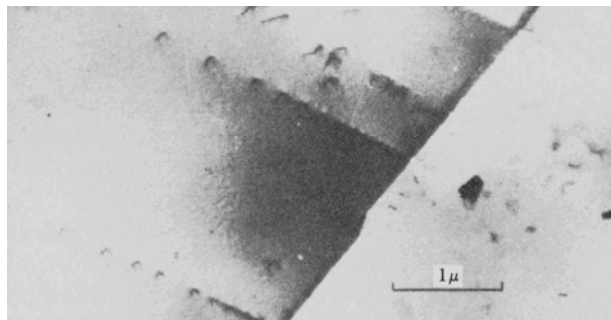


รูปที่ 1.25 กราฟแรงเค้นความเครียดของทองแดงผลึกเดี่ยวและหลายผลึก

ระหว่างการเกิดการเสียรูปถาวรของโลหะ ดิสโลเคชันจะมีการเคลื่อนตลอดระยะนาบการเลื่อน แต่จะไม่สามารถเคลื่อนได้โดยตรงจากเกรนหนึ่งไปสู่อีกเกรนหนึ่งในแนวเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 1.26 เส้นการเลื่อนมีการเปลี่ยนทิศทางที่ขอบเขตเกรน ซึ่งแต่ละเกรนจะมีชุดดิสโลเคชันของตัวเองบนระนาบการเลื่อนของตน โดยมีทิศทางการเลื่อนที่แตกต่างจากเกรนอื่นๆรอบข้าง รูปที่ 1.27 แสดงขอบเขตเกรนที่มีลักษณะเป็นมุมตัดชัดเจน ซึ่งจะขบวนการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน และเป็นเหตุทำให้ดิสโลเคชันเกิดการสะสมที่ขอบเขตเกรน



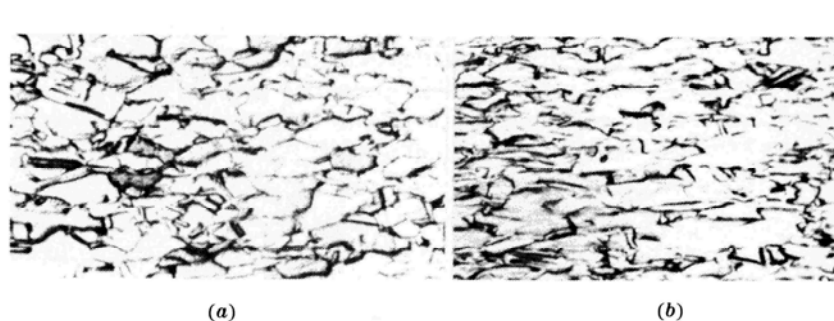
รูปที่ 1.26 แสดงแถบการเลื่อนของอะลูมิเนียมหลายผลึกที่เสียรูปถาวร (60x)



รูปที่ 1.27 การสะสมของดิสโลเคชันที่ขอบเกรนในชิ้นทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม (17500x)

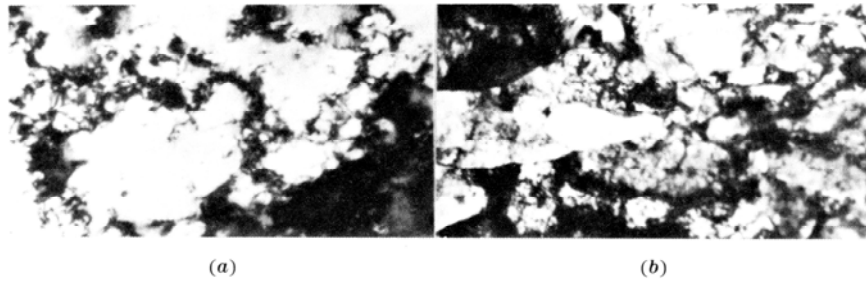
7.2.2 ผลกระทบของการเสียรูปถาวรต่อรูปร่างเกรนและการจัดเรียงดิสโลเคชัน

การเปลี่ยนรูปร่างเกรนกับการเสียรูปถาวรนั้น พิจารณาได้จากการขึ้นรูปเป็นทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อน (annealing) ซึ่งมีโครงสร้างเกรนแบบละเอียด (equiaxed) จนเกิดการเสียรูปถาวร พบว่าเกรนมีลักษณะค่อนข้างเหมือนกันจากการเริ่มเกิดการเคลื่อนตัวและการจัดเรียงตัวของดิสโลเคชัน ดังรูปที่ 1.28 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคของแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการรีดเย็นโดยลดความหนาร้อยละ 30 และ 50 ตามลำดับ สิ่งที่ได้คือเมื่อเพิ่มขนาดการรีดเย็นเกรนจะยืดออกมากขึ้นในทิศทางการรีดนั้นเช่นเดียวกับเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน



รูปที่ 1.28 โครงสร้างทองแดงบริสุทธิ์ที่เสียรูปจากการรีดเย็น (a) ร้อยละ 30 (b) ร้อยละ 50 (300x)

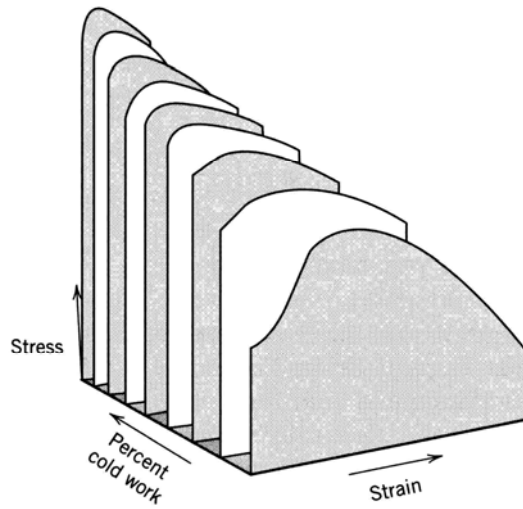
การจัดเรียงดิสโลเคชันจะเปลี่ยนไปตามการเสีรูปถาวร โดยดิสโลเคชันในทองแดงบริสุทธิ์หลังจากการเสีรูปถาวรร้อยละ 30 จะเกิดเซลล์คล้ายโครงร่างเป็นพื้นที่สว่างตรงกลางเซลล์ (รูปที่ 1.29a) และเมื่อเพิ่มขนาดการเสีรูปถาวรด้วยการลดความหนาร้อยละ 50 โครงสร้างของเซลล์จะมีความแน่นมากขึ้นและมีการยึดออกในทิศทางของการรีด (รูปที่ 1.29b)



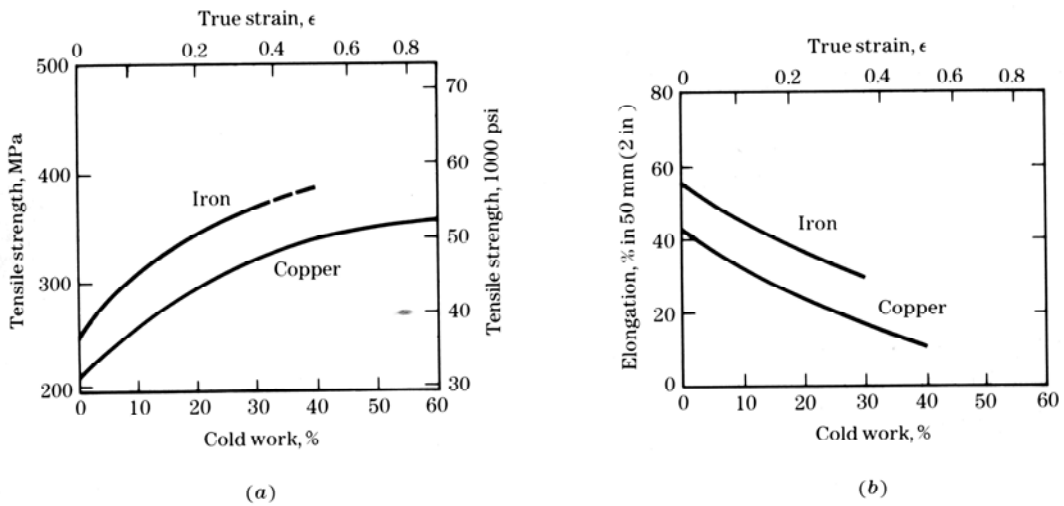
รูปที่ 1.29 โครงสร้างทองแดงบริสุทธิ์ที่เสีรูปจากการรีดเย็น (a) ร้อยละ 30 (b) ร้อยละ 50 (30000x)

7.2.3 ผลกระทบของการเสีรูปเย็นต่อการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะ

จากภาพจุลภาคอิเล็กตรอนรูปที่ 1.29 จะเห็นว่าความหนาแน่นของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเสีรูปแบบเย็นที่เพิ่มขึ้น กลไกความหนาแน่นของดิสโลเคชันที่เพิ่มขึ้นจากการขึ้นรูปเย็นนั้นเป็นความเข้าใจที่ไม่ถูกต้องนัก เพราะแท้จริงแล้วความหนาแน่นของดิสโลเคชันที่เพิ่มขึ้นเกิดจากดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นใหม่เกิดปฏิกิริยากับดิสโลเคชันที่มีอยู่เดิม ทำให้ดิสโลเคชันใหม่เคลื่อนผ่านดิสโลเคชันที่มีอยู่เดิมได้ยากยิ่งขึ้น ความกระะระกะของดิสโลเคชันทำให้โลหะเกิดความแข็งแรงจากการยึดหรือการเสีรูปจากการเพิ่มปริมาณการขึ้นรูปเย็นดังแสดงในรูปที่ 1.30 หรือพิจารณาได้จากการนำโลหะเหนียว เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม และเหล็กเฟอร์ไรต์ที่ผ่านการอบอ่อนมาทำการขึ้นรูปเย็นที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 1.31a ที่แสดงให้เห็นถึงผลของการขึ้นรูปเย็นที่อุณหภูมิห้องซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงดึงของทองแดงไม่ผสมจาก 30 ksi (200 MPa) เป็น 45 ksi (320 MPa) ด้วยการขึ้นรูปเย็นร้อยละ 30 ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงดึงในรูปที่ 7.20 แต่อย่างไรก็ตามระยะยึด (ความเหนียว) จะลดลง ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.31b การขึ้นรูปแบบเย็นร้อยละ 30 ระยะยึดของทองแดงบริสุทธิ์จะลดลงจากร้อยละการยึดประมาณ 42 เป็น 18



รูปที่ 1.30 อิทธิพลของการขึ้นรูปเย็นต่อความแข็งแรงของวัสดุ



รูปที่ 1.31 อิทธิพลของการขึ้นรูปเย็นต่อสมบัติทางกลของเหล็กและทองแดง

(a) ความแข็งแรงดึงต่อร้อยละการขึ้นรูปเย็น (b) ระยะยืดต่อร้อยละการขึ้นรูปเย็น

การขึ้นรูปแบบเย็นหรือการทำให้แข็งด้วยการยืดเป็นวิธีหนึ่งที่สำคัญสำหรับการทำให้เกิดความแข็งแรงในโลหะบางชนิด ยกตัวอย่างเช่นทองแดงบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมสามารถถูกทำให้เกิดความแข็งแรงด้วยวิธีการแบบนี้เท่านั้น ดังนั้นเส้นลวดทองแดงบริสุทธิ์เมื่อนำมาทำการลดขนาดแบบเย็นจะสามารถทำให้เกิดความแข็งแรง (ภายในขีดจำกัดการขึ้นรูป) จากการทำให้แข็งด้วยปริมาณการยืดขนาดต่างๆ

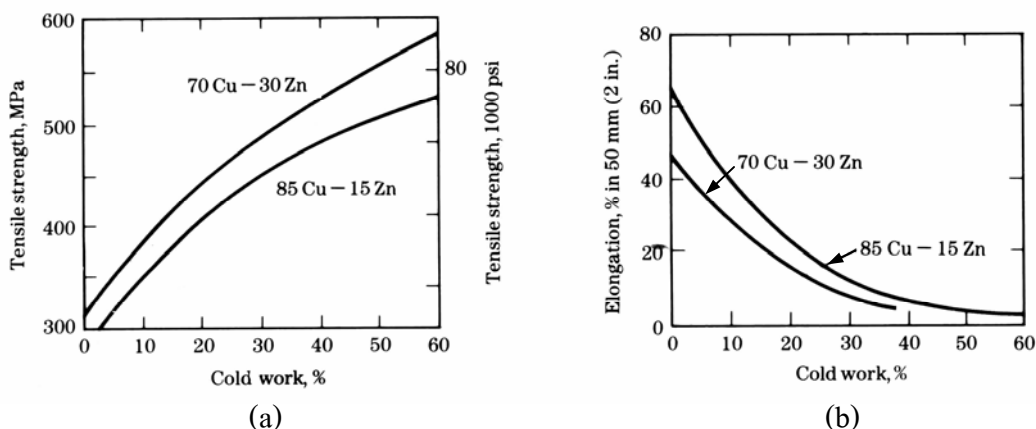
7.2.4 ผลกระทบของสารละลายของแข็งต่อการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะ

กรรมวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงของโลหะนอกจากการขึ้นรูปเย็น คือการเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็ง (solid-solution strengthening) โดยการเติมธาตุโลหะผสมหนึ่งถึงสองธาตุที่สามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็ง กล่าวคือเมื่ออะตอมของธาตุผสมละลายเข้าไปแทนที่ (substitution) หรือแทรก (interstitial) อยู่ในโครงผลึกของโลหะตั้งต้น จะเกิดแรงเค้นล้อมรอบอะตอมธาตุผสมซึ่งส่งผลกระทบทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้โลหะผสมที่เป็นสารละลายของแข็งจึงมีความแข็งแรงกว่าโลหะบริสุทธิ์ และสองตัวแปรที่สำคัญในการทำให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยสารละลายของแข็ง

1. ขนาดอะตอมสัมพัทธ์ (relative size) กล่าวคือถ้าขนาดอะตอมของธาตุผสมกับขนาดอะตอมของโลหะตั้งต้นยังมีความแตกต่างกันมาก จะยิ่งทำให้โครงสร้างผลึกของโลหะตั้งต้นมีความบิดเบี้ยวไปมาก และยิ่งทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น

2. การรวมตัวของธาตุผสม (short-rang order) เนื่องจากในสารละลายของแข็งอะตอมธาตุผสมจะละลายแบบสุ่ม จึงเกิดการรวมตัวของธาตุผสมเป็นกลุ่มเล็กๆ ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น เนื่องจากต้องเคลื่อนผ่านโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างอะตอมต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของทองเหลืองร้อยละ 70 ทองแดงและ 30 สังกะสี กับทองเหลืองร้อยละ 85 ทองแดงและ 15 สังกะสี พบว่าทองเหลืองที่ร้อยละ 30 สังกะสีมีความแข็งแรง (รูปที่ 1.32a) และร้อยละการยืด (รูปที่ 1.32b) มากกว่าทองเหลืองที่ร้อยละ 15 สังกะสีที่ทุกๆ ร้อยละของการขึ้นรูปเย็น



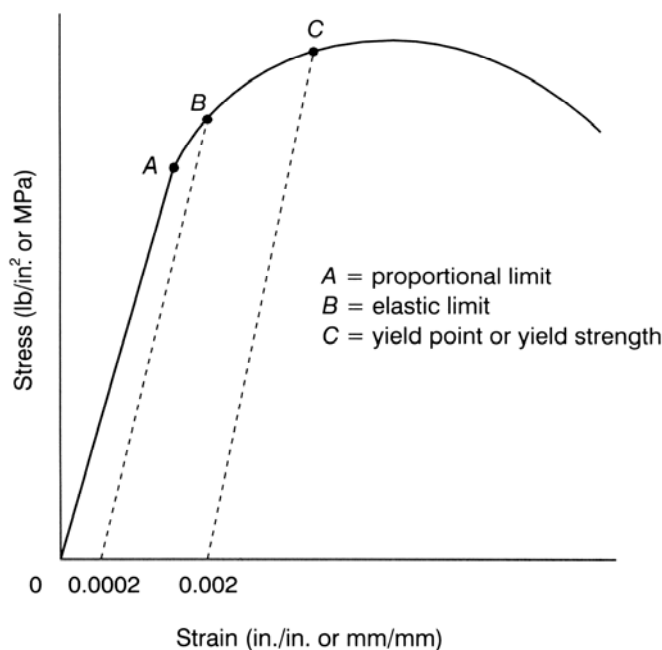
รูปที่ 1.32 ผลของสารละลายของแข็งต่อความแข็งแรงของโลหะผสมทองเหลือง

8. ความยืดหยุ่น (elasticity)

ความยืดหยุ่นเป็นสมบัติของวัสดุที่นิยามได้เป็นความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อย่างสมบูรณ์หลังจากที่นำแรงเค้นที่ทำให้เกิดการเสียรูปออกไป ไม่มีวัสดุใดที่สามารถแสดงความยืดหยุ่นได้อย่างสมบูรณ์ตลอดทุกช่วงแรงเค้นที่กระทำตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเกิดการแตกหัก วัสดุบางอย่างเช่นเหล็กกล้าจะมีความยืดหยุ่นเหนือช่วงค่าแรงเค้นค่อนข้างสูง แต่จะหมดไปเมื่อแรงเค้นมีค่าสูงขึ้นถึงค่าหนึ่ง ส่วนวัสดุอื่นๆ เช่นเหล็กหล่อและคอนกรีตเมื่อมีแรงกระทำจะมีความยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำ

ความยืดหยุ่นของวัสดุอาจเปลี่ยนไปจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การยืดออกหรือการใส่แรงกระทำอย่างรวดเร็ว เช่นวัสดุไม้หรือคอนกรีตอาจจะสามารถรับแรงกระทำและคืนสภาพได้อย่างสมบูรณ์ในการรับแรงช่วงเวลาสั้นๆ แต่จะแอ่นลงหรือแตกร้าวถ้าปล่อยให้รับแรงเป็นระยะเวลานาน

ในเรื่องของ ความแข็งแรงช่วงยืดหยุ่น (elastic strength) สามค่าที่ต้องทำการวัดได้แก่ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วน (proportional limit) และความแข็งแรงจำนนวน (yield strength) ดังแสดงในรูปที่ 1.33



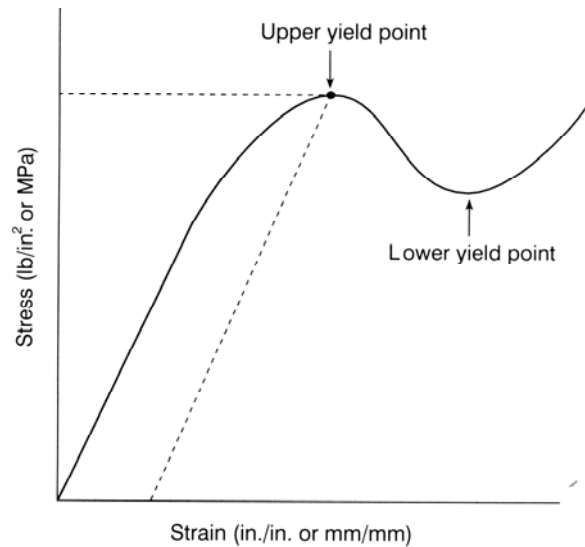
รูปที่ 1.33 แสดงขีดจำกัดอลาสติก ขีดจำกัดสัดส่วนและความแข็งแรงจำนนวน

ขีดจำกัดอลาสติกคือค่าแรงเค้นสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุโดยไม่เกิดการเสียรูปถาวร กรรมวิธีที่จะสามารถวัดขีดจำกัดอลาสติกได้อย่างแม่นยำนั้นต้องเป็นกรรมวิธีที่สามารถทำการทดสอบกับวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยการเพิ่มแรงกระทำที่ละน้อยจนกระทั่งวัสดุเสียรูปถาวร

ขีดจำกัดการยืดตัวส่วนคือแรงเค้นสูงสุดของวัสดุที่สามารถเกิดขึ้น โดยปราศจากการเบนออกจากเส้นตรงของกราฟแรงเค้นกับความเครียด วัสดุส่วนใหญ่จะแสดงส่วนที่เป็นกราฟเส้นตรงในช่วงยืดหยุ่น (elastic range) ขีดจำกัดความยืดหยุ่นกับขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วนบ่อยครั้งที่ไม่ค่อยชัดเจน เพราะขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วนสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกขีดจำกัดความยืดหยุ่นได้ ส่วนขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วนบ่อยครั้งยากต่อการหาค่า ทั้งนี้เนื่องจากกราฟแรงเค้นกับความเครียดเบนหรือโค้งออกจากแนวเส้นตรง ดังนั้นในบ่อยครั้งที่ใช้ความแข็งแรงงานเป็นตัววัดความแข็งแรงยืดหยุ่น

ความแข็งแรงงานส่วนใหญ่จะวัดด้วยวิธีออฟเซต (offset method) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM ที่ได้นิยามความแข็งแรงงานเป็นแรงเค้น ณ จุดที่วัสดุแสดงการเสียรูปถาวรจำกัดจำเพาะ (specified limiting permanent set) (ASTM E6) วิธีการนี้ขึ้นอยู่กับ การเลือกค่าออฟเซตหรือการงานต่อการเสียรูปถาวร (plastic yield) ซึ่งการวัดค่าง่ายกว่าการวัดค่าขีดจำกัดความยืดหยุ่นและขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วน ในการวัดค่าความแข็งแรงงาน ต้องเลือกค่าออฟเซตหรือค่าความเครียด เนื่องจากความถูกต้องของวิธีแบบออฟเซตจะลดลงเมื่อค่าออฟเซตลดลง ค่าความเครียดโดยทั่วไปของวัสดุเชิงโครงสร้างจะอยู่ในช่วง 0.0001 ถึง 0.001

ในช่วงของการงานของวัสดุเหนียวจะมีสองจุดวิกฤตคือ จุดงานด้านบน (upper yield point, UYP) และจุดงานด้านล่าง (lower yield point, LYP) การงานของวัสดุถือว่าเกิดขึ้นเมื่อความเครียดของวัสดุเพิ่มขึ้นโดยปราศจากการเพิ่มขึ้นของแรงเค้น จุดงานด้านบนและด้านล่างในรูปที่ 1.34 ใช้ในการระบุช่วงของการเสียรูปถาวรของวัสดุและใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบ



รูปที่ 1.34 จุดจํานนบนและล่างของวัสดุ

9. การเสีรูปลถาวร (plasticity)

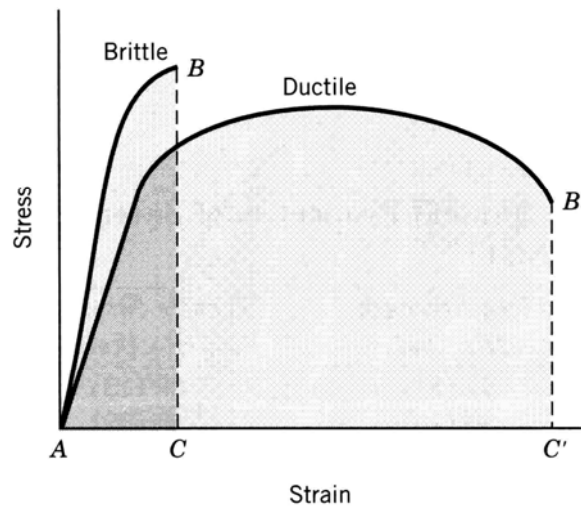
การเสีรูปลถาวรคือความสามารถของวัสดุต่อการเสีรูปลแบบคงรูปโดยไม่เกิดการแตกร้าว การเกิดการเสีรูปลถาวรจะเกี่ยวข้องกัเวลา เนื่องจากวัสดุในช่วงการเสีรูปลถาวร ความเครียดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องภายใต้แรงเค้นค่าหนึ่ง และการเกิดการเสีรูปลถาวรนี้จะเกี่ยวข้องกัความสามารถในการเสีรูปลแบบคงรูปก่อนแตกร้าว หรือขีดจํากัดความเครียดก่อนการแตกร้าว การเสีรูปลถาวรสามารถแสดงได้ด้วยลักษณะเฉพาะของการเกิดการจํานน (yield) การเลื่อนในช่วงการเสีรูปลถาวร (plastic flow) และการคราก (creep)

ความเครียดช่วงเสีรูปลถาวร (plastic strain) เป็นผลของแรงเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ โดยแรงเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับการทดสอบแรงดึงเกิดขึ้นที่ระนาบ 45° กัทิศทางการดึง แต่การเคลื่อนตัวของระนาบที่อยู่ใกล้กันหรือการเคลื่อนตัวของระนาบเข้าไปในวัสดุจะไม่เกิดตามแนวระนาบ 45° ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมจะมีการจัดทิศทางการเคลื่อนภายในโครงผลึกใหม่ โดยจะเคลื่อนไปในทิศทางที่มีแรงด้นน้อยที่สุด ส่วนความเครียดที่เกิดขึ้นช่วงการเสีรูปลถาวรขณะที่วัสดุอยู่ภายใต้แรงกระทำนั้นจะขึ้นอยู่กับจํานวนของระนาบการเคลื่อน ทิศทางการจัดเรียงตัวของผลึก และขนาดของแรงเค้นที่กระทำ

สมบัติสองอย่างที่สำคัญมากต่อการทดสอบการเสียรูปถาวรของวัสดุคือ **ความเหนียว (ductility)** และ **ความเปราะ (brittleness)** ความเหนียวคือความสามารถของวัสดุในการถูกดึงยืดให้ยาวออกหรือความสามารถในการเสียรูปถาวรก่อนเกิดการแตกหักภายใต้แรงกระทำดังกราฟ B' ในรูปที่ 1.35 ตัวอย่างวัสดุเหนียวได้แก่เหล็กอ่อน (mild steel) ซึ่งสามารถใช้ทำลวดหรือเคเบิลได้ แต่สำหรับวัสดุที่เกิดการแตกหักโดยมีการยืดออกเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลยถือว่าเป็นวัสดุเปราะดังกราฟ B ในรูปที่ 1.35 ตัวอย่างวัสดุเปราะ เช่น เหล็กหล่อกับคอนกรีตเป็นต้น ปกติความแข็งแรงดึงของวัสดุเปราะจะมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงอัดอย่างเห็นได้ชัด ความเหนียวของวัสดุบ่อยครั้งจะวัดเป็นร้อยละการยืด (percent elongation) และร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (percent reduction) ภายใต้การทดสอบแรงดึง ร้อยละการยืดของชิ้นทดสอบหาได้ดังสมการ

$$\% \text{ elongation} = [(l_f - l_0) / l_0] \times 100$$

- เมื่อ l_0 คือระยะทดสอบ (gauge length) เริ่มต้นก่อนการทดสอบ
 l_f คือระยะทดสอบ (gauge length) สุดท้ายหลังการทดสอบ



รูปที่ 1.35 กราฟแรงเค้นความเครียดของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ

ตัวอย่างที่ 1.5

ถ้าชิ้นทดสอบยาว 1 นิ้ว รับแรงแล้วยืดออกเป็น 1.033 นิ้ว ถามว่าร้อยละการยืดมีค่าเท่าไร

$$\begin{aligned}\text{จาก } \% \text{ elongation} &= [(l_f - l_0) / l_0] \times 100 \\ &= [(1.033 \text{ in.} - 1 \text{ in.}) / 1 \text{ in.}] \times 100 \\ &= 3.3 \%\end{aligned}$$

ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบหาได้ดังสมการ

$$\% \text{ reduction} = [(A_0 - A_f) / A_0] \times 100$$

เมื่อ A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นก่อนการทดสอบ
 A_f คือพื้นที่หน้าตัดสุดท้ายหลังการทดสอบ

ตัวอย่างที่ 1.6

ชิ้นทดสอบแรงดึงหลังการแตกมีพื้นที่หน้าตัดลดลงจาก 0.505 นิ้ว เป็น 0.492 นิ้ว ถามว่าชิ้นทดสอบมีร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่าไร

$$\begin{aligned}\text{จะได้ } A_0 &= \pi (0.505 \text{ in.})^2 = 0.801 \text{ in.}^2 \\ A_f &= \pi (0.492 \text{ in.})^2 = 0.760 \text{ in.}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จาก } \% \text{ reduction} &= [(A_0 - A_f) / A_0] \times 100 \\ &= [(0.801 \text{ in.}^2 - 0.760 \text{ in.}^2) / 0.801 \text{ in.}^2] \times 100 \\ &= 5.12 \%\end{aligned}$$

ในการรายงานร้อยละการยืดจะต้องแจ้งค่าระยะทดสอบ (gauge length) เสมอ เนื่องจากร้อยละการยืดจะปรับเปลี่ยนไปตามระยะทดสอบเริ่มต้น ปกติในการทดสอบวัดความเหนียวของวัสดุจะใช้วิธีการทดสอบดัดเย็น (cold-bend test) ซึ่งจะได้อธิบายในภายหลัง

10. ความแข็งแรง (strength)

ความแข็งแรงสูงสุด (ultimate strength, US) ของวัสดุเป็นแรงเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ ซึ่งวัดได้จากค่าแรงกระทำสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นหรือค่าสูงสุดบนกราฟแรงเค้นกับความเครียด ตัวอย่างค่าความแข็งแรง เช่น ความแข็งแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) และความแข็งแรงอัดสูงสุด (ultimate compressive strength) เป็นต้น

ความแข็งแรงดึง (tensile strength) คือแรงเค้นดึงสูงสุดที่วัสดุรองรับได้ในขณะทดสอบ ความแข็งแรงแตกร้าวหรือแตกหัก (rupture or breaking strength) คือแรงเค้นหรือแรงกระทำ ณ จุดแตกหักต่อพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น

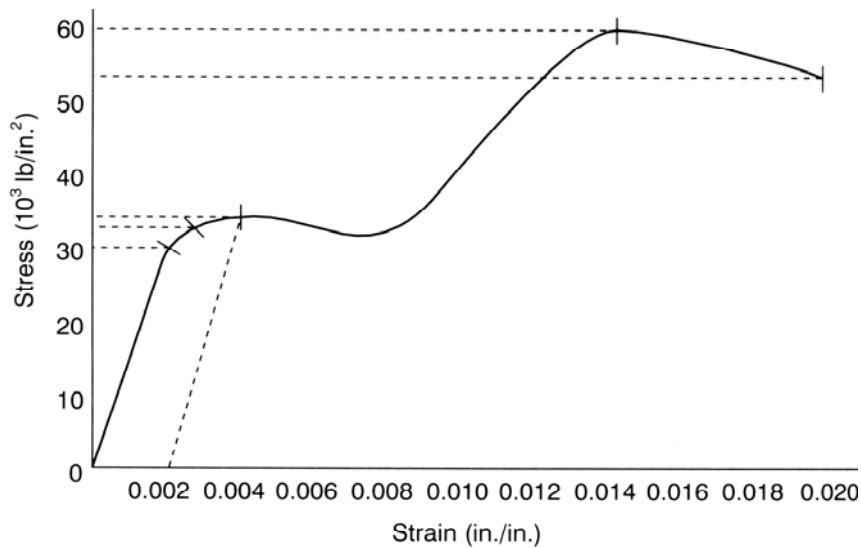
ความแข็งแรงอัด (compressive strength) คือความแข็งแรงอัดสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ โดยวัสดุเหนียวจะมีความแข็งแรงอัดขึ้นอยู่กับปริมาณการเสียรูปสูงสุด

ถ้าวัสดุได้รับแรงเค้นแบบซ้ำๆ มักจะเกิดความเสียหายอันเนื่องจากการล้า **ความแข็งแรงการล้า (fatigue strength)** ของวัสดุ คือแรงเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ภายในจำนวนรอบที่กำหนดโดยไม่เกิดการแตกหัก **ขีดจำกัดการล้า (fatigue limit)** คือแรงเค้นสูงสุดที่วัสดุไม่เกิดการแตกหักอันเนื่องมาจากจำนวนรอบของการรับแรง

ตัวอย่างที่ 1.7

ในการทดสอบการดึงกับชิ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.507 นิ้ว และ gauge length เริ่มต้น 2 นิ้ว ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 1.36 ซึ่งชิ้นทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้าย 0.493 นิ้ว กับ gauge length สุดท้าย 2.037 นิ้ว หลังการแตกหัก จงหาค่าต่างๆ ต่อไปนี้

- โมดูลัสการยืดหยุ่น (modulus of elasticity)
- ขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วน (proportional limit)
- ความแข็งแรงสูงสุด (ultimate strength)
- ความแข็งแรงจำนน (yield strength) ที่ 0.2% ออฟเซต
- ร้อยละการยืด (percent elongation)
- ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (percent reduction)
- ความแข็งแรงแตกหัก (breaking strength)
- จุดจำนน (yield point) บนและล่าง



รูปที่ 1.36 กราฟตัวอย่างข้อมูลการทดสอบแรงดึง

ความแข็ง (hardness) อาจนิยามเป็นความต้านทานของพื้นผิววัสดุต่อการเกิดรอยกด (indentation) หรือรอยขูดขีด (abrasion) ดังนั้นความแข็งจึงอาจพิจารณาได้เป็นแรงเค้นที่ทำให้เกิดรอยกดหรือรอยขูดขีดบนพื้นผิวของวัสดุ ตัวอย่าง การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell test) เป็นการวัดแรงเค้นต่อหน่วยพื้นที่ที่ใช้กดหัวบอลลงบนผิวของวัสดุ อย่างไรก็ตามการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่ค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยกด ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าที่แสดงบนหน้าปัดเครื่องทดสอบที่บ่งบอกถึงค่าแรงเค้นที่ใช้ในการทำให้เกิดรอย ซึ่งไม่ใช่การวัดค่าโดยตรง

11. ประเภทของความเสียหาย (types of failure)

ในการทดสอบวัสดุ ประเภทและคุณลักษณะของความเสียหายเป็นสิ่งสำคัญในการระบุวัสดุ สิ่งที่ต้องบอกถึงความเสียหาย ซึ่งประกอบด้วย การจมนาน การเคลื่อนตัว การเกิดตะกรันหรือเกล็ด การเกิดคอขวด หรือการลดลงของพื้นที่หน้าตัด และรอยแตก ซึ่งเป็นการตรวจสอบเชิงคุณภาพที่สามารถกำหนดเป็นค่าเชิงปริมาณได้ เมื่อทำการทดสอบจนถึงจุดที่เกิดความเสียหายสิ่งสำคัญคือต้องแน่ใจได้ว่าวัสดุเกิดความเสียหายอย่างที่คาดไว้ โดยที่ไม่ได้เกิดจากการทดสอบผิดพลาด ความบกพร่องในวัสดุ การใส่แรงกระทำไม่เหมาะสม หรือเลือกรูปแบบการทดสอบอื่นที่ไม่ถูกต้องซึ่งจะให้ผลการทดสอบที่ไม่สามารถนำไปใช้ได้

เมื่อทำการทดสอบวัสดุควรคำนึงถึงความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเสีรูปร่าง และจุดที่วัสดุไม่สามารถรับแรงเค้นที่กระทำหรือต้านทานการเสีรูปร่างดังกล่าว วัสดุหลายอย่างไม่แสดงจุดแตกหักที่ชัดเจนหรือมีการสิ้นสุดของกระบวนการทดสอบอย่างกะทันหัน ซึ่งทำให้ยากต่อการวัดค่าต่างๆ หลังจากทีวัสดุเสีหาย

ความเสีหายสามารถนิยามได้เป็นการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะบางอย่างที่ทำให้วัสดุไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นความเสีหายจึงไม่ได้หมายถึงการแตกหักเพียงอย่างเดียว แต่รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุจนไม่สามารถนำไปใช้งานได้อีก ยกตัวอย่างกรณีเสีหายจากการแตกหัก เช่น ยางรถยนต์เมื่อเหยียบตะปูลมจะรั่วซึมออกมาจนไม่สามารถรับน้ำหนักรถได้อีก ส่วนวัสดุที่เสีหายในขณะที่ยังไม่แตกหักหรือฉีกขาด เช่น ถุงพลาสติกซึ่งปกติสามารถยืดได้มากก่อนฉีกขาด ดังนั้นในการใช้งานต้องระบุขนาดของการเสีรูปร่างหรือการยืดของถุงที่จะยังสามารถใช้งานได้ และหากเกินจุดที่กำหนดถือว่าถุงเกิดความเสีหายแล้วแม้ว่าจะยังไม่ฉีกขาดก็ตาม

รูปแบบเฉพาะและคุณลักษณะของความเสีหายในการทดสอบแบบต่างๆ ได้อธิบายรวมไว้กับการทดสอบแต่ละแบบ ตัวอย่างของความเสีหายโดยทั่วไปสามตัวได้แก่ การเคลื่อนตัว (slippage) การฉีกขาด (separation) และ การบิดงอ (buckling) อย่างไรก็ตามความเสีหายเหล่านี้อาจเกิดร่วมกันได้ในการทดสอบจริง

การเคลื่อนตัว (slippage) เป็นการเคลื่อนสวนทางกันของระนาบที่ขนานกันภายในวัสดุ การเคลื่อนของระนาบในวัสดุหรือการเคลื่อนของระนาบหนึ่งผ่านอีกระนาบหนึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดการเสีหายตลอดระนาบนั้น ด้วยเหตุนี้โครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวของผลึกจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการที่วัสดุจะเกิดการเคลื่อนตัวและเกิดการแตกเฉือน (shear fracture) ในที่สุด การเคลื่อนเกิดขึ้นได้ง่ายในระนาบที่เป็นแบบ close-packed ซึ่งจะมีพื้นที่สัมผัสของด้านที่อยู่ติดกันต่ำที่สุด

การคราก (creep) เป็นการเสีรูปร่างในลักษณะของการไหลแบบพลาสติก (plastic flow) ซึ่งเป็นการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ ที่ปริมาตรคงที่โดยที่วัสดุไม่แตกหัก แต่ถ้าการเคลื่อนตัวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลก็จะเกิดการแตกหักในที่สุด โดยการเคลื่อนตัวจะเกิดจากแรงเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดึง แรงอัด แรงบิด และแรงดัดงอ

การฉีกขาด (separation) หรือแตกร้าว (cleavage) หรือการแตกหัก (fracture) จะเกิดขึ้นเมื่อแรงเค้นที่กระทำมากกว่าแรงพันธะภายในของวัสดุภายใต้แรงดึง เช่นเดียวกับการเคลื่อนตัว ความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกของวัสดุและการจัดเรียงตัวของผลึกภายในวัสดุ ตัวอย่างการฉีกขาด เช่นการหมุนเกลียวกระดาศเหล็กมือ โดยยึดตรงปลายไว้แล้วใส่แรงบิด กระดาศจะฉีกตามแนวประ

การบิดงอ (buckling) หรือความเสียหายการบิดงอ จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุไม่สามารถทนต่อแรงกดแล้วเกิดการบิดงอ ความเสียหายประเภทนี้สามารถสังเกตได้ดีที่สุดกับวัสดุที่เป็นท่อทรงกระบอกเช่นกระป๋องเครื่องดื่ม ซึ่งจะเกิดการบิดงอเมื่อคนขึ้นไปเหยียบ และกระป๋องอาจจะบิดงอถ้าใส่แรงบิด เช่นการบิดปลายทั้งสองของกระป๋องในทิศตรงข้ามกัน แรงเค้นอัดภายนอกจะกดกระป๋องให้บิดงอ

12. การแตกหักของโลหะ (metal fracture)

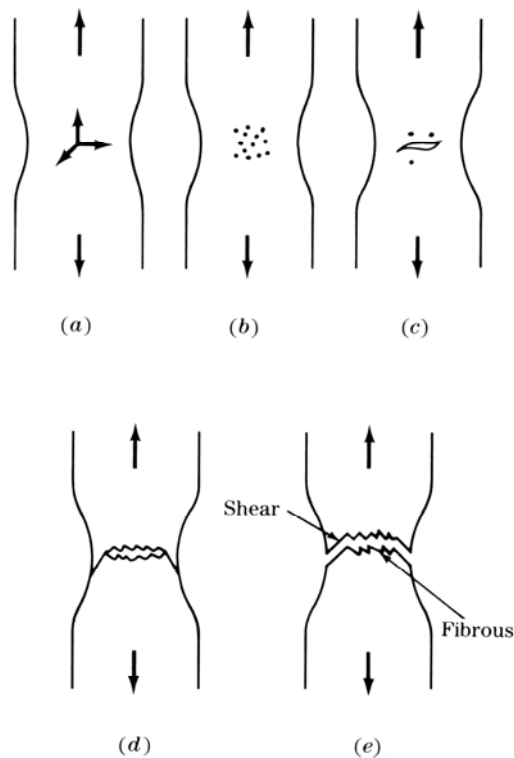
การแตกหักเป็นการแตกออกของของแข็งภายใต้แรงเค้นเป็นสองส่วนหรือมากกว่า และการแตกหักของโลหะปกติแยกออกได้เป็นการแตกหักแบบเหนียวและแบบเปราะ แต่มีหลายกรณีที่เกิดการแตกหักทั้งสองแบบร่วมกัน การแตกหักแบบเหนียวของโลหะจะเกิดหลังจากที่เกิดการเสียรูปถาวรอย่างมากและเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป ในขณะที่การแตกหักแบบเปราะจะเกิดในลักษณะผ่ากรน เรียกว่าระนาบการแตก(cleavage planes) ซึ่งจะแตกหักแบบฉับพลัน รูปที่ 1.37 เป็นภาพตัวอย่างการแตกหักแบบเหนียวของโลหะผสมอะลูมิเนียม



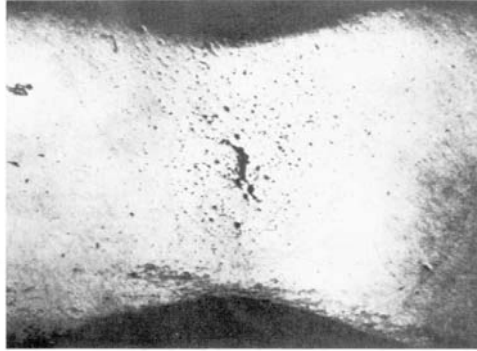
รูปที่ 1.37 รอยแตกเหนียวแบบถ้วยกับกรวย (cup and cone) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม

- การแตกหักแบบเหนียว

การแตกหักแบบเหนียวของโลหะจะเกิดขึ้นหลังจากที่เกิดการเสียรูปแบบถาวรอย่างมาก เมื่อพิจารณาการแตกหักของชิ้นทดสอบแรงดึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว พบว่าถ้าใส่แรงเค้นให้กับชิ้นทดสอบเกินค่าแรงเค้นสูงสุดและมีการยืดออกพอสมควร ชิ้นทดสอบจะเกิดการแตกหัก ซึ่งการแตกหักที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้เป็นสามระยะคือ ระยะแรกเป็นช่วงที่ชิ้นทดสอบเกิดเป็นคอคอดและเกิดช่องว่างขึ้นภายในบริเวณที่เป็นคอคอด (รูปที่ 1.38a และ b) ระยะที่สองช่องว่างที่เกิดขึ้นรวมกันเป็นรอยร้าวตรงบริเวณศูนย์กลางของชิ้นทดสอบและขยายกว้างไปที่บริเวณผิวภายนอกในทิศตั้งฉากกับแรงที่ใส่ (รูปที่ 1.38c) และระยะที่สามเมื่อรอยร้าวเข้าใกล้บริเวณพื้นผิวทิศทางการแตกจะเป็น 45° กับทิศทางการดึง และรอยแตกสุดท้ายจะเป็นแบบกรวยกับถ้วย (รูปที่ 1.38d และ e) รูปที่ 1.39 แสดงการเกิดรอยแตกภายในบริเวณที่เป็นคอคอดของชิ้นทดสอบทองแดงบริสุทธิ์



รูปที่ 1.38 ขั้นตอนการเกิดการแตกหักเหนียวแบบถ้วยกับกรวย

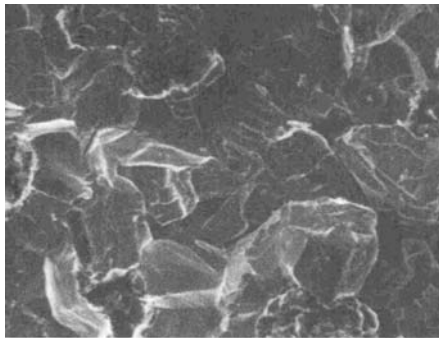


รูปที่ 1.39 รอยแตกหักภายในชิ้นทดสอบทองแดงบริสุทธิ์หลายผลึกบริเวณที่เกิดคอคอด (9x)

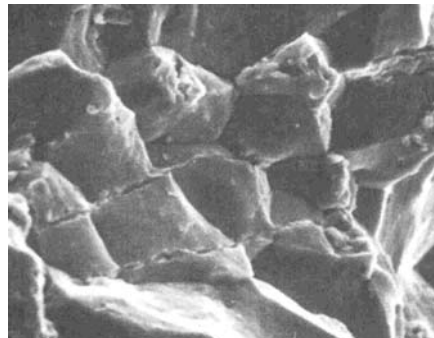
- การแตกหักแบบเปราะ

การแตกหักของโลหะและโลหะผสมหลายชนิดเป็นการแตกหักแบบเปราะที่เกิดร่วมกับการเสียรูปถาวรเล็กน้อย การแตกเปราะปกติเกิดในลักษณะแตกตลอดระนาบผลึก เรียกว่าระนาบการแตกหัก โลหะหลายชนิดที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ HCP มักเกิดการแตกหักแบบเปราะ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างแบบนี้มีระนาบการเลื่อนจำกัด เช่นผลึกเดี่ยวของสังกะสีที่อยู่ภายใต้แรงเค้นสูงๆในระนาบ (0001) จะเกิดการแตกหักแบบเปราะ โลหะ BCC หลายชนิด เช่นเหล็กอัลฟา โมลิบดีนัม และทังสเตนจะเกิดการแตกหักแบบเปราะที่อุณหภูมิต่ำภายใต้อัตราความเครียดสูง นอกจากนั้นบริเวณที่เป็นร่องบากอาจเกิดแรงเค้นสามแกนซึ่งจะทำให้เกิดการแตกเปราะได้เช่นกัน โดยขั้นตอนของการเกิดการแตกหักแบบเปราะมีอยู่สามขั้นคือ ขั้นแรกการเสียรูปแบบถาวรทำให้ดิสโลเคชันสะสมและกีดขวางกันตลอดแนวระนาบการเลื่อน จากนั้นในขั้นที่สอง บริเวณที่มีดิสโลเคชันขวางกันจะมีแรงเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นและมีจุดเริ่มแตกหักเล็กๆ เกิดขึ้น และในขั้นสุดท้ายแรงเค้นทำให้จุดเริ่มแตกขยายตัวโดยพลังงานความเครียดยืดหยุ่นที่สะสมจะเสริมให้เกิดเป็นรอยแตก

การแตกเปราะของโลหะหลายผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบผ่าเกรน (transgranular) กล่าวคือการแตกหักจะตัดขวางเนื้อเกรนในแนว 90° กับแรงดึง รอยแตกจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบเป็นเงา ดังแสดงในรูปที่ 1.40a อย่างไรก็ตามการแตกหักแบบเปราะสามารถเกิดขึ้นในลักษณะผ่าเกรนได้ถ้าบริเวณขอบเขตเกรนมีฟิล์มเปราะ (brittle film) หรือถ้าบริเวณขอบเขตเกรนมีความเปราะจากการมีตะกอนของธาตุอื่นแทรกอยู่ ส่วนการแตกเหนียวนั้นจะเกิดการ



(a)



(b)

รูปที่ 1.40 ภาพการแตกหักจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ขนาด 1500 เท่า

(a) การแตกเปราะแบบผ่าเกรน (b) การแตกเหนียวตามขอบเกรน

13. ความจุพลังงาน (energy capacity)

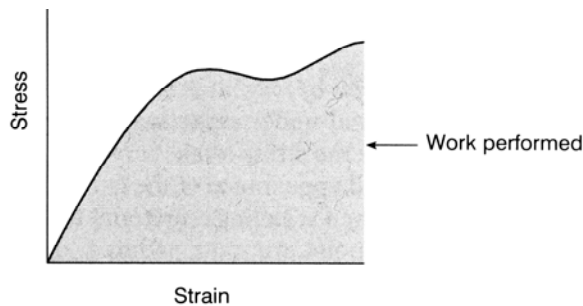
ความจุพลังงานเป็นความสามารถของวัสดุในการดูดซับและกักเก็บพลังงานซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการทดสอบวัสดุ ความจุพลังงานหรือพลังงานที่ต้องการในการทำงานซึ่งเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับการทดสอบความต้านทานต่อการรับแรงกระตุก (shock resistance) หรือการทดสอบการกระแทก (impact testing) รากฐานของความจุพลังงานคืองานหรือพลังงานซึ่งเท่ากับแรงคูณกับระยะทาง ทั้งงานและพลังงานจะวัดในหน่วยของจูล (joules, J) งานที่ให้กับวัสดุช่วงพลาสติกจะเปลี่ยนเป็นความร้อนและเกิดการสูญเสีย ส่วนงานที่ให้กับวัสดุช่วงยืดหยุ่นจะคืนสภาพเดิมโดยอัตโนมัติ

ความจุพลังงานช่วงยืดหยุ่น (elastic resilience) ของวัสดุคือพลังงานหรืองานที่ใช้ทำให้วัสดุเข้าสู่ขีดจำกัดช่วงยืดหยุ่น (elastic limit) พลังงานนี้จะคืนสู่สภาพเดิมโดยอัตโนมัติเมื่อนำแรงเค้นออกจากวัสดุ สิ่งที่สัมพันธ์กับความจุพลังงานช่วงยืดหยุ่นคือ โมดูลัสของความจุพลังงานช่วงยืดหยุ่น (modulus of resilience) โมดูลัสนี้ภายใต้แรงเค้นสามารถนิยามเป็นพลังงานที่กักเก็บต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ขีดจำกัดช่วงยืดหยุ่น พลังงานนี้เป็นปริมาณ

$$\text{Resilience} = \sigma^2 / 2E$$

เมื่อ σ คือแรงเค้นที่ขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วน
 E คือยังโมดูลัสของวัสดุ

จากไดอะแกรมแรงเค้นกับความเครียด งานที่ใช้สามารถแสดงด้วยพื้นที่ใต้กราฟแรงเค้นกับความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 1.41



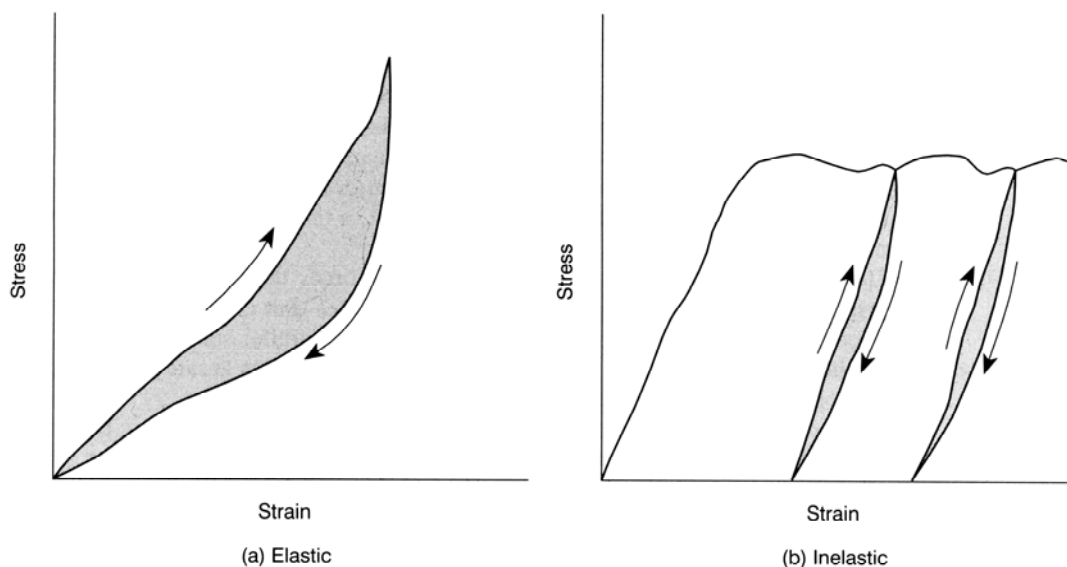
รูปที่ 1.41 พื้นที่ใต้กราฟ

โมดูลัสของความจุพลังงานช่วงยืดหยุ่นเป็นการวัดความจุการยืดหยุ่น (elastic capacity) หรือความแข็งแรงพลังงานยืดหยุ่น (elastic energy strength) ของวัสดุ การวัดความจุนี้ใช้ประโยชน์ในเรื่องของการเลือกวัสดุ (materials selection) ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงเค้นซ้ำๆ ในช่วงขีดจำกัดช่วงยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งจะวัดในหน่วยของจูลต่อลูกบาศก์เมตร (J/m^3) หรือพาสคาล (Pa) สำหรับเหล็กกล้าต่างๆ ไปโมดูลัสของความจุพลังงานช่วงยืดหยุ่นนี้จะอยู่ในช่วง 100 ถึง 4500 kJ/m^3 โมดูลัสนี้จะเพิ่มขึ้นตามร้อยละขององค์ประกอบคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆ ที่เพิ่มขึ้นในวัสดุ

พลังงานบางอย่างมักสูญเสียในระหว่างการเปลี่ยนรูปของพลังงาน เช่น การกระดอนของลูกบอล เริ่มแรกแรงที่ใส่ทำให้ลูกบอลกระดอนสูงและจากนั้นลูกบอลจะกระดอนด้วยแรงที่เกิดขึ้นในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งจะกระดอนต่ำลงเรื่อยๆ จนกระทั่งลูกบอลสูญเสียพลังงานทั้งหมด และปรากฏการณ์ในแบบเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีการให้แรงสลับกับ

ความแกร่ง (toughness) คือการวัดพลังงานที่ใช้ในการทำให้วัสดุแตกหัก โมดูลัสของความแกร่ง (modulus of toughness) คือปริมาณพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ใช้ทำให้วัสดุแตกหักภายใต้แรงกระทำคงที่ (static load) ความแกร่งสามารถแสดงได้ด้วยกราฟโดยพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของกราฟแรงเค้นกับความเครียด ซึ่งทำให้สามารถประเมินความแกร่งเชิงคุณภาพได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.41

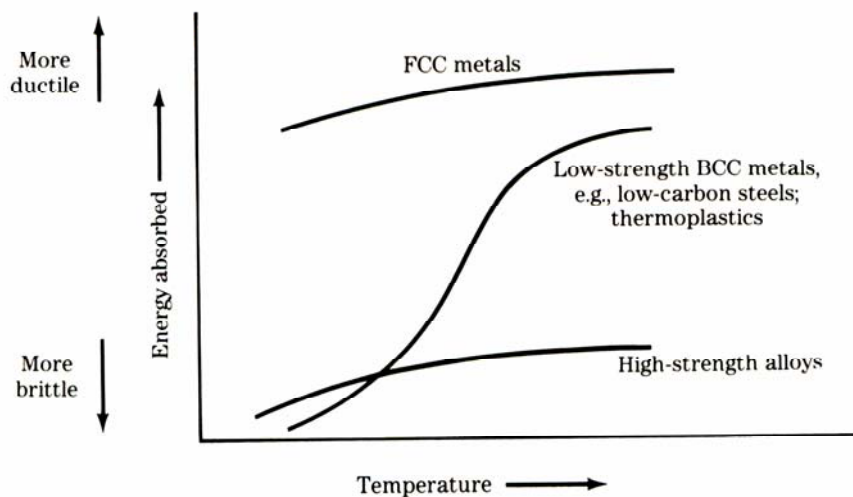
ในการเลือกวัสดุเพื่อนำใช้งานที่ต้องรับแรงกระแทกเหนือจุดจ้านจะใช้ค่าความแกร่งของวัสดุเป็นเกณฑ์สำคัญ ความแกร่งจะใช้หน่วยเป็นจูลต่อลูกบาศก์เมตร (J/m^3) เหล็กกล้าจะมีค่าความแกร่งอยู่ในช่วง 40 ถึง $120 MJ/m^3$



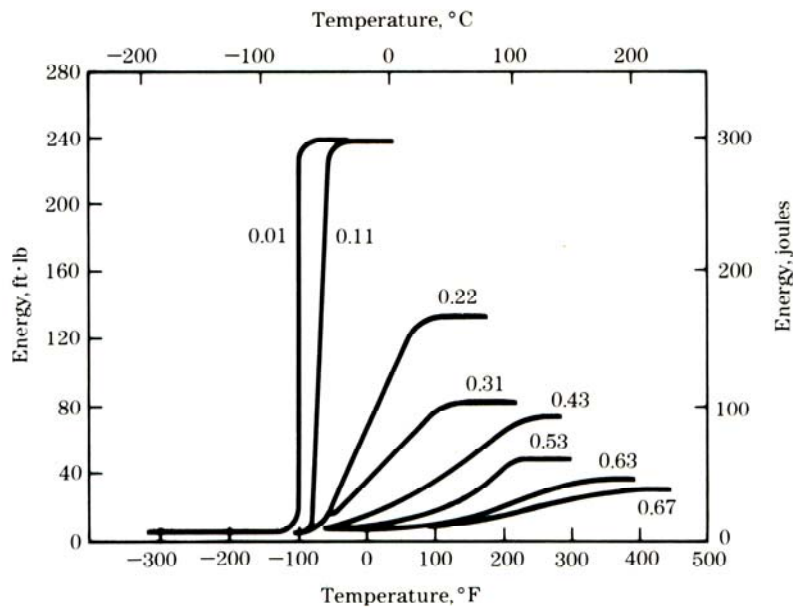
รูปที่ 1.42 แสดงฮิสเทอเรซิสของของวัสดุภายใต้การรับแรงแบบซ้ำๆ

ทังเฟนสเป็นค่าพลังงานที่วัสดุสามารถดูดซับก่อนแตกหัก ซึ่งมีความสำคัญในกรณีที่ต้องให้วัสดุสามารถรองรับแรงกระแทกโดยไม่เกิดการแตกหัก ค่าทังเฟนสสามารถหาค่าได้ด้วยการทดสอบแรง โดยการปล่อยลูกตุ้มน้ำหนักจากความสูงที่กำหนดเหวี่ยงกระแทกเข้ากับชิ้นทดสอบจนเกิดการแตกหัก จากนั้นทำการคำนวณพลังงานที่ชิ้นทดสอบดูดซับในการแตกหักจากค่าน้ำหนักและค่าผลต่างของความสูงของลูกตุ้มก่อนกับหลังกระแทก รูปที่ 1.43 แสดงผลกระทบบของอุณหภูมิต่อค่าพลังงานการกระแทกของวัสดุบางชนิด

การทดสอบแรงกระแทกสามารถใช้ในการวัดช่วงของอุณหภูมิที่ทำให้พฤติกรรมของโลหะและโลหะผสมเปลี่ยนจากแบบเหนียวเป็นแบบเปราะเมื่ออุณหภูมิลดลง ปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าอ่อนมีผลต่อช่วงอุณหภูมิของพฤติกรรมนี้ ดังแสดงในรูปที่ 1.44 เหล็กกล้าอ่อนคาร์บอนต่ำจะมีช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนพฤติกรรมแบบเหนียวเป็นแบบเปราะแคบและต่ำเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าอ่อนที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า นั่นคือเมื่อปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าอ่อนเพิ่มขึ้นเหล็กกล้าจะมีความเปราะมากขึ้นและดูดซับพลังงานในการแตกหักในการทดสอบแรงกระแทกลดลง



รูปที่ 1.43 ผลกระทบบของอุณหภูมิต่อการดูดซับพลังงานการกระแทกของวัสดุต่างๆ



รูปที่ 1.44 ผลกระทบของปริมาณคาร์บอนต่อพลังงานการแตกของเหล็กกล้าอ่อน

14. สรุป (summary)

เมื่อวัสดุรับแรงเพิ่มขึ้นเริ่มแรกวัสดุจะแสดงพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่น จากนั้นเป็นช่วงการเปลี่ยนแบบพลาสติกและสุดท้ายเกิดการแตกหักหรือเสียหาย จุดจำกัดช่วงพลาสติกที่เหมาะสมจะอิงอยู่กับจุดจํานนหรือความแข็งแรงจํานน ส่วนขีดจำกัดสัดส่วนคือจุดบนกราฟแรงเค้นความเครียดที่กราฟเริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรง ความแข็งแรงของวัสดุแบบต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงอัด ความแข็งแรงแตกหัก และความแข็งแรงการล้า การวัดความสามารถการยืดหยุ่นคือการวัดค่า โลคูลัสความยืดหยุ่นหรือยัง โมคูลัสและโมคูลัสของริชิลเลียนซ์ ค่าโมคูลัสเหล่านี้เป็นอัตราของแรงเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุที่สอดคล้องกับความเครียดภายในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่น

ความเหนียวเป็นสมบัติพลาสติกหรือการวัดความสามารถในการเสียรูปโดยปราศจากการแตกหักของวัสดุ ทัพเนสเป็นความสามารถของวัสดุในการทนต่อแรงเค้นที่กระทำและเป็นปริมาณพลังงานที่จำเป็นในการเกิดการแตกหัก ทัพเนสเป็นฟังก์ชันของความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุ ความแข็งเป็นการวัดความทนทานของวัสดุต่อการเกิดรอยกดหรือรอยขีดข่วนบนพื้นผิว ความแข็งบางครั้งเป็นตัวบ่งบอกสมบัติอื่นๆ ของวัสดุได้

สมบัติความยืดหยุ่นจะขึ้นอยู่กับแรงโมเมนต์ระหว่างอะตอม ส่วนสมบัติความไม่ยืดหยุ่นหรือพลาสติกจะขึ้นอยู่กับระนาบการเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอะตอมหรือชนิดของโครงผลึก การเคลื่อนจะเกิดขึ้นถ้าระนาบของวัสดุที่ขนานกันเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกัน โดยจะขึ้นอยู่กับแรงเค้นเฉือนซึ่งมีค่าสูงสุดที่ 45° จากแนวระนาบปกติ

พฤติกรรมของวัสดุเชิงโครงสร้างที่อุณหภูมิห้องสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการให้แรงกระทำหรือสภาวะของการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ อัตราของแรงเค้นที่กระทำ การให้แรงแบบช้าๆ หรือการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมของการทดสอบ เช่น ปริมาณความชื้น เป็นต้น

15. คำถามท้ายบท (Questions)

1. อธิบายความแตกต่างระหว่างการเสียรูปแบบยืดหยุ่นกับการเสียรูปแบบถาวร
2. นิยามคำว่าแรงเค้น พร้อมกับหน่วยที่ให้ทั้งระบบอเมริกาและระบบ SI
3. หาแรงเค้นของแท่งทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm. ขณะรับน้ำหนัก 1500 kg
4. คำนวณแรงเค้นของแท่งชิ้นงานยาว 30 cm. และมีพื้นที่หน้าตัดขนาด 6.5 mm. x 3.5 mm. ซึ่งรับน้ำหนัก 5200 kg
5. หาแรงเค้นของชิ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 in. ที่รับน้ำหนัก 1500 lb
6. นิยามคำว่าความเครียด พร้อมทั้งหน่วยที่ใช้ทั้งในระบบอเมริกาและระบบ SI
7. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (strain) กับร้อยละการยืด (% elongation)
8. ชิ้นทดสอบแรงดึงทองเหลืองขนาดหน้าตัด 0.5 in. x 0.019 in. และมีระยะทดสอบ (gauge length) 2 in. ถามว่าชิ้นทดสอบมีความเครียดเท่าไร ถ้าชิ้นงานมีระยะทดสอบสุดท้ายเท่ากับ 3.15 in.
9. นิยามคำว่าแรงเค้นเฉือน ความเครียดเฉือน และโมดูลัสเฉือนช่วงอีลาสติกของโลหะ พร้อมอธิบายลักษณะของแรงเฉือนที่กระทำต่อชิ้นงานโลหะในรูปของกล่องสี่เหลี่ยม ว่าแรงเฉือนทำให้เกิดแรงเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนได้อย่างไร พร้อมทั้งสมการการคำนวณ

10. นิยามโมดูลัสความยืด (modulus of elastic) หรือยังโมดูลัสของโลหะ
11. นิยามความแข็งแรงจํานน (yield strength) ของโลหะหรือโลหะผสม พร้อมแสดงวิธีการหาค่าความแข็งแรงจํานนออฟเซตจากกราฟแรงเค้นความเครียดของโลหะ
12. นิยามความแข็งแรงดึงสูงสุด (UTS) พร้อมแสดงวิธีหาค่า UTS จากกราฟแรงเค้นความเครียดของโลหะ
13. อะไรคือข้อมูลสำคัญที่ได้รับจากค่าร้อยละการยืด ณ จุดแตกหักของชิ้นงาน
14. แถบการเลื่อน (slipbands) และแนวการเลื่อน (slip lines) คืออะไร และเหตุใดจึงเกิดแถบการเลื่อนบนพื้นผิวของโลหะ
15. อธิบายกลไกการเลื่อนที่ทำให้โลหะเกิดการเสียรูปถาวรโดยไม่เกิดการแตกหัก
16. ทำไมการเลื่อนในโลหะจึงเกิดขึ้นบนระนาบที่อัดแน่นที่สุด (densest-packed)
17. ทำไมการเลื่อนในโลหะจึงเกิดขึ้นในทิศทาง close packed
18. อธิบายระนาบการเลื่อนและทิศทางการเลื่อนของโครงผลึก FCC ว่าเป็นอย่างไร
19. สี่ระนาบการเลื่อนและสามทิศทางการเลื่อนของโครงผลึก FCC มีอะไรบ้าง
20. ระนาบการเลื่อนและทิศทางการเลื่อนของโครงผลึก BCC และ HCP มีอะไรบ้าง
21. มีการเลื่อนใดอีกที่ทำให้โดยเฉพาะโครงผลึก HCP มีระบบการเลื่อนมากขึ้น
22. ทำไมโลหะบริสุทธิ์ที่มีผลึกเป็น FCC เช่น Ag และ Cu จึงมีค่าแรงเค้นเฉือนวิกฤตต่ำ
23. ทำไมไทเทเนียมที่มีโครงผลึกเป็น HCP จึงมีค่าแรงเค้นเฉือนวิกฤตสูง
24. อธิบายกระบวนการเสียรูปแบบระนาบคู่ (twinning) ที่เกิดขึ้นในโลหะบางชนิดในการเสียรูปถาวร
25. อธิบายความแตกต่างระหว่างกลไกการเลื่อนกับกลไกการเกิดระนาบคู่ในการเสียรูปถาวรของโลหะ
26. ทำไมการเกิดระนาบคู่จึงมีความสำคัญในการเสียรูปของโลหะที่มีผลึกแบบ HCP
27. ขอบเขตเกรนทำให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้อย่างไร
28. อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเกรนที่เกิดขึ้นเมื่อทำการรีดเย็นแผ่นโลหะผสมทองแดงที่มีโครงสร้างเกรนเล็กละเอียดด้วยการลดความหนาที่ร้อยละ 30 และ 50
29. อธิบายว่าเกิดอะไรขึ้นกับดิสโลเคชันในแผ่นโลหะผสมทองแดงในข้อที่ 28

30. ความเหนียวของโลหะมีผลอย่างไรกับการขึ้นรูปเย็นโลหะ เพราะเหตุใด
31. สารละลายของแข็งทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้อย่างไร
32. สารละลายของแข็งทำให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้อย่างไร
33. สองตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการทำให้แข็งด้วยสารละลายของแข็งมีอะไรบ้าง
34. อธิบายลักษณะพื้นผิวรอยแตกแบบเหนียวของโลหะ
35. อธิบายสามขั้นตอนการเกิดการแตกหักแบบเหนียวอย่างละเอียด
36. อธิบายลักษณะพื้นผิวรอยแตกแบบเปราะของโลหะ
37. อธิบายสามขั้นตอนการเกิดการแตกหักแบบเปราะอย่างละเอียด
38. อุณหภูมิส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับพลังงานของวัสดุอย่างไร
39. ปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการแตกเหนียวแตกเปราะของวัสดุ