

บทที่ 4

การทดสอบเชิงกล สมบัติเชิงกล และการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ

- การทดสอบเชิงกลและสมบัติเชิงกล
- การทดสอบเชิงกลเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะทำให้เราทราบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของวัสดุ ทำให้สามารถพิจารณาว่าวัสดุนั้น ๆ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานหรือไม่

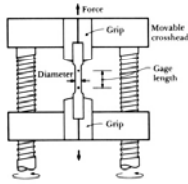
1

1. Tensile test

- **Tensile Test:** เป็นการวัดการตอบสนอง (การยืด) ของวัสดุต่อแรงดึงใน 1 ทิศทาง ที่ดึงอย่างช้า ๆ (slowly applied uniaxial tensile force) จะได้กราฟระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain) ซึ่งจะทำให้ทราบค่า yield strength, tensile strength, modulus of elasticity, and ductility
- Engineering stress = $\sigma = F/A_0$
- Engineering strain = $\epsilon = \Delta l/l_0 = (l - l_0)/l_0$
- F = แรง (N) $A_0 =$ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (m^2)
- $l_0 =$ ความยาวเริ่มต้น $l =$ ความยาวที่เวลาใด ๆ

2

- โดยจะทำการดึงวัสดุด้วยอัตราคงที่ แล้วดูความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ตัวอย่างรูปของการยืด sample ดังรูปที่ 4.1 และกราฟที่ได้ดังรูปที่ 4.2



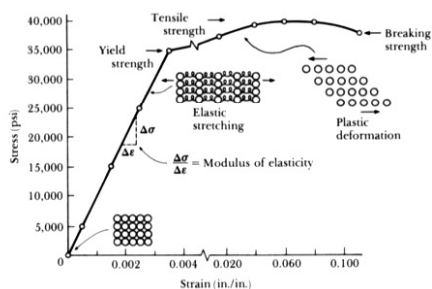
รูปที่ 4.1 ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ tensile test

3

- สมบัติที่ได้จาก tensile test ได้แก่
- Yield strength (σ_y) เป็นจุดที่เริ่มเห็น plastic deformation ได้ชัด ในพลาสติก จุด yield เป็นจุดที่ความชันของกราฟ stress-strain เป็นศูนย์ (วัสดุยืดออกไปได้ โดยที่ไม่ต้องออกแรงเพิ่ม)
- Tensile strength (σ_{max}) เป็น stress ที่แรงสูงสุด สำหรับวัสดุที่ไม่เกิด necking วัสดุจะขาดโดยที่ต้องใช้ stress สูงขึ้นเรื่อย ๆ แต่สำหรับวัสดุที่ ductile จะเกิด necking และพื้นที่หน้าตัดลดลง ทำให้ใช้แรงน้อยลง และ engineering stress ลดลง จุดที่เกิด necking จึงเป็น tensile strength
- Modulus of elasticity (E) = stress/strain ตาม Hook's law (ในช่วง stress/strain คงที่)

4

Stress - Strain curve



5

True stress และ True strain

- เนื่องจากในขณะดึงชิ้นตัวอย่าง พื้นที่หน้าตัดจะเล็กลง (A ลดลง) นั่นคือ stress จริง ต้องมากกว่าค่าที่วัดโดยใช้ A_0

$$\text{True stress} = \sigma_t = F/A$$

$$\text{True strain} = \int dl/l = \ln(l/l_0) = \ln(A_0/A)$$

เพราะหาก V ปริมาณคงที่ $A l = A_0 l_0$

6

- ตัวอย่าง ดึงชิ้นตัวอย่างมีความยาวเริ่มต้น 2 cm พื้นหน้าตัดขนาด 1 cm x 0.5 cm เมื่อทำการดึงพบว่า ความยาวเพิ่มขึ้น 3 cm โดยที่ออกแรงดึง 20 N จงหา stress, strain, Young's modulus, true stress, true strain และ true modulus

1. $\text{stress} = F/A_0 = 20 \text{ N} / (1 \times 10^{-2} \times 0.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2) = 400,000 \text{ Pa}$
2. $\text{strain} = (l-l_0)/l_0 = (3-2) / 2 \text{ cm} = 0.5$ (ไม่มีหน่วย)
3. $\text{Young's modulus} = \text{stress} / \text{strain} = 400,000 / 0.5 = 800,000 \text{ Pa}$

4. $\text{true stress} = F/A$

หากปริมาตรไม่เปลี่ยน $A_0 l_0 = A l$ ดังนั้น $A = A_0 l_0 / l$

$$\Rightarrow \text{true stress} = F/A = (F/A_0) (l/l_0) = 400,000 \text{ Pa} \times 1.5 = 600,000 \text{ Pa}$$

5. $\text{true strain} = \ln(l/l_0) = \ln(3/2) = \ln 1.5 = 0.405$
6. $\text{true modulus} = 600,000 / 0.405 = 1.48 \times 10^6 \text{ Pa}$

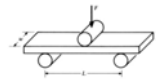
7

2. Bending Test

- สำหรับวัสดุที่เปราะ เช่น เซรามิกซ์ การทดสอบจะเป็นแบบ bending แทน โดยเป็น 3-point bending

- Flexural strength = $3FL/2wh^2$ (F=fracture load, L = length, w = width, h = height)

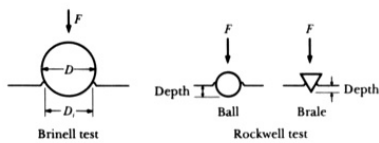
- Flexural modulus = $L^3F/4wh^3\delta$ (δ = deflection)



8

3. Hardness test

- **Hardness Test:** โดยใช้ indenter กดลงบนผิวของวัสดุตัวอย่างเพื่อวัดความแข็งของพื้นผิวของวัสดุ โดยที่ indenter อาจจะเป็นทรงกลมหรือเป็นมุมแบบเพชร



รูป Hardness Tests ทั้งแบบ Brinell และ Rockwell

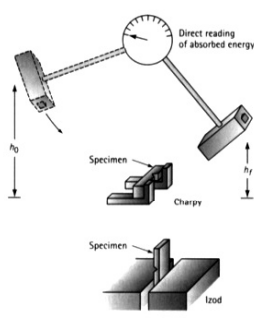
9

4. Impact test

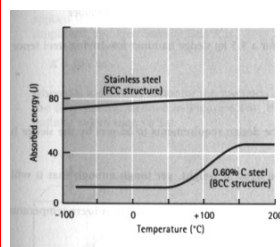
- เป็นการทดสอบวัสดุ โดยเกิดการชนกับวัสดุอีกชิ้น Impact test จะมี rate of loading ที่สูงกว่า tensile test มาก ทำให้วัสดุแสดงพฤติกรรมแบบเปราะ (brittle) การทดสอบอาจจะเป็น Charpy หรือ Izod test ดังแสดงในรูป

- หากมีการทดสอบวัสดุที่อุณหภูมิต่าง ๆ ก็พบความสัมพันธ์ระหว่าง impact strength กับอุณหภูมิ โดยที่จะเป็นแบบ brittle ที่อุณหภูมิต่ำ และเป็นแบบ ductile ที่อุณหภูมิสูง เรียกอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติว่า "Transition temperature" ในกรณีของ polymer จะสังเกตได้ชัด วัสดุบางชนิดไม่แสดง transition temperature อย่างชัดเจน โดยเฉพาะโลหะที่มีโครงสร้างแบบ FCC

10



Impact test แบบ Charpy และ Izod เพื่อวัดพลังงานที่ดูดซับ



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อ Impact Strength ของ Stainless Steel และ 0.60% C Steel พลังงานที่ดูดซับจะเปลี่ยนเมื่อพฤติกรรมของวัสดุเปลี่ยนจาก brittle เป็น ductile

11

5. Fracture Toughness

- เป็นการบอกความสามารถของวัสดุที่มีจุดบกพร่อง (flaw) สำหรับการดึง

$$K = f\sigma(\pi a)^{1/2}$$

- เมื่อ K = stress intensity factor, f = geometry factor, σ = applied stress, a = flaw size (flaw ที่มีขนาด a แต่ flaw ที่อยู่ใน bulk มีขนาด 2a) (ถ้าชิ้นตัวอย่างมีความกว้างมาก f มีค่าประมาณ 1.0)

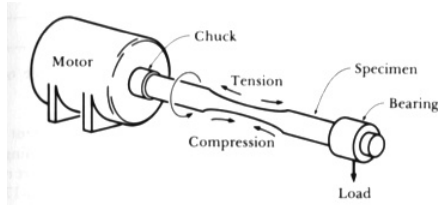
- เมื่อวัสดุรับความเค้นมาก หรือมี flaw ขนาดใหญ่ จะมีค่า Stress intensity factor (K) สูง และหากค่า K สูงกว่าค่าวิกฤต (K_{IC}) วัสดุก็จะแตก

- โดยปกติแล้วค่า K_{IC} ขึ้นกับความหนาของวัสดุ แต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นค่า K_{IC} จะลดลงเรื่อย ๆ และเมื่อความหนามากพอ ค่า K_{IC} จะคงที่เท่ากับค่า K_{IC}

12

6. Fatigue Test (การทดสอบความล้า)

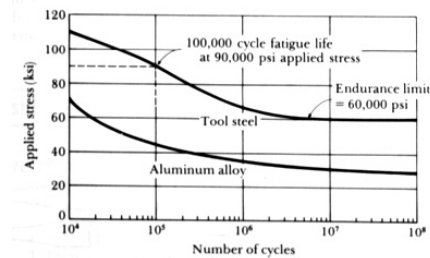
- เป็นการทดสอบวัสดุโดยให้ stress ที่ต่ำกว่า yield strength ซ้ำ ๆ กัน หลาย ๆ ครั้ง cyclical stress อาจจะเป็น rotation, bending หรือ vibration



13

Fatigue Test (ต่อ)

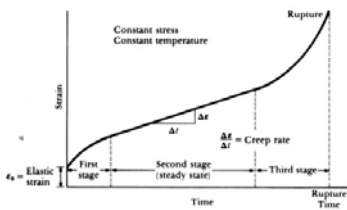
- สำหรับการทดสอบ fatigue หากใช้ stress สูง จำนวนครั้งที่ทำให้วัสดุหักก็จะไม่สูงมาก แต่หากใช้ stress น้อยก็ต้องใช้จำนวนครั้งมากขึ้น ดังแสดงในรูป



14

7. Creep test (การคืบ)

- เป็นการทดสอบโดยให้ stress ที่คงที่ (ต่ำกว่า yield strength) ทนที่ที่ได้รับ stress วัสดุจะยืดแบบ elastic และได้ $\text{strain} = \epsilon = (\sigma/E)$ หลังจากนั้น strain จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเกิดจาก plastic deformation
- เมื่อเวลาผ่านไป strain จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แม้ stress และอุณหภูมิจะคงที่ ในช่วง steady state นั้น เราอาจคำนวณหา creep rate = $\Delta\epsilon/\Delta t$



15

4.2 การเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ

- มี 3 วิธีที่สำคัญได้แก่
 - (1) Strain-Hardening
 - (2) Solid Solution Strengthening และ
 - (3) Dispersion Strengthening

16

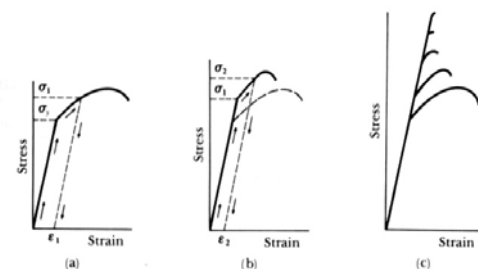
1. Strain-Hardening

- ในกระบวนการผลิตแผ่นโลหะ แผ่นโลหะจะถูกนำไปรีด (rolling) โดยอาจจะเป็นการ "รีดร้อน" (hot rolling) ซึ่งจะรีดหลังจากที่แผ่นโลหะออกจากเตาเผา และรีดจนเย็น หรืออาจจะเป็นการ "รีดเย็น" (cold rolling) กระบวนการรีดเย็นนี้ทำให้โลหะแข็งแรงขึ้น เพราะเกิด "strain-hardening"
- เมื่อวัสดุถูกดึงจนเกินขอบเขตของ elasticity จะเกิด yielding (plastic deformation) ที่ σ_y และหากดึงต่อจนถึง σ_u ซึ่งเกิด permanent deformation เป็น ϵ_1 เมื่อเอา stress ออก หากเราทดสอบชิ้นตัวอย่างเดิมซึ่งเกิด yielding แล้ว วัสดุจะเริ่ม yield ที่ σ_y (ซึ่งสูงกว่า σ_y) และหากดึงจนถึง σ_2 (และ ϵ_2) หากทดสอบซ้ำอีก ก็จะเริ่มเกิด yielding ที่ σ_y และเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ แสดงให้เห็นว่า วัสดุที่ผ่าน yielding มาแล้ว จะมีความแข็งแรงหรือ yield strength สูงขึ้น

17

% cold work โดยที่ % cold work คือร้อยละของความหนาที่ลดลง

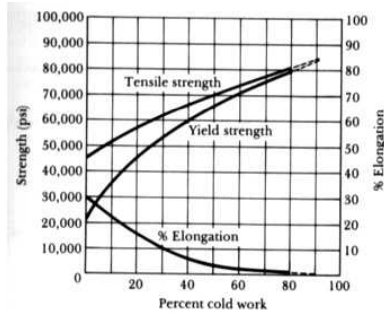
% cold work = ความหนาที่ลดลง / ความหนาเริ่มต้น x 100



18

เมื่อ % cold work เพิ่มขึ้น tensile strength และ yield strength จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่

elongation จะลดลง



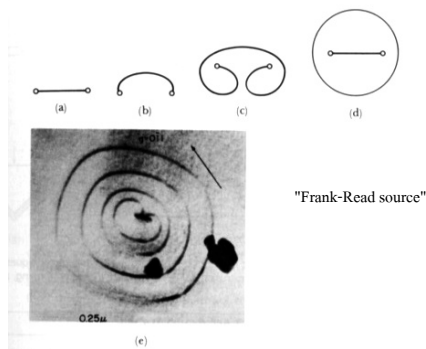
19

กลไกการเกิด Strain Hardening

- เมื่อความเค้นมากกว่า yield stress (σ_y), dislocations จะเริ่ม slip เมื่อ dislocation มาพบบางจุด (obstacles) ที่ทำให้ dislocation เคลื่อนต่อไปไม่ได้ ก็จะทำให้ dislocation ติดที่จุดนั้น รูป (a)
- เมื่อรับความเค้นเพิ่ม dislocation ก็เริ่มโค้ง (รูป b)
- แล้วเริ่มเกิด loop (รูป c)
- เมื่อ loop สัมผัสตัวมันเองก็จะเกิดเป็นวงกลม (รูป d) ดังภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (รูป e) เรียก "Frank-Read source" ซึ่งจะทำให้เกิด dislocation เพิ่มขึ้นมาก จำนวนของ dislocations ที่มากขึ้น จะขัดขวางซึ่งกันและกัน (เคลื่อนที่ยาก) และทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้น

20

กลไกการเกิด Strain Hardening



21

ลักษณะเฉพาะของ Cold Working (การรีดเย็น)

1. ทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้นและเป็นการขึ้นรูปในเวลาเดียวกัน
2. ผลัดกันที่ได้มีความทนของขนาด (เนื่องจากเกิด strain น้อย)
3. เป็นวิธีที่ราคาไม่แพง เนื่องจากเป็นวิธีเชิงกล
4. โลหะบางชนิด เช่นแบบ HCP มี slip system น้อย จึงทำ cold working ได้ไม่มาก
5. การนำไฟฟ้า ความต้านทานการกัดกร่อน และ ductility ลดลงบ้าง
6. ความเค้นที่ตกค้าง (residual stress) และความไม่เป็น anisotropic อาจมีประโยชน์ในบางกรณี

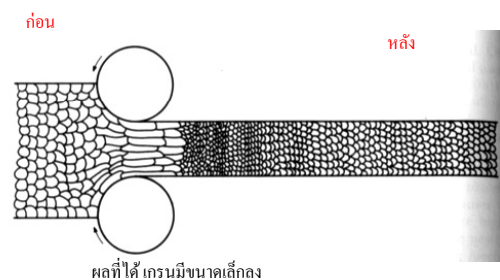
22

Hot Working (การรีดร้อน)

- เป็นการทำให้วัสดุเกิด deformation ที่อุณหภูมิสูงกว่า recrystallization temperature (T_c) แต่ไม่ทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้น (ต่างกับ cold working) ในระหว่างทำ cold working จะทำให้ anisotropic grains เกิดการตกผลึกใหม่ และหากมีการควบคุมก็จะได้ grain ขนาดเล็ก
- Hot working สามารถทำให้วัสดุที่เป็นแผ่นหนา (thick plate) กลายเป็นแผ่นบางได้ (thin sheet) โดยทำการรีดแบบต่อเนื่อง โดยจะรีดที่ T สูง เพราะรีดง่าย และขั้นสุดท้ายจะทำที่ T สูงกว่า T_c เล็กน้อย เพื่อให้ได้ grain ขนาดเล็ก

23

การรีดร้อน (ต่อ)



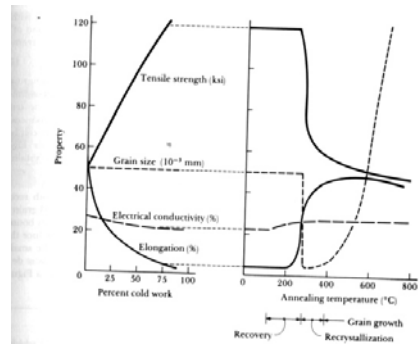
24

Annealing

- เป็น heat treatment เพื่อกำจัดผลของ Strain hardening ที่เกิดในขณะที่ทำ Cold working ทำให้ได้ผลลิตภัณฑ์ที่ soft และ ductile แต่ยังคงมีผิวและความคงทนต่อขนาดที่ดี และอาจจะทำ cold working อีกครั้งหลัง annealing ได้ เนื่องจากวัสดุกลับมามี ductile อีกครั้ง หากมีการทำ cold work และ anneal ซ้ำ ๆ กันหลายครั้ง ก็จะได้ผลลิตภัณฑ์ที่มี deformation ทั้งหมดสูง และขั้นสุดท้ายจะทำการ anneal ที่อุณหภูมิไม่สูงนัก เพื่อกำจัด residual stress
- การทำ anneal จะเริ่มจาก T ต่ำ และเมื่อทำการ anneal ไป จะได้สมบัติก่อน cold work กลับมา
- เช่นเมื่อทำ cold work, tensile strength เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำ anneal สมบัตินี้จะลดลงกลับไปอยู่ระดับก่อนทำ cold work

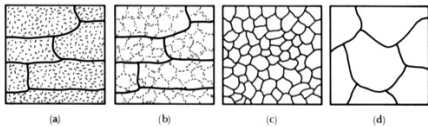
25

Annealing (ต่อ)



26

- Annealing มี 3 ขั้นตอนย่อย
- 1. Recovery: เป็นขั้นที่ 1 เมื่อเริ่มให้ความร้อน พลังงานความร้อนทำให้ dislocation เคลื่อนที่ และเกิด polygonized subgrain structure (โดยที่ความหนาแน่นของ dislocation ไม่เปลี่ยนแปลง) อาจเรียกขั้นนี้ว่า "Stress Relief Anneal" (รูป b)
- 2. Recrystallization: เกิด nucleation และ growth ของเกรนใหม่ ซึ่งมี dislocation น้อยกว่า เมื่อ T สูงขึ้น จะเกิดการกำจัด residual stress อย่างรวดเร็ว และเกิดเกรนใหม่ที่มีขนาดเล็ก (รูป c)
- 3. Grain Growth: เกิดการเติบโตของเกรนเป็นขนาดใหญ่ขึ้น และจำนวนน้อยลง (รูป d)



27

2. Solid Solution Strengthening (SSS)

- นอกจากการทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้นโดย Cold Working แล้ว การทำเป็น Solid Solution จะทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้น เพราะ
- - Relative size factor: การที่มีอะตอมที่มีขนาดต่างกันมากแทรกอยู่ ทำให้อะตอมเคลื่อนที่ยาก จึงทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้น
- - Short range order: เกิดความมีระเบียบในช่วงสั้น ๆ ทำให้ dislocation เคลื่อนที่ผ่านได้ยาก เพราะกลุ่มของอะตอมที่เป็นระเบียบเป็นสิ่งกีดขวาง (block) อยู่

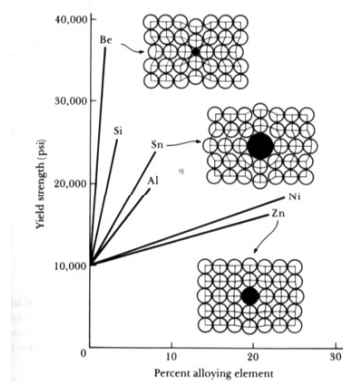
28

Degree ของ Solid Solution Strengthening

- Degree ของ Solid Solution Strengthening ถูกควบคุมด้วย 2 ปัจจัย
- 1. ความแตกต่างของขนาดของอะตอม (alloying element อาจจะใหญ่กว่าหรือเล็กกว่า) หากมีความแตกต่างกันมาก จะเกิด slip ได้ยาก ทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้น
- 2. ปริมาณของ alloying elements ที่ใช้ เมื่อปริมาณมากขึ้น yield strength เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่หากใส่มากเกินไปจนเกินค่าความสามารถในการละลาย Solubility จะเป็น Dispersion Strengthening

29

ผลของขนาดและร้อยละของธาตุที่เติมเข้าไปต่อ yield strength



30

Liquid

(a)

Solid Solution

(b)

เกิด compound

a) Ni-Cu liquid (b) Ni-Cu Solid Solution

(c) เมื่อมี Zn มากกว่า 30% จะเกิด phase ที่ 2 เนื่องจากมี Zn เกินความสามารถในการละลาย และเกิดเป็น compound ขึ้น

31

ผลของ Solid Solution Strengthening

- 1. Yield strength, tensile strength และ hardness ของโลหะผสมสูงกว่าของโลหะบริสุทธิ์
- 2. Ductility ของโลหะผสมมักน้อยกว่าของโลหะบริสุทธิ์ (มีบางกรณีเท่านั้นที่ ductility เพิ่ม)
- 3. การนำไฟฟ้ามักลดลงมาก ดังนั้นโลหะผสมของ Cu หรือ Al จึงใช้ทำลวดนำไฟฟ้าไม่ได้
- 4. Creep และการลดลงของ strength ที่อุณหภูมิสูงลดลง ใช้ทำ High temperature alloy ได้

32

3. Dispersion Strengthening

- เป็นการทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้นเมื่อเกิดอีกเฟสขึ้น โดยเรียกเฟสที่มีปริมาณมากกว่า "Matrix" และเฟสที่มีปริมาณน้อยกว่า "Precipitate" หรือ "Dispersed phase"
- เมื่อเกิด 2-phase alloy ขึ้น จะมี boundary ระหว่าง phase ทั้งสอง ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวที่ไม่สมมาตรแบบ ซึ่งจะขัดขวางการเกิด slip ทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้น

33

- หลักการของ Dispersion Strengthening
- 1. Matrix ต้อง soft และ ductile เพื่อให้ตัว alloy มี ductility ในระดับหนึ่ง แต่ precipitate ควรแข็งแรง ซึ่งจะขัดขวางการเกิด slip
- 2. Hard precipitate เป็นเฟสไม่ต่อเนื่อง (discontinuous phase) แต่ Soft matrix เป็นเฟสต่อเนื่อง เพราะ crack ซึ่งมักเกิดใน phase ที่แข็ง (precipitate ที่ไม่ต่อเนื่อง) ดังรูป 19 a ซ้าย (หาก matrix แข็ง ก็เกิด crack ต่อเนื่อง และวัสดุจะแตก ดังรูป 19 a ขวา)
- 3. Precipitate Particles ควรจะมีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก ดังรูป 19 b ซ้าย
- 4. Precipitate Particles ควรจะมีลักษณะกลม (ไม่ใช่ยาวแบบเข็ม) ดังรูป 19 c
- 5. Precipitate จำนวนมากเพิ่มความแข็งแรงของ Alloy (เช่นเดียวกับ Solid Solution Strengthening)

34

รูปที่ 19 ลักษณะของ Dispersed Phase ที่ดีและไม่ดี

35

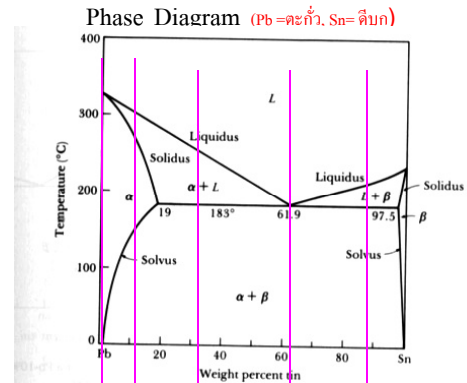
- การทำให้เกิด Dispersed Phase ในโลหะ มีหลายวิธีได้แก่
- 1. **By Solidification** (การแข็งตัว) เกิดในกรณีนี้ที่ตัวถูกละลายหรือ alloying elements มีความเข้มข้นสูงเกิน solubility ของสาร ($L \rightarrow S_1 + S_2$)
- 2. **By Phase Transformation** (การเปลี่ยน phase) หมายถึงเกิดการเปลี่ยนเฟสในสภาวะที่เป็นของแข็ง (Solid-State Reactions) ได้แก่ age hardening (precipitate hardening) และ eutectoid ($S_1 \rightarrow S_2 + S_3$)

36

3.1 Dispersion Strengthening by Solidification

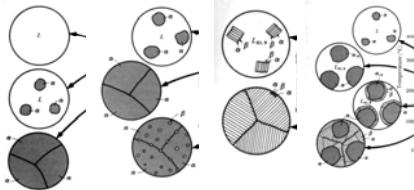
- หากมีการใส่ alloying elements ในปริมาณมากเกินไป จะเกิดสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) ซึ่งประกอบด้วยธาตุอย่างน้อย 2 ธาตุ เป็นเฟสใหม่ที่มีองค์ประกอบโครงสร้างผลึก และสมบัติของมันเอง (เหมือนเป็นอีกสารประกอบที่ต่างจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบ)
- สำหรับ lead-tin สามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็ง หรือเกิดหลายเฟสได้ ขึ้นกับองค์ประกอบ และเกิด eutectic reaction ที่ 61.9% tin ดังเฟสไดอะแกรม จะเห็นได้ว่าวัสดุที่มีองค์ประกอบต่างกัน หากมีลดอุณหภูมิ จะเกิดการกลายเป็นของแข็ง α หรือ β

37



38

% Tin	เฟสที่เกิด	Strengthening
0-2	Solid Solution Alloy	Solid Solution Strengthening $L \rightarrow \alpha$
2-19	β -dispersed phase in α -matrix	Dispersion Strengthening $L \rightarrow \alpha + \beta$
19-61.9	Hypoeutectic Alloy	
61.9	Eutectic Alloy	
61.9-97.5	Hypereutectic Alloy	



(a) Solid Solution (b) Dispersion (c) Eutectic (d) Hypoeutectic

39

3.2 Dispersion Strengthening by Phase Transformation

- อาจจะเป็น age hardening (precipitate hardening) หรือ eutectoid ($\gamma \rightarrow \alpha + \beta$) เป็นการที่ของแข็ง 1 เฟส กลายเป็นของแข็ง 2 เฟส โดยเกิด Nucleation และ Growth ในปฏิกิริยา Solid-State หากพิจารณาพลังงานอิสระ จะได้สมการคล้ายกับสมการพลังงานในการเกิด solidification แต่ในที่นี้มีเทอม Strain Energy เพราะ precipitate เกิดใน matrix ที่เป็นของแข็ง

$$\Delta G = (4/3)\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + (4/3)\pi r^3 \epsilon$$

เมื่อ ϵ คือ Strain energy per volume

40

- Nucleation มักเกิดง่ายบน surface ที่มีอยู่แล้ว เพื่อลดพลังงานพื้นผิว ดังนั้นมักเกิดที่ grain boundary หรือ defect อื่น ๆ (เกิดได้ง่ายที่ undercooling สูง หรือที่อุณหภูมิต่ำ)
- Growth เป็นการเติบโตของผลึก ซึ่งเป็น long-range diffusion และเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอม อะตอมที่จะแพร่จะหลุดออกจากตำแหน่งเดิมและย้ายไปที่ใหม่ ในบางกรณีชั้นการหลุด (detachment) เป็นขั้นที่ช้า (ซึ่งเป็นขั้นกำหนดอัตรา) บางกรณีก็เป็นขั้น attachment แต่ส่วนมากแล้ว diffusion มักเป็นขั้นที่ช้าที่สุด เนื่องจาก diffusion เกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ดังสมการ

41

- Growth rate = $A \exp(-Q/RT)$
อัตรารวม (overall rate) = nucleation rate x growth rate
- ที่ T ต่ำ เกิด nucleation ได้ดี แต่เกิด growth น้อย
- ที่ T สูง เกิด growth ได้ดี แต่เกิด nucleation น้อย
ดังนั้น Overall rate จะสูงที่อุณหภูมิต่ำไม่สูงและไม่ต่ำเกินไป

