1302 420
Failure Analysis

Assistant Prof. Dr. Sukangkana Lee

FAILURE

การเสียหายของวัสดุ

1. นิยาม: วัสดุชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เมื่อใช้งานไปสักระยะ ก็จะเกิดการเสื่อมคุณภาพ และเกิดการชำรุดเสียหายตามอายุการใช้งาน ความเสียหายบางอย่างเกิดขึ้นในขณะที่ชิ้นงานยังสามารถใช้งานได้เป็นปกติ และเมื่อความเสียหายนั้นไม่ได้รับการดูแล ก็อาจส่งผลให้ชิ้นงานนั้นๆไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ

ความเสียหายสามารถแบ่งเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. **<u>ความเสียหายโดยยังไม่เกิดการแตกหัก</u> เช่น การโก่ง การคราก การคืบ**
2. **<u>การแตกหัก</u> เนื่องจากแรงทางกล การกัดกร่อน การล้า หรือ แรงทางกลผสมกับการกัดกร่อน**

2. ปัจจัยหลักของการเกิดความเสียหาย

1. **<u>ปัจจัยภายนอกวัสดุ</u> ซึ่งได้แก่ การเลือกใช้วัสดุที่ไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน และ สิ่งแวดล้อม หรืออาจเกิดจากการใช้งานไม่ถูกวิธีจึงทำให้เกิดความเสียหาย**
2. **<u>ปัจจัยภายในเนื้อวัสดุ</u> เกิดจากความบกพร่องของกระบวนการผลิต การที่ชิ้นงานมีส่วนผสม และสมบัติต่างๆด้อยกว่ามาตรฐาน และสภาพผิวของวัสดุ การเสื่อมสภาพของวัสดุ เป็นสาเหตุทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก**

3. ประเภทความเสียหาย

การเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภทตาม หลักเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

1. แบ่งตามผลกระทบของความเสียหาย ได้แก่
   1. ความเสียหายทางตรง (Direct Failure)
   2. ความเสียหายต่อเนื่อง (Result Failure) ความเสียหายต่อเนื่องจะมากกว่า ความเสียหายทางตรง เพราะจะเกี่ยวกับ ชีวิตและทรัพย์สิน

เช่น

ตัวอย่างความเสียหาย

1. ความเสียหายของรถยนต์

สิ่งที่เสียหาย	นอตล้อรถยนต์
สาเหตุ	ขันนอตไม่แน่น เกิดการสั่นสะเทือนและขาดจากการล้า
ความเสียหายตรง	นอตขาดออกจากกัน ทำให้ล้อหลุด
ความเสียหายต่อเนื่อง	ช่วงล่างของรถกระแทก ครูดกับถนน ไม่สามารถขับรถต่อได้

2. ความเสียหายของหม้อไอน้ำ

สิ่งที่เสียหาย	หม้อไอน้ำ
สาเหตุ	การรีดท่อมากเกินไป ทำให้ผนังบางลง 50%
ความเสียหายตรง	ท่อน้ำแตกเมื่อใช้งานที่ 525 °C เป็นเวลา 1000 ชม.
ความเสียหายต่อเนื่อง	หม้อไอน้ำพังหมด และต้องหยุดโรงไฟฟ้า

3. ความเสียหายของลิฟท์

สิ่งที่เสียหาย	ลิฟท์
สาเหตุ	สวิทซ์เสียหายทำให้ลิฟท์ชนเพดานบ่อยครั้ง
ความเสียหายตรง	เพลากวานสลิงเกิดการล้า
ความเสียหายต่อเนื่อง	ลิฟท์พังขณะใช้งาน ทำให้มีผู้บาดเจ็บ

2. แบ่งตามชนิดของการเกิด ชิ้นงานทำงานได้ไม่สมบูรณ์เนื่องจาก

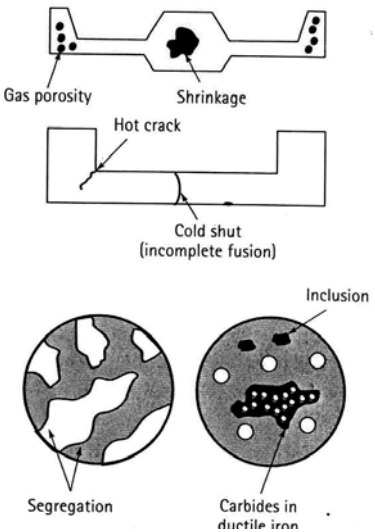
- ภาระกรรม (Load) สูงเกินกว่าความสามารถของชิ้นงานที่จะรับได้
- เมื่อความต้านทานต่อภาระกรรมของชิ้นงานน้อยกว่าความต้านทานที่ชิ้นงานรับได้

ทำให้แบ่งประเภทความเสียหายได้ดังนี้

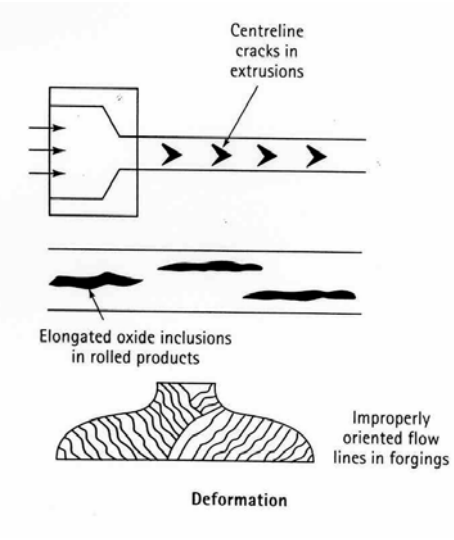
1. ความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยไม่คาดถึง (อุบัติเหตุวิบัติ) รวมถึงภัยธรรมชาติ
2. ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องก่อนนำมาใช้งาน (สูติวิบัติ) เช่น การเชื่อมไม่สมบูรณ์ การหล่อไม่สมบูรณ์ เป็นต้น
3. ความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน (โรคาวิบัติ) การผุกร่อน ภาระกรรมสูงเกินไป เป็นต้น

ความบกพร่องของวัสดุที่อาจเป็นสาเหตุของความเสียหาย

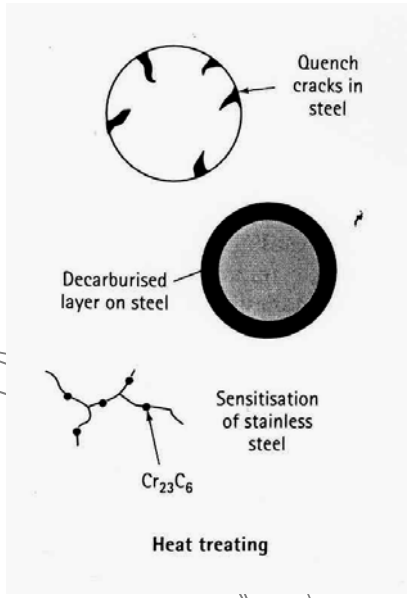
1. Defects from Casting



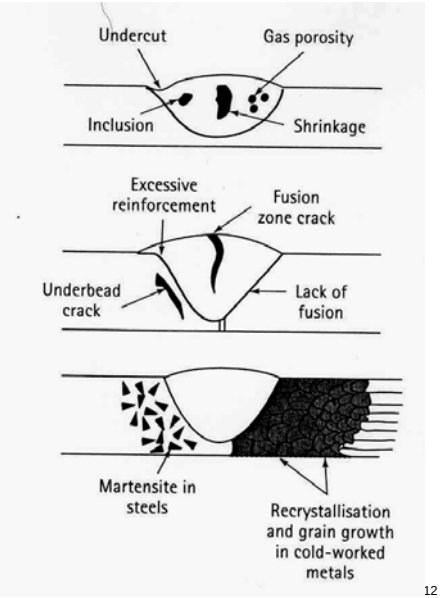
2. Defects from Forming



3. Defects from Heat treating

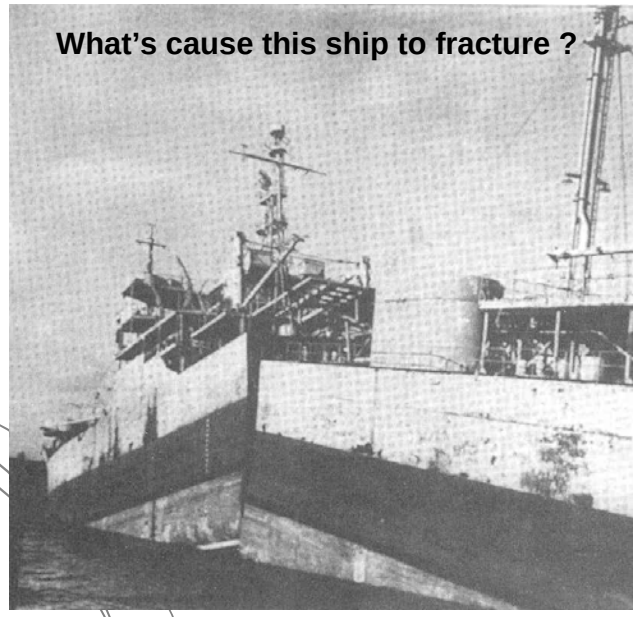


4. Defects from Welding



3. การแบ่งประเภทตามชนิดของภาระกรรม

- ทางกล ได้แก่ แรงดึง แรงกด แรงกระแทก แรงเป็นคาบ
- ทางความร้อน ได้แก่ การขยายตัว, หดตัวทางความร้อน
- ทางเทคโนโลยี ได้แก่ เชื่อมผิดพลาด โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลง การสึกหรอ
- ทางเคมี ได้แก่ การเสื่อมสลาย การผุกร่อน



4. การวิเคราะห์ความเสียหาย (Failure analysis)

มีวัตถุประสงค์ เพื่อ ตรวจวินิจฉัย และหาสาเหตุที่แท้จริงของความเสียหายที่เกิดขึ้น เพื่อนำความรู้ดังกล่าว ไปใช้ในการ

- วางแผนซ่อมบำรุง
- ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นอีกในอนาคต
- เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ดียิ่งขึ้น

4.1 หลักการของการวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสียหาย

1. การบ่งชี้ตำแหน่งจุดกำเนิดของความเสียหายต้องทำด้วยความรอบคอบ เพื่อนำไปสู่สาเหตุที่แท้จริง ควรที่จะนำทั้งชิ้นที่เสียหาย และชิ้นที่สมบูรณ์มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน
2. ไม่ควรที่จะพยายามนำชิ้นที่แตกเสียหายแล้วกับมาต่อกับชิ้นเดิม เนื่องจากผิวชิ้นงานที่แตกจะมีความเปราะและอาจเสียหายจากการกระทำของผู้วิเคราะห์ และอาจทำให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนได้ การเคลื่อนย้ายต้องมีความระมัดระวัง
3. ไม่ควรที่จะทำการทดสอบแบบทำลาย ยกเว้นได้รับการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนแล้ว

4.2 กระบวนการการวิเคราะห์สาเหตุของ Failure

มีทั้งหมด 14 ขั้นตอนดังนี้

1. **เก็บข้อมูลทั้งหมด และเลือกตัวอย่างการศึกษา**
2. **ตรวจสอบจุดที่เกิดความเสียหายด้วยตา และจดบันทึก**
3. **ทดสอบโดยไม่ทำลาย**
4. **ทดสอบคุณสมบัติทางกล (hardness and toughness)**
5. **เก็บข้อมูลและทำความสะอาดแล้วเก็บรักษาชิ้นงานไว้เพื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เกิดความเสียหาย**
6. **ทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดบริเวณที่เกิดความเสียหาย เช่น ทิศทางรอยร้าว สภาพผิว เป็นต้น ทั้งจากภาพถ่าย และเอกสาร**

7. **ตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค**
8. **คัดเลือกและเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา**
9. **ทดสอบและวิเคราะห์ชิ้นงาน**
10. **วิเคราะห์กลไกการเกิดความเสียหาย**
11. **ทดสอบด้านเคมีของบริเวณที่เสียหายว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากส่วนอื่นของชิ้นงานหรือไม่**
12. **ทดสอบชิ้นงานตามสมมติฐาน (special test)**
13. **วิเคราะห์กลไกการแตกหัก**
14. **วิเคราะห์สาเหตุ จากหลักฐานทั้งหมด สรุป และเขียนรายงาน**

จาก14 ขั้นตอน สามารถสรุปได้เป็น 4 ขั้นตอนหลัก คือ

1. เก็บข้อมูล, รายละเอียด และ เงื่อนไขในการทำงานของชิ้นงาน
2. ตรวจสอบสภาพของชิ้นงานที่เสียหาย, ขนาด, แบบ และชนิดของวัสดุวัสดุ
3. ทดสอบโดยไม่ทำลาย, ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบทางกล วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี วิเคราะห์ผิวแตก
4. สรุปสาเหตุของความเสียหาย

ตัวอย่างการวิเคราะห์การแตกหักของสลักเกลียวยึดกังหัน

1. รายละเอียด:

แตกหักอย่างฉับพลัน ในระหว่างการใช้งานปกติ 400 °C หลังจากใช้งานมาเป็นเวลารวม 1425 ชม. เป็นการแตกหักแบบเปราะบริเวณเกลียว มีรอยแตกเฉือนที่ขอบรูเจาะและบริเวณด้านตรงข้ามกับจุดเริ่มต้น สลักเกลียวไม่มีการยืดตัว

2. วัสดุ และคุณสมบัติ

เป็นเหล็กกล้าผสมสูง มีคุณสมบัติดังนี้

Tensile strength = 102 kg/mm^2

0.1 Yield strength = 82 kg/mm^2

0.5 Yield strength = 91 kg/mm^2

3. การทดสอบแบบไม่ทำลาย: ไม่จำเป็น

4. การตรวจโครงสร้างจุลภาค

เตรียมชิ้นงานตามแนวขวาง ที่ผิวมีรอยแตกไหม้, มีคราบที่เกิดจากการไหม้ซึมลงไปตามขอบเกรน น่าจะเป็นการแตกตามขอบเกรน (intergranular crack) โครงสร้างจุลภาคเป็น Bainite มีการแยกตัวของ Precipitate ตามของผลึก

5. การทดสอบความแข็ง: 317-342 HV

6. การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี:

(wt%)	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Ti
	0.11	0.43	0.81	10.6	0.55	0.72	0.15	0.17

7. การทดสอบทางกล:

7.1 การทดสอบแรงดึง แท่งทดสอบ B12x60, มาตรฐานทดสอบ DIN 50125

7.2 การทดสอบแรงกระแทกรอยบากแหลม แท่งทดสอบ ISO, มาตรฐานทดสอบ DIN50-115

ทั้งสองการทดสอบมีอุณหภูมิทดสอบ 20 °C

Mechanical properties	ค่ามาตรฐาน	ผลการทดสอบ
$\sigma_{0.1}$,kg/mm^2	82	93.1
$\sigma_{0.5}$,kg/mm^2	91	97.8
UTS, kg/mm^2	102	104
Elongation, %	-	15

ชิ้นทดสอบแรงกระแทก	Impact Energy (kg-m/cm^2)
K1	2.3
K2	1.0
K3	2.0

8. วิเคราะห์ผิวแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด

มีรอยแตกตามขอบเกรนแบบ Intergranular และมีรอยไหม้

9. สรุป

เป็นการแตกแบบเปราะ รอยแตกเป็นแบบ Intergranular cracking ค่าทดสอบทางเคมีถูกต้องตามมาตรฐาน ค่าความต้านทานแรงกระแทกค่อนข้างต่ำ, yield strength สูงกว่ามาตรฐานอาจเนื่องมาจาก Work hardening สาเหตุความเสียหายเกิดจาก Creep Embritlement

1302 420 Failure analysis

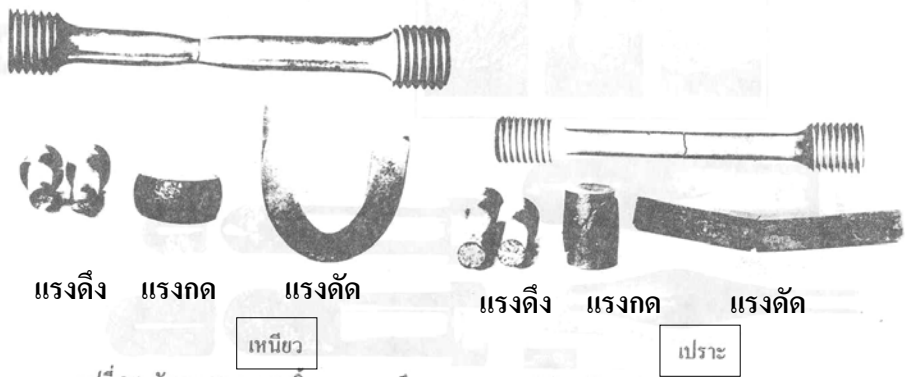
บทที่ 2
พฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำทางกล

Introduction

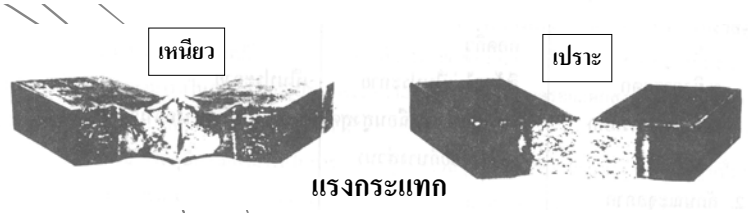
- พฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำทางกล หมายความว่า ปฏิกิริยา (การตอบสนอง) ของวัสดุต่อแรงกระทำภายนอก
- เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ อาจจะมีการเสียรูปแบบยืดหยุ่น เสียรูปแบบถาวร และการแตกหัก ซึ่งจะบ่งชี้ถึง ความเหนียว (Ductility) และ ความเปราะ (Brittleness) ของวัสดุ

- วัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปสูง (เหนียว) จะมีความสามารถในการหยุดรอยแตกร้าวได้สูง เนื่องจากความเค้นจะสามารถกระจายในเนื้อวัสดุ และเกิดการเสียรูปสม่ำเสมอ ไม่มีความเค้นสะสมที่ใดที่หนึ่ง
- วัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปต่ำ (เปราะ) จะมีความเค้นสะสมสูงในบางบริเวณ เช่น รอยบาก และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้ต่ำ ทำให้เกิดการแตกหักแบบฉับพลันได้

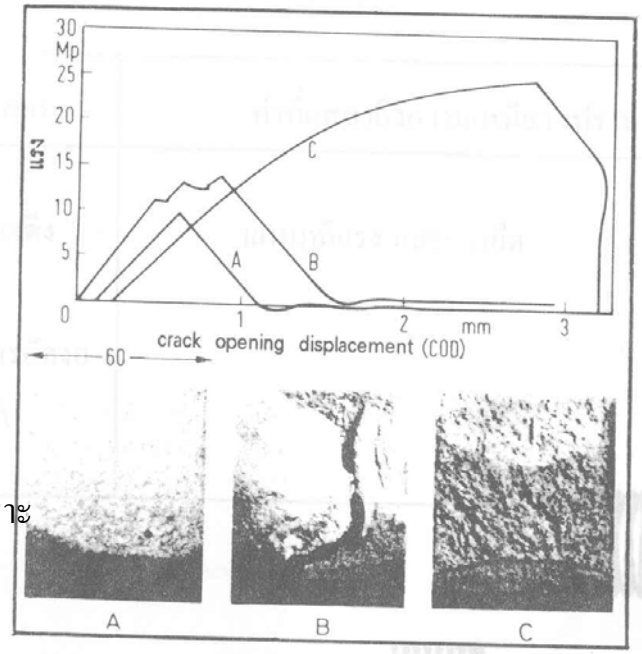
การแตกแบบเหนียว	การแตกหักแบบเปราะ
1. รูปร่างของรอยแตกหักที่พบมากสำหรับโลหะอ่อน จะมีคอคอด	1. ลักษณะมหภาค รอยหักจะเรียบ ไม่มีการเสียรูปชัดเจน
2. ผิวรอยแตกด้านไม่เป็นประกาย	2. ผิวแตกเป็นประกาย
3. ทิศทางรอยแตก คือในทิศแรงเฉือนสูงสุด (45 องศา)	3. ตั้งฉากกับทิศทางของแรงดึง
4. โครงสร้างจุลภาค ผลึกจะมีการยืด หด	4. ผลึกจะไม่มีการยืด หด ที่ชัดเจน
5. จากกล้อง SEM จะเป็นหลุม บ่อ โดยมรการยืดที่ปากหลุม	5. ขึ้นอยู่กับชนิดของ load ไม่มีการยืด



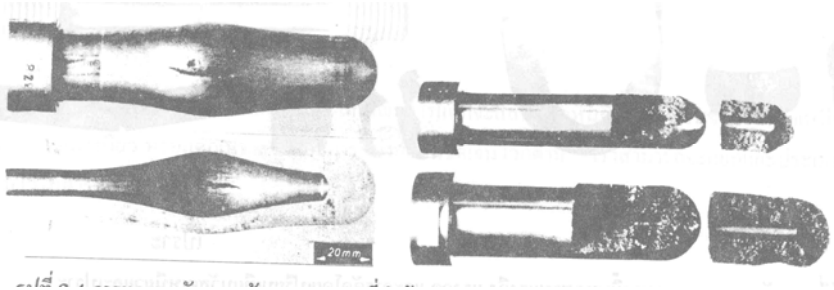
รูปที่ 2.1 ลักษณะการแตกของชิ้นทดสอบแรงดึง แรงกด และการดัดโดยเปรียบเทียบวัสดุเหนียวและเปราะ



แรงกระแทก



เปราะ เหนียว



วัสดุเหนียว
มีการยืด พองออก

วัสดุเปราะ
ไม่มีการยืด
ผิวแตกเป็นประกาย

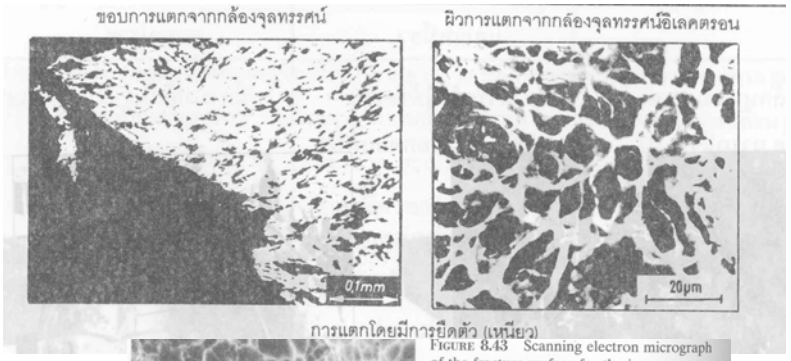
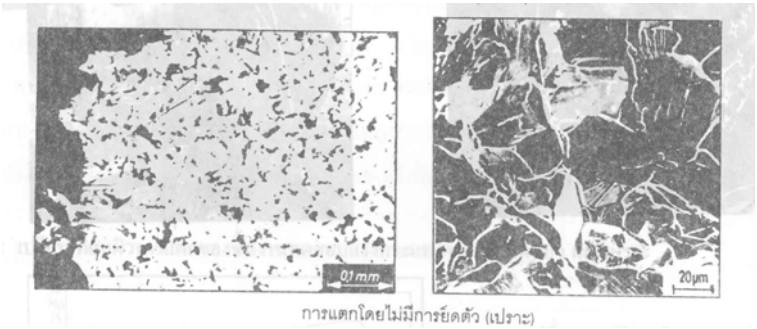
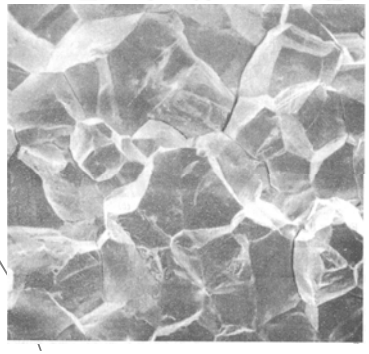


FIGURE 8.43 Scanning electron micrograph of the fracture surface for the inner-core specimen that was tensile tested; a completely dimpled structure may be noted. Approximately 3500×. (Reproduced with permission from *Handbook of Case Studies in Failure Analysis, Vol. 1* (1992), ASM International, Materials Park, OH, 44073-0002.)



การแตกโดยไม่มีการยืดตัว (เปราะ)



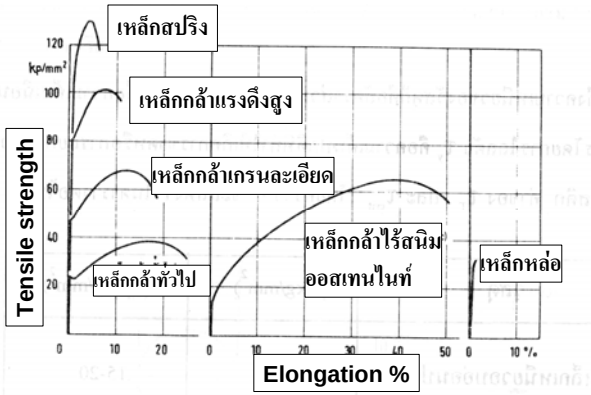
ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะการเสียหาย

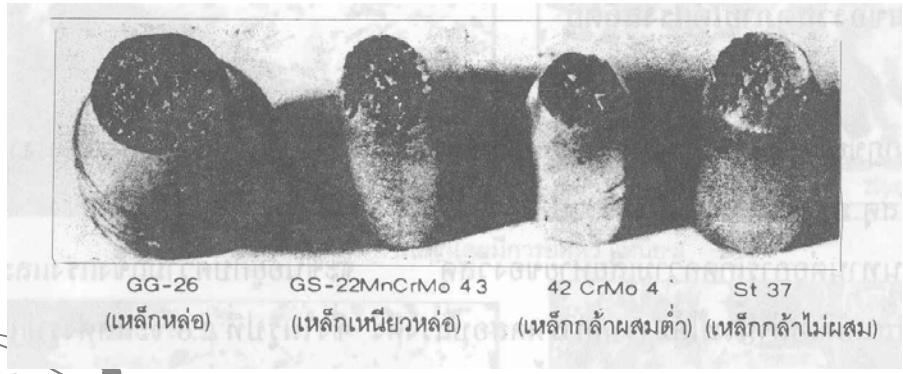
1. ชนิด และลักษณะของภาระกรรม แรงสถิตย์ (static load) หรือ แรงเป็นคาบ (Cycle load)
2. ในการทดสอบแรงกระแทก จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสภาวะความเค้น
3. พลังงานที่ชิ้นงานสะสมไว้
4. ขนาด และรูปร่างของชิ้นงาน

2.1 Materials behavior under static loading

ความเสียหายจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุ

2.1.1 ชนิดของวัสดุ





ความเหนียวลดลง

ดัชนีบ่งชี้ความเหนียว คือ ค่าสัดส่วน τ_{crit}/σ_T

โดยที่ τ_{crit} คือ ความเค้นเฉือนวิกฤต (ความต้านการเสียรูปพลาสติก)

และ σ_T คือ ความต้านทานต่อการแยกออกจากกันโดยความเค้นปกติ (ความต้านการแตกเปราะ)

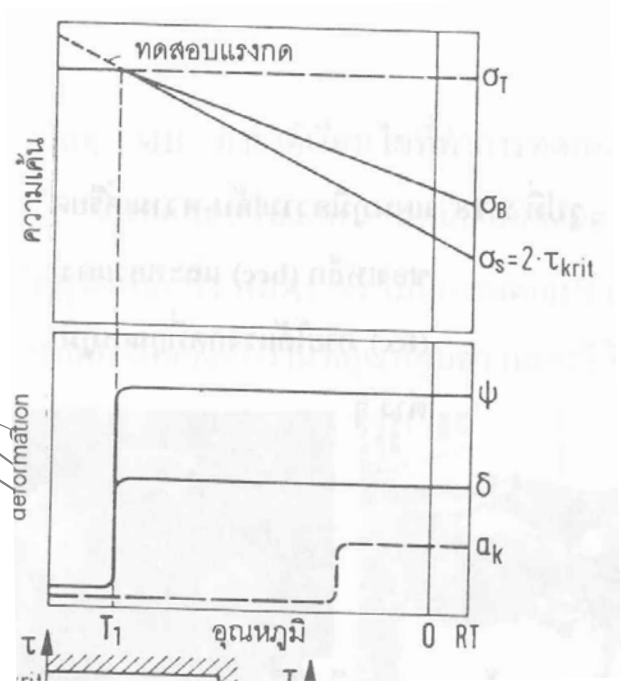
พิจารณากราฟ stress-strain ของวัสดุ

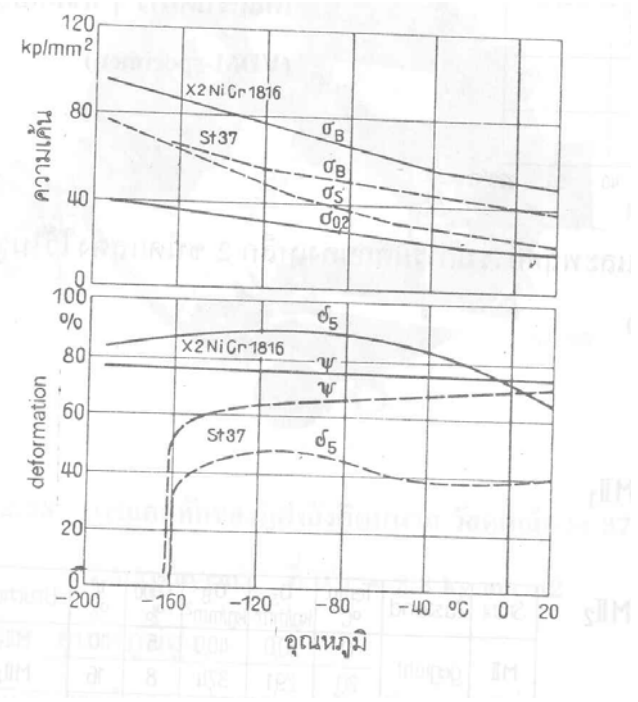
- วัสดุเหนียว จะมีค่า τ_{crit}/σ_T ต่ำ
- วัสดุเปราะ จะมีค่า τ_{crit}/σ_T สูง

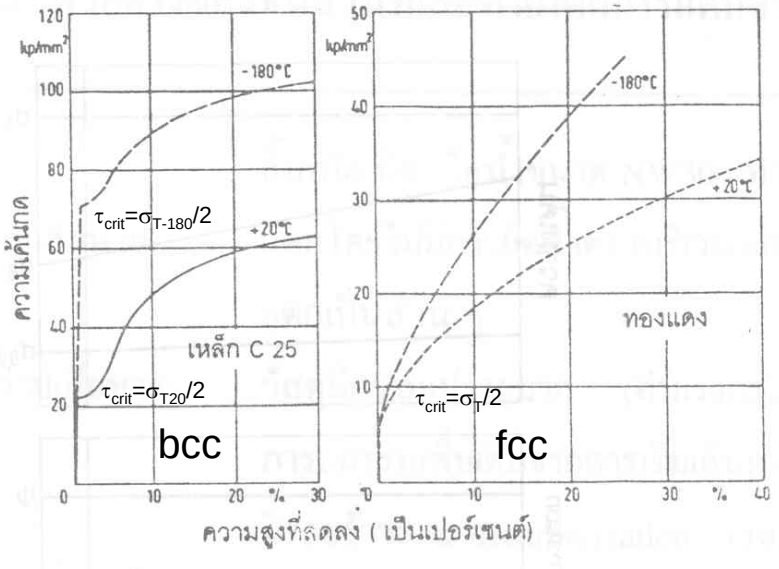
2.1.2 อุณหภูมิ

ความเค้นเฉือนวิกฤติ, τ_{crit} จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้น ค่าอัตราส่วน τ_{crit}/σ_T จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย

- อุณหภูมิต่ำ พฤติกรรมของโลหะจะขึ้นอยู่กับระบบผลึก โดยเฉพาะผลึกแบบ bcc เมื่ออุณหภูมิต่ำลง จะมีค่าความเค้นเฉือนวิกฤติเท่ากับค่าความต้านทานการแตก ทำให้ไม่มีการยืดตัวเมื่อแตก
- ส่วนวัสดุโครงสร้างผลึก fcc จะยังคงรักษาความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำไว้ได้

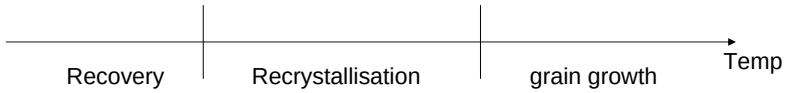






โครงสร้าง BCC: ความเค้นเฉือนวิกฤติ, τ_{crit} จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

2.1.2.2 อุณหภูมิสูง

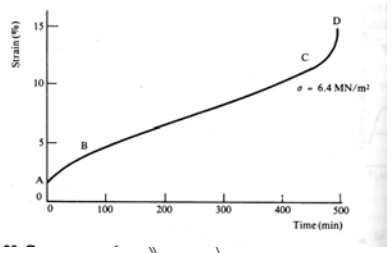


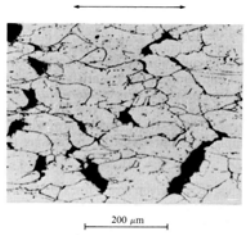
ก. การรับภาระกรรมของวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคลายตัวของผลึก (Recovery temperature)

จะสามารถใช้ค่าที่ทดสอบที่อุณหภูมิห้องได้ แต่พึงระลึกเสมอว่า ความสามารถในการยืดตัวจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ข. การรับภาระกรรมของวัสดุที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคลายตัวของผลึก (Recovery temperature)

พฤติกรรมและความเสียหายของวัสดุจะมีเวลา เข้ามาเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเรียกว่า การคืบ (Creep)





ลักษณะความเสียหายที่เกิดจากการคืบ มี 2 แบบ คือ

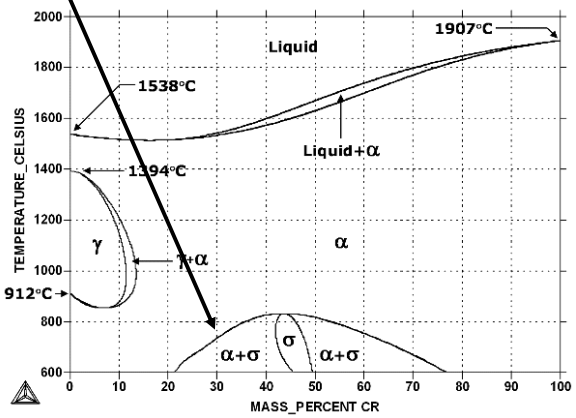
1. บริเวณที่เป็นรอยแตกจะมีการยืดตัวสูง และมีการแยกตัวของเกรน มีรอยแตกตามของเกรน และอาจจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างเนื่องจากอุณหภูมิสูงด้วย (ดูรูป 2.30)

2. ความเสียหายเนื่องจากการคืบ บางครั้งเป็นการแตกแบบเปราะ เรียกว่า Creep embrittlement ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวของธาตุบางชนิดที่ขอบเกรนทำให้ขอบเกรนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงเกิดเป็นการแตกตามขอบเกรน (Intergranular)

เหล็กที่มีความเสียงต่อการเกิด Creep embrittlement ได้แก่ เหล็กที่มี Cr, Mo, V และ Nb

ตัวอย่าง การแตกเปราะที่อุณหภูมิสูงของเหล็ก Austenite

เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงระหว่าง 600-800 °C โครงสร้าง Austenite จะมีโอกาสเกิด σ-phase และจะอยู่ตามขอบเกรนส่งผลให้เกิดการแตกแบบเปราะที่อุณหภูมิห้องได้



2.1.3 สภาวะความเค้น

ขนาด และทิศทางของแรงเค้นจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของวัสดุด้วย

2.1.3.1 ขนาดของความเค้นหลัก

- Plastic deformation จะเกิดขึ้นเมื่อ $\tau_{max} = \tau_{crit}$
- การแตกชนิดที่ไม่มีการยืด จะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma_{max} = \sigma_T$

ถ้าความเค้นที่ชิ้นงานได้รับถึงจุด τ_{crit} หรือ σ_T ก่อนกัน สามารถหาได้จากผลต่างของความเค้นหลักสูงสุด (แรงดึง และ แรงกด)

อีกพฤติกรรมหนึ่ง ที่เกิดในกรณีที่การยืดตัวของชิ้นงานมีขนาดคงที่ ได้แก่ พฤติกรมการคลายความเค้น (Relaxation behavior)

เช่น การคลายความเค้นของของสลักเกลียวที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ดูรูปที่ 2.28 และความเสียหายที่อุณหภูมิสูง อีกประการก็คือ ผนังของชิ้นงานบางลงเนื่องจากการผุกร่อน หรือการสึกหรอ ทำให้รับแรงได้น้อยลง ดูตารางที่ 2.6

1302 420 Failure Analysis

บทที่ 3

ความเสียหายอันเนื่องมาจากสมบัติทางฟิสิกส์

สมบัติทางฟิสิกส์

อุณหภูมิ/ความร้อน เป็นปัจจัยทางฟิสิกส์ที่มีอิทธิพลต่อโลหะ เพราะ

- เมื่อโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการขยายตัว
- เมื่อโลหะได้รับอุณหภูมิต่ำลง จะเกิดการหดตัว

อิทธิพลของการขยายตัว/หดตัวทางความร้อนต่อวัสดุ

1. ทำให้เกิดความเครียด (ยืด หรือ หด)
2. หากอุณหภูมิมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ อาจทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอได้
3. ทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในชิ้นงาน อาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้

3.1 การเกิดเป็นน้ำแข็ง

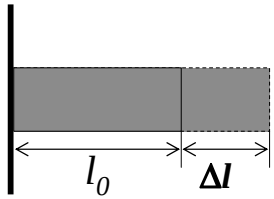
- ที่อุณหภูมิต่ำ การเกิดน้ำแข็งเกาะชิ้นงาน ทำให้เกิดความเสียหายได้ เช่น
- ท่อต่าง ๆ เมื่อของเหลวในท่อเป็นน้ำแข็ง และมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแรงดันขึ้นภายใน ถ้าปริมาตรขยายเพิ่มขึ้น ประมาณ 1/11 เท่า ของปริมาตรเดิม จะทำให้เส้นรอบวงท่อขยายตัว 2.9% ทำให้ท่อแตกได้

- ลักษณะการแตก จะเป็นการแตกแบบฉับพลัน (รูปที่ 3.1, 3.2 และ 3.3)
- หากมีการเจาะรู หรือ มีความหนาที่ไม่เท่ากัน ก็จะทำให้มีความเค้นที่สูงขึ้น และ ทำให้แตกง่ายขึ้น (รูป 3.4)

3.2 ความเค้นที่เกิดจากความร้อน

- เมื่อโลหะที่มีความยาว l_o ได้รับความร้อน ถ้าเป็นการขยายตัวอย่างอิสระ(ไม่มีความเค้น) จะมีขนาดการขยายตัว/หดตัว เท่ากับ

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta \upsilon \cdot l_o$$

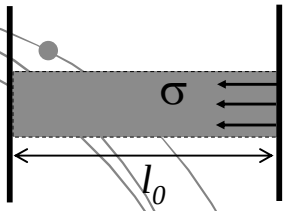


α = สัมประสิทธิ์การขยายตัว (K^{-1})

$\Delta\upsilon$= ผลต่างของอุณหภูมิ (K)

$$\frac{\Delta l}{l_o} = \varepsilon = \alpha \cdot \Delta \upsilon$$

- เมื่อมีการขัดขวางการขยายตัว (ไม่อิสระ) <u>จะทำให้เกิดความเค้นภายในโลหะขึ้น</u> เช่น
- มีการยึดติดชิ้นงานกับวัสดุภายนอก
- มีความแตกต่างของอุณหภูมิ เกิดการขยายตัวไม่เท่ากัน



$$\frac{\Delta l}{l_o} = \varepsilon = 0$$

$$\sigma = -E \cdot \alpha \cdot \Delta \upsilon$$

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อความเค้น

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ ได้แก่

1. สภาวะความเค้น-ความเครียด แบบแกนเดียว, แบบ 2 แกน หรือแบบ 3 แกน
2. การกระจายตัวของความร้อน

3.2.1. สภาวะความเค้น-ความเครียด

สามารถคำนวณได้จาก **Hook's Law** ดังตารางที่ 3.1

1. สภาวะความเค้นแกนเดียว

$$\varepsilon_1 = 0$$
$$\sigma_1 = -E \cdot \alpha \cdot \Delta\upsilon,$$
$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

2. สภาวะความเค้น 2 แกน

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$$
$$\sigma_1 = \sigma_2 = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta\upsilon}{1-\mu}$$
$$\sigma_3 = 0$$

3. สภาวะความเค้น 3 แกน มีค่าสูงที่สุด

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$$
$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta\upsilon}{1-2\mu}$$

เช่น ในเหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติดังนี้

- โมดูลัสยืดหยุ่น (E) = 21,000 kg/mm^2
- อัตราส่วนปัวซอง (μ) = 0.3
- สัมประสิทธิ์การขยายตัว (α) = 12 x 10^{-6} K^{-1}

จะมีค่า ความเค้นแกนเดียว = -0.25$\Delta\upsilon$

ความเค้น 2 แกน = -0.36 $\Delta\upsilon$

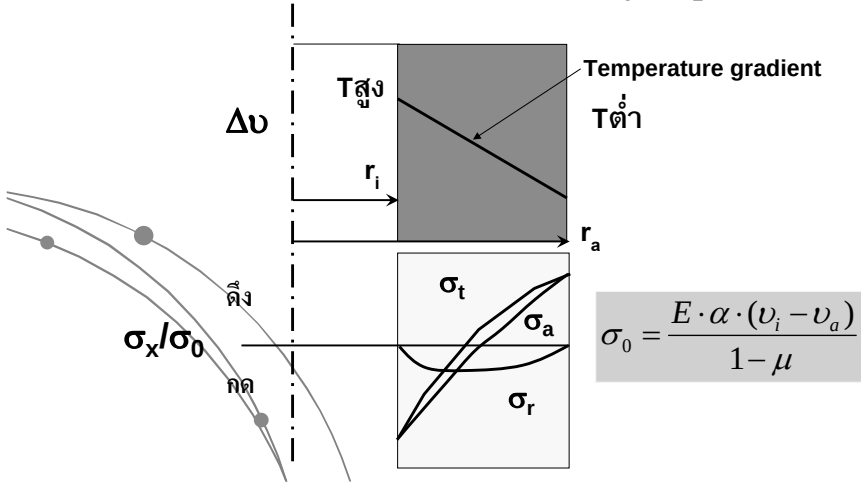
ความเค้น 3 แกน = -0.63 $\Delta\upsilon$

3.2.2. การกระจายตัวของความร้อน

หากภายในวัสดุมีการกระจายของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ และมีความแตกต่างของอุณหภูมิมาก จะทำให้

- เกิดความเค้นในทิศต่างกัน เช่น ดึง และ กด
- เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ก็มีแนวโน้มที่จะมีความเค้นสูงขึ้น

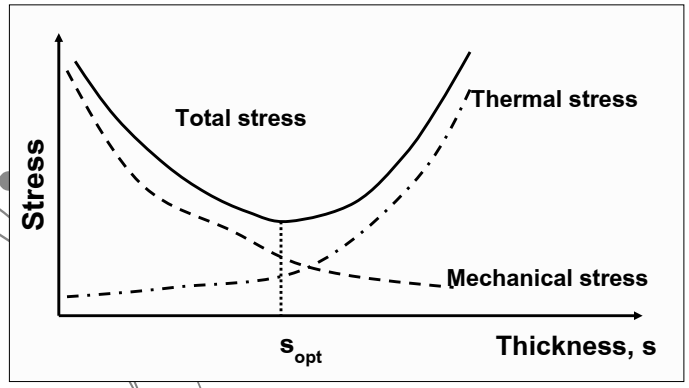
- ภายในความหนาของวัสดุ จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายใน ทำให้เกิด **Temperature gradient** หรือ ความชันของการเปลี่ยนอุณหภูมิ



$$\sigma_0 = \frac{E \cdot \alpha \cdot (\upsilon_i - \upsilon_a)}{1-\mu}$$

- เมื่อ ความชันของกราฟสูง(Δυ สูง) จะทำให้ เกิดความเค้นจากความร้อนได้สูง ในบางครั้งสูงมาก จนเรียกว่า “Thermal shock”
- ถ้าความเค้นจากความร้อนเพียงอย่างเดียว สูงเกินกว่าความเค้นจุดคราก จะทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานได้

- ดังนั้น การเลือกความหนาวัสดุ ต้องคำนึงถึง ความเค้นที่เกิดจากความร้อนและความเค้นที่เกิดจากแรงทางกลด้วย



- อีกปัจจัยที่ต้องพิจารณา คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งโดยปกติแล้ว จะไม่ใช่ค่าคงที่ แต่จะแปรผันไปตามอุณหภูมิ (รูป 3.8)
- ดังนั้น วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ จะมีโอกาสเกิดความเค้นจากความร้อนได้สูงกว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง

- ในกรณีที่ต้องรับแรงเค้นจากความร้อนเป็นคาบ (เช่น ร้อน-เย็น สลับกัน) ในการพิจารณาอายุการใช้งานจะต้องนำค่า ความต้านทานการล้าในรอบต่ำ (Low cycle fatigue) มาพิจารณาด้วย (ตาราง 3.2)
- ลักษณะความเสียหายที่เกิด จะมีรอยร้าวที่ผิวเป็นตาข่ายและมีจำนวนมาก รอยร้าวค่อนข้างตรงและลึกลงไปในเนื้อวัสดุ และมักพบเศษจากการเผาไหม้ในร่องของรอยร้าวด้วย (รูป 3.11-3.16)

3.3 ความเค้นหลงเหลือ

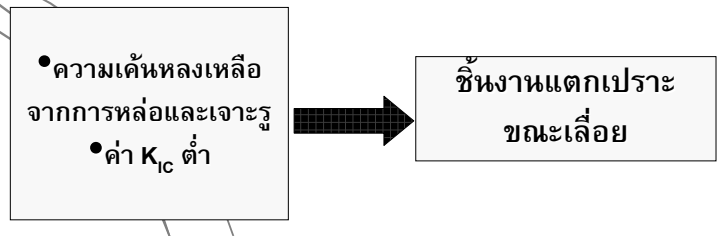
ความเค้นหลงเหลือ (Residual Stress) คือ ความเค้นที่มีอยู่ในชิ้นงาน(locked-in stresses) โดยไม่มีแรงภายนอกมากระทำ

มี 3 ประเภท คือ

- ประเภท I เกิดจากความเค้นที่ชิ้นงานได้รับก่อนหน้านี้ (แรงภายนอก, อุณหภูมิ และ การเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค) ทำให้การกระจายความเค้นไม่สม่ำเสมอ
- ประเภท II และ III เป็นความเค้นดึงที่เกรนของโลหะสามารถทำให้เกิดการแตกปราะได้

- หากความเค้นหลงเหลือ รวมกันกับ ความเค้นหลัก เกิดเป็นความเค้น 3 แกนขึ้น จะทำให้วัสดุเกิดการแตกเปราะ (รูป 3.20)
- การแตกหัก มีทั้งแตกเป็น 2 ส่วน และแบบหลายส่วน

ตัวอย่าง: ตาราง 3.4

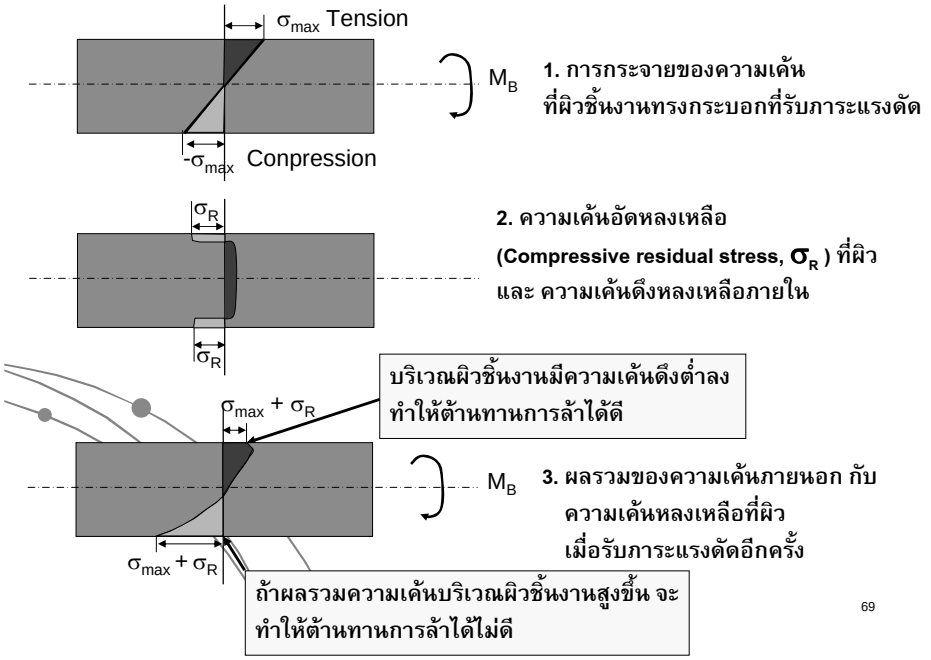


สาเหตุของการเกิด Residual stress

3.3.1 แรงกระทำภายนอก

- เมื่อชิ้นงานรับแรงกระทำภายนอกเกินจุดยืดหยุ่น เกิดการเสียรูปแบบถาวรที่ไม่สม่ำเสมอกันในหน้าตัดชิ้นงาน
- บริเวณที่เกิดการเสียรูปไปจะขัดขวางไม่ให้บริเวณที่เสียรูปยืดหยุ่นกลับเข้าสู่สภาพเดิม ทำให้บริเวณยืดหยุ่นนี้มีความเค้นค้างอยู่ ดังนั้นทำให้บริเวณที่เสียรูปถาวรเกิดความเค้นหลงเหลือเพื่อถ่วงดุลความเค้นที่ค้างอยู่

- ความเค้นหลงเหลือที่เกิดขึ้นบริเวณที่เกิดการเสียรูป จะมีทิศทาง ตรงกันข้าม กับความเค้นภายนอกที่ได้รับ
- และเมื่อชิ้นงานที่มีความเค้นหลงเหลือรับภาระต่อไป จะส่งผลให้เกิดความเค้นแบบกลับไปกลับมา (ดึง และ กด สลับกัน) ถึงแม้ว่า Load ภายนอก จะเป็นไปในทิศทางเดียวก็ตาม
- ความเค้นหลงเหลือสูงสุด จะเท่ากับ Elastic limit ของโลหะนั้น ๆ



1. การกระจายของความเค้นที่ผิวชิ้นงานทรงกระบอกที่รับภาระแรงดัด

2. ความเค้นอัดหลงเหลือ (Compressive residual stress, σ_R) ที่ผิว และ ความเค้นดึงหลงเหลือภายใน

บริเวณผิวชิ้นงานมีความเค้นดึงต่ำลง ทำให้ต้านทานการล้าได้ดี

3. ผลรวมของความเค้นภายนอก กับความเค้นหลงเหลือที่ผิว เมื่อรับภาระแรงดัดอีกครั้ง

ถ้าผลรวมความเค้นบริเวณผิวชิ้นงานสูงขึ้น จะทำให้ต้านทานการล้าได้ไม่ดี

ตัวอย่างความเสียหาย

- รูป 3.23 ชิ้นงานมีรอยบากรับแรงกดเป็นคาบ เมื่อมี overload (2) ทำให้มีความเค้นหลงเหลือเป็นแรงดึง (หมายเลข 3) ทำให้เกิดการเสียรูปเนื่องจากแรงดึง

$$\sigma_{\text{หลงเหลือ}} = \sigma_{\text{จริง}} - \sigma_{\text{อุดมคติ}}$$

- รูป 3.24 การแตกร้าวของเฟือง ในด้านที่รับแรงดัดเป็นคาบ

3.3.2 การกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ

เช่น การเชื่อมเป็นจุด จะทำให้เกิดความเค้นจากความร้อนไม่สม่ำเสมอภายในชิ้นงาน เกิดความเค้นกดบนจุดที่ร้อนที่สุด และเมื่อจุดที่ร้อนเย็นลง จะทำให้เกิดความเค้นหลงเหลือได้หากชิ้นงานมีการหดตัวอย่างถาวร

1302 420 Failure analysis

บทที่ 4
ความเสียหายเนื่องจากเทคโนโลยี
Failure from Technology

4.1 ความผิดพลาดทางวัสดุและจุดบกพร่อง

แบ่งเป็น

- **ความผิดพลาดของแท่ง Ingot**
- **ความผิดพลาดของชิ้นงานหล่อ**

4.1.1 ความผิดพลาดของแท่ง Ingot

แท่ง Ingot ของโลหะก่อนที่จะนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ถ้าหากว่ามี Segregation ซึ่งก็คือ ความไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติ และโครงสร้างซึ่งเกิดจากการที่ส่วนผสมทางเคมีกระจายไม่สม่ำเสมอระหว่างการเย็นตัว ทำให้โลหะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีการแยกส่วนและโครงสร้าง เช่น มีฟองอากาศที่ใหญ่ มีสิ่งเจือปนมาก จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้อยคุณภาพได้

ผลเสีย

1. **การเกิด Lamination คือ การที่ Ingot มีโพรงอากาศมากเกินไป และมีขนาดใหญ่ ทำให้เมื่อผ่านการรีดไม่สามารถรีดให้ติดกันได้ เกิดเป็นแผ่นโลหะลอกออกที่ผิว หรือเกิดเป็นชั้นของโลหะ**
2. **หากมีสารมลทิล (Inclusion) มาก เช่น MnS (แมงกานีสซัลไฟด์) ที่จะสามารถยืดตัวได้ตามทิศทางการรีด ที่สามารถมองเห็นเป็นสันสีดำ แต่จะไม่แตกกระจายเป็นชิ้นเล็ก ๆ จะทำให้เหล็กมีคุณสมบัติเปราะในทิศตามขวาง**

วิธีการแก้ไข

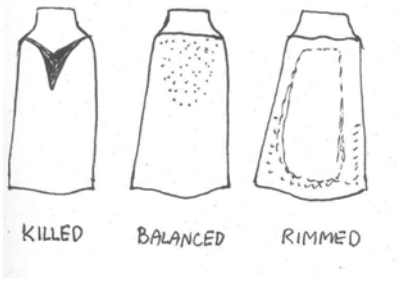
สำหรับเหล็กกล้า จะมี ออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำโลหะเหล็ก และเมื่อเกิดการเย็นตัวเป็นแท่ง ingot หากไม่มีการกำจัดออกซิเจนออกไป จะทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ ทำความเสียหายต่อชิ้นงานได้

ดังนั้น Ingot ที่เหมาะแก่งานวิศวกรรม จึงต้องมีการกำจัดออกซิเจน (Deoxidation) ดังนี้

1. Killed Ingot

เป็น **ingot** ที่ไม่มี **segregation** โดยการเติมอลูมิเนียมและซิลิกอน เพื่อให้รวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นตะกรันคลุมผิวหน้าไว้ เมื่อเย็นตัวแล้วจะตัดส่วนนี้ทิ้งซึ่งคิดเป็น **12%** โดยน้ำหนักของแท่ง **ingot** และเนื้อวัสดุส่วนที่เหลือจะไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่

Killed steel ingot เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุสูง เช่น งานทุบขึ้นรูปร้อน งานชุบผิวด้วยคาร์บอน เป็นต้น



2. Rimmed Ingot

สำหรับโลหะเหล็ก ใน **Rimmed steel**จะใช้วิธีการกระจายฟองอากาศ

โดยการให้ ออกซิเจน รวมตัวกับ คาร์บอน กลายเป็นกาซ **CO** ขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปภายในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ ผิวด้านนอกไม่มีคาร์บอน จึงมีความเหนียวกว่าเนื้อด้านใน จึงเหมาะสำหรับงานขึ้นรูปเย็น เพราะฟองอากาศขนาดเล็กสามารถหายไปได้เมื่อผ่านการรีดลดขนาดหลาย ๆครั้ง

แต่มีข้อเสียคือ จะมี **segregation** ค่อนข้างสูง จึงนิยมทำเฉพาะเหล็กที่มีคาร์บอน น้อยกว่า **0.25%** และ แมงกานีส **0.60%**

3. Balanced (Semi-killed) Ingot

เป็น **ingot** ที่มีคุณสมบัติระหว่าง **Killed** และ **Rimmed** คือจะมีการเติมเพียง **Si** ตัวเดียวเพื่อกำจัดออกซิเจน และจะมีฟองอากาศขนาดเล็กของ **CO** กระจายอยู่เล็กน้อยเฉพาะผิวด้านบน คิดเป็น **2%** ของปริมาตร และสามารถกำจัดออกได้เมื่อผ่านการรีดในครั้งแรก

4.1.2 ชิ้นงานหล่อขึ้นรูป

ข้อบกพร่องจากงานหล่อ สามารถแบ่งได้เป็น **4** กลุ่มดังนี้

1. ข้อบกพร่องเชิงรูปร่าง เช่น ขนาดใหญ่เกินไป, รูปร่างบิดเบี้ยว, การไหลไม่ต่อเนื่อง และ หล่อไม่เต็ม เป็นต้น
2. ข้อบกพร่องที่ผิว เช่น ผิวไหม้, สะเก็ด
3. ข้อบกพร่องภายใน เช่น โพรงหดตัว, รูกลวง, รอยแตก, ฟองอากาศ
4. ข้อบกพร่องเชิงโครงสร้าง เช่น มีโครงสร้างที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น, มีสารมลทินมากเกินไป, เกรนมีขนาดใหญ่เกินไป

4.2 การออกแบบและประกอบที่ผิดพลาด

แบ่งเป็น

1. **การเลือกใช้วัสดุไม่ถูกต้อง**
2. **ออกแบบรูปร่างลักษณะไม่เหมาะสม**
3. **การประกอบและการบำรุงรักษาไม่ดี**

เป็นความเสียหายที่เกิดจากคน

4.2.1 การเลือกใช้วัสดุ

เป็นการเลือกใช้วัสดุไม่เหมาะสมกับงานทั้งที่ตั้งใจและไม่ตั้งใจ จึงส่งผลเสียหายต่ออุปกรณ์นั้น ๆ ก่อนเวลาอันควร เช่น

- **เลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำเกินไป**
- **ใช้วัสดุผิดประเภท**
- **ใช้วัสดุไม่น้อยกว่าที่ได้ออกแบบไว้**

4.2.2 ออกแบบรูปร่างลักษณะไม่เหมาะสม

เป็นการออกแบบที่ไม่เหมาะสม โดยไม่คำนึงถึงความเหมาะสมในการผลิต และ สภาวะการใช้งานของชิ้นงาน

เช่น

- **มีมุมคม หรือ รอยบาก ที่เป็นบริเวณสะสมความเค้นมากไป**
- **การเชื่อมต่อวัสดุ เช่น ใช้นอตแทนการเชื่อม**
- **วัสดุที่ต้องรับแรงเป็นคาบ ควรคำนึงถึง ความต้านทานการล้า และอุณหภูมิ (2.55)**

4.2.3 การประกอบและการบำรุงรักษาที่บกพร่อง

การประกอบ หรือการบำรุงรักษาอย่างไม่ถูกวิธี จะทำให้เกิด Load แก่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น จากที่ได้ออกแบบไว้ และส่งผลเสียหายต่อชิ้นงานได้ เช่น

1. **มีสิ่งแปลกปลอมหลุดเข้าไปในอุปกรณ์จากการประกอบที่ไม่รอบคอบ**
2. **การเกิดภาระกรรมสูงเกินไปจากการขันสลักเกลียวแน่นเกินไป**
3. **การหล่อลื่นที่ไม่ถูกต้อง**

4.3 ความผิดพลาดในการผลิตสำเร็จ

แบ่งเป็น

1. การผลิตที่ไม่มีเศษวัสดุ เช่น การหล่อ การรีด การทุบขึ้นรูป การอบชุบ
2. การผลิตที่มีเศษวัสดุ เช่น การกลึง ไส กัด เจาะ
3. การเสียหายจากการชุบแข็ง

4.3.1 การผลิตโดยไม่มีเศษ

4.3.3.1 ความผิดพลาดจากการผลิต

ในการผลิตบางอย่างไม่สามารถตรวจพบความบกพร่องได้ด้วยตาเปล่า เพราะเกิดขึ้นในระดับโครงสร้างจุลภาค เช่น ในการขึ้นรูปวัสดุด้วยวิธีด้วยตีขึ้นรูป วัสดุที่นำมาใช้ต้องมีความสม่ำเสมอของโครงสร้าง เมื่อผ่านการแปรรูปจึงจะได้วัสดุสำเร็จที่มีการกระจาย และการไหลของเนื้อวัสดุที่สม่ำเสมอ และได้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่สม่ำเสมอด้วย

4.3.1.2 การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallisation)

เป็นที่ทราบแล้วว่า เมื่อวัสดุ เกิดการตกผลึกใหม่เนื่องจากอุณหภูมิสูงกว่า ‘อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (Recrystallisation temperature)’ ในโลหะบริสุทธิ์จะประมาณ $0.3T_m$ ส่วนโลหะผสมจะสูงกว่า โลหะบางชนิดอาจสูงถึง $0.7\ T_m$ ซึ่งจะทำให้เกรนของวัสดุใหญ่ขึ้น และทำให้ความแข็งแรงลดลง

ดังนั้น ในการผลิต จะต้องระมัดระวังไม่ให้มีการตกผลึกใหม่

กระบวนการที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ได้ เช่น

1. การเผาวัสดุที่อุณหภูมิสูงเกินไป และไฟไหม้ เป็นต้น
2. การอบคลายเครียดหลังจากการรีดเย็นที่อุณหภูมิสูงจะเสียงต่อการตกผลึกใหม่ค่อนข้างสูง เนื่องจากวัสดุจะมีพลังงานสะสมภายในจำนวนหนึ่งระหว่างการรีดเย็นที่สามารถทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของเกรนได้เร็ว
3. การชุบเคลือบผิวที่อุณหภูมิสูงเกินไปทั้งที่ตั้งใจและไม่ตั้งใจ

4.3.1.3 การบ่ม (Aging)

เป็นกระบวนการที่วัสดุจะมีความแข็งแรงสูงขึ้นแต่จะมีความยืดน้อยลง ทั่วไปการบ่มมี 2 ประเภท คือ

1. **การบ่มตามธรรมชาติ (Natural Aging) คือ ชิ้นงานสามารถมีความแข็งสูงขึ้นเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องปกติ**
2. **การบ่มแบบไม่ธรรมชาติ (Artificial Aging) คือ การเร่งเวลาระยะบ่มให้สั้นลงโดยใช้ความร้อนเข้าช่วย**

ในกรณีที่เนื้อเหล็กมี ไนโตรเจนสูง และได้รับการขึ้นรูปเย็นมาก่อน และเมื่อทิ้งไว้ หรือ บ่มที่อุณหภูมิ 250 ^{o}C ครึ่งชั่วโมง จะทำให้เหล็กมีความเปราะ ทนต่อแรงกระแทกได้น้อยลง (รูป 4.40)

ทั้งนี้เพราะ อะตอมของ Nitrogen จะไปขัดขวางการเลื่อนไหลของระนาบอะตอม ส่งผลให้เหล็กมีความแข็งขึ้น แต่เปราะ

- **วิธีการแก้ไขคือ ลดปริมาณ Nitrogen โดยการเติม Al หรือ Mn ในน้ำโลหะเหล็ก และการอบอ่อน**

4.3.2 การผลิตโดยการเสียเศษ

- **ในการผลิตชิ้นงานโดยการ การกลึง ไส กัด เจาะ จะต้องคำนึงถึงสมบัติของวัสดุที่จะนำมาทำด้วย เพราะจะส่งผลถึง คุณภาพ และ พฤติกรรมการใช้งาน**
- **ความเสียหายที่มักพบคือ คุณภาพผิว และ ความเที่ยงตรงของขนาด เช่น**
- **ชิ้นงานที่ผิวหยาบ และขนาดเล็ก จะเกิดการสั่นสะเทือนและเสียดสีกัน เกิดเป็น fretting corrosion ได้**
- **ชิ้นงานเกิดรอยร้าวจากการกลึง**

4.3.3 ความเสียหายจากการชุบแข็ง

การชุบแข็งของเหล็กกล้าจะมีขั้นตอนดังนี้

Pearlite & Ferrite $\xrightarrow{\text{Heat}}$ **Austenite** $\xrightarrow{\text{Quench}}$ **Martensite**

ซึ่งโครงสร้าง matensite จะแข็ง เปราะ

ดังนั้น ถ้าเราต้องการวัสดุที่ผิวแข็งทนการสึกหรอ แต่เนื้อในมีความแข็งแรงเหนียว จะทำได้ด้วยการ ชุบผิวแข็ง (Hardening) ด้วยกระบวนการ carburizing และ Nitriding

4.3.3.1 การร้าวเนื่องจากการชุบแข็ง

จะเป็นรายร้าวที่คม เป็นเส้นตรงและลึกลงไปในเนื้อ

เกิดจาก

การกระจายของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอเกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอในชิ้นงาน และเกิดความเค้นขึ้นทั้งจากความร้อน และความเค้นหลงเหลือจากการเปลี่ยนโครงสร้าง

4.3.3.2 ความเสียหายจากการชุบแข็ง

ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการอบชุบคือ

1. **การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา**
2. **รูปร่างของชิ้นงาน**
3. **อุณหภูมิที่ใช้**

ความเสียหายหรือข้อบกพร่องจากการชุบแข็ง เช่น

1. **เผาที่อุณหภูมิต่ำเกินไป โครงสร้างไม่เปลี่ยนเป็น Austenite ทั้งหมด ทำให้ความลึกของการชุบน้อย ความแข็งผิวต่ำกว่าที่ต้องการ**
2. **เมื่อชุบแล้วที่อุณหภูมิห้อง ยังมีโครงสร้าง Austenite หลงเหลืออยู่ ความแข็งผิวต่ำกว่าที่ต้องการ**
3. **เผาที่อุณหภูมิสูงเกินไป เกิดเป็น coarse martensite ทำให้วัสดุเปราะ (4.62)**
4. **การชุบผิวแข็งที่ลึกเกินไป overcarbulizing หรือ การสูญเสียคาร์บอนที่ผิว เนื่องจากเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไป (Decabulizing)**

4.4 ความเสียหายของงานเชื่อม

คุณภาพของงานเชื่อม จะขึ้นอยู่กับ

- **วัสดุที่นำมาเชื่อม**
- **ลักษณะของงานเชื่อม**
- **วิธีการเชื่อม**
- **ฝีมือของช่างเชื่อม**

สาเหตุหลักความเสียหาย → ความบกพร่องของการเชื่อม

4.4.1 การเชื่อมที่มีจุดบกพร่อง

1. **การใช้วัสดุไม่เหมาะสม เช่น รูป 4.69 เหล็กกล้าคาร์บอน C0.26%, P 0.11% S 0.08% เป็นวัสดุที่ไม่เหมาะต่อการเชื่อมเนื่องจากมี ปริมาณ คาร์บอน และฟอสฟอรัส ค่อนข้างสูง ทำให้เปราะ ทำให้เกิดการแตกร้าวตามขอบเกรนระหว่างการเย็นตัว เนื่องจากฟอสฟอรัส จะแยกตัวอยู่ตามขอบเกรน**
2. **โลหะที่ผ่านกระบวนการอบชุบมาแล้ว ก็ไม่เหมาะในการเชื่อม**

Material	Arc Welding	Oxyacetylene Welding	Electron Beam Welding	Resistance Welding	Brazing	Soldering	Adhesive Bonding
Cast iron	7	10	1	1	3	1	7
Carbon Steel, low-alloy steel	10	10	7	10	10	3	7
Stainless steel	10	7	7	10	10	5	7
Aluminum	7	7	7	7	7	1	10
Magnesium	7	7	7	7	7	1	10
Copper, Copper alloys	7	7	7	7	10	10	7
Nickel, Nickel alloys	10	7	7	10	10	5	7
Titanium	7	1	7	7	3	1	7
Lead	7	7	1	3	1	10	10
Zinc	7	7	1	3	1	7	10

2. การเชื่อมที่ไม่เหมาะสม เช่น

- **รูป 4.70 การเชื่อมท่อโค้งด้วยแกส เป็นความบกพร่องเนื่องจากขอบแนวเชื่อมเยื้องกัน**
- **รูป 4.71 - 4.72 การเชื่อมไม่สมบูรณ์**

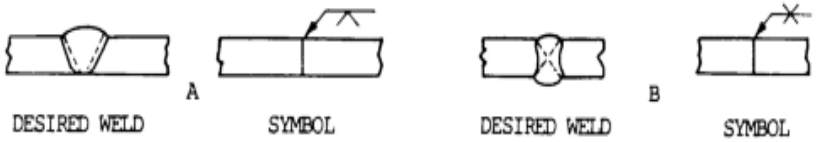


Figure 3-45. Groove weld dimensions for welds extending through the members joined.

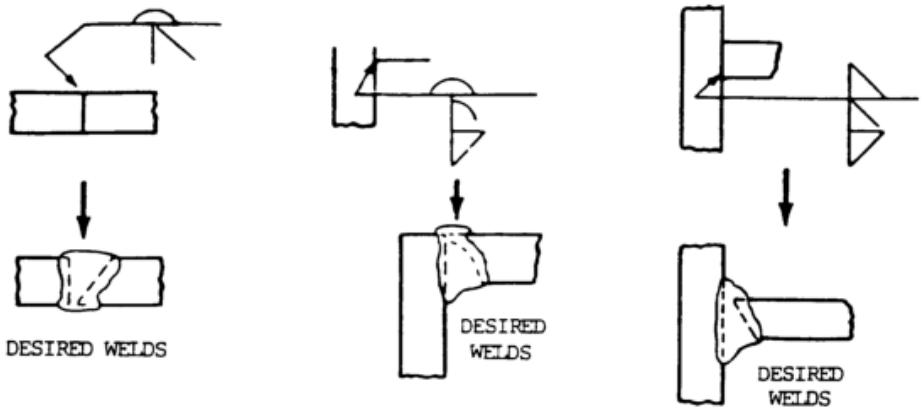


Figure 3-21. Combinations of weld symbols.

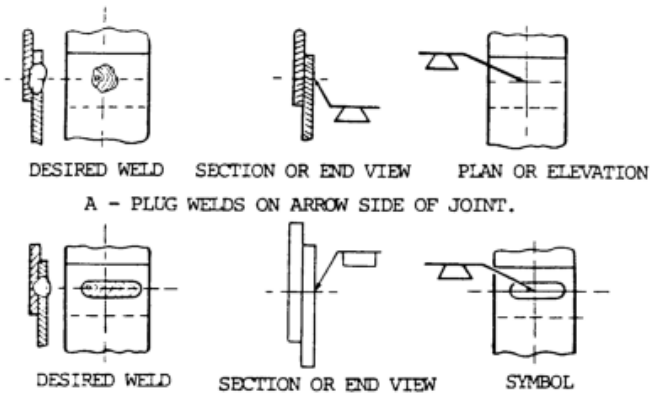


Figure 3-11. Plug and slot welding symbols indicating location and dimensions of the weld.

- **รูป 4.73 รอยกัดข้างรอยเชื่อม**
- **รูป 4.74 ฟองอากาศและตะกรันฝังใน**

Figure 3-9. Arrow side fillet welding symbol.

Figure 3-12. Arrow side V-groove welding symbol.

รูป 4.75 การเชื่อมซึมลึกไม่เพียงพอ

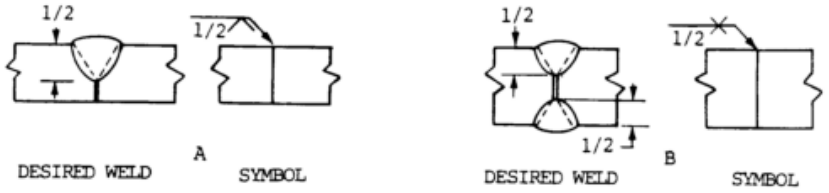


Figure 3-46. Groove weld dimensions for welds extending partly through the members joined.

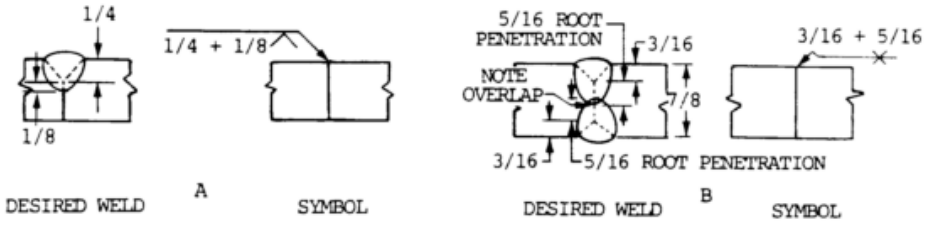
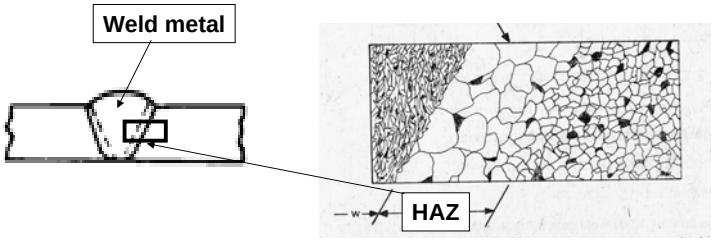


Figure 3-47. Dimensions of groove welds with specified root penetration.

4.4.2 ความเค้นหลงเหลือในแนวเชื่อม

ความเค้นหลงเหลือเกิดจาก

- **เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอภายในชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อน**
- **ความเร็วในการเย็นตัว:**
- **เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก และโครงสร้างจุลภาค**



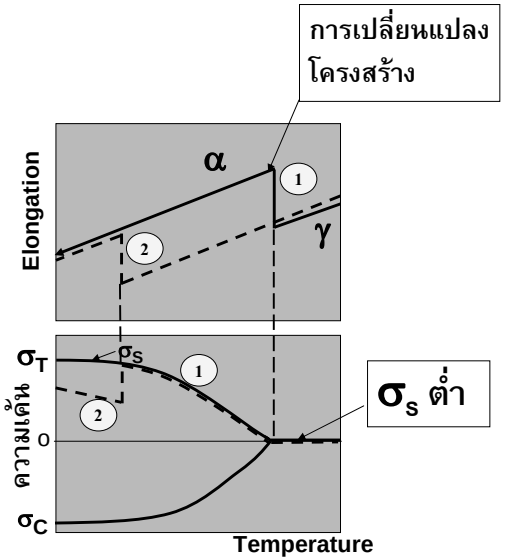
- โดยทั่วไป **HAZ (Heat affected zone:**คือบริเวณชิ้นงานที่อยู่ถัดจาก **weld metal)** ในเหล็กกล้า จะมีอุณหภูมิการเชื่อม **900-1000 °C** และมีโครงสร้างเป็น **γ-FCC** (ค่า **a=0.365 nm)** โดยที่บริเวณรอบ ๆ ยังคงเป็น **BCC** และเมื่อเย็นตัวลง บริเวณ **HAZ** จะมีโครงสร้างเปลี่ยนกลับไปเป็น **α-BCC** (ค่า **a=0.283 nm)** เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

- กรณีที่ 1 เส้นทึบ

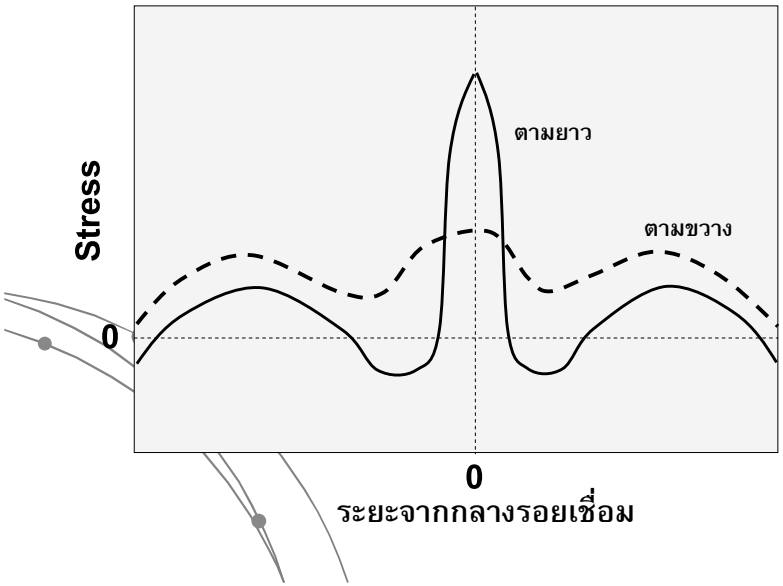
  ความเค้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง = 0 ความเค้นหลงเหลือ = จุด Yield point ของวัสดุขณะร้อน

- กรณีที่ 2 เส้นประ

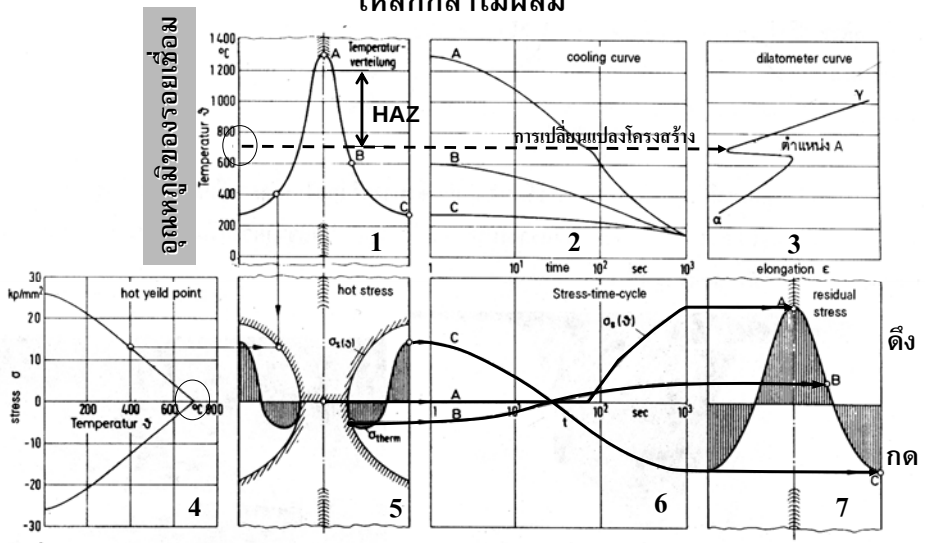
  ความเค้นกดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง = σ ทำให้ ความเค้นหลงเหลือลดลง



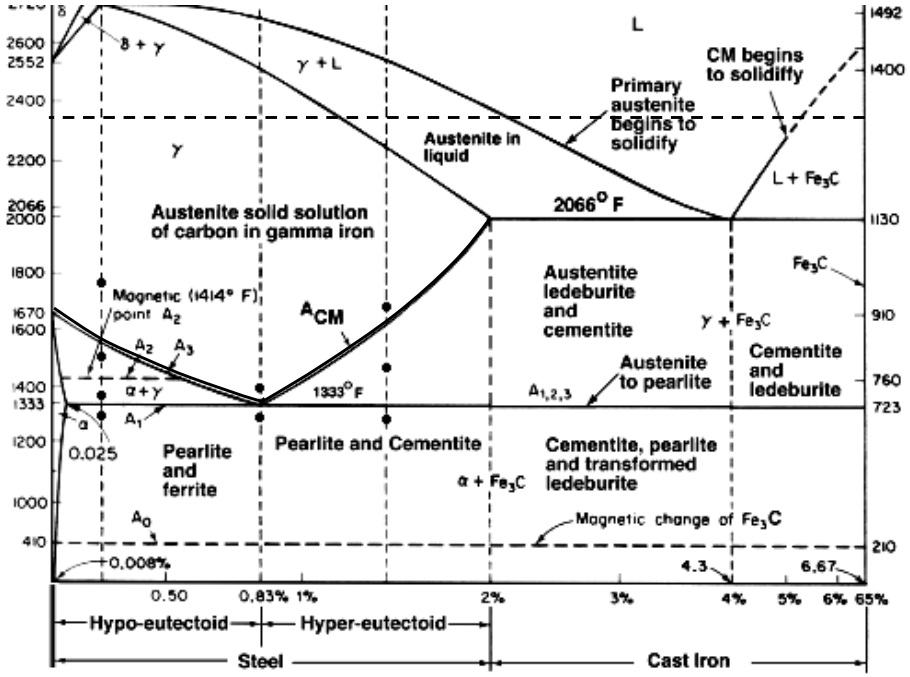
ความเค้นหลงเหลือในแผ่นเชื่อม



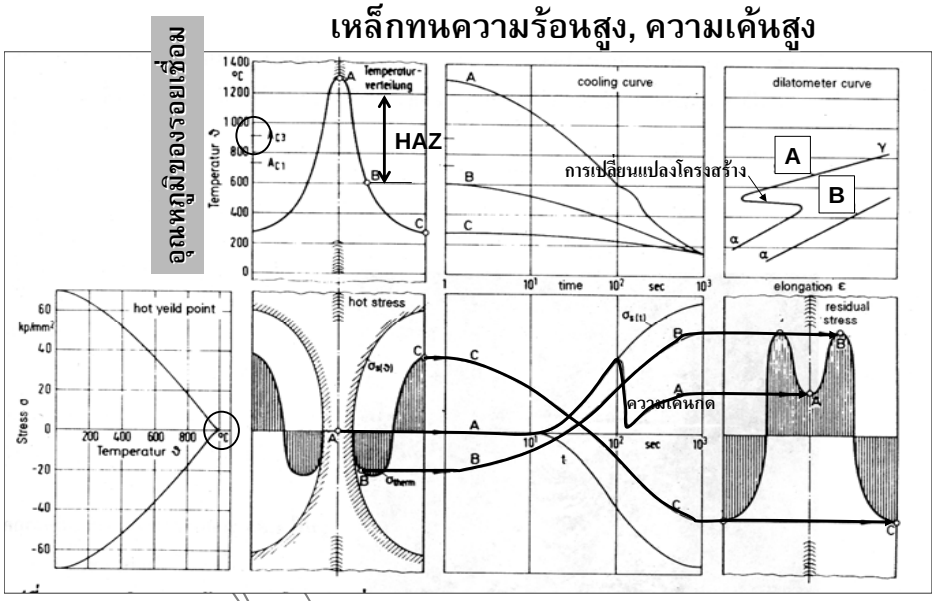
เหล็กกล้าไม่ผสม



Residual stress = σ_s(400 °C) และมีค่าสูงสุดบริเวณจุด **A** ซึ่งมีอุณหภูมิสูงที่สุด



เหล็กทนความร้อนสูง, ความเค้นสูง



เกิดความเค้นกดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ทำให้ความเค้นหลงเหลือบริเวณ A ลดลง

- ผลของความเค้นหลงเหลือ
  1. เกิดการเสียรูปแบบถาวร
  2. ถ้ามีโครงสร้างที่เปราะ เกิดการแตกร้าวได้
  3. ในชิ้นงานหนา ความเค้นอาจไปรวมกับความเค้นใช้งานในทิศตามยาวและขวาง ทำให้โลหะมีความเปราะสูงขึ้น

วิธีการลดความเค้นหลงเหลือของเหล็ก

กระบวนการ	วิธีการ
การเพิ่มภาระกรรมทางกล	ดึง กด
วิธีอุณหภูมิต่ำ	เผาบริเวณข้างแนวเชื่อมทั้งสองข้าง ประมาณ 200°C ส่วนแนวเชื่อม 100 °C
อบลดความเค้น Stress Relief	อบที่ 550-650 °C ความเค้นหลงเหลือจะลดลงเหลือเท่ากับ σs(V)
อบอ่อนปกติ Annealing	อบที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A3 เกิดผลึกใหม่ แต่ชิ้นงานอาจเกิดการเปลี่ยนรูป

4.4.3 รอยร้าวในงานเชื่อม

- ความเค้นหลงเหลือที่เกิดจากการเชื่อม ส่งผลให้ชิ้นงานมีความเปราะ และเกิดรอยร้าวขึ้นได้

สาเหตุหลัก

1. ความเค้นหลงเหลือ
2. การอบชุบที่ไม่ถูกต้อง
3. การยืดตัว ที่อุณหภูมิต่ำ
4. การคืบ ที่อุณหภูมิสูง

4.4.3.1 การร้าวร้อน

เกิดที่อุณหภูมิใกล้กับอุณหภูมิการแข็งตัว สาเหตุ คือ ธาตุบางตัวที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น S, P ยังคงสภาพของเหลวตามขอบเกรน ในขณะที่เหล็กแข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดแรงดึงเนื่องจากความเค้นหลงเหลือ

การร้าวร้อนมี 2 ประเภท คือ

1. ร้าวร้อนขณะแข็งตัว มักเกิดกลางรอยเชื่อม
2. ร้าวร้อนขณะหลอมละลาย มักมีขนาดเล็ก

4.4.3.2 รอยร้าวเย็น

ลักษณะ: เกิดรอยร้าวที่อุณหภูมิต่ำ ขณะชิ้นงานเกิดการเย็นตัวแล้ว รอยร้าวจะลึก คม เกิดใต้รอยเชื่อม

สาหตุ:

1. หากเกิดความเค้นหลงเหลือ จะดึงให้ชิ้นงานเกิดรอยร้าวได้
2. มี H ในเนื้อวัสดุ เกิด Hydrogen induced crack
3. เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และทำให้วัสดุเปราะ

4.4.3.3 รอยร้าวเนื่องจากการใช้งาน

ลักษณะ: เกิดรอยร้าวที่ความเค้นต่ำ ทั้งที่ไม่มีรอยร้าวมาก่อน

สาเหตุ: เกิดจากการรวมความเค้นใช้งาน และความเค้นสะสม

4.4.4 การเชื่อมพอกผิว

การแตกหักจากการเชื่อมพอกผิวแข็ง ทำให้รอยเชื่อมรับภาระได้ต่ำลงสาเหตุ

- การเชื่อมที่ไม่ดี
- การบิดตัวของรอยเชื่อม
- การเกิดความแข็งของวัสดุ
- การเกิดรอยร้าว
- การเกิดความเค้นหลงเหลือ