บทที่ 3
ทฤษฎีเกี่ยวกับการล้า

การล้า คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรเฉพาะที่ในโครงสร้างวัสดุซึ่งเกิดอย่างต่อเนื่องเมื่อวัสดุรับความเค้นที่สลับที่เปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นลงตามเวลาซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวหรือแตกหักหลังจากจำนวนรอบมากเพียงพอ

กลไกการล้าประกอบด้วย 3 ขั้นตอน[14]

1. การเริ่มเกิดการแตกร้าว (Crack initiation)
2. การขยายตัวอย่างต่อเนื่องจนพื้นที่ภาคตัดไม่สามารถรับภาระได้ (crack - propagation)
3. การแตกหักขั้นสุดท้าย (Final fracture)

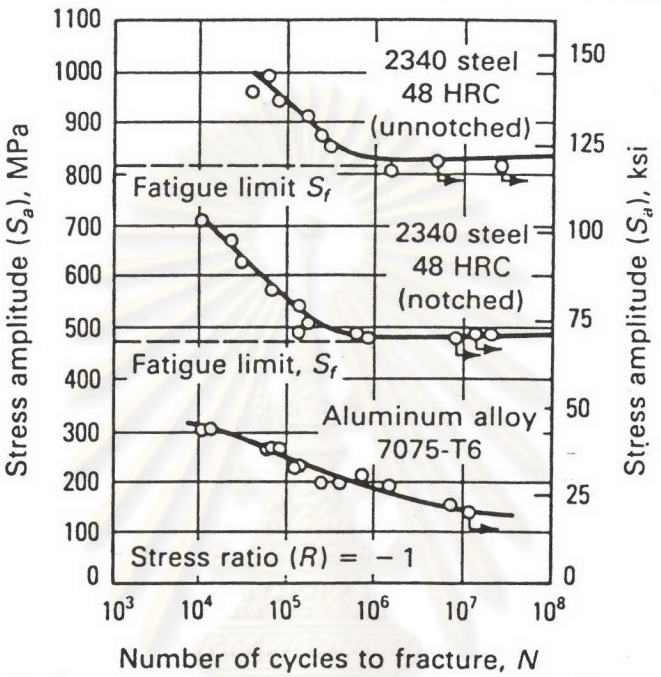
การแตกหักในลักษณะนี้สามารถเกิดขึ้นได้แม้ว่าระดับความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าจุดคราก (Yield Strength) ของโลหะ การเริ่มเกิดและการขยายอยู่เฉพาะในจุดที่มีความเครียดสูง ส่วนมากเป็นจุดบกพร่องในโครงสร้างจุลภาค

3.1 อายุการล้า (Fatigue life)

อายุการล้า คือ จำนวนรอบของความเค้นที่ทำให้เกิดการแตกหัก ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น ระดับความเค้น สภาพความเค้น วัฏจักรของความเค้น ภาวะแวดล้อม และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ในทางการทดสอบความล้า อายุการล้า แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเริ่มเกิดการแตกร้าว ซึ่งนับจากชิ้นทดสอบได้รับความเค้นสลับจนเกิดรอยร้าวเพียงพอที่จะขยายต่อไป และการขยายตัวของรอยร้าวซึ่งสามารถใช้วิธีการทางกลศาสตร์การแตกหักในการทำนายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวได้

แผนภูมิความเค้นและอายุการล้า หรือแผนภูมิ S-N ซึ่งเป็นการพล้อตค่าความเค้นสลับ (S) กับจำนวนรอบก่อนเกิดการเสียหาย (N) ข้อมูล S-N ได้จากการทดสอบการหมุนดัด เช่น การทดสอบของ R.R.Moore[14] ซึ่งจะให้โมเมนต์คงที่ และทำให้เกิดความเค้นสลับบนแกนเดียวอย่างสมบูรณ์ สมมติฐานของการทดสอบตั้งว่าค่าความเครียดทั้งหมดที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงอิลาสติค ดังนั้นข้อมูลของค่าความเค้นและอายุการล้าจะเป็นจริงได้ก็ต่อ

เมื่อความเครียดที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงอิลาสติค หรือความเครียดมีค่าประมาณความเค้นคราก เท่านั้น เส้นโค้ง S-N ได้จากการพล้อตข้อมูล S-N แบบ log-log หรือกึ่ง log เพื่อแสดงค่าเฉลี่ยของข้อมูล โลหะจำพวกเหล็กกล้า (BCC) จะมีค่าขีดจำกัดการล้า (Fatigue limit) ชัดเจน ส่วนอะลูมิเนียมและโลหะนอกตระกูลเหล็กจะไม่ปรากฏขีดจำกัดการล้า จะถือเอาค่าความเค้นที่อายุการล้า 5×10^8 รอบ[14] เป็นขีดจำกัดการล้า ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เส้นโค้ง S-N ของโลหะวิศวกรรม

3.2 สมการความล้าพื้นฐาน

ความเค้นที่เกิดขึ้นในการทดสอบความล้าแบบหมุนตัดปลายอิสระ

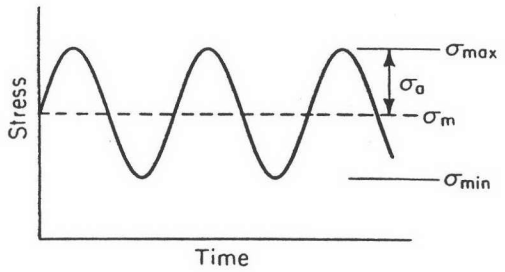
$$\sigma = \frac{MC}{I} \quad \text{..... (2.1)}$$

σ = ความเค้น

M = โมเมนต์ตัด

C = ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวนอกของภาคตัด

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ภาคตัด



รูปที่ 3.2 ความหมายของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแรงสลับ

อัตราส่วนต่าง ๆ ของความเค้น

อัตราส่วนความเค้นส่วนเปลี่ยน (Amplitude Ratio) $A = \frac{\sigma a}{\sigma m}$ .....(2.2)

อัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio) $R = \frac{\sigma max}{\sigma min}$ .....(2.3)

หมายเหตุ

ความเค้นสลับแบบสมบูรณ์ $R = -1$

ความเค้นสลับบางส่วน $R < -1$

ความเค้นเปลี่ยนแปลง $\sigma min = 0$ และ σmax $R = 0$

ความเค้นดึงขึ้น-ลง $R < 1$

ความเค้นที่กระทำ

ความเค้นเฉลี่ย $\sigma m = \frac{\sigma max + \sigma min}{2}$ .....(2.4)

ช่วงความเค้น $\sigma r = \sigma max - \sigma min$ .....(2.5)

ความเค้นส่วนเปลี่ยน $\sigma a = \frac{\sigma max - \sigma min}{2}$ .....(2.6)

$\sigma a = \frac{\sigma r}{2}$ .....(2.7)

แฟคเตอร์จุดรวมความเค้น (Stress Concentration Factor) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อชิ้นส่วนที่รับความเค้นนั้นมีความไม่ต่อเนื่อง เช่น รอยบาก รู รอยขูด ขีด ซึ่งเป็นสาเหตุแห่งการเพิ่มความเค้น

$$\text{แฟคเตอร์จุดรวมความเค้น } K_t = \frac{\text{ความเค้นชิ้นส่วนที่รอยบาก}}{\text{ความเค้นชิ้นส่วนไม่มีรอยบาก}} \quad \text{.....(2.8)}$$

แฟคเตอร์การล้าของรอยบาก (Fatigue Notch Factor)

$$\text{แฟคเตอร์การล้าของรอยบาก } K_f = \frac{\text{ความแข็งแรงล้าของชิ้นส่วนที่มีรอยบาก}}{\text{ความแข็งแรงล้าของชิ้นส่วนที่ไม่มีรอยบาก}} \quad \text{.....(2.9)}$$

ความไวของรอยบากต่อการล้า (Fatigue Notch Sensitivity)

$$\text{ความไวของรอยบากต่อการล้า } q = (K_f - 1)/(K_t - 1) \quad \text{.....(2.10)}$$

การขยายรอยร้าว

กรณีที่ชิ้นงานรับแรงสลับพฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวจะเกิดขึ้นโดยความเค้นสลับ ขนาดของการขยายตัวในแต่ละรอบโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับสภาพความเค้นที่ปลายรอยร้าว ซึ่งพิจารณาในรูปของ ความเค้นหนาแน่น K (Stress Intensity Factor) ระหว่างการรับแรงสลับแต่ละรอบ

$$K = \sigma \beta \sqrt{\pi a} \quad \text{.....(2.11)}$$

$$\Delta K = Kmax - Kmin$$

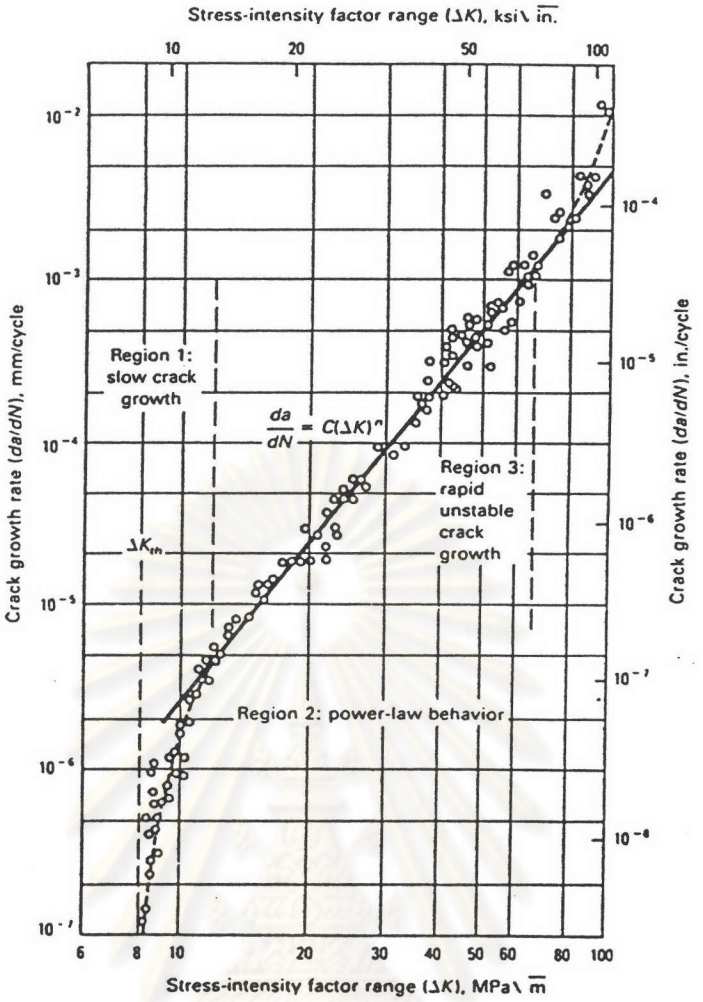
เมื่อ ΔK = ช่วงของความเค้นหนาแน่น

$Kmax = \sigma max\ \beta \sqrt{\pi a}$

$Kmin = \sigma min\ \beta \sqrt{\pi a}$

β = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของรอยแตก

a = ความยาวของรอยร้าว



รูปที่ 3.3 พฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวแบบล้า

จากรูปที่ 3.3 เป็นผลการทดสอบการขยายตัวของรอยร้าวมีค่า R = Kmin /Kmax คงที่เป็นการแสดงผลระหว่างอัตราการขยายตัวของรอยร้าว da/dN กับช่วงความเค้นหนาแน่น ΔK (Stress Intensity Factor Range) ในโลหะทั่วไป เส้นโค้ง มี 3 ช่วง คือ

ระยะที่ 1

$\Delta K = \Delta K_{th}$ (ΔK threshold)

ช่วงความเค้นหนาแน่นต่ำไม่เกิดการขยายตัวของรอยร้าว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระยะที่ 2 ความสัมพันธ์อยู่ในรูปยกกำลัง

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \qquad \text{.....(2.12)}$$

ระยะที่ 3 ช่วงสุดท้ายเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1 - R)(Kc - \Delta K)} \qquad \text{.....(2.13)}$$

C, n = ค่าคงที่ของวัสดุ

Kc = ความเหนียว (Toughness) ของโลหะบริเวณรอยแตก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย