

บทที่ 2 ทฤษฎี

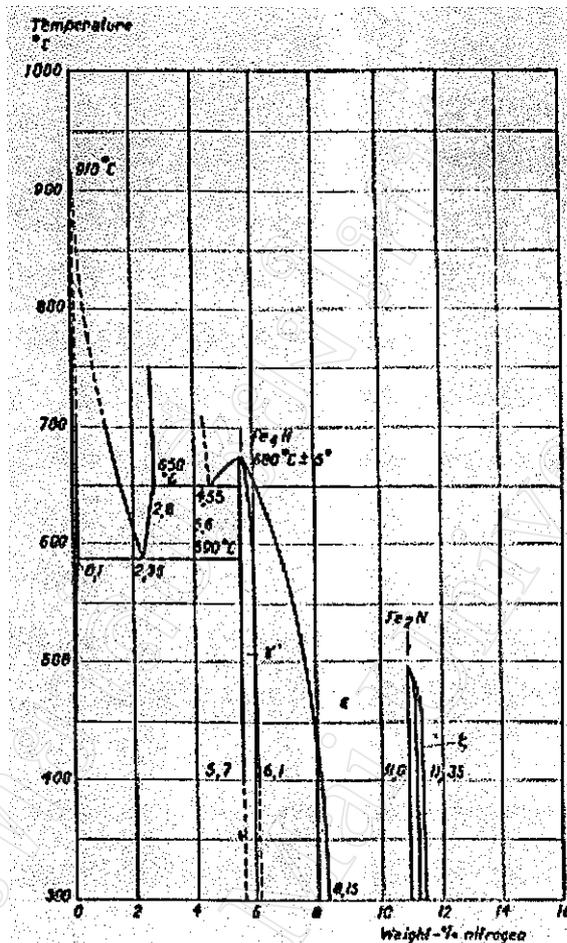
2.1 การไนไตรด์ (Nitriding)⁽³⁾

เป็นกระบวนการทางความร้อนเชิงเคมีที่จะทำให้อะตอมของไนโตรเจนเข้าไปในเฟสเฟอร์ไรต์ในช่วงอุณหภูมิ 500 – 590°C และไม่มีการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการเย็นตัวลงมายังอุณหภูมิห้อง วิธีการนี้ถูกใช้ครั้งแรกในช่วงปลายทศวรรษที่ 20 (1920s) และใช้กันอย่างแพร่หลายในเวลาต่อมา วิธีการในการไนไตรด์ได้ถูกพัฒนามาเป็นลำดับและสามารถประยุกต์ใช้กับเหล็กกล้า (steels) ได้หลายชนิด

สมบัติของเหล็กกล้าหลังการทำไนไตรด์สรุปได้ดังนี้

- 1) มีความแข็งแรงสูงและทนทานต่อการสึกกร่อน (wear) และลดการเกาะเกาะของผิว
- 2) สมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อผ่านการอบ (tempering) และมีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง
- 3) ทนทานต่อความล้าได้สูงและมีความไวต่อรอยบากต่ำ (low notch sensitivity)
- 4) เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนให้กับเหล็กกล้าประเภทที่ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)
- 5) มีความคงทนของรูปทรงสูง

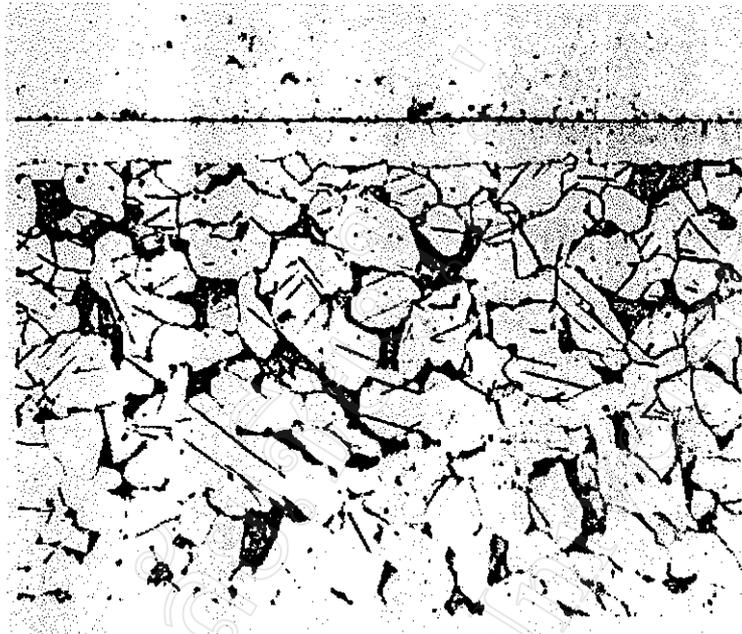
กระบวนการไนไตรด์สามารถศึกษาได้โดยใช้แผนภาพความสมดุลของเหล็กและไนโตรเจน (iron – nitrogen equilibrium diagram) ซึ่งแสดงไว้ในรูป 2.1



รูป 2.1 แผนภาพความสมดุลของเหล็กและไนโตรเจน

ณ อุณหภูมิที่ทำการไนไตรต์ ไนโตรเจนจะสามารถละลายในเหล็กได้เพียง 0.1% ถ้าความเข้มข้นมากกว่านี้ก็จะเกิดเฟส γ' (Fe_4N) ขึ้น ถ้ามีความเข้มข้นของไนโตรเจนมากกว่า 6% เฟส γ' จะเปลี่ยนไปเป็น เฟส ϵ (Fe_{23}N) และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C จะเกิดเฟส ξ (Fe_2N) ขึ้น ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนอยู่ประมาณ 11%

เมื่อทำการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ทางโลหะ (metallurgical microscope) เฟส γ' และเฟส ϵ จะปรากฏเป็นชั้นสีขาวอยู่ที่ผิว เรียกว่าชั้นสีขาว (white layer) ดังแสดงในรูป 2.2



รูป 2.2 ชั้นสีขาวและชั้นการแพร่ (diffusion layer) ที่มีตะกอนของเหล็กไนไตรด์ในเหล็กกล้าคาร์บอน 0.15% หลังจากผ่านการไนไตรด์โดยใช้แก๊สเป็นเวลา 10 ชม. ที่ 500°C (กำลังขยาย 500 เท่า)

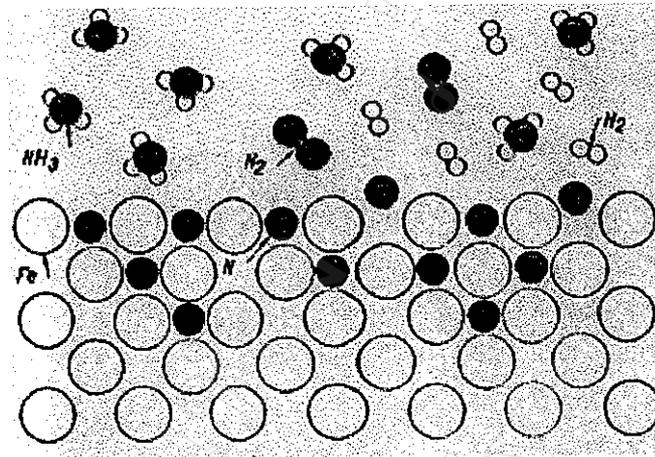
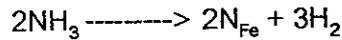
ในระหว่างการไนไตรด์ความหนาของชั้นสีขาวจะเพิ่มขึ้น พร้อม ๆ กับการแพร่ของไนโตรเจนเข้าไปในเนื้อเหล็กกล้าได้มากขึ้น และเมื่อการละลายของไนโตรเจนอยู่ในระดับที่อิ่มตัว สารประกอบไนไตรด์ก็จะเกิดการตกตะกอนที่บริเวณขอบเกรนและตามระนาบทางผลึกต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเหล็กกล้าทุกชนิดสามารถทำการไนไตรด์ได้

2.1.1 วิธีการไนไตรด์

1. การไนไตรด์โดยใช้แก๊ส (Gas Nitriding)

เป็นการให้ไนโตรเจนแก่ชิ้นงานโดยใช้แก๊สที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ ซึ่งได้แก่ แก๊สแอมโมเนีย แก๊สแอมโมเนียกับไนโตรเจนหรือไฮโดรเจน และแก๊สแอมโมเนียกับไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะขอล่าถึงเฉพาะการไนไตรด์โดยใช้แก๊สแอมโมเนียเนื่องจากเป็นแก๊สที่ใช้ในการทดลอง

แอมโมเนียจะถูกผ่านเข้าไปในบริเวณที่จะทำการไนไตรด์ แอมโมเนียจะแตกตัวให้ไนโตรเจนในรูปของอะตอมและจะถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อเหล็กดังในรูป 2.3



รูป 2.3 การแตกตัวของแอมโมเนียในเหล็กกล้าในระหว่างการไนไตรต์โดยใช้แก๊ส

โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิในการไนไตรต์จะประมาณ 510°C ขึ้นไป และใช้เวลาประมาณ 12-120 ชม. ขึ้นกับอุณหภูมิในการไนไตรต์ ชนิดของเหล็กกล้า และการนำไปใช้งาน

2. การไนไตรต์ในอ่างเกลือ (Salt-bath Nitriding)

เป็นวิธีการไนไตรต์โดยใช้เกลือเหลวเป็นสารให้นไตรเจน โดยเกลือนั้นประกอบด้วย NaCN 60-70%โดยน้ำหนัก และ KCN 30-40%โดยน้ำหนัก นอกจากนี้อาจมีคาร์โบเนต (Na_2CO_3) และ โซเดียมไนเตรต (NaNO_2) 2-3%โดยน้ำหนัก ก่อนทำการไนไตรต์ต้องทำการบ่มเกลือที่ 575°C เป็นเวลา 12 ชม. เพื่อให้โซเดียมไนเตรตเพิ่มขึ้นถึงระดับที่ต้องการคือประมาณ 45% โดยทั่วไปแล้วจะใช้ อุณหภูมิในการไนไตรต์ $550-570^{\circ}\text{C}$ และใช้เวลาในการไนไตรต์ 1-4 ชม.

3. การไนไตรต์แบบผง (Powder Nitriding)

เป็นวิธีการไนไตรต์โดยใช้ผงที่เป็นสารประกอบของไนโตรเจนเป็นตัวให้นไตรเจนแก่ชิ้นงาน วิธีการคือจะใส่สารกระตุ้นพลังงาน (energizer) ลงไปที่ก้นภาชนะประมาณ 15%โดยน้ำหนัก แล้วจึงใส่ผงไนไตรต์ลงไปปูทับสารกระตุ้นพลังงาน จากนั้นจึงใส่ชิ้นงานลงไปโดยไม่ให้ชิ้นงานสัมผัสกับสารกระตุ้นพลังงานแล้วจึงใส่ผงไนไตรต์ทับอีกชั้นหนึ่ง ถ้าชิ้นงานมีหลายชิ้นให้ใส่ผงไนไตรต์สลับกับชิ้นงานเป็นชั้น ๆ ไป จากนั้นเปิดภาชนะให้แน่นที่สุดแล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ $520-570^{\circ}\text{C}$ และใช้เวลาไม่เกิน 12 ชั่วโมง

4. การไนไตรต์โดยใช้พลาสมา (Plasma Nitriding)

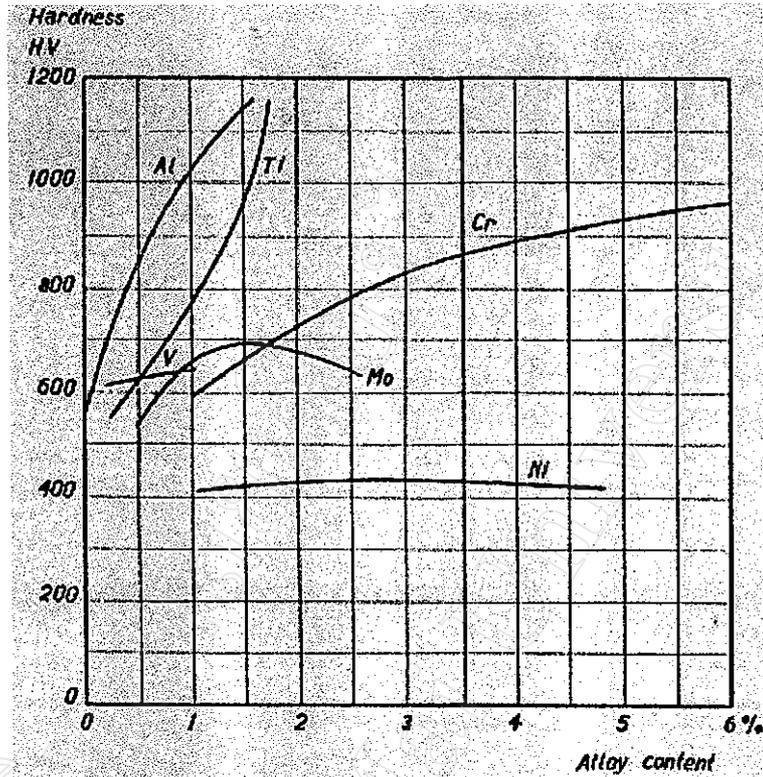
เรียกอีกอย่างว่าการไนไตรต์โดยใช้ไอออน (Ionitriding) วิธีการนี้ได้ถูกค้นพบโดย Berghaus ในช่วงต้นทศวรรษที่ 30 (1930s) แต่ไม่เป็นที่นิยมนักเนื่องจากในสมัยนั้นอุปกรณ์มีราคาแพงและเทคโนโลยีต่าง ๆ ก็ไม่เขื่อง่าย แต่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคนิคและเทคโนโลยีต่าง ๆ มากขึ้น ทำให้ในปัจจุบันการไนไตรต์โดยใช้พลาสมาจึงได้รับความสนใจจากภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากให้สมบัติของพื้นผิวดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการไนไตรต์ชนิดอื่นและยังมีความประหยัดและให้การแพร่ของไนโตรเจนที่เร็วกว่าโดยใช้อุณหภูมิการไนไตรต์ที่ต่ำกว่าหรือใช้เวลาน้อยกว่า⁽⁴⁾

วิธีการ จะใช้แก๊สแอมโมเนียเฉื่อยหรือแก๊สผสมระหว่างไฮโดรเจนกับไนโตรเจน แล้วใช้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงทำให้แก๊สที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบนั้นเกิดการแตกตัวและให้ไนโตรเจนไอออน (N^+) และอิเล็กตรอน แล้วไนโตรเจนไอออนจะถูกดึงดูดเข้าสู่ชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าลบ และอิเล็กตรอน จะถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวนิ่งเตาซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าบวก โดยใช้เวลาในการไนไตรต์ประมาณ 1-5 ชม.

2.1.2 ความสามารถในการไนไตรต์ (Nitridability)

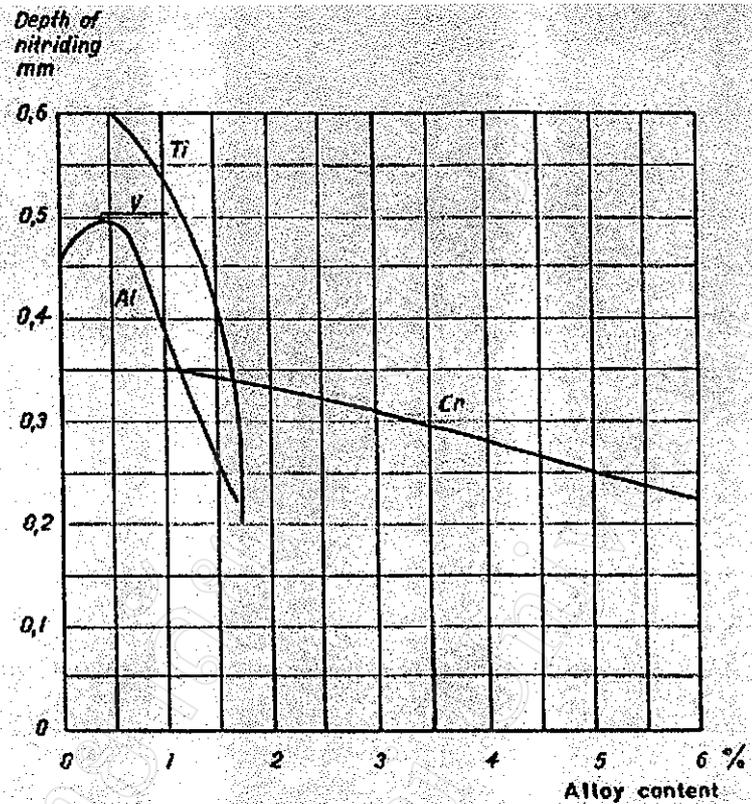
สามารถมองได้สองแง่คือหมายถึงความสามารถในการดูดซึมไนโตรเจนของเหล็กกล้า หรืออีกแง่หนึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของความแข็งที่เกิดจากไนโตรเจน

- ผลของธาตุผสม (alloying elements) สามารถพิจารณาได้จากรูป 2.4



รูป 2.4 ผลของธาตุผสมที่มีต่อความแข็งหลังจากการไนไตรต์ในเหล็กกล้าผสม (alloy) 0.35%C
0.30%Si 0.70%Mn

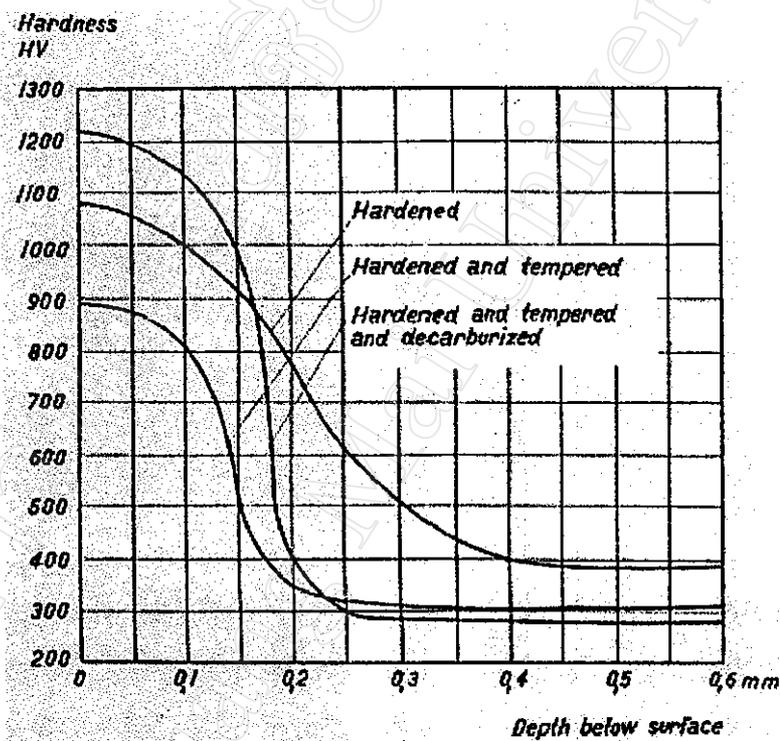
จากรูปจะเห็นได้ว่า Al จะเกิดเป็นไนไตรต์ที่มีความแข็งที่สุด รองลงมาคือ Ti, Cr, Mo และ V ซึ่งเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมเจือปนอยู่หลายชนิดจะให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมอยู่เพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง นอกจากนี้ความลึกของชั้นไนไตรต์จะลดลงเมื่อมีปริมาณธาตุผสมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 2.5



รูป 2.5 ผลของธาตุผสมที่มีต่อความลึกของชั้นไนไตรต์ในเหล็กกล้าผสมชนิดหนึ่งที่ผ่านการไนไตรต์เป็นเวลา 8 ชม. ที่ 520°C

Al และ Ti ซึ่งมีผลมากที่สุดต่อการเพิ่มความแข็งนั้นก็จะมีผลต่อการชะลอการแพร่ของไนโตรเจนมากที่สุดเช่นกัน ระดับส่วนผสมที่ให้ค่าความแข็งและความลึกของการไนไตรต์สูงที่สุดคือที่ 1%Al ซึ่งก็เป็นระดับส่วนผสมที่ใช้ในเหล็กกล้าผสมอลูมิเนียมไนไตรต์ (Al-alloyed nitriding steels) เหตุที่ธาตุผสมเหล่านี้ไปชะลอการแพร่ของไนโตรเจนก็เนื่องจากว่ามันจะไปรวมตัวกับไนโตรเจนเกิดเป็นสารประกอบไนไตรต์

โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ก็มีผลต่อความสามารถในการไนไตรต์เช่นกัน โดยเฟสเฟอร์ไรต์ (ferrite) จะทำให้การแพร่ของไนโตรเจนเป็นไปโดยง่าย ส่วนการที่มีคาร์ไบด์เจือปนอยู่น้อยในโครงสร้าง จะทำให้เกิดผลดีต่อการแพร่ของไนโตรเจนและความแข็ง จากการทดสอบพบว่าความสามารถในการไนไตรต์ของเหล็กกล้าหลังจากชุบแข็ง (hardening) และเหล็กกล้าหลังจากชุบแข็งและอบและกำจัดคาร์บอน (hardening and tempering and decarburizing) จะดีกว่าเหล็กกล้าหลังจากชุบแข็งและอบ (hardening and tempering) ดังแสดงในรูป 2.6



รูป 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งที่ผิวและความลึกของการไนไตรต์ในโครงสร้างจุลภาคของ En 29 B หลังจากการไนไตรต์โดยใช้พลาสมาเป็นเวลา 8 ชม. ที่ 520°C

ผลของเวลาในการไนไตรต์ (nitriding time) ที่มีต่อความลึกของการไนไตรต์สำหรับเหล็กกล้าผสมต่ำ (low-alloy steels) จะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

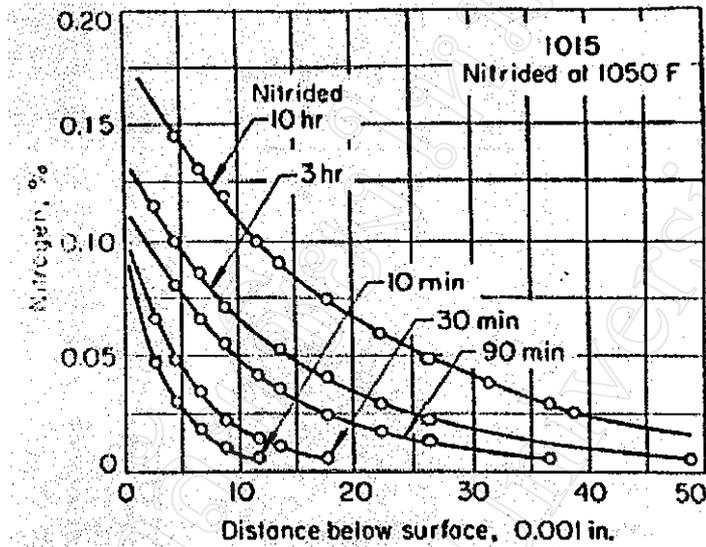
$$D_n = k t^{1/2} \quad \text{---(2.1)}$$

เมื่อ D_n คือความลึกของการไนไตรต์

k คือค่าคงที่ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและชนิดวัสดุ

t คือเวลา (ชม.)

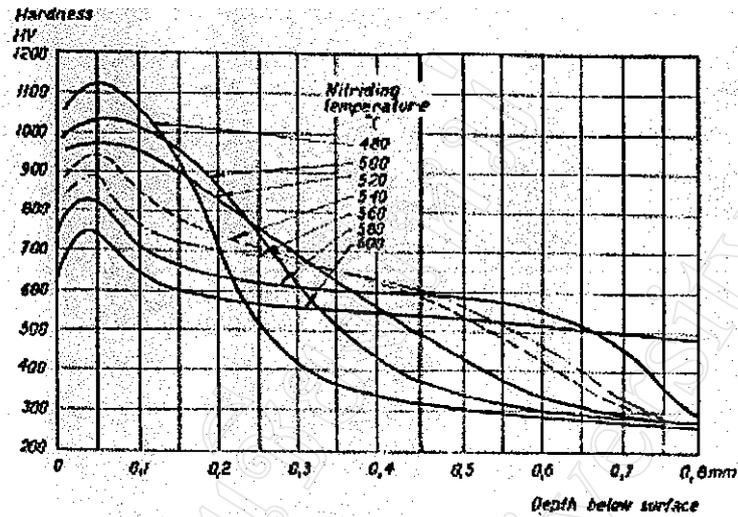
เมื่อทำการศึกษาปริมาณไนโตรเจนที่ระดับความลึกต่าง ๆ ภายใตผิวหลังจากกระบวนการไนไตรต์ในอ่างเกลือของเหล็กกล้าคาร์บอน 0.15% C ผลที่ได้แสดงไว้ในรูป 2.7



รูป 2.7 การผันแปรของปริมาณไนโตรเจนกับระยะทาง (nitrogen gradients) ของเหล็กกล้า 1015 ที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาในการไนไตรต์ที่อุณหภูมิ 1050° ฟ (566° ซ)

ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องของสมการดังกล่าวได้เป็นอย่างดีเมื่อให้ปริมาณไนโตรเจนที่เจอบนมีค่างที่

ผลของอุณหภูมิในการไนไตรต์ (nitriding temperature) ที่มีต่อการไนไตรต์คือยิ่งอุณหภูมิในการไนไตรต์ต่ำก็ยิ่งทำให้ความแข็งที่ผิวสูง แต่ในขณะเดียวกันก็จะทำให้ระดับความลึกในการไนไตรต์น้อยด้วย ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีของเหล็กกล้าผสมต่ำดังแสดงในรูป 2.8



รูป 2.8 ผลของอุณหภูมิในการไนไตรต์ที่มีต่อความแข็งและความลึกของการไนไตรต์ของ BS 905M39, En 41 B (Bofers ARO 75) ที่ไนไตรต์เป็นเวลา 60 ชม.

แอกทิวิตีของไนโตรเจน (nitrogen activity) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการไนไตรต์ ในกรณีการไนไตรต์โดยใช้แก๊ส แอกทิวิตีของไนโตรเจนจะถูกควบคุมโดยระดับการแตกตัว (dissociation) และอัตราการไหลของแก๊ส ซึ่งจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$A_N = av \quad \text{---(2.2)}$$

เมื่อ A_N คือ แอกทิวิตีของอะตอมไนโตรเจน

- a คือ ระดับของการแตกตัว
- v คือ อัตราการไหล

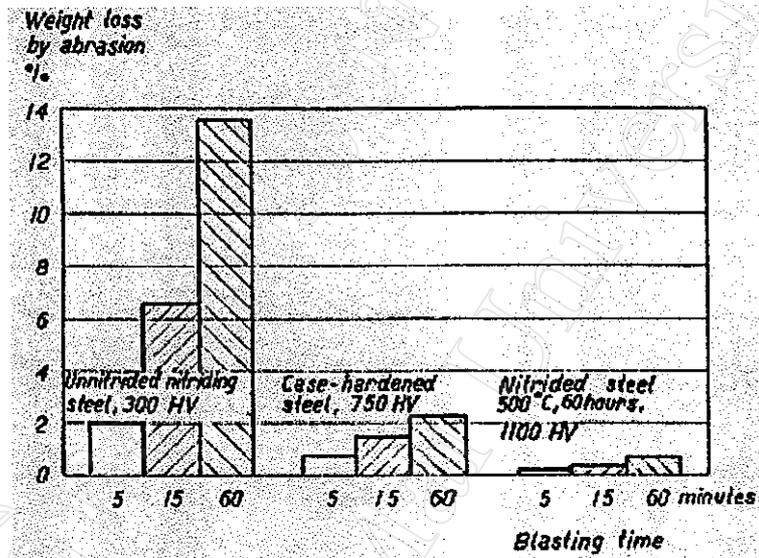
แอกทิวิตีของไนโตรเจนเป็นฟังก์ชันของจำนวนโมเลกุลแอมโมเนียที่แตกตัวที่ผิวเหล็กกล้าต่อหน่วยเวลา ที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ใด ๆ ระดับการแตกตัวจะลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น หรือค่า av เพิ่มขึ้น ดังนั้นในทางปฏิบัติปริมาณของไนโตรเจนสามารถตรวจสอบได้จากค่าเฉลี่ยของระดับการแตกตัวและจะถูกควบคุมโดยอัตราการไหล

แอกทิวิตีของไนโตรเจนที่สูงเนื่องจากอัตราการไหลที่สูงจะทำให้ระดับการแตกตัวต่ำ และแอกทิวิตีของไนโตรเจนที่ต่ำเนื่องจากอัตราการไหลที่ต่ำจะทำให้ระดับการแตกตัวสูง ถ้าอัตราการไหลต่ำมากจะทำให้การไนไตรต์ไม่สม่ำเสมอ คือจะให้ผลที่แตกต่างกันในตำแหน่งที่แตกต่างกัน และระดับการแตกตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงและควบคุมอัตราการไหลของแก๊สให้สูงจะทำให้การแตกตัวอยู่ในระดับที่คงที่

2.1.3 สมบัติของเหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์

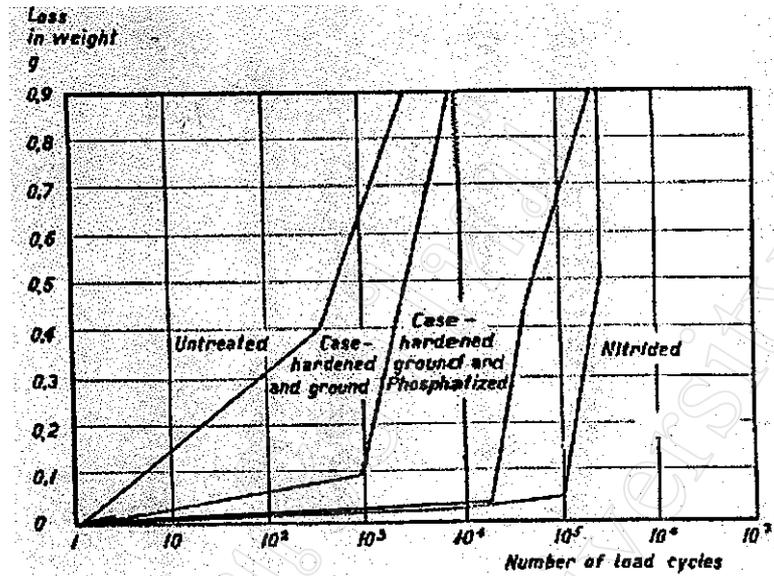
1. ความต้านทานต่อการสึกกร่อน (Wear Resistance)

ความต้านทานต่อการสึกกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความแข็งเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีของการสึกกร่อนแบบขัดสี (abrasive wear) การไนไตรต์จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกกร่อนได้ ดังแสดงในรูป 2.9



รูป 2.9 น้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากการขัดสีกับผงเหล็กกล้าของเหล็กกล้าที่ไม่ได้ทำการไนไตรต์, เหล็กกล้าชุบแข็ง และเหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์ ตามลำดับ

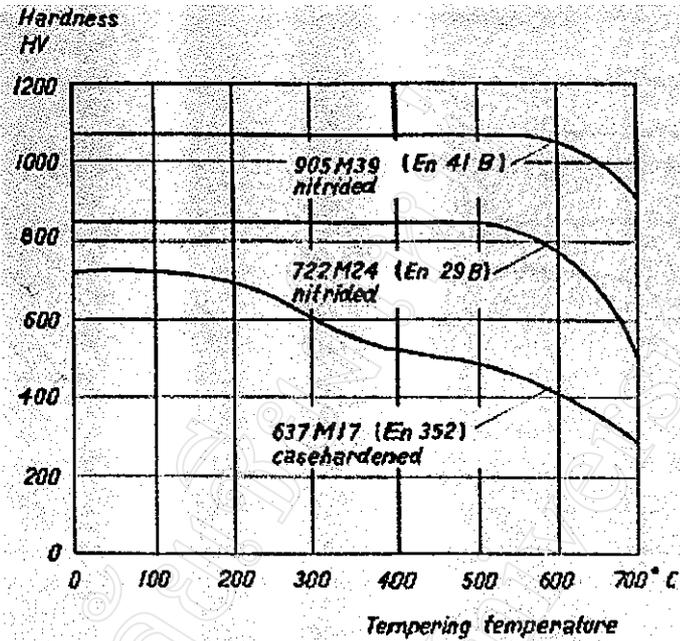
จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์จะเกิดการสึกกร่อนน้อยที่สุด ส่วนในกรณีของการสึกกร่อนแบบเกาะติด (adhesive wear) นั้นเหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์จะมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนได้ดีเนื่องจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient of friction) จะลดลงและเกิดการถลอกน้อยลงด้วย และจากการทดลองโดยใช้จานเหล็กกล้าคาร์บอน 0.15% หมุนเสียดสีกับจานวัสดุประเภทต่าง ๆ ด้วยความเร็ว 440 และ 400 รอบต่อนาทีตามลำดับดังแสดงในรูป 2.10 ปรากฏว่าเหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์จะมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนดีที่สุด



รูป 2.10 น้ำหนักที่สูญหายไปเนื่องจากการเสียดสีกับจานเหล็กกล้าคาร์บอน 0.15% ของเหล็กกล้าที่ไม่ได้ทำการไนไตรต์, เหล็กกล้าชุบแข็งแล้วขัดผิว, เหล็กกล้าชุบแข็งแล้วขัดผิวแล้วผ่านกระบวนการฟอสเฟตไตซ์ (Phosphatized) และเหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์ ตามลำดับ โดยใช้น้ำหนักถ่วง 20 กิโลปอนด์

2. ความต้านทานต่อการอบและความแข็งที่อุณหภูมิสูง (Resistance to Tempering and Hardness at Elevated Temperature)

หลังผ่านการไนไตรต์เหล็กกล้าจะสามารถทนความร้อนได้ถึงอุณหภูมิที่ทำการไนไตรต์และอาจสูงกว่านี้ในบางกรณีโดยที่ความแข็งไม่แตกต่างไปจากขณะที่อยู่ที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูป 2.11

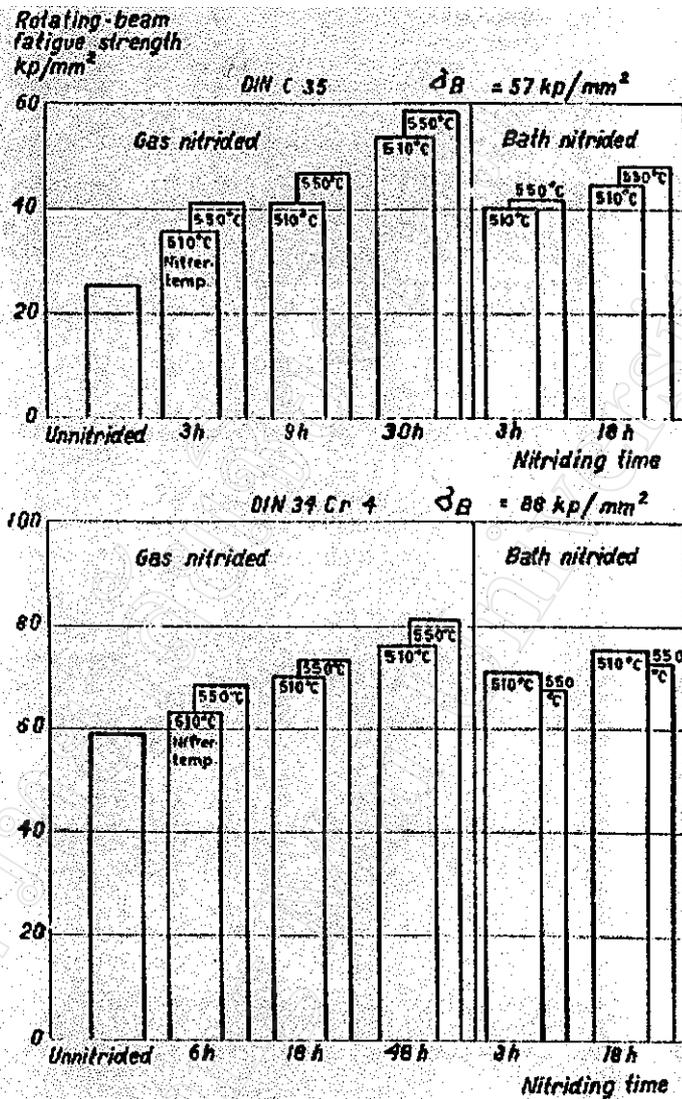


รูป 2.11 แผนภาพการอบของเหล็กกล้าชุบแข็งและเหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์

เนื่องจากมีสมบัติต้านทานการสึกกร่อนที่ดีเยี่ยมและมีความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูงนี้จึงทำให้เหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์เหมาะที่จะนำไปทำแม่พิมพ์ร้อน (hot-work dies) ได้เป็นอย่างดี

3. ความต้านทานความล้า (Fatigue Strength)

ลักษณะเฉพาะอีกประการหนึ่งของเหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์ก็คือมีความต้านทานความล้าสูงและมีความไวต่อรอยบาก (Notch sensitivity) ต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนเรียบ (plain-carbon steel) และเหล็กกล้าผสมต่ำ (low-alloy steel) หลังจากผ่านการไนไตรต์แล้วจะมีความต้านทานความล้าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ทำการไนไตรต์ด้วย ดังแสดงในรูป 2.12

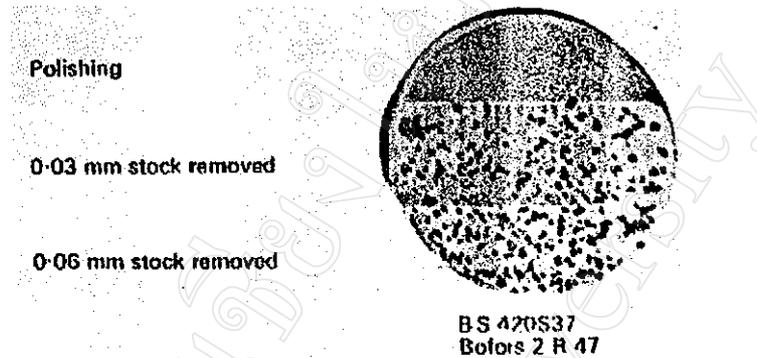


รูป 2.12 การเพิ่มขึ้นของความล้าของตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.9 มม. ซึ่งเป็นเหล็กกล้าชุบแข็งและผ่านการอบแล้วทำการไนไตรต์ด้วยวิธีไนไตรต์โดยใช้แก๊สและไนไตรต์ในอ่างเกลือ

4. ความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

หลังจากผ่านการไนไตรต์แล้วความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไม่ไร้สนิม (non-stainless steels) จะเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นความต้านทานต่อการกัดกร่อนจะลดลงเนื่องจากโครเมียมจะไปเกิดเป็นสารประกอบไนไตรต์ นอกจากนี้การที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในระหว่างการไนไตรต์ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนภายในได้ในเหล็กกล้า 18/8 ที่ไม่ได้เพิ่มเสถียรภาพ (non-stabilized 18/8 steels) ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ผ่านการไนไตรต์แล้ว

ทำการขัดผิวแบบละเอียด (polishing) จะดีที่สุด ถ้าทำการขัดผิวแบบหยาบ (grinding) ในระดับ 0.03 มม. ชั้นไนไตรด์ก็จะหลุดออกไปและส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง ดังแสดงในรูป 2.13



รูป 2.13 การทดสอบการกัดกร่อนเป็นเวลา 16 ชม. โดยใช้สเปรย์น้ำเกลือความเข้มข้น 5% เป็นเวลา 2x30 นาที โดยตัวอย่างทดสอบเป็นเหล็กกล้า BS420S37 Bofors 2 R 47 ที่ผ่านการไนไตรด์โดยใช้แก๊สเป็นเวลา 60 ชม. ที่ 510°C

2.2 ความแข็ง (Hardness)⁽⁵⁾

คือความต้านทานต่อการเสียรูป (plastic deformation) ของวัสดุ หรือความต้านทานต่อการเกิดรอยกด

เทคนิคในการวัดความแข็ง

1. การทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test)

เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดในการวัดความแข็งเพราะไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน หรือต้องใช้ความชำนาญเป็นพิเศษ สามารถวัดความแข็งของวัสดุได้ตั้งแต่แข็งมากจนถึงอ่อนมากโดยการปรับเปลี่ยนหัวกดและน้ำหนักถ่วง หัวกดจะมีทั้งแบบเหล็กกล้าทรงกลมชุบแข็ง (hardened steel ball) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.58, 3.175, 6.350 และ 12.70 มม. และแบบเพชรรูปกรวย (brake) ที่จะใช้กับวัสดุที่แข็งมาก ๆ ค่าความแข็งจะหาได้จากความแตกต่างของระดับความลึกของรอยกดที่เกิดจากน้ำหนักถ่วงรอง (minor loads) และน้ำหนักถ่วงหลัก (major load) โดยสามารถแบ่งการทดสอบออกได้เป็นสองประเภทตามขนาดของน้ำหนักถ่วงดังนี้คือ ร็อคเวลล์ (Rockwell) และร็อคเวลล์พื้นผิว

(superficial Rockwell) โดยรีดเวลล์นั้นจะใช้น้ำหนักถ่วงรอง 10 กก. ใช้น้ำหนักถ่วงหลัก 60, 100 หรือ 150 กก. ลักษณะของหัวกดและน้ำหนักถ่วงที่ใช้ในแต่ละระดับความแข็ง (scale) แสดงไว้ในตาราง 2.1 และ 2.2 ส่วนกรณีรีดเวลล์พื้นผิวนั้นโดยทั่วไปจะใช้กับตัวอย่างวัสดุบาง ๆ โดยใช้น้ำหนักถ่วงรอง 3 กก. ใช้น้ำหนักถ่วงหลัก 15, 30 หรือ 45 กก. ลักษณะของหัวกดและน้ำหนักถ่วงในแต่ละระดับความแข็งแสดงไว้ในตาราง 2.3

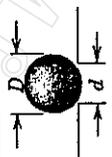
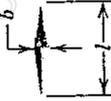
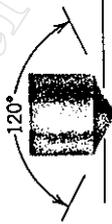
ตาราง 2.1 ระดับความแข็งรีดเวลล์ (Rockwell hardness scales)

ระดับความแข็ง	หัวกด	น้ำหนักถ่วงหลัก (กก.)
A	เพชร	60
B	บอล 1.58 มม.	100
C	เพชร	150
D	เพชร	100
E	บอล 3.175 มม.	100
F	บอล 1.58 มม.	60
G	บอล 1.58 มม.	150
H	บอล 3.175 มม.	60
K	บอล 3.175 มม.	150

ตาราง 2.2 ระดับความแข็งรีดเวลล์พื้นผิว (Superficial Rockwell hardness scales)

ระดับความแข็ง	หัวกด	น้ำหนักถ่วงหลัก (กก.)
15N	เพชร	15
30N	เพชร	30
45N	เพชร	45
15T	บอล 1.58 มม.	15
30T	บอล 1.58 มม.	30
45T	บอล 1.58 มม.	45
15W	บอล 3.175 มม.	15
30W	บอล 3.175 มม.	30
45W	บอล 3.175 มม.	45

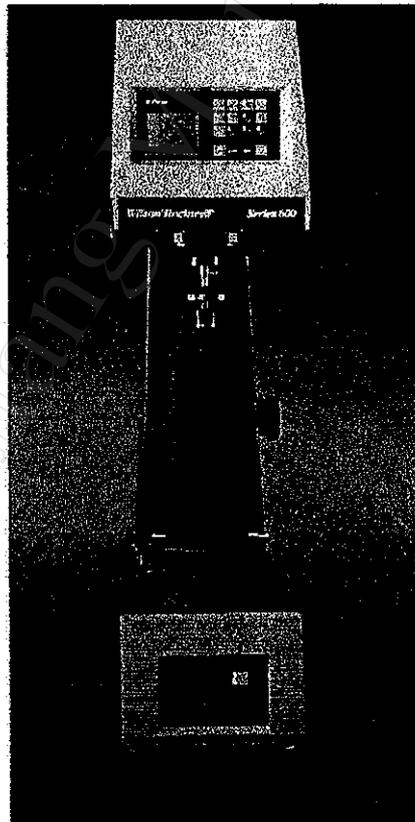
ตาราง 2.3 เทคนิคในการวัดความแข็ง

Test	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
	Indenter	Side View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P $HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P $HV = 1.854P/d^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P $HK = 14.2P/d^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	Diamond cone 1/8, 1/4, 1/2 in. diameter steel spheres		 	P Rockwell 60 kg 100 kg 150 kg Superficial Rockwell 15 kg 30 kg 45 kg

^a For the hardness formulas given, P (the applied load) is in kg, while D , d , d_1 , and l are all in mm.

การระบุค่าความแข็งร็อคเวลล์จะใช้สัญลักษณ์ HR ตามด้วยระดับความแข็ง เช่น 80 HRB จะหมายถึงค่าความแข็งร็อคเวลล์เท่ากับ 80 ในระดับความแข็ง B หรือ 60 HR 30W จะหมายถึงค่าความแข็งร็อคเวลล์พื้นผิวเท่ากับ 60 ในระดับความแข็ง 30W ซึ่งในแต่ละระดับความแข็งควรมีค่าความแข็งไม่เกิน 100 และไม่ต่ำกว่า 20 จึงจะให้ค่าที่ถูกต้อง นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนยังอาจเกิดได้จากการที่ตัวอย่างวัสดุบางเกินไปหรือทำการกดที่บริเวณใกล้ขอบหรือรอยกดสองรอยอยู่ใกล้กันมากเกินไป ความหนาของตัวอย่างวัสดุควรมากกว่าความลึกของรอยกด 10 เท่าเป็นอย่างน้อย และระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกดควรห่างจากขอบตัวอย่างวัสดุหรือจุดศูนย์กลางรอยกดอื่นเป็นสามเท่าของระยะเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกด นอกจากนี้ฐานวางตัวอย่างวัสดุจะต้องมั่นคงและมีตัวอย่างวัสดุต้องเรียบด้วย

เครื่องมือวัดความแข็งร็อคเวลล์ในปัจจุบัน (modern Rockwell hardness tester) เป็นแบบอัตโนมัติและใช้ง่าย สามารถอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงและใช้เวลาเพียง 2-3 วินาทีต่อชิ้น นอกจากนี้ยังสามารถตั้งเวลาและนำหน้กถ่วงได้อีกด้วย ดังแสดงในรูป 2.14



รูป 2.14 เครื่องมือวัดความแข็งร็อคเวลล์ในปัจจุบัน (modern Rockwell hardness tester)

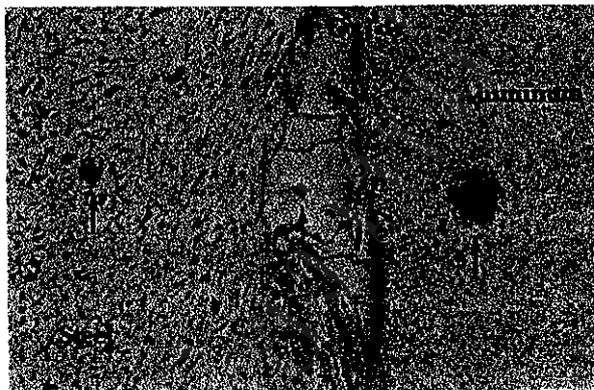
2. การทดสอบความแข็งบรินเนลล์ (Brinell hardness test)

จะใช้หัวกดทรงกลมแข็งซึ่งเป็นเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) กดลงไปบนผิววัสดุ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.00 มม. น้ำหนักถ่วงมาตรฐานจะอยู่ในช่วง 500-3000 กก. โดยจะเพิ่มขึ้นทีละ 500 กก. โดยในการทดสอบจะถ่วงน้ำหนักที่เวลาคงที่ระหว่าง 10-30 วินาที วัสดุที่แข็งมากขึ้นจะใช้น้ำหนักถ่วงมากขึ้น ค่าความแข็งบรินเนลล์จะใช้สัญลักษณ์ HB ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดของน้ำหนักถ่วงและเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกดดังแสดงในตาราง 2.3 โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกดนี้วัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (low power microscope) ซึ่งมีสเกลอยู่บนเลนส์ตา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกดจะถูกแปลงไปเป็นค่าความแข็งบรินเนลล์โดยใช้สูตรในตาราง 2.3 การควบคุมความหนาของตัวอย่างวัสดุ ตำแหน่งรอยกด ระยะห่างระหว่างรอยกด ลักษณะผิว และการจัดวางนั้น จะใช้หลักการเดียวกันกับการวัดค่าความแข็งร็อคเวลล์

3. การทดสอบความแข็งจุลภาคนूपและวิกเกอร์ (Knoop and Vickers microhardness test)

เทคนิคทั้งสองเป็นเทคนิคการวัดความแข็งแบบจุลภาค (microhardness testing) มีลักษณะคล้ายกันคือจะใช้หัวกดเพชรรูปทรงปิรามิดกดลงบนผิวตัวอย่างวัสดุ โดยที่การวัดความแข็งนूपจะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ส่วนการวัดความแข็งวิกเกอร์จะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส น้ำหนักถ่วงที่ใช้จะน้อยกว่าร็อคเวลล์และบรินเนลล์ โดยจะอยู่ในช่วง 1-1000 กก. การวัดรอยกดทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (microscope) แล้วแปลงเป็นค่าความแข็งโดยใช้สูตรในตาราง 2.3

การเตรียมผิวตัวอย่างวัสดุ (การขัดหยาบและขัดละเอียด) ที่ดีจะทำให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้อง สัญลักษณ์ความแข็งนूपและวิกเกอร์จะเป็น HK และ HV ตามลำดับ และระดับความแข็ง (scale) ของเทคนิคทั้งสองนั้นจะเท่ากันโดยประมาณ เมื่อพิจารณาจากขนาดของน้ำหนักถ่วงและหัวกดแล้ว เทคนิคทั้งสองสามารถวัดความแข็งในบริเวณเล็ก ๆ ได้ จึงสามารถใช้วิเคราะห์ความแข็งของเฟสต่าง ๆ ของวัสดุได้⁽⁶⁾ ดังแสดงในรูป 2.15



รูป 2.15 รอยกดในการวัดความแข็งจุดภาคของบริเวณรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมกับเหล็กกล้า

2.3 การสึกกร่อน (Wear)⁽⁷⁾

คือ การสูญเสียมวลของวัสดุเนื่องมาจากผิวสัมผัสของวัสดุเคลื่อนที่เสียดสีกัน กลไกหลัก (main mechanism) ของการสึกกร่อนมีดังนี้

1. การสึกกร่อนเนื่องจากการหลุดติด (Adhesive wear) เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวเคลื่อนที่เสียดสีกัน แล้วมีบางส่วนหลุดออกมาจากพื้นผิวหนึ่งและติดไปกับอีกพื้นผิวหนึ่ง
2. การสึกกร่อนเนื่องจากการขัดสี (Abrasive wear) เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวที่แข็งและขรุขระเคลื่อนที่เสียดสีกับพื้นผิวที่อ่อนกว่า ทำให้บางส่วนของพื้นผิวที่อ่อนกว่าหลุดออกมา ซึ่งลักษณะนี้จะเป็นการขัดสีของวัสดุสองชิ้น (two-body abrasion) อีกลักษณะหนึ่งคืออนุภาคแข็งอยู่ระหว่างวัสดุที่อ่อนกว่าสองชิ้นซึ่งเคลื่อนที่เสียดสีกัน ลักษณะนี้จะเรียกว่าการขัดสีของวัสดุสามชิ้น (three-body abrasion)
3. การสึกกร่อนที่ก่อให้เกิดการออกซิเดชัน (Oxidation wear) คือการที่ชั้นออกไซด์บนผิวโลหะซึ่งเกิดการสึกกร่อนทั้งการหลุดติดและการขัดสี ทำให้ชั้นออกไซด์ซึ่งมีสมบัติป้องกันการออกซิเดชันและมีความเปราะถูกทำลาย ส่งผลให้อัตราการออกซิเดชันของโลหะเพิ่มขึ้น
4. การสึกกร่อนที่เกิดการกัดกร่อน (Corrosive wear) เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวที่เคลื่อนที่เสียดสีกันได้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อมและทำให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาดังกล่าวหลุดออกมา
5. การสึกกร่อนเนื่องจากความล้าของพื้นผิว (Surface fatigue wear) เกิดขึ้นในบริเวณที่วัสดุเกิดการหมุนสัมผัสกัน เช่นในแบริ่ง (bearings) หรือเกียร์ โดยผิวสัมผัสของวัสดุนั้นจะเกิด

แรงเค้น (stress) และไม่เกิดแรงเค้นสลับกันต่อเนื่องกันไป ทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้นใต้ผิว เนื่องจากความล้าดังกล่าว รอยร้าวจะขยายตัวไปในแนวขนานกับพื้นผิวทำให้วัสดุเกิดการกะเทาะหลุดออกจากพื้นผิว การสึกกร่อนลักษณะนี้วัสดุจะหลุดออกมามากกว่ากรณีอื่น โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุที่หลุดออกมาจะอยู่ในระดับ 100 นาโนเมตร ซึ่งกรณีการสึกกร่อนแบบขีดสีจะอยู่ในระดับ 3 นาโนเมตร

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University