

บทที่ 2

ทฤษฎี

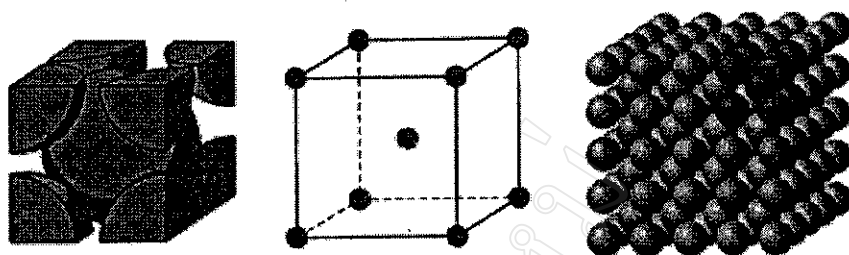
2.1 โลหะผสมไทเทเนียม (Titanium alloys)

โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์สามารถผลิตได้โดยมีสารตั้งต้นจาก TiO_2 จากนั้นจะถูกเปลี่ยนให้เป็น TiCl_4 และ จะใช้กระบวนการสกัดให้เป็นไทเทเนียมบริสุทธิ์โดยใช้ โซเดียม หรือ แมกนีเซียม เนื่องจากโลหะไทเทเนียมมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ดังนั้นกระบวนการผลิตไทเทเนียมบริสุทธิ์จึงต้องทำในสุญญากาศ

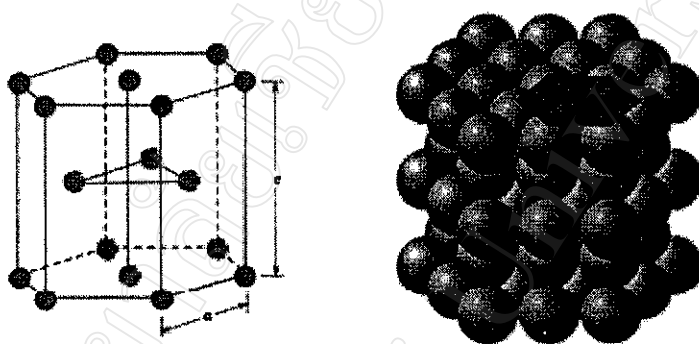
โลหะไทเทเนียมมีสมบัติที่ติดมากต่อการทนทานการกัดกร่อน มีความแข็งแรงสูง มีสมบัติที่ดี ณ ที่อุณหภูมิสูง โดยไทเทเนียมจะมีความแข็งแรงได้ถึง 1400 MN.m^{-2} ในขณะที่ความหนาแน่นมีค่า 4.50 Mg.m^{-3} จึงทำให้โลหะผสมไทเทเนียมเด่นกว่าโลหะชนิดอื่น นอกจากนี้ออกไซด์ของไทเทเนียม (TiO_2) ยังช่วยป้องกันการกัดกร่อนและสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ได้ดีมาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 535°C แต่ถ้ามากกว่านี้ ชั้นฟิล์มออกไซด์จะมีการแตกได้ ทำให้โอกาสที่จะตอมของ คาร์บอน(C), ไนโตรเจน(N) หรือไฮโดรเจน(H) เข้าทำปฏิกิริยากับไทเทเนียม ส่งผลให้คุณสมบัติต่าง ๆ จะลดลง เนื่องจากสมบัติการทนทานการกัดกร่อนที่ดี โลหะไทเทเนียมจึงนิยมนำไปใช้ทำอุปกรณ์ทางเคมี , ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่มีการสัมผัสกับน้ำทะเล หรือแม้แต่อุปกรณ์ทางการแพทย์ นอกจากนี้ อุตสาหกรรมทางการบินก็นิยมใช้โลหะไทเทเนียม ในการทำ ชิ้นส่วนยานอวกาศ, ชิ้นส่วนเครื่องยนต์เจ็ท[1-3]

เมื่อนำธาตุอื่นมาผสม เช่น ไนโอเบียม(Nb) จะทำให้เกิด intermetallic compound ที่มีการนำไฟฟ้าได้ยิ่งยวดขึ้น ถ้านำนิเกิล(Ni) มาผสม ทำให้เกิดโลหะผสมไทเทเนียม ที่สามารถจำรูป (shape – memory effect) ได้ และถ้าโลหะผสมมีอะลูมิเนียม(Al) ประกอบอยู่ จะปรับปรุงสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) เช่น ความแข็ง ของโลหะผสมดีขึ้น

โลหะไทเทเนียมมีสมบัติเป็น allotropic ที่อุณหภูมิต่ำ โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบ HCP (Hexagonal Closed Pack) หรือมีชื่อว่า อัลฟา (α) ถ้าอุณหภูมิมากกว่า 882°C โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบ BCC (Body Center Tetragonal) หรือ เบต้า (β) [2,3]



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ BCC [2]



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ HCP [2]

เมื่อมีการเติมสารต่าง ๆ ลงไป จะช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเปลี่ยนสมบัติของ allotropic (allotropic transformation temperature) แต่ถ้ามีการเติมสารตะกั่ว (Pb) หรือ เซอร์โคเนียม (Zr) ลงไป จะช่วยปรับปรุงให้โลหะผสมมีความแข็งแรงดีขึ้น และอุณหภูมิการเปลี่ยนสมบัติ allotropic จะไม่เปลี่ยน เมื่อมีการเติม อะลูมิเนียม (Al), ออกซิเจน (O), ไฮโดรเจน (H) หรือเป็นตัวเสถียร α (α -stabiliser) จะทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนจาก α เป็น β สูงขึ้น สำหรับตัวเสถียร β อย่างเช่น วานาเดียม (V), แทนทาลัม (Ta), โมลิบดีนัม (Mo) และไนโอเบียม (Nb) จะถูกเติมลงไปเพื่อ ทำให้เฟส β สามารถเสถียร ณ ที่อุณหภูมิห้องได้ โดยส่วนมาก มักจะมีการเติม แมงกานีส (Mn), โครเมียม (Cr) และเหล็ก (Fe) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) และช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเฟสคู่ คือทั้ง α และ β พร้อมกัน ที่อุณหภูมิห้องได้ โลหะผสมไทเทเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก คือ

1. โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ (Commercially Pure Titanium)

เป็นโลหะไทเทเนียมที่ไม่ได้เจือปนสารใด ๆ จุดประสงค์หลักคือ เพื่อต้องการความทนทานการกัดกร่อนที่ดีมาก อย่างไรก็ตามโอกาสที่ ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยา ก็มีสูงมาก ดังนั้นโลหะไทเทเนียมประเภทนี้ จึงมีออกซิเจน ปนอยู่บ้าง ผลก็คือ ความแข็งแรงจะสูงขึ้น แต่ความทนทานการกัดกร่อนจะลดลง การประยุกต์ใช้งานของโลหะไทเทเนียมประเภทนี้ มักจะพบในอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น ภาชนะบรรจุสารเคมี, ท่อแป๊ป, ปั๊ม, วาล์ว เป็นต้น

2. โลหะผสมไทเทเนียมแบบ α (Alpha Titanium Alloys)

โลหะผสมไทเทเนียมแบบ α นี้ เกือบทั้งหมดจะมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมประมาณ 5 % และมีดีบุก 2.5 % ซึ่งทำให้โลหะผสมไทเทเนียม มีโครงสร้างผลึกเป็น HCP ความแข็งแรงสูง จะสูงมาก วิธีการทำให้โลหะผสมไทเทเนียมเกิดเป็นเฟส α ก็คือ โลหะผสมจะถูก anneal ที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นบริเวณที่เกิด β ขึ้น จากนั้นการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จะเกิดโครงสร้างผลึกเป็นแบบ α หรือที่เราเรียกว่า 'Widmanstatten' โลหะผสมประเภทนี้จะให้การทนทานต่อการเกิด ความล้า (Fatigue) ที่ดี แต่ถ้าต้องการให้มีความทนทานต่อความคืบ (Creep) ต้องปล่อยให้เย็นตัวในเตาเผา

3. โลหะผสมไทเทเนียมแบบ β (Beta Titanium Alloys)

เมื่อมีการเติม โมลิบดีนัม หรือ วานาเดียม ลงไปจำนวนมาก โลหะผสมไทเทเนียมจะสามารถคงเฟส β ที่อุณหภูมิต่ำได้ และถ้าต้องการให้เนื้อโลหะผสมเป็นเฟส β ทั้งหมด จะต้องอาศัยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วย โลหะผสมประเภทนี้จะมีค่าความแข็งแรงสูงสุดในบรรดาโลหะผสมไทเทเนียมด้วยกัน ความแข็งแรงของโลหะผสมไทเทเนียมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณสารเจือ (ทั้ง โมลิบดีนัม และ วานาเดียม) และกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของ α ใน β การประยุกต์ใช้งานจะเน้นไปทางอุตสาหกรรมอากาศยาน โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องทนความดันหรือแรงอัดที่สูงมาก

4. โลหะผสมไทเทเนียมแบบ $\alpha - \beta$ (Alpha - Beta Titanium Alloys)

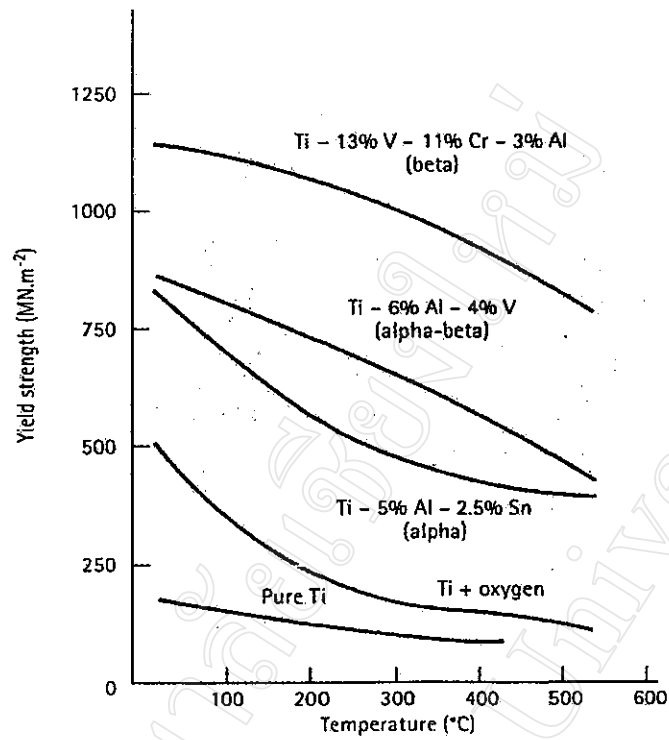
เมื่อในโลหะผสมมีทั้งสารเจือที่เป็นตัวเสถียร α และ β อยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม ก็สามารถเกิดเฟสทั้ง α และ β ได้ ณ ที่อุณหภูมิต่ำ Ti-6Al-4V เป็นตัวอย่างที่เห็นได้ชัดที่สุดของโลหะผสมประเภทนี้

การอบอ่อน (Annealing) จะช่วยปรับปรุงสมบัติ ความเหนียว (Ductility), สมบัติความเป็นเนื้อเดียวกัน (Uniform property) จะทำได้โดยจะให้ความร้อนแก่โลหะผสมโดยที่อุณหภูมิจะ

ต่ำกว่า บริเวณที่เป็น β เล็กน้อย ทำให้เฟส α เหลืออยู่เล็กน้อย จากนั้น ถ้าทำให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ พบว่า จะเกิดเกรนของ α ที่มีด้านเท่า ๆ กัน (Equiaxed grains) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ จะให้ความเหนียวที่ดีและยังป้องกันการเกิดการแตกร้าว (Crack) ได้อีกด้วย ส่วนการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว พบว่า เฟสของ α จะมีโครงสร้างแบบ acicular ซึ่งโอกาสที่การแตกร้าวต่าง ๆ จะเกิดขึ้นได้ และจะเกิดตามบริเวณรอยต่อของเฟส $\alpha - \beta$ อย่างไรก็ตามการทนทานต่อความคืบ (Creep) จะดี การประยุกต์ใช้งานก็จะเน้นไปทางอุปกรณ์ที่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดีเช่น คันเกียร์, ชิ้นส่วนเครื่องยนต์เจ็ท[3]

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของโลหะไทเทเนียมแต่ละชนิด [3]

Materials	Tensile Strength (MN.m ⁻²)	Yield Strength (MN.m ⁻²)	% Elongation
Pure Ti			
99.5%	240	170	24
99.0%	550	485	15
Alpha-Ti alloys			
5%Al-2.5Sn	860	780	15
Beta-Ti alloys			
13%V-11%Cr-3%Al	1290	1210	5
Alpha-Beta Ti alloys			
6%Al-4%V	1030	970	8



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield Strength กับ อุณหภูมิ ของโลหะไทเทเนียมแต่ละชนิด [2]

2.2 การแพร่ในของแข็ง (Diffusion in Solids) [3,5]

การแพร่คือ การที่อะตอมมีการเคลื่อนที่ภายในวัสดุ เพื่อที่จะช่วยลดความแตกต่างของความเข้มข้นอะตอม (Concentration gradient) และทำให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกัน อะตอมจะเคลื่อนที่ได้ต้องอาศัยกระบวนการที่กระทำต่อชิ้นงาน

กระบวนการแพร่จะพบเมื่อมีการนำโลหะผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment of Metals), การผลิตเซรามิก (Manufacture of ceramics), กระบวนการแข็งตัวของวัสดุ (Solidification of materials), การนำความร้อนและไฟฟ้า (Thermal and Electrical Conductivity)

ความเสถียรของอะตอม (Stability of Atoms)

เมื่อเกิดความไม่สมบูรณ์ (Imperfection) ขึ้นในผลึกเช่น เกิดช่องว่าง (Vacancy) หรือเกิดการแทรกของอะตอม (Interstitial) และความไม่สมบูรณ์นี้จะไม่เสถียร เมื่ออะตอมได้รับพลังงาน มันก็จะสามารถเคลื่อนที่หรือแพร่ได้ การแพร่ของอะตอมนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งอะตอมแพร่จากตำแหน่งปกติเดิมไปยังช่องว่าง หรือจากตำแหน่ง interstitial หนึ่ง ไปยังอีกอันหนึ่งก็ได้ นอกจากนี้การแพร่ของอะตอมยังสามารถแพร่ข้ามเกรน (Grains) ได้ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของขอบเกรน (Grain Boundary)

ความสามารถของอะตอมและความไม่สมบูรณ์ในการแพร่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ หรือพลังงานความร้อนที่ได้รับ อัตราการเคลื่อนที่ (Rate) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{rate} = c_0 \exp -\frac{Q}{RT} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าคงที่

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature) (K)

Q คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (J.mol^{-1})

ถ้าเราทำให้สมการอยู่ในรูป natural logarithms จะได้

$$\ln(\text{rate}) = \ln c_0 - \frac{Q}{RT} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

นำสมการที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\text{rate})$ และ $1/T$ ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น $-Q/R$ เราก็สามารถคำนวณค่า Q ได้

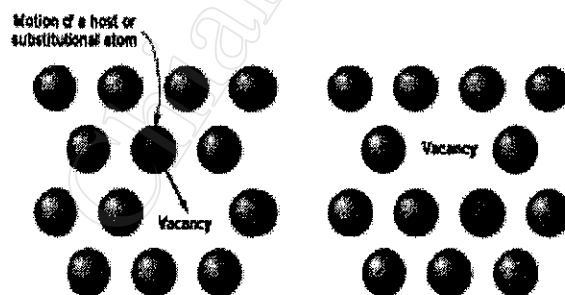
2.2.1 กลไกของการแพร่ (Diffusion Mechanism)

ในของแข็งที่มีความบริสุทธิ์ พบว่าการที่อะตอมเคลื่อนที่จาก lattice หนึ่งไปยังอีกอันหนึ่ง เราเรียกกระบวนการนี้ว่า Self – Diffusion โดยสามารถสังเกตได้จากตัวอะตอมที่เราฉาบริ่งสี (Radioactive Tracers) ตัวอย่างเช่น ทองคำ ถ้าอะตอมปกติจะเป็น Au^{197} แต่ถ้าอะตอมของทองที่มีการฉาบริ่งสี จะเป็น Au^{198} แม้ว่าเราจะพบการแพร่แบบนี้ในวัสดุทุกชนิด แต่พฤติกรรมที่เกิดจากการแพร่แบบนี้ก็ไม่มีผลสำคัญมากนัก

สำหรับการแพร่ของอะตอมที่เจือปนเกิดขึ้น เช่น นำแผ่นนิเกิล กับ ทองแดงมาเชื่อมกัน พบว่าอะตอมของนิเกิลจะแพร่เข้าไปในทองแดง และในขณะเดียวกันอะตอมของทองแดง ก็แพร่เข้าไปยังนิเกิล กลไกการแพร่ของอะตอมเจือปน จะมี 2 แบบด้วยกันคือ

1. การแพร่แบบช่องว่าง หรือ แทนที่ (Vacancy Diffusion or Substitutional)

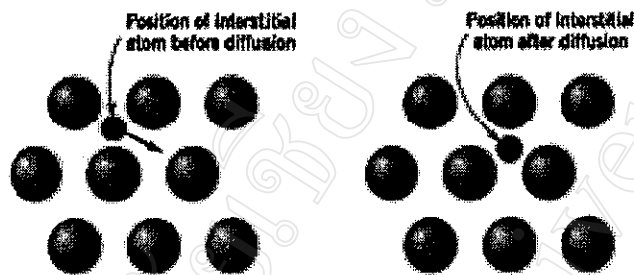
ในกลไกการแพร่แบบนี้อะตอมในวัสดุ หรือ อะตอมเจือที่แทนที่ในตำแหน่งอะตอมเดิม จะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง lattice หนึ่งไปยังตำแหน่งช่องว่างที่อยู่ใกล้เคียง (เกิดช่องว่างใหม่ ณ ตำแหน่ง lattice เดิม) และการแพร่แบบนี้จะเกิดไปอย่างต่อเนื่อง เราเรียกการแพร่แบบนี้ว่า การแพร่แบบช่องว่าง (Vacancy Diffusion) จำนวนของช่องว่างที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.4 แสดงการแพร่แบบช่องว่าง [2]

2. การแพร่แบบแทรก (Interstitial Diffusion)

การแพร่แบบแทรกมีหลักการคือ เมื่ออะตอมที่แทรกอยู่ในโครงสร้างผลึกเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่แทรก (Interstitial Site) จากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งแทรกอีกอันหนึ่ง และช่องว่างไม่จำเป็นต่อการแพร่แบบนี้ ในผลึกส่วนใหญ่จะมีอะตอมแทรกมากกว่าช่องว่าง ดังนั้น การแพร่แบบนี้จึงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการแพร่แบบช่องว่าง

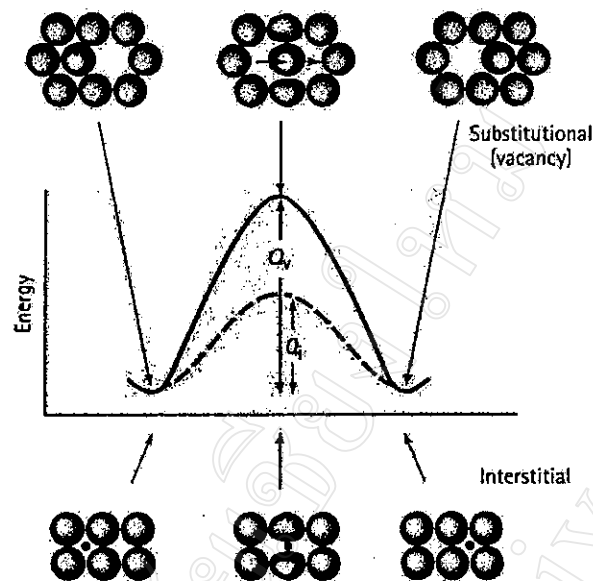


รูปที่ 2.5 แสดงการแพร่แบบแทรก [2]

2.2.2 พลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการแพร่ (Activation Energy for Diffusion)

การแพร่จะเกิดขึ้นได้เมื่อ อะตอมสามารถเคลื่อนที่ผ่านอะตอมที่ล้อมรอบอยู่ เพื่อไปยังตำแหน่งใหม่ ดังนั้นอะตอมที่จะแพร่จึงต้องมีพลังงานที่เพียงพอ

อะตอมเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งเดิมจะมีพลังงานต่ำอยู่ค่าหนึ่ง และจะเสถียร เมื่อต้องการให้อะตอมเคลื่อนที่ไปตำแหน่งใหม่ ต้องให้พลังงานมากแก่อะตอม พลังงานที่ให้นี้ ต้องมากกว่าพลังงานเดิมของอะตอม หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) โดยทั่วไปแล้วอะตอมแทรกจะต้องการพลังงานในการแพร่น้อยกว่า การแพร่แบบช่องว่าง นอกจากนี้พลังงานกระตุ้นของวัสดุแต่ละชนิดยังมีค่า ไม่เท่ากัน เนื่องจากจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกันอีกด้วย



รูปที่ 2.6 แสดงถึงการที่อะตอมจะแพร่ผ่านอะตอมข้างเคียงได้ต้องได้รับพลังงานที่เพียงพอ และพลังงานที่ใช้ในการแพร่แบบแทรกจะน้อยกว่าการแพร่แบบช่องว่าง [3]

2.2.3 การคำนวณเกี่ยวกับการแพร่

1. กฎข้อที่ 1 ของ Fick (Fick's First Law)

เมื่อการแพร่เป็นแบบสถานะคงตัว (Steady State) กล่าวคือ ความเข้มข้นไม่ขึ้นกับเวลา เราสามารถทราบอัตราการแพร่ของอะตอมได้จากค่าฟลักซ์ (Flux, J) หรือนิยามได้ว่า คือ ค่าที่แสดงจำนวนอะตอมที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งต่อเวลา สามารถแสดงได้เป็นความสัมพันธ์ดังนี้

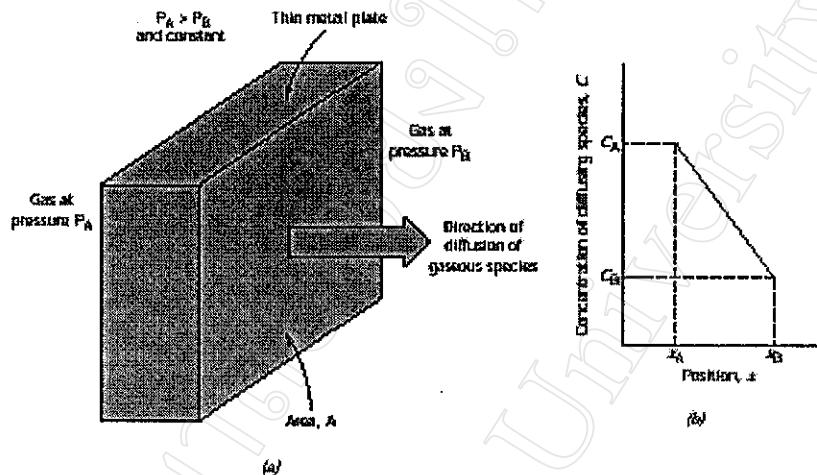
$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ J คือ ค่า ฟลักซ์ ($\text{atom.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

D คือ ค่าคงที่ในการแพร่หรือ (Diffusion Coefficient) ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

dc/dx คือค่า concentration gradient ($\text{atom.m}^{-3}.\text{m}^{-1}$)

ค่า concentration gradient เป็นค่าที่แสดงว่า ความเข้มข้นจะเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง โดยจะเกิดขึ้นได้เมื่อ นำวัสดุ 2 ชนิดที่ต่างกันมาต่อกัน หรือเมื่อของแข็งสัมผัสกับแก๊สหรือของเหลว นอกจากนี้ concentration gradient ยังสามารถเกิดในกรณีที่โครงสร้างของวัสดุ ไม่อยู่ในสภาวะสมดุล เช่น อยู่ในระหว่างกระบวนการผลิต (Processing)



รูปที่ 2.7 (a) แสดงว่าถ้าจำนวนอะตอมหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งเราจะเรียกว่า flux (b) แสดง concentration gradient [2]

2. กฎข้อที่ 2 ของ Fick (Fick's Second Law)

ในกรณีที่การแพร่ไม่อยู่ในสถานะคงตัว (non-steady state) หรือความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง พบว่า ฟลักซ์ จะมีความสัมพันธ์กับ เวลา (t) โดยเป็นไปตามสมการความต่อเนื่อง (Equation of continuity) ดังนี้

$$\frac{dc}{dt} = - \frac{dJ}{dx} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

แทนค่าสมการ 2.3 ลงในสมการ 2.4 จะได้

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx} D \frac{dc}{dx} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

หรือ

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

การแก้สมการในกฎข้อที่ 2 ของ Fick มีหลายกรณี

กรณีที่ 1 ถ้าแหล่งให้ความเข้มข้น (Source) มีลักษณะเป็นแผ่นบาง (thin film) ติดอยู่กับวัสดุที่ปลายด้านหนึ่งเมื่อปล่อยให้เวลาผ่านไป t พบว่าการแพร่จะเป็นไปดังสมการ

$$c(x,t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp -\frac{x^2}{4dt} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

เมื่อ

c คือ ความเข้มข้น (atom.m^{-3})

Q คือ จำนวนอะตอมที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หนึ่ง (atoms)

D คือ ค่าคงที่ในการแพร่หรือ (Diffusion Coefficient) ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

t คือ เวลา (s)

x คือ ระยะทางที่ห่างจากพื้นผิว (m)

กรณีที่ 2 ถ้าแหล่งให้ความเข้มข้นมีขนาดใหญ่มากหรือสามารถให้ความเข้มข้นที่คงที่ได้ จะได้สมการ

$$\frac{c-c_s}{c_0-c_s} = \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

เมื่อ $\text{erf } z$ หมายถึง error function หรือ error integral of Gauss

$$\text{erf } z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า error function [2]

z	$\text{erf}(z)$	z	$\text{erf}(z)$	z	$\text{erf}(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2753	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3256	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3744	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4204	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

2.2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Diffusion Coefficient

ค่า Diffusion Coefficient จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นไปตามสมการของ Arrhenius ดังนี้

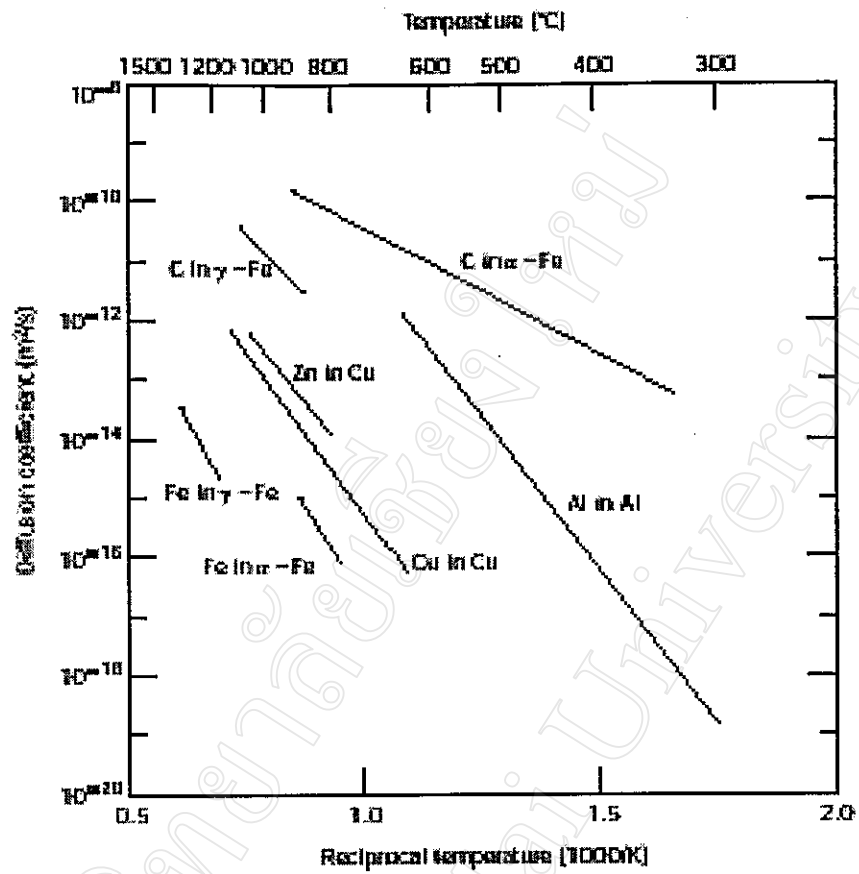
$$D = D_0 \exp -\frac{Q}{RT} \quad \text{..... (2.10)}$$

เมื่อ Q คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) (J.mol^{-1})

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

T คือ อุณหภูมิ (K)

D_0 คือ ค่า Diffusion Coefficient ของระบบ ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)



รูปที่ 2.8 แสดงค่า Diffusion Coefficient ของโลหะที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น [2]

2.3 เทคนิคการเคลือบผิว (Coating Deposition Techniques) [6]

ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคนิคในการเคลือบผิว โดยเน้นไปที่ประสิทธิภาพ และการลดค่าใช้จ่าย ซึ่งเทคนิคการเคลือบผิวที่นิยมทำกันมาก ก็คือ เทคนิคการเคลือบผิวด้วยไอ (Vapor deposition) โดยสารที่จะใช้เคลือบจะอยู่ในรูปของไอ สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นผิวได้ เกือบทุกชนิด สารเคลือบที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง, ยึดเกาะกับชิ้นงานได้ดี โดยเทคนิคแบบ vapor deposition นี้มี 2 แบบหลัก ๆ คือ

2.3.1 PVD (Physical Vapor Deposition)

เทคนิคการเคลือบผิวแบบ PVD เป็นการเคลือบโดยทำให้อะตอมของสาร เคลือบเป็น แผ่นฟิล์มไปบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยอาศัยความเป็นสุญญากาศที่สูง (10^{-6} to 10^{-8} Pa) และสามารถสร้างฟิล์มบางได้มีความหนาประมาณ 10^{-7} - 10^{-4} m การเคลือบผิวแบบ PVD นี้ จะมีหลายวิธีด้วยกันเช่น evaporation, Ion plating, Ion sputtering, Implantation ซึ่งแต่ละวิธีก็จะให้ สมบัติของฟิล์มที่ต่างกัน

Evaporation

วิธีนี้ไอของสารเคลือบจะถูกสร้างจากการให้ความร้อนยังสารที่ต้องการเคลือบ (ประมาณ $1000 - 2000^{\circ}\text{C}$) และต้องอยู่ภายในความดันประมาณ $10^{-6} - 1$ Pa เมื่อสารถูกให้ความร้อนจนกลายเป็นไอ ความดันก็จะสูงกว่าความดันล้อมรอบ ทำให้สามารถเกิดการควบแน่นที่ผิวสารตัวอย่างได้ และขณะเดียวกัน ก็จะต้องให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง ($200 - 1600^{\circ}\text{C}$) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะติดและได้โครงสร้างของสารเคลือบที่เหมาะสม ในการประยุกต์ใช้งานบางครั้ง ก็มีการทำให้ไอของสารอยู่ในรูปของพลาสมา โดยทำให้ไอเกิดการแตกตัวเป็นไอออน แล้วไปเคลือบบนผิว เราเรียกวิธีนี้ว่า Activated reactive evaporation (ARE) ซึ่งกระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มการยึดเกาะที่ดีและสมบัติเชิงกล บางกรณีสารเคลือบอาจมีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก ดังนั้นจึงต้องมีการให้ความร้อนด้วยวิธี ion beam ซึ่งสามารถให้ความร้อนได้ถึง 3500°C

เทคนิคการเคลือบแบบ evaporation นี้ ง่ายและค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก สามารถให้อัตราการเคลือบได้ถึง $25 \mu\text{m}.\text{min}^{-1}$ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างความหนาได้ถึง 1 mm อย่างไรก็ตาม การยึดเกาะของสารเคลือบยังไม่ดีนัก จึงทำให้ไม่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ทางด้าน Tribology

Ion Plating

กระบวนการวิธี ion plating นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ คือ glow-discharge(plasma) ion plating ซึ่งจะทำให้ความดันต่ำ ($0.5 - 10 \text{ Pa}$) และ ion beam ion plating ทำให้ความดันต่ำมาก ($10^{-5} - 10^{-2} \text{ Pa}$)

ในกระบวนการ glow-discharge ion plating หลักการจะคล้ายกับกระบวนการ evaporation แต่จะมีกลุ่มแก๊สในรูปของ glow discharge เป็นตัวกลางระหว่าง สารเคลือบและ สารตัวอย่าง ดังนั้นเมื่อสารเคลือบระเหยมายังบริเวณนี้ ก็จะแตกตัวเป็นไอออน ในการควบแน่นที่ผิวสารตัวอย่าง ไอออนที่แตกตัวนี้จะต้องอาศัย ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจากการต่อขั้วที่ สารตัวอย่าง ($2 - 5 \text{ kv}$) ในกรณีที่สารตัวอย่างมีสมบัติเป็นฉนวน ความต่างศักย์ที่ให้จะเป็นแบบ radio frequency potential

สำหรับกระบวนการ ion beam ion plating แหล่งของไอออนที่ใช้เคลือบจะมาจากภายนอก และไอออนที่ใช้เป็นได้ทั้งแก๊สเฉื่อย หรือสารที่ต้องการเคลือบ ที่สำคัญคือแผ่นสารตั้งต้นต้องสามารถทนต่อลำไอออนที่มาตกกระทบได้

ข้อดีของการเคลือบวิธีนี้ คือการยึดเกาะของสารเคลือบกับสารตัวอย่างจะดีมาก อย่างไรก็ตามอัตราการเคลือบจะต่ำ

Sputtering

เทคนิคการเคลือบแบบ sputter นี้ เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด มีหลักการคือ สารเคลือบที่อยู่ในรูป ของแข็ง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Target จะถูกกระตุ้นให้หลุดออกออกจากผิวเป็นอนุภาค โดยอนุภาคที่เป็นไอออนบวก จากนั้นอนุภาคของสารเคลือบที่หลุดออกกลายเป็นไอจะไปตกกระทบที่สารตัวอย่างเกิดเป็นแผ่นฟิล์มขึ้นมา กระบวนการที่ใช้สร้างอนุภาคกระตุ้น คือ glow-discharge ionization ต้องใช้ความดัน $0.5 - 10 \text{ Pa}$ และใช้พลังงาน 100 ถึง 1000 eV ในการสร้างหรือ ได้จาก ion beam ที่ได้จากแหล่งภายนอก และต้องมีความดัน $10^{-5} - 10^{-2} \text{ Pa}$ ใช้พลังงาน 100 eV ถึง 10 keV เมื่อสารตัวอย่างถูกกระตุ้นให้อนุภาคหลุดออกมา อนุภาคนั้นจะมีพลังงานประมาณ 10 ถึง 40 eV

เทคนิค sputter นี้เป็นวิธีเดียวที่สร้างไอของสารเคลือบด้วยกระบวนการเชิงกล ซึ่งวิธีอื่นจะอาศัยกระบวนการทางเคมีหรือความร้อน ดังนั้นจึงสามารถใช้กับสารเคลือบได้ทุกชนิด

2.3.2 CVD (Chemical Vapor Deposition)

เทคนิค CVD นี้มีหลักการคล้ายกับ PVD แต่จะต่างกันตรงที่ไอของสารเคลือบ ซึ่งอาจมีมากกว่า 1 ตัวจะทำปฏิกิริยาทางเคมี ก่อนแล้วจึงเกิดเป็นสารประกอบไปเคลือบที่ผิวของสารตัวอย่าง อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง $150 - 2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความดันที่ใช้อยู่ในช่วง 65 Pa ถึงความดันบรรยากาศ (0.1 Mpa)

เนื่องจากเทคนิค CVD นี้ ใช้ความดันที่ต่ำ ดังนั้นผิวที่เคลือบจึงมีคุณสมบัติและคุณภาพที่ดี และยังอัตราการเคลือบที่สูง การยึดเกาะของผิวเคลือบที่ดีมาก แต่อย่างไรก็ตามเทคนิค CVD นี้มีข้อเสียคือ สารตัวอย่างต้องมีความทนต่ออุณหภูมิได้ดี เพราะโครงสร้างของสารตัวอย่างอาจเปลี่ยนไปได้ในระหว่างกระบวนการนี้

2.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) [3,7]

ความแข็งเป็นตัวเปรียบเทียบที่สำคัญตัวหนึ่งทางวิศวกรรมด้านโลหะหรือโลหะผสม ค่าความแข็งของโลหะจะมีความสัมพันธ์กับสมบัติอื่น ๆ ของโลหะ เช่น ความเค้นสูงสุด (Tensile strength) , ความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance), การทำให้แข็ง (Hardening) ดังนั้น การทดสอบความแข็งนั้นจะมีความสำคัญในการพิจารณาลักษณะของโลหะโดยเฉพาะงานในด้านเคลือบผิวหรืออบ – ชุบแข็ง เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการยอมรับหรือคัดทิ้งชิ้นงาน

2.4.1 การวัดความแข็งแบบโมส์ (Moh's scale of hardness)

การวัดความแข็งแบบโมส์นี้ เป็นการวัดความแข็งโดยทำให้เกิดรอยบนโลหะสามารถทำได้เร็วและได้ผล สเกลความแข็งจะประกอบด้วยแร่มาตรฐาน 10 ชนิด เรียงลำดับความแข็งจากน้อยไปมาก คือ

- | | |
|-------------|---------------|
| 1. Talc | 6. Orthoclase |
| 2. Gypsum | 7. Quartz |
| 3. Calcite | 8. Topaz |
| 4. Fluorite | 9. Corundum |
| 5. Apatite | 10. Daimond |

ถ้าโลหะชนิดหนึ่งถูกทำให้เกิดรอยโดย Apatite แต่ Fluorite ไม่ทำให้เกิดรอย ค่าความแข็งของโลหะนั้นจะมีค่าระหว่าง 4 และ 5 เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สเกลความแข็งของโมส์นี้มีข้อเสีย คือ ช่วงความห่างของสเกลมีค่าไม่เท่ากัน

2.4.2 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness test)

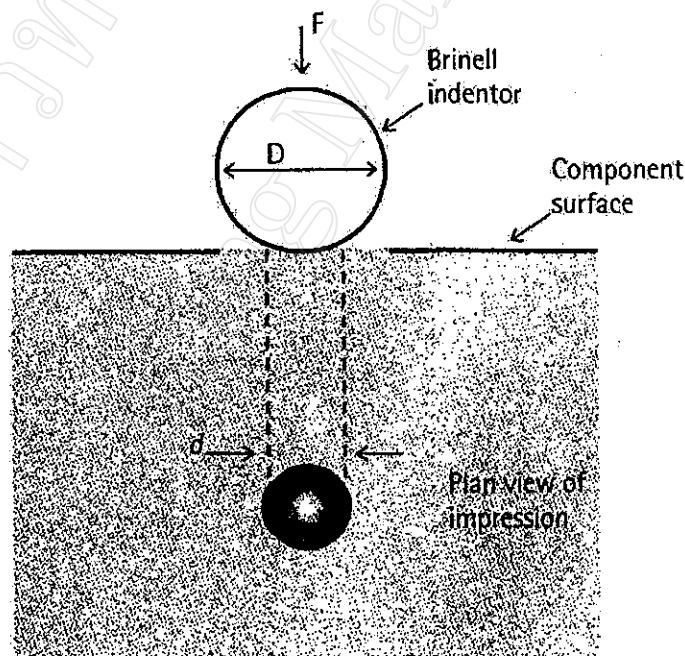
ในปี ค.ศ. 1900 ดอกเตอร์ J.A. Brinell ชาวสวีเดน ได้ค้นคว้าการวัดความแข็งของโลหะ พบว่า สามารถที่จะหาค่าความแข็งได้โดยการวัดขนาดของรอยกดที่เกิดจากหัววัดบอลเหล็กที่กดลงบนโลหะด้วยน้ำหนักที่คงที่ค่าหนึ่ง ข้อดีของการทดสอบความแข็งด้วยวิธีนี้คือ ไม่ต้องมีการเปรียบเทียบความแข็งของโลหะที่ต้องการวัด

หัวกดและน้ำหนัก

หัวกดที่ใช้กับเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล เป็นลูกบอลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 หรือ 10 mm ซึ่งหัวกดมาตรฐานสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทคือ

1. แบบลูกบอลมาตรฐานทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนเปอร์เซนต์สูง
2. แบบลูกบอลทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนเปอร์เซนต์สูงและผ่านการชุบแข็ง
3. แบบลูกบอลทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide)

เมื่อหัวกดจมลงในชิ้นตัวอย่าง หัวบอลกดอาจจะเกิดการเปลี่ยนรูปซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งของชิ้นตัวอย่างและยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่ให้แก่หัวกดด้วย โลหะที่มีค่าความแข็งเกินกว่า 525 สเกลบริเนล ก็จะมีการแปรรูปขึ้นในหัวกดแบบใดแบบหนึ่งได้ ค่าความแข็งที่ได้จะผิดพลาด ซึ่งค่าความแข็ง 525 อาจสูงได้ถึง 600 สเกลบริเนลเมื่อใช้หัวกดประเภทที่สอง และอาจจะถึง 725 บริเนลได้เมื่อใช้หัววัดแบบที่สาม เพื่อที่จะลดข้อเสียนี้ น้ำหนักที่ใช้กดควรจะปรับให้ได้จนเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกดมีค่า 25- 80 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางหัววัด



รูปที่ 2.9 แสดงการกดวัดแบบบริเนล [3]

หลักการ

หลักการของเครื่องบริเนลอยู่ที่ว่าหัวกดมีขนาดต่างกัน แต่มีรูปทรงของรอยกดเหมือนกัน จะมีสัดส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางที่จะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากัน โดยน้ำหนักที่ใช้จะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบอล

$$P = 30D^2 \text{ สำหรับเหล็กและเหล็กกล้า}$$

$$P = 5D^2 \text{ สำหรับทองเหลือง บรอนซ์ และโลหะตระกูลอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก}$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักที่กระทำ (Kg)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกดบอล (mm)

ค่าความแข็งของบริเนลมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร (kg.mm^{-2}) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ น้ำหนักหน่วยกิโลกรัมหารด้วยพื้นที่ผิวทรงกลมของรอยกดหน่วยตารางมิลลิเมตร ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{ค่าความแข็งบริเนล} = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.11)$$

เมื่อ P เท่ากับ น้ำหนักที่ให้ (kg)

A เท่ากับ พื้นที่ของรอยกด (mm^2)

พื้นที่ผิวของรอยกดที่เกิดจากหัวกดบอลสามารถคำนวณให้อยู่ในเทอมของ D ได้โดยให้เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกดเท่ากับ D_1 และพื้นที่ผิวของรอยกดระหว่างระนาบของเส้นผ่าศูนย์กลาง D และระนาบของเส้นผ่าศูนย์กลาง D_1 มีค่าเท่ากับ $\frac{\pi D \sqrt{D^2 - D_1^2}}{2}$ และพื้นที่ผิวครึ่งทรงกลมของหัวกดบอลมีค่าเท่ากับ $\frac{\pi D^2}{2}$ เพราะฉะนั้นพื้นที่ผิวของรอยกดมีค่าเท่ากับผลต่างของพื้นที่ผิวครึ่งทรงกลมกับพื้นที่ผิวระหว่างระนาบ D และ D_1 ในรอยกด

$$\text{พื้นที่ผิวของรอยกด} = \frac{\pi D^2}{2} - \frac{\pi D \sqrt{D^2 - D_1^2}}{2} \dots\dots\dots (2.12)$$

เมื่อ D เท่ากับ เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกดบอล

D_1 เท่ากับ เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกด

นำสมการพื้นที่ผิวของรอยกด ไปแทนค่าสมการที่ (2.11) จะได้

$$\text{ค่าความแข็งบริเนล} = \frac{P}{\frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - D_1^2})}{2}} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\text{หรือ} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - D_1^2})} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

การเตรียมผิวทดสอบ

ผิวของชิ้นงานตัวอย่างซึ่งจะทำการตรวจวัดจะต้องเรียบและปราศจากรอยต่าง ๆ รวมทั้งสนิมและออกไซด์ด้วย การตะไบและการขัดอย่างละเอียดก็เพียงพอแล้ว ส่วนการขัดเงาไม่จำเป็นต้องใช้ในการวัดแบบบริเนลนี้ ที่สำคัญคือต้องระวังเรื่องออกไซด์ตรงบริเวณที่จะวัด ในการวัดความแข็งของโลหะรูปโค้งนูนจะต้องขัดให้เรียบก่อน

2.4.3 การทดสอบความแข็งแบบอาร์มสตรอง – วิคเกอร์ (The armstrong – vicker hardness test)

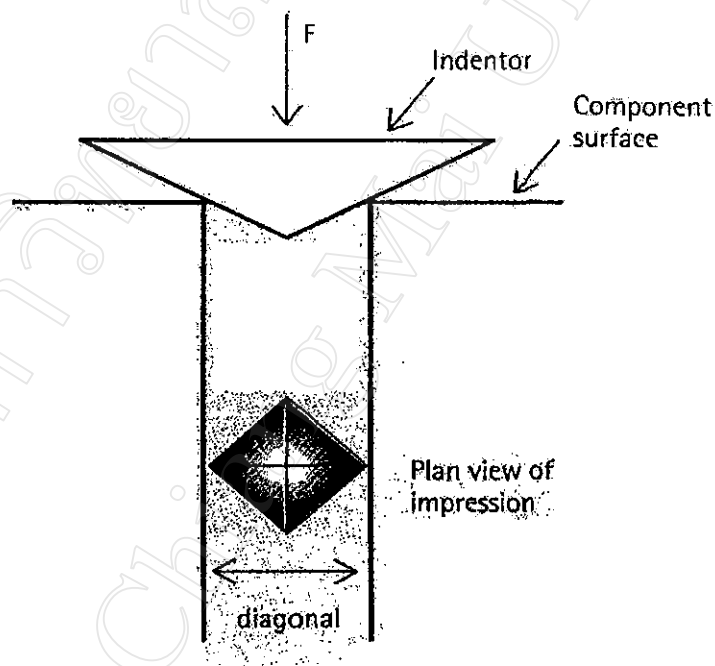
การวัดความแข็งแบบอาร์มสตรอง – วิคเกอร์ หรือเรียกสั้น ๆ ว่า การวัดความแข็งแบบวิคเกอร์ ซึ่งการวัดแบบนี้ใช้หัวกดแบบเพชร จึงจะสามารถปรับความกว้างของรอยกดได้โดยปรับน้ำหนักที่ใช้ให้เหมาะสม ดังนั้นจึงสามารถนำไปวัดโลหะที่มีขนาดบางและความแข็งที่ผิวสูง ๆ ได้ การวัดความแข็งแบบวิคเกอร์มีหลักการคล้ายคลึงกับการวัดแบบบริเนล

หลักการทำงานของเครื่องวัดจะเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ คือหลังจากที่หัวกดสัมผัสกับชิ้นงานตัวอย่างแล้ว น้ำหนักที่ตั้งค่าไว้ก็จะกระทำลงไปในช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นน้ำหนักจะถูกยกออกโดยอัตโนมัติ หลังจากที่ยอยกดเกิดบนชิ้นงานตัวอย่างแล้ว ก็จะต้องวัดขนาดของรอยกดโดยไม่จำเป็นต้องนำชิ้นงานออกจากแท่นวาง และเลื่อนให้รอยกดอยู่ตรงตำแหน่งกับกล้องวัดขนาดที่ติดอยู่ทางด้านข้างของเครื่องวัด

ห้กดและน้ำหนัก

ห้กดแบบวิกเกอร์ทำด้วยเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีมุมระหว่างด้าน 136 องศา เนื่องจากรูปร่างที่แน่นอนของห้กด ดังนั้น ค่าความแข็งวิกเกอร์คือ ค่าความแข็งที่ได้จากห้กดเพชรปิรามิด โดยใช้หลักการเดียวกับการวัดแบบบริเนล และส่วนของค่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกับบริเนล โดยเฉพาะที่ค่าความแข็งสูง ๆ ในทางปฏิบัติค่าความแข็งทั้งแบบบริเนลและวิกเกอร์จะมีค่าเดียวกันจนถึงค่าความแข็งที่ 300 บริเนล ที่ค่าความแข็งสูงกว่านี้ความแข็งจะเริ่มแตกต่างกัน และจะมากขึ้นจนเห็นได้ชัดที่ค่า 600 บริเนล

ค่าความแข็งที่แตกต่างกันนี้เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปของห้กดบอล แต่ในส่วนของวิกเกอร์ ค่าความแข็งยังเป็นสัดส่วนแบบเส้นตรงต่อไปอีก เพราะห้กดเพชรที่ไม่เปลี่ยนรูป ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงใช้วิธีการวัดแบบวิกเกอร์ในกรณีที่วัสดุมีความแข็งสูงกว่า 600 บริเนล



รูปที่ 2.10 แสดงการกดแบบวิกเกอร์ [3]

วิธีการวัดรอยกด

ในการหาความแข็งแรงแบบวิกเกอร์จะต้องทำการวัดความยาวของเส้นทแยงมุมทั้ง 2 ของรอยกดที่เกิดจากหัวกด แล้วจึงหาค่าเฉลี่ย การวัดความยาวแต่ละด้านนี้ต้องวัดด้วยความแม่นยำ โดยจะใช้กล้องที่ติดกับเครื่องวัดและสามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.001 มิลลิเมตร

ค่าความแข็งแรงวิกเกอร์จะเท่ากับ น้ำหนักที่กระทำหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกดรูปปิรามิด ดังนั้น

$$\text{ค่าความแข็งแรงวิกเกอร์} = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.15)$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักที่กระทำ (kg)

A คือ พื้นที่ผิวด้านข้างของรูปปิรามิด (mm²)

พื้นที่ผิวด้านข้างของรอยกดมีค่าเท่ากับ

$$A = 2aS$$

S เท่ากับ ความสูงด้านเอียง

a เท่ากับ ความยาวฐานปิรามิด

เส้นทแยงมุมและความยาวของฐานมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$D^2 = 2a^2 \quad \text{หรือ} \quad a = \frac{D}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad A = \frac{2DS}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.17)$$

มุมระหว่างด้านตรงข้ามของรอยกดมีค่าเท่ากับมุมระหว่างด้านตรงข้ามของหัวกดเช่นกัน คือเท่ากับ 136 ° ดังนั้นความความสูงด้านเอียง อาจเขียนได้ว่า

$$S = \frac{a/2}{\sin 68^\circ} \quad \text{หรือ} \quad \frac{D/2\sqrt{2}}{\sin 68^\circ} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\text{แทนค่า } S \text{ ลงในสมการที่ 2.17 จะได้ } A = \frac{D^2}{2 \sin 68^\circ} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

เมื่อแทนค่า A ลงในสมการ P/A จะได้

$$VHN = 1.854 \frac{P}{D^2} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

เมื่อ VHN คือ ค่าความแข็งวิกเกอร์

P คือ ค่าน้ำหนักที่กระทำ

D คือ ความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในทางปฏิบัติ ค่าความแข็งวิกเกอร์จะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม

การเตรียมผิวทดสอบ

เนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กมาก จำเป็นที่ผิวตัวอย่างต้องเรียบไม่มีรอยขีดข่วนใด ๆ และต้องปราศจากสนิม การผิวเงาต้องทำเท่าที่จะทำได้ทุกครั้ง และที่สำคัญ ค่าความแข็งวัดได้จากจุด ๆ เดียวไม่ใช่ความแข็งของทั้งชิ้นงาน ควรจะทำการวัดมากกว่า 2 ชิ้นไป ด้วยน้ำหนักที่ต่างกัน ผลที่ได้คือ สามารถตรวจสอบความถูกต้องของอีกค่าได้

2.4.4 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell hardness test)

การวัดความแข็งของโลหะสามารถบอกได้โดยความแตกต่างของความลึก แต่การวัดแบบนี้เป็นการวัดการเพิ่มความลึกของหัวกด ที่กระทำลงบนชิ้นงานด้วยน้ำหนักขั้นแรกและขั้นที่สอง

เครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลนี้สามารถอ่านค่าความแข็งได้โดยตรง เครื่องวัดความแข็งชนิดนี้จะต้องสร้างด้วยความแน่นอนทั้งขนาดของน้ำหนัก และระดับซึ่งสามารถทำการวัดการเพิ่มความลึกของรอยกดได้อย่างอัตโนมัติเมื่อน้ำหนักต่างค่ากระทำ โดยน้ำหนักค่าแรกมีค่า 10 kg คงที่ ส่วนน้ำหนักค่าหลังจะมีค่า 60, 100, 150 kg ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดหัวกดด้วย

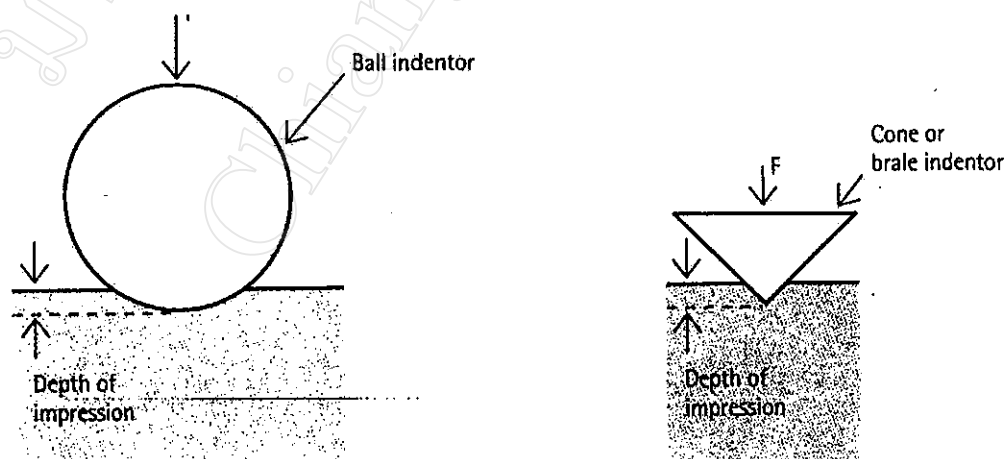
หัวกด

หัวกดที่ใช้ในเครื่องวัดความแข็งแบบรีอคเวลมีหลายชนิด แต่มาตรฐานจะมีอยู่ 2 แบบ คือ หัวกดลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $1/16$ นิ้ว (Steel Ball) ซึ่งเป็นแบบ บี – สเกล และอีกแบบเป็นหัวกดแบบเพชรรูปกรวย ซึ่งเป็นแบบ ซี – สเกล หรือแบบ เบรล (Brle)

การทำงานของหัวกดแบบบอลเหล็กที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความแข็ง 0 ถึง 100 รีอคเวล บี (HRB) ถ้าโลหะมีความแข็งมากกว่า 100 HRB จะทำให้หัวกดเกิดการเปลี่ยนรูป เกิดความผิดพลาดในการวัด ถึงแม้ว่าหัวกดจะไม่เปลี่ยนรูป ก็ไม่เหมาะสมที่จะใช้วัดความแข็งสูง ๆ เนื่องจากหัวกดที่เป็นทรงกลมจะขาดความไวในการวัดความแตกต่างของความแข็งที่ค่าต่างกั นน้อย ส่วนหัวกดแบบเบรล ทำจากเพชรรูปกรวยกลม มุมของกรวยจะเท่ากับ 120° ปลายบนของหัวเป็นทรงกลม มีรัศมีจุดตัดเท่ากับ 0.200 mm

ช่วงใช้งานของหัวกดแบบเบรล ในการวัดความแข็งแบบรีอคเวลซี (HRC) อยู่ในช่วง 20 (เทียบเท่ากับ 97 HRB) ถึง 70 HRC หรืออาจมากกว่าเล็กน้อย หัวกดแบบเบรลไม่ควรจะใช้วัดความแข็งของโลหะที่มีค่าต่ำกว่า 20 HRC ด้วยเหตุผลที่ว่าจะเกิดความผิดพลาดที่ค่าความแข็งต่ำ ๆ เพราะค่าความผิดพลาดสัมพันธ์กับรูปร่างของเข็มวัดเพชรที่ไม่แน่นอนของโรงงานผลิต โรงงานจะไม่สามารถตรวจสอบหัววัดให้ได้แน่นอนกับความลึกที่จะสอดคล้กับความแข็งที่ 20 HRC

นอกจากหัวกดทั้งสองแบบแล้ว ยังได้มีการใช้ หัวกดบอลที่มีขนาดใหญ่กว่านี้อีก มากสุด $1/2$ นิ้ว ทั้งนี้เพื่อใช้สำหรับวัดโลหะที่อ่อนจนไม่สามารถใช้หัวกดสองแบบแรกได้ หัวกดที่มีขนาดใหญ่นี้เหมาะในการวัดความแข็งของโลหะพวกโลหะไม่ค้ินรูป เช่นพวกเหล็กหล่อ



รูปที่ 2.11 แสดงการกดวัดแบบรีอคเวล [3]

การเตรียมผิวทดสอบ

เพื่อให้ได้รอยกดเกิดบนผิวงานที่ดี เมื่อใช้หัวกดทั้งแบบหัวบอลเหล็กหรือแบบเบรลผิวของตัวอย่างต้องเรียบและสม่ำเสมอ การขัดผิวเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง สิ่งสกปรกที่แข็งหรือสนิมที่ติดอยู่ที่ชิ้นงานทดสอบ จะทำให้เกิดค่าความแข็งที่คลาดเคลื่อนไป

2.4.5 การทดสอบความแข็งแบบนูป (Knoop Hardness Test)

เครื่องวัดความแข็งแบบนูป (Knoop) เป็นเครื่องวัดชนิดพิเศษใช้ในการวัดความแข็งของวัสดุที่มีขนาดเล็ก หรือบางมาก รวมทั้งผิวที่ผ่านการเคลือบผิว เช่น คาร์บูไรซิง (Carburizing) , ไนไตรดิง (Nitriding) นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดความแข็งของโครงสร้างภายในโลหะผสม โดยความลึกของรอยกดที่ได้จะมีค่าไม่เกิน 1 μm .

เครื่องวัดความแข็งแบบนูป เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นให้มีน้ำหนักและการทำงานที่แน่นอน การทำงานเป็นไปอย่างอัตโนมัติซึ่งควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ยกเว้นการวัดขนาดของรอยกดที่เกิดจากหัวกด หลักการทำงานของเครื่องจะคล้ายคลึงกับเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์

หัวกดและน้ำหนักที่ใช้

หัวกดแบบมาตรฐานจะเป็นหัวเพชรรูปปิรามิด มีมุมตามขวาง 130° มุมตามยาว $172^\circ 30'$ (มุมทั้งสองเกิดจากระนาบทั้งสี่ด้านตัดกัน) รอยกดที่เกิดจากหัวกด จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนมีเส้นทแยงมุมตั้งฉากกัน ความยาวของเส้นทแยงมุมหนึ่งยาวเป็น 7 เท่าของอีกเส้น ความลึกของรอยกดมีค่าประมาณ 1 ส่วน 30 ของเส้นทแยงมุมเส้นยาว อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบความแข็งทุกชนิด จะมีการคืนรูปบางส่วนของรอยกดที่เกิดจากหัวกดหลังจากที่ปลดน้ำหนักออก การคืนรูปนี้จะมากขึ้นกับขนาดและรูปร่างของหัวกด เนื่องจากหัวกดของนูปทำให้เกิดการคืนรูปทางด้านขวาง มากกว่าทางด้านยาว ผลที่เกิดขึ้นก็คือ ค่าความยาวของเส้นทแยงมุมที่ยาว มีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่ของหัวกด และจะมีค่าใกล้เคียงกับความยาวจริงก่อนคืนรูป

วิธีวัดรอยกด

ค่าความแข็งของนูปจะเท่ากับน้ำหนักที่ให้หารด้วยพื้นที่ของรอยกดก่อนคืนรูป ดังนั้น

$$\text{ค่าความแข็งของนูป} = \frac{P}{A} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

เมื่อ P เท่ากับ น้ำหนักที่กระทำ (kg)
 A เท่ากับ พื้นที่ของรอยกด (mm^2)

โดย

$$A = \frac{DL}{2} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

D เท่ากับ ความยาวของเส้นทแยงมุมด้านขวาง (สั้น)

L เท่ากับ ความยาวของเส้นทแยงมุมด้านยาว (ยาว)

เนื่องจากพื้นที่ของรอยกด จะมีค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุด เมื่อทำการวัดเส้นทแยงมุมด้านที่ยาวกว่าก่อนคืนรูป (L) แทนการวัดด้านที่สั้นกว่า ดังนั้นเราจำเป็นที่จะต้องเขียนสมการของพื้นที่รอยกด ให้อยู่ในเทอมของเส้นทแยงมุมที่ยาว รูปของการกดวัดแบบรูปจะเหมือนกับการกดวัดแบบวิคเกอร์แต่เปลี่ยนจากหัวกดที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

จากมุมในแนวขวางและในแนวยาวมีค่า 130° และ $172^\circ 30'$ ตามลำดับ จะได้ความสัมพันธ์ของเส้นทแยงมุมทั้งสองคือ

$$\frac{\tan 65^\circ}{D} = \frac{\tan 86^\circ 15'}{L} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

แทนค่า $\tan 65^\circ$ และ $\tan 86^\circ 15'$ จะได้ว่า

$$L = 7.114D \quad \text{หรือ} \quad D = 0.14056L \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

แทนค่า D ลงในสมการ 2.22 จะได้

$$A = \frac{0.14056 L^2}{2} = 0.07028L^2 \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

แทนค่าพื้นที่ A ลงในสมการ 2.21 จะได้สมการความแข็งแรงรูป

$$KHN = \frac{P}{0.07028 L^2} = 14.2 \frac{P}{L^2} \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

ดังนั้นค่าความแข็งของนุปลจะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นทแยงมุมตามยาว และในการรายงานผลการวัดความแข็ง จำเป็นที่จะต้องบอกถึง น้ำหนักที่ให้แก่วัด

การเตรียมผิวทดสอบ

รอยกดที่เกิดจากหัวกดแบบนุปลโดยเฉพาะที่น้ำหนักน้อยจะมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นชิ้นงานตัวอย่างจะต้องถูกเตรียมให้สมบูรณ์ที่สุด โดยเฉพาะรอยขีดข่วนและสนิมต่าง ๆ

2.5 การสึกหรอของโลหะ (Wear of metals) [8]

การสึกหรอคือ ความเสียหายของพื้นผิวหรือการหลุดออกไปของเนื้อวัสดุที่เกิดจากการสัมผัสกันของวัสดุ 2 ชนิด ภายใต้แรงค่าหนึ่ง ซึ่งวัสดุอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือคนละชนิดก็ได้ โดยลักษณะที่สัมผัสกันอาจเป็นแบบการเสียดสี, การกระแทก การเกิดการสึกหรอจะเริ่มเกิดได้จากจุดที่สัมผัสบนพื้นผิว และเมื่อพื้นผิวนั้นมีการเคลื่อนที่ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น โดยเนื้อวัสดุหนึ่งอาจหลุดออกไปหรือหลุดติดไปกับอีกพื้นผิวหนึ่ง ความเสียหายที่เกิดจากการสึกหรอจะมากหรือน้อยบอกได้จากมวลหรือปริมาตรที่เสียไป การสึกหรอจะทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการบำรุงรักษา ชนิดของการสึกหรอที่พบส่วนใหญ่มี 2 ชนิดคือ การสึกหรอแบบเกาะติด (Adhesive wear) และการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear)

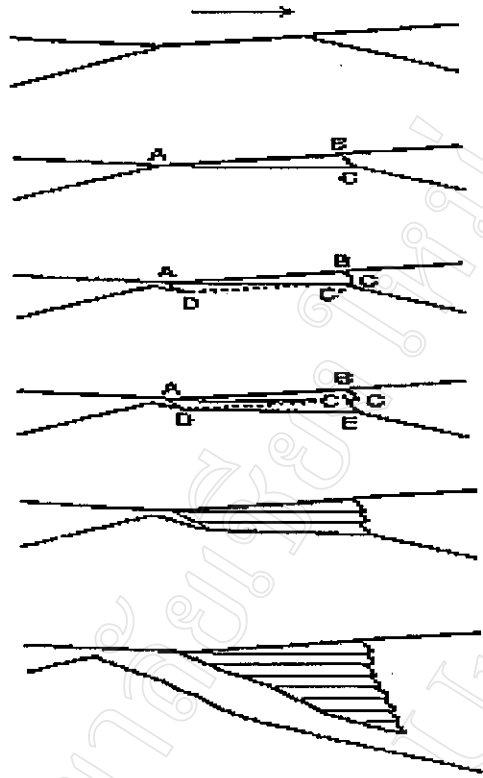
2.5.1 การสึกหรอแบบเกาะติด (Adhesive wear)

การสึกหรอแบบหลุดติดจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ มีการสัมผัสกันของพื้นผิววัสดุ 2 พื้นผิว ในลักษณะที่เสียดสีกัน โดยบริเวณที่สัมผัสจะเกิดการหลุดออกไปของเนื้อวัสดุหนึ่งไปติดกับอีกอันหนึ่ง ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสึกหรอแบบเกาะติดได้แก่ สมบัติทางกายภาพเช่น โครงสร้างผลึก พันธะของวัสดุ ขนาดเกรน และลักษณะขอบเกรน

เนื่องจากอัตราการสึกหรอบอกได้จากปริมาตรที่เนื้อวัสดุสูญเสียไป ดังนั้น ปริมาตรที่สูญเสียจะมีความสัมพันธ์กับ น้ำหนักที่ใช้กด, ระยะทางที่เคลื่อนที่ และความแข็งของพื้นผิวที่สึก ดังสมการของ Holm

$$V = \frac{KWx}{H} \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

- เมื่อ
- V คือ ปริมาตรที่สูญเสีย
 - W คือ น้ำหนักที่ใช้กด
 - x คือ ระยะทางที่เคลื่อนที่
 - H คือ ความแข็งของพื้นผิวที่สึกหรอ
 - K คือ สัมประสิทธิ์การสึกหรอ



รูปที่ 2.12 แสดงการล้าหรือแบบเกาะติด [8]

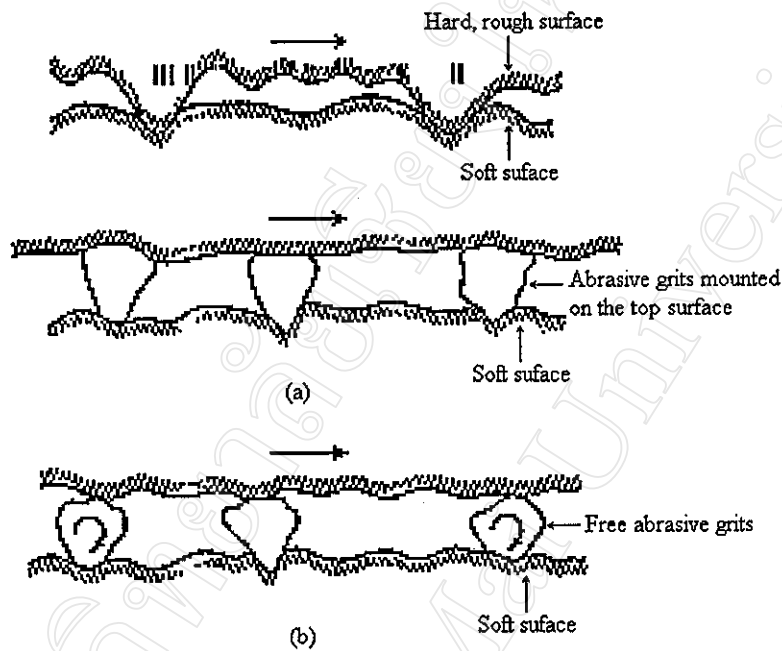
2.5.2 การล้าหรือแบบขัดถู (Abrasive Wear)

การล้าหรือแบบขัดถูเกิดได้จากพื้นผิวที่มีลักษณะแข็ง, หยาบหรือมีอนุภาคที่แข็ง ขัดถูหรือขูดไปบนพื้นผิวที่อ่อนกว่า ความเสียหายที่เกิดระหว่างบริเวณที่สัมผัสกันอาจเกิดการแตกหัก (fracture) หรือผิดรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) แตกหัก (fracture) ขึ้นกับเนื้อวัสดุ ถ้าวัสดุมีความเหนียว (ductile materials) เช่น พลาสติกหรือพอลิเมอร์ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการผิดรูปแบบถาวรอย่างเดียว เนื่องจากมีความยืดหยุ่นต่อการแตกหัก (fracture toughness) สูง ในขณะที่วัสดุแข็งเปราะ (Brittle materials) ความยืดหยุ่นต่อการแตกจะหักต่ำ จะเกิดความเสียหายแบบแตกหัก เช่น ในเซรามิกบางจำพวก ความเสียหายแบบขัดถูแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะได้แก่

1) การขัดถูระหว่าง 2 พื้นผิว (Two-body abrasive) คือ พื้นผิวที่แข็งกว่าขัดถูลงไปในอีกพื้นผิวที่อ่อนกว่า ซึ่งมักเกิดกับการใช้งานทางเครื่องมือกล เช่น การเจียรไนย, การกลึง และการกัดผิว เป็นต้น

2) การขัดถูที่มีอนุภาคตัวกลาง (Three-body abrasive) คือ จะมีอนุภาคนขนาดเล็ก ที่แข็งจะเป็นตัวกลางที่คอยขัดถูระหว่างพื้นผิว โดยอาจจะขัดให้ผิวด้านหนึ่งหรือทั้ง 2 ด้านเกิดการ

สึกหรอได้ เช่น การขัดเงา(Polishing) ของสารตัวอย่าง ปกติกลไกการสึกหรอจะเริ่มจากการขัดถูระหว่างพื้นผิวทั้งสองก่อน แล้วทำให้เกิดเป็นอนุภาคเล็กๆ ที่หลุดออกมาอยู่ระหว่างผิว จากนั้นทำให้เกิดการขัดถูแบบ มีอนุภาคตัวกลาง ขึ้น อย่างไรก็ตามความเสียหายจากการขัดถูแบบ two-body นั้นจะมากกว่า three-body



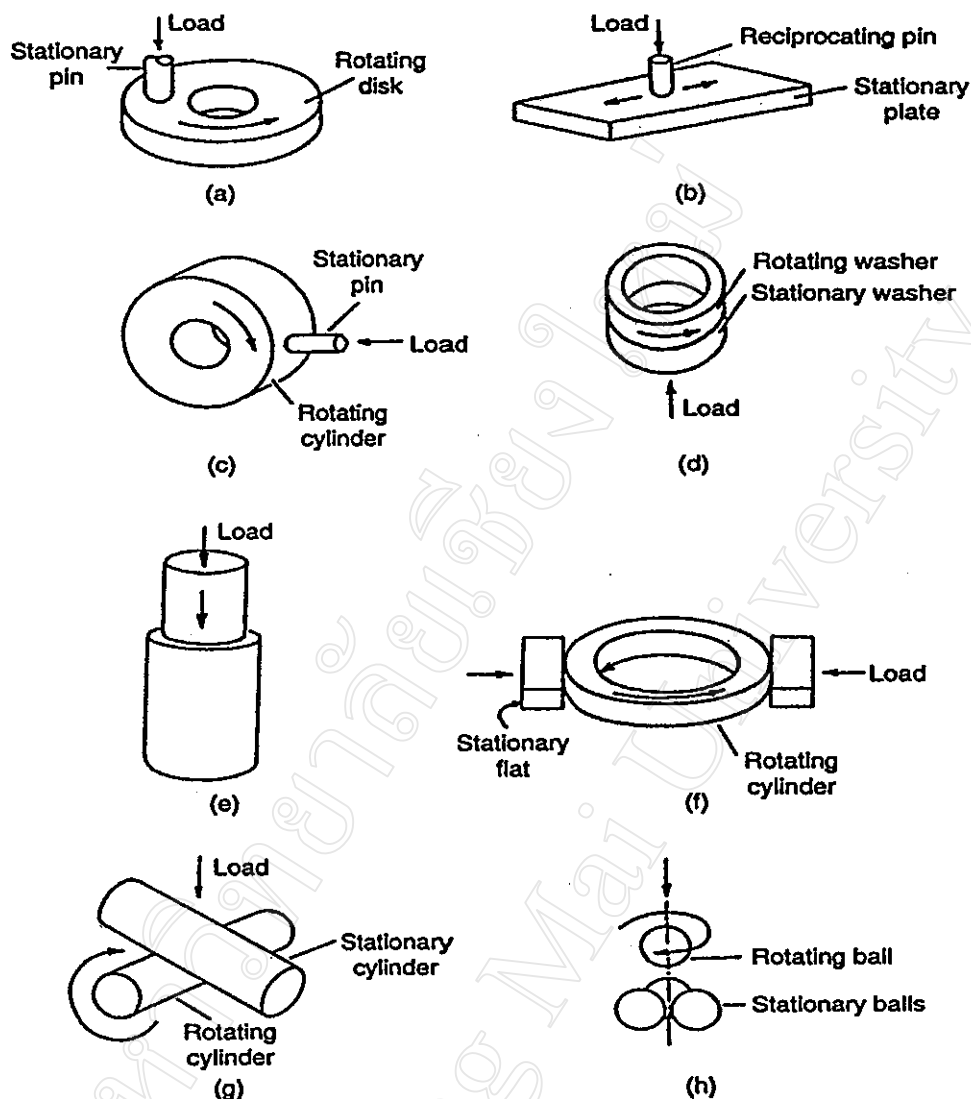
รูปที่ 2.13 แสดงการสึกหรอแบบขัดถู [8]

นอกจากการสึกหรอที่กล่าวมาทั้งสองแบบแล้ว ในการใช้งานจริงยังพบการสึกหรออีกหลายชนิดเช่น

- การสึกหรอแบบออกซิเดชัน (Oxidation wear)
- การสึกหรอแบบการกัดกร่อน (Corrosive wear)
- การสึกหรอเนื่องจากการล้าของผิว (Surface fatigue wear)

2.5.3 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอนั้นจะต้องมีการออกแบบหรือจำลอง การทดสอบให้มีความใกล้เคียงกับการทำงานจริง ซึ่งตัวแปรที่ต้องมีการควบคุมได้แก่ น้ำหนักที่ใช้ ความเร็วในการหมุนหรือเคลื่อนที่ อุณหภูมิ การหล่อลื่น เป็นต้นการทดสอบการสึกหรอนั้นมีหลายวิธีด้วยกันดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.14 แสดงแบบจำลองการทดสอบการสึกหรอแบบต่าง ๆ [8]

- a) แบบห้กดบนจานหมุน (Pin-on-disk)
- b) แบบห้กดบนแผ่นเรียบ (Pin-on-flat)
- c) แบบห้กดบนขอบทรงกระบอก (Pin-on-cylinder)
- d) แบบวางแหวนขัดถูบนวงแหวนอีกอันหนึ่ง (Thrust washers)
- e) แบบหมุดกดลงในกระบอก (Pin-into-bushing)
- f) แบบแท่งสี่เหลี่ยมขัดถูที่ขอบทรงกระบอก (Rectangular flats on a rotating cylinder)
- g) แบบทรงกระบอก 2 แท่งขัดถูทิศทางไขว้กัน (Crossed cylinders)
- h) แบบใช้ลูกบอล 4 ลูก (Four-ball)