

บทคัดย่อ

การกัดกร่อนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เครื่องจักร อุปกรณ์ ตลอดจนสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ที่เป็นโลหะและมีการใช้งานในน้ำเกิดการชำรุดเสียหายก่อนเวลาอันควร กองทัพเรือเป็นหน่วยงานที่มีความจำเป็นต้องปฏิบัติการกิจต่าง ๆ เกี่ยวข้องกับน้ำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการชำรุดเสียหายอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของตัวเรือรบ อุปกรณ์ และท่อทางต่าง ๆ ที่มีการสัมผัสโดยตรงกับน้ำจึงเป็นสิ่งที่ไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงได้ อย่างไรก็ตามการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่สามารถคาดเดาและสามารถป้องกันได้ การป้องกันการกัดกร่อนให้ได้ผลดีจะต้องทราบถึงสภาพแวดล้อมของการใช้งานและรูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะได้เลือกวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่ถูกต้องและเหมาะสมที่สุด โลหะกันกร่อน (Sacrificial anodes) เป็นวิธีที่นิยมสำหรับป้องกันการกัดกร่อนของโลหะที่มีการใช้งานสัมผัสกับน้ำตลอดเวลา โลหะกันกร่อนที่นิยมนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะต่าง ๆ ได้แก่ สังกะสีกันกร่อน (Zinc anode) อะลูมิเนียมกันกร่อน (Aluminium anode) และแมกนีเซียมกันกร่อน (Magnesium anode) ซึ่งการใช้งานของโลหะกันกร่อนแต่ละประเภทก็มีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป

นาวาตรี ดร.พินัย มุ่งสันติสุข

รักษาราชการ หัวหน้านายช่างโรงงานหล่อหลอมและไม้แบบ แผนกโรงงานเครื่องกล
กองโรงงาน อุทกหารเรือธนบุรี กรมอุทกหารเรือ

E-mail : pinai.m@navy.mi.th



การกัดกร่อนและการป้องกัน (Corrosion and Prevention)

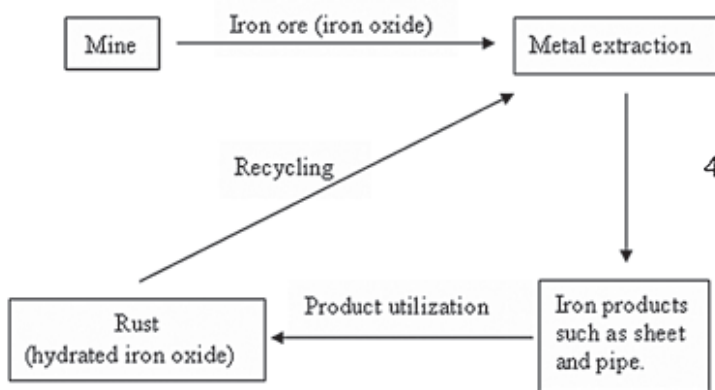
บทนำ

การกัดกร่อน (Corrosion) คือ ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) หรือ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ระหว่างวัสดุและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ การกัดกร่อนสามารถเกิดได้กับวัสดุทุกชนิด เช่น พลาสติก เซรามิก ไม้ โลหะ ฯลฯ แต่เมื่อก้าวถึงการกัดกร่อน เรามักจะคุ้นเคยและนึกถึงการกัดกร่อนของโลหะเป็นอย่างแรก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เหล็ก (Fe) เช่น สนิมที่เกิดขึ้นในท่อน้ำประปาที่ทำจากเหล็ก การผุกร่อนของตัวถังรถยนต์ หรือการผุกร่อนของตัวเรือเหล็กในน้ำทะเล เป็นต้น

การกัดกร่อนเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สินเป็นอย่างมาก และในบางครั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตของมนุษย์ได้ หากการกัดกร่อนเกิดกับสิ่งก่อสร้างที่มีมนุษย์พักอาศัยหรือทำงานอยู่ และการกัดกร่อนดังกล่าวก่อให้เกิดการชำรุดเสียหายแก่สิ่งก่อสร้างนั้น ๆ เช่น สะพาน เรือ เครื่องบิน หรือ อาคารต่าง ๆ การเสื่อมสลายของวัสดุอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงได้ แต่การป้องกันไม่ให้วัสดุเกิดการกัดกร่อนหรือเกิดซ้ำลงเป็นสิ่งที่สามารถกระทำได้ ดังนั้น การศึกษาถึงสาเหตุของการกัดกร่อน และการเลือกวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ

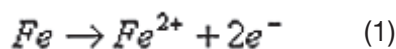
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการกัดกร่อน

โลหะที่ถูกนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ เกิดจากการนำสินแร่ที่ขุดได้จากพื้นโลกมาลงจนได้โลหะบริสุทธิ์แล้วจึงนำโลหะบริสุทธิ์ไปใช้งาน หรือนำโลหะบริสุทธิ์ที่ได้ไปเจือด้วยธาตุต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะชนิดนั้น ๆ ให้ได้ตามที่ต้องการก่อนที่จะนำไปใช้งาน ฉะนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าจากเดิม สินแร่ที่เป็นสภาพเสถียรถูกนำไปลงจนได้โลหะบริสุทธิ์ที่ไม่เสถียร ดังนั้นโลหะบริสุทธิ์ที่ไม่มีเสถียรภาพจึงพยายามที่จะกลับคืนสู่สภาพเดิมที่มีเสถียรภาพมากกว่า ดังตัวอย่างของเหล็กในรูปที่ 1



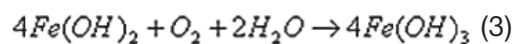
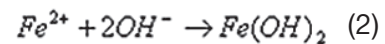
รูปที่ 1 วัฏจักรการผลิตและการใช้งานของเหล็ก

กระบวนการเกิดการกัดกร่อนเบื้องต้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2 โดยบริเวณที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า (potential) ต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน และเราเรียกบริเวณดังกล่าวว่า anode โดยโลหะบริเวณดังกล่าวจะมีการสูญเสีย อิเล็กตรอน (e-) อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction or anodic reaction) ดังตัวอย่างตามสมการที่ 1 (ในที่นี้จะใช้เหล็กเป็นตัวอย่างสำหรับการกัดกร่อนแบบต่าง ๆ เนื่องจากเหล็กเป็นโลหะที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด)

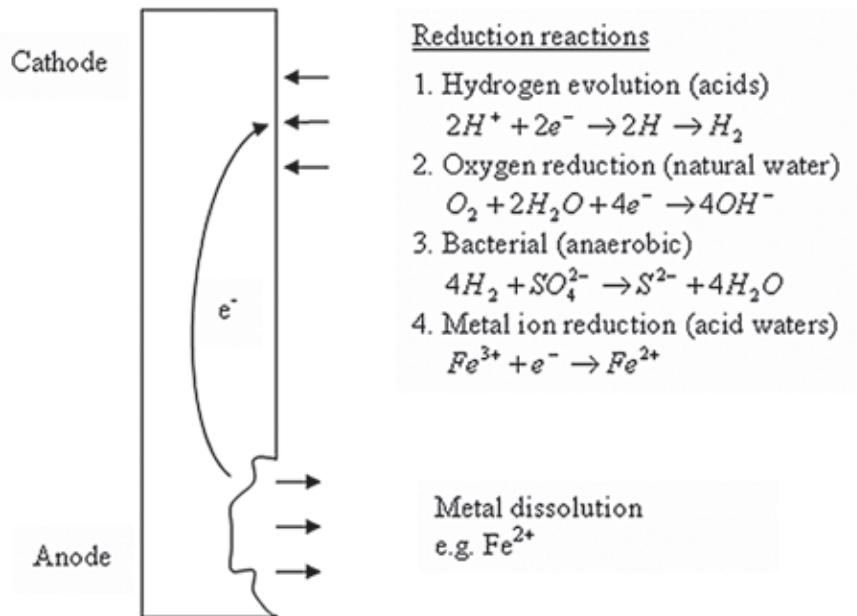


อิเล็กตรอนที่เกิดจากสมการที่ 1 จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า หรือ cathode และอิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกใช้ในปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction or cathodic reaction)

ในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด โลหะจะเกิดการกัดกร่อนไปพร้อม ๆ กับการเกิดขึ้นของก๊าซไฮโดรเจนดังปฏิกิริยาที่ 1 (รูปที่ 2) สำหรับเหล็กที่ถูกใช้งานในน้ำที่มีสภาพเป็นกลาง หรือมีความเป็นกรดหรือด่างเล็กน้อย (pH ~ 6.5-8.5) เช่น น้ำในแม่น้ำ หรือน้ำประปา ปฏิกิริยารีดักชันจะเป็นไปตามปฏิกิริยาที่ 2 (รูปที่ 2) และการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการเกิดขึ้นของ FeOOH (hydrated ferric oxide) หรือ Fe₂O₃ (สนิมแดง) อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ในบางกรณีเราจะพบว่า โลหะที่ใช้งานอยู่ในน้ำเสียหรือน้ำที่ไม่มีออกซิเจนละลายอยู่เลยก็ยังคงมีการเกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้น การกัดกร่อนดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 3 (รูปที่ 2) โดยจะมีแบคทีเรียบางประเภท ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้โดยปราศจากออกซิเจน แบคทีเรียดังกล่าวสามารถใช้ไฮโดรเจนในการดำรงชีวิต และจะทำให้ SO₄²⁻ ที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนเป็น S²⁻ (ปฏิกิริยาที่ 3 ในรูปที่ 2) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยารีดักชันนั่นเอง โดยปกติแล้วน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติต่าง ๆ จะมีปริมาณซัลเฟตละลายอยู่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ แม้จะปราศจากออกซิเจนก็ตาม



รูปที่ 2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะในกระบวนการเกิดการกัดกร่อนเบื้องต้น

รูปแบบของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน โดยการกัดกร่อนสามารถจำแนกออกได้ตามรูปร่างและลักษณะของการเกิดการกัดกร่อนดังแสดงให้เห็นรูปที่ 3 และรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion)

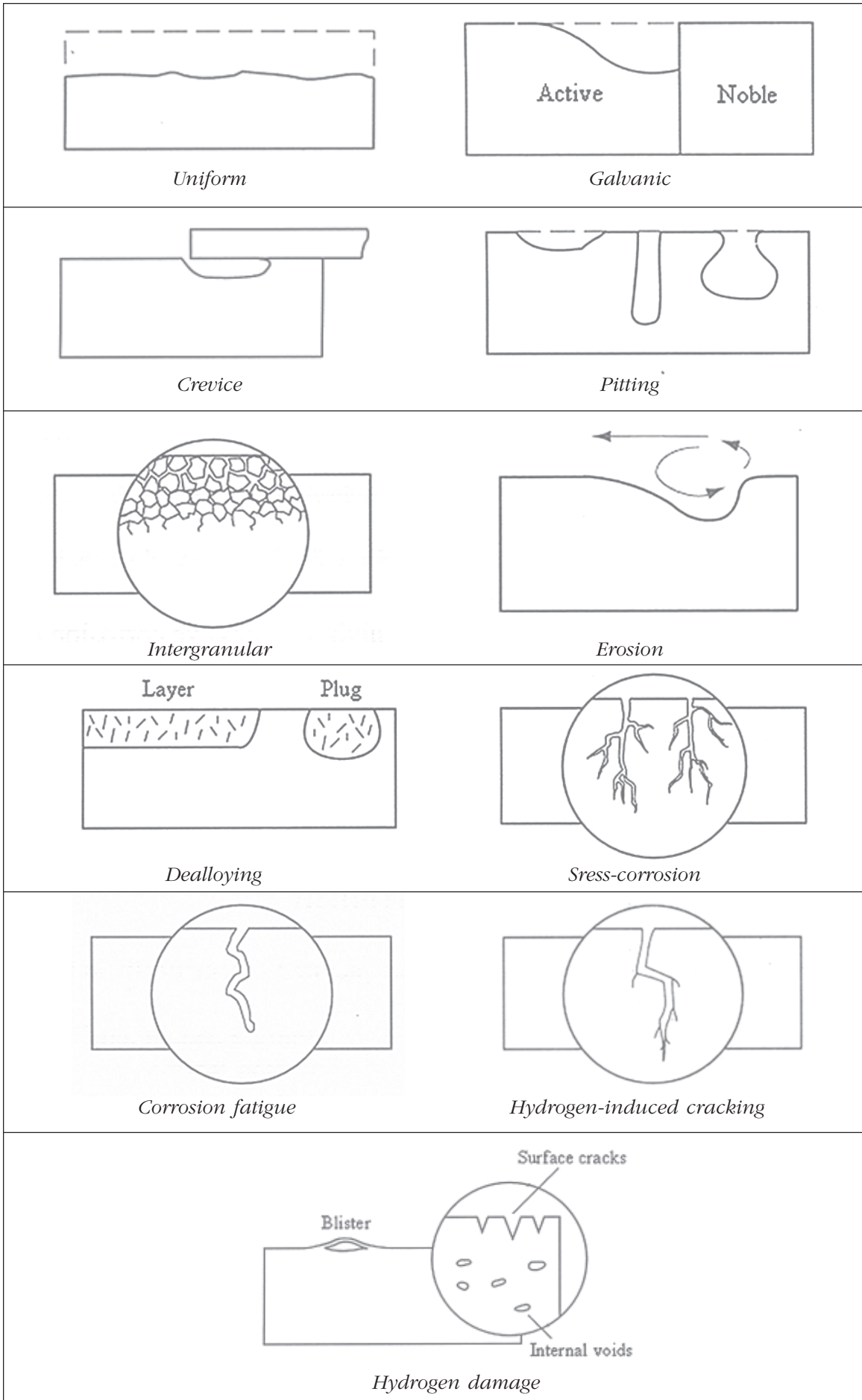
การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอเป็นรูปแบบที่พบบ่อยมากที่สุด โดยการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นตลอดทั่วผิวหน้าของโลหะ การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอมักเกิดจากโลหะถูกใช้งานและสัมผัสกับน้ำ สารกัดกร่อนหรือความชื้นอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั่วพื้นผิว และตลอดพื้นผิวของโลหะที่ถูกกัดกร่อนจะมีความเปลี่ยนแปลงไปจากพื้นผิวเดิมโดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือความหนาของโลหะจะลดลงในระดับที่ใกล้เคียงกัน การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่สามารถคาดคะเนได้ล่วงหน้าว่าจะจะเป็นไปในทิศทางใด ทำให้สามารถวางแผนป้องกันหรือเปลี่ยนวัสดุได้ทันทั่วทั้งที่ ดังนั้นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอจึงไม่น่าเป็นห่วงมากนัก การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอสามารถป้องกันได้

โดยการเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่ง หรือใช้หลายวิธีร่วมกัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- เลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม
- การเคลือบผิว (coating) ด้วยวิธีต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น แผ่นเหล็กอาบสังกะสี
- การป้องกันโดยวิธี cathodic protection
- เติมสารยับยั้ง (inhibitors) เพื่อลดความรุนแรงของสารกัดกร่อน

2. การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion)

การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากโลหะสองชนิดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า (potential) ต่างกัน มาสัมผัสกันในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และมีฤทธิ์กัดกร่อน (corrosive electrolyte) โดยโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะเป็นแอโนด (anode) และถูกกัดกร่อน ส่วนโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจะเป็นแคโทด (cathode) และได้รับการป้องกันจากแอโนดทำให้ไม่เกิดการ



รูปที่ 3 รูปแบบการกัดกร่อนประเภทต่าง ๆ

กัดกร่อน การพิจารณาว่าโลหะชนิดใดจะถูกกัดกร่อนเมื่อโลหะสองชนิดมาสัมผัสกันในสารละลายชนิดหนึ่ง ๆ จะสามารถทราบได้จากอนุกรมกัลวานิก (Galvanic series) ในสารละลายนั้น ๆ สำหรับตารางที่ 1 เป็นอนุกรมกัลวานิกในน้ำทะเล โดยโลหะที่อยู่ใกล้ Anodic end มากกว่าจะถูกกัดกร่อน ส่วนโลหะที่อยู่ใกล้ Cathodic end มากกว่าจะได้รับการป้องกันจากการกัดกร่อน การป้องกันการกัดกร่อนแบบกัลวานิกสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

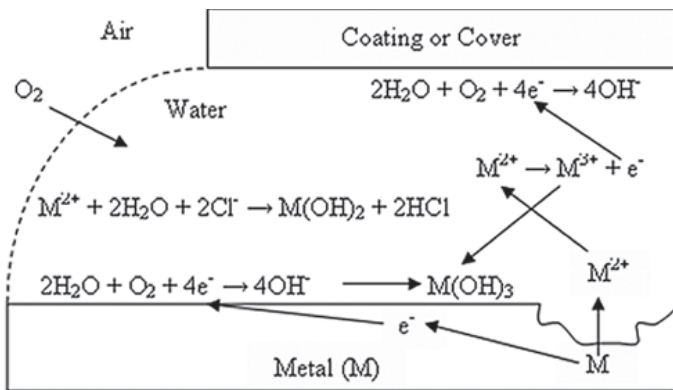
- พยายามเลือกใช้โลหะที่อยู่ใกล้กันในอนุกรมกัลวานิกให้มากที่สุด
- หลีกเลี่ยงการใช้งานแอโนดที่มีขนาดเล็กร่วมกับแคโทดที่มีขนาดใหญ่ (area effect) เพราะทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว เช่น ควรเลือกใช้สลักที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมในการยึดแผ่นเหล็ก
- ใช้ฉนวนกันหรือทอหุ้มโลหะตัวใดตัวหนึ่งเพื่อป้องกันโลหะสัมผัสกัน
 - การเคลือบผิว (coating) ด้วยวิธีต่าง ๆ แต่ต้องคอยระวังและซ่อมแซมผิวที่เคลือบไว้อย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่เป็นแอโนดเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่อาจจะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก area effect
 - เติมสารยับยั้ง (inhibitors) เพื่อลดความรุนแรงของสารกัดกร่อน
 - ออกแบบให้ชิ้นส่วนที่เป็นแอโนดสามารถเปลี่ยนได้โดยง่าย หรือออกแบบให้มีความหนาเพิ่มขึ้นเพื่อให้ชิ้นงานมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น
 - ติดตั้งโลหะชนิดที่สามที่เป็นแอโนดมากกว่าเข้ากับโลหะทั้งสองชนิด

ตารางที่ 1 อนุกรมกัลวานิกในน้ำทะเล
(Galvanic Series in Seawater)

Cathodic end (least easily corroded)	
	↑
	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
	zirconium
AISI Type 316, 317 stainless steel (passive)	
AISI Type 304 stainless steel (passive)	
AISI Type 430 stainless steel (passive)	
	nickel (passive)
	copper-nickel (70-30)
	bronzes
	copper
	brasses
	nickel (passive)
	naval brass
	tin
	lead
AISI Type 316, 317 stainless steel (active)	
AISI Type 304 stainless steel (active)	
	cast iron
	steel or iron
	aluminium alloy 2024
	cadmium
	aluminium alloy 1100
	zinc
	magnesium and magnesium alloys
	↑
Anodic end (most easily corroded)	

3. การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion)

การกัดกร่อนชนิดนี้เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ และมักจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นมุมอับต่าง ๆ ที่มีการขังตัวของสารกัดกร่อน ความชื้น และสิ่งสกปรก เช่น รอยแตก รอยแยก หลุม บริเวณหมุดยึด บริเวณสลัก หรือบริเวณหน้าแปลน เป็นต้น การกัดกร่อนในที่อับนี้อาจจะกล่าวได้ว่าเป็นการกัดกร่อนแบบกัลวานิกอีกรูปแบบหนึ่งที่เกิดจากความเข้มข้นของสารละลายบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน เช่น ความเข้มข้นของเกลือ (C1) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (pH) หรือความเข้มข้นของออกซิเจน (O₂) เป็นต้น สำหรับกรณีที่พบได้บ่อยคือความแตกต่างกันของปริมาณออกซิเจน โดยบริเวณที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนปริมาณน้อยกว่าจะเป็นแอโนดและเกิดการกัดกร่อน บริเวณที่มีออกซิเจนมากกว่าจะเป็นแคโทดและได้รับการปกป้อง ตัวอย่างตามธรรมชาติที่สามารถพบเห็นการกัดกร่อนในที่อับ ได้แก่ ตัวเรือเหล็กบริเวณที่มีเพรียงเกาะโดยบริเวณที่เพรียงเกาะอยู่จะเกิดการกัดกร่อน รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างรูปแบบหนึ่งของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกัดกร่อนแบบมุมอับ



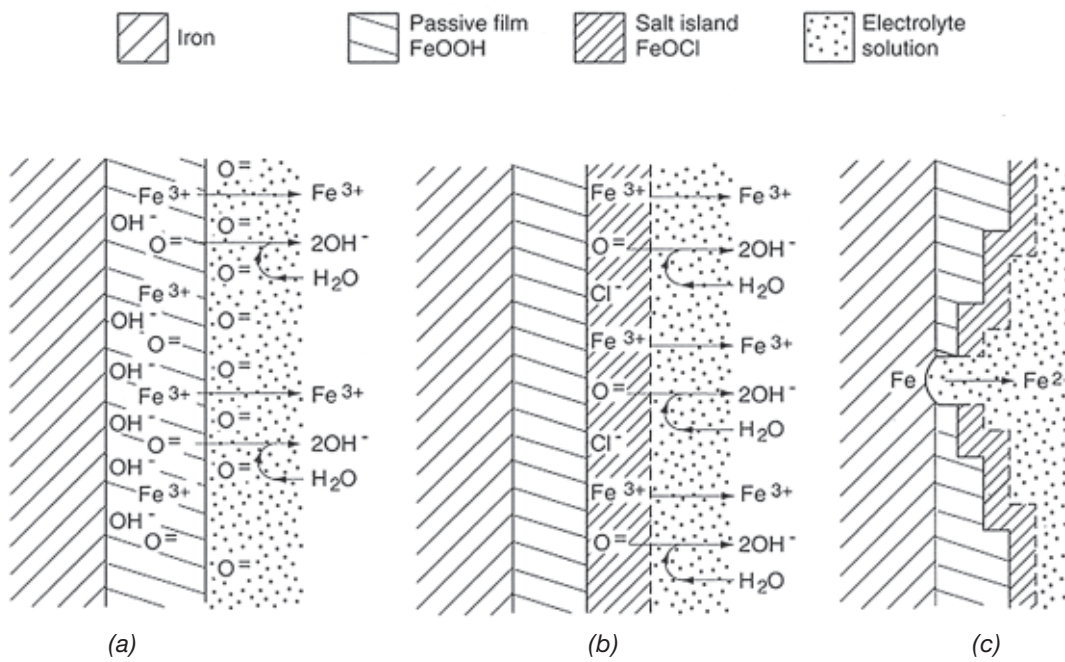
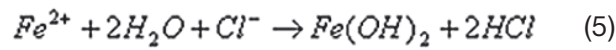
รูปที่ 4 การเกิดการกัดกร่อนในที่อับ

4. การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting Corrosion)

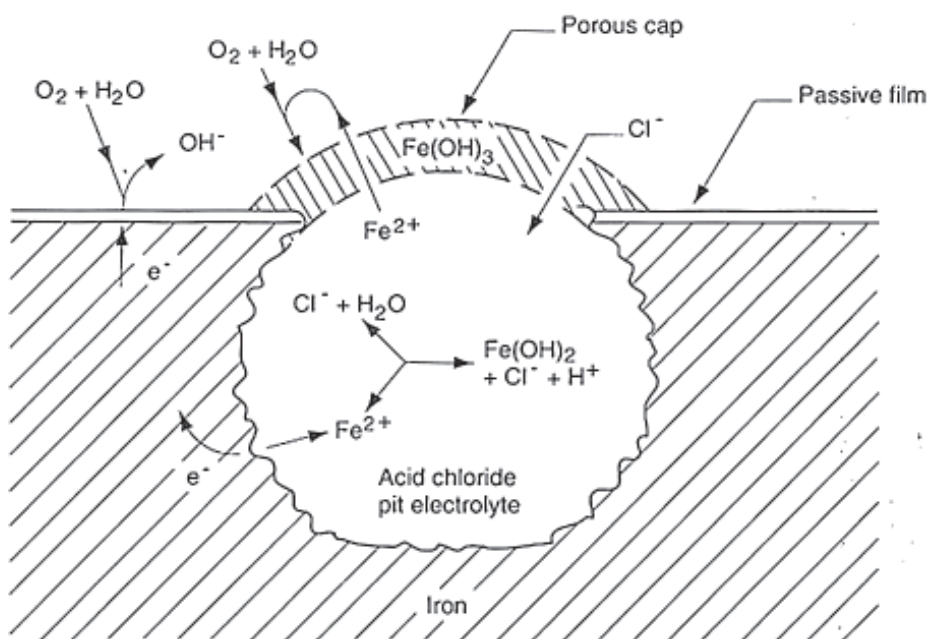
การกัดกร่อนชนิดนี้เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่อีกรูปแบบหนึ่งที่มีอันตรายเป็นอย่างมาก การกัดกร่อนสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและไม่สามารถคาดเดาอัตราเร็วของการกัดกร่อนได้ การกัดกร่อนจะเกิดเริ่มต้นจากหลุมหรือโพรงเล็ก ๆ บนพื้นผิวของโลหะ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการหลุดร่อน หรือแตกออกของออกไซด์ฟิล์ม (protective oxide film) ทำให้สารกัดกร่อนสามารถแทรกตัวเข้าไปตามรอยแตกและสัมผัสกับ

เนื้อโลหะได้โดยตรง การกัดกร่อนจะไม่ขยายตัวให้เห็นชัดเจนบนพื้นผิวโลหะเหมือนกับการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ แต่จะขยายตัวลึกลงไปใต้พื้นผิวของโลหะ ซึ่งขั้นตอนการขยายตัวของสารกัดกร่อนนี้อาจจะมีการกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion) เกิดขึ้นร่วมด้วยการขยายตัวของสารกัดกร่อนใต้พื้นผิวของโลหะนี้เองที่ทำให้เราไม่สามารถมองเห็นและคาดคะเนได้ว่าเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะเกิดการชำรุดเสียหายขึ้นเมื่อใด ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบหลุมที่มักจะพบได้บ่อย ๆ คือ การใช้งานของโลหะไร้สนิมในสารละลายที่มีส่วนประกอบของคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) เช่น น้ำทะเล เป็นต้น

รูปที่ 5 แสดงถึงกลไกเริ่มต้นในการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็ก ในสารละลายที่ไม่มีส่วนประกอบของ Cl⁻ (5a) และในสารละลายที่มีส่วนประกอบของ Cl⁻ (5b) เช่น น้ำทะเล สำหรับรูปที่ 6 แสดงถึงการขยายตัวของสารกัดกร่อนแบบหลุมภายใต้รอยแตกของ passive film จะเห็นได้ว่าเมื่อเหล็กหรือเหล็กกล้าไร้สนิมถูกนำไปใช้งานในสารละลายที่มี Cl⁻ ละลายอยู่ การกัดกร่อนจะเกิดรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ passive film ของเหล็กแตกหรือหลุดร่อนออก การกัดกร่อนภายใต้รอยแตกจะรุนแรงมากขึ้นอันเนื่องมาจากกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการกัดกร่อน ดังสมการที่ 5



รูปที่ 5 (a) การกัดกร่อนอย่างช้า ๆ ของเหล็กในสารละลายที่ประกอบด้วย Cl⁻, (c) สารกัดกร่อนแทรกตัวเข้าตามรอยแตกของ passive film และกัดกร่อนเนื้อเหล็กโดยตรง (ที่มาของภาพ: Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed., หน้า 213)



รูปที่ 6 กระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการขยายตัวของการกัดกร่อนแบบหลุม (ที่มาของภาพ : Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed., หน้า 214)

จะเห็นได้ว่าการกัดกร่อนในที่อับและการกัดกร่อนแบบหลุมมีกลไกในการเกิดการกัดกร่อนที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนทั้งสองแบบจึงสามารถใช้วิธีที่เหมือนกันได้ เช่น

- หลีกเลี่ยงการใช้งานในสารกัดกร่อนที่มีความเข้มข้น และ/หรือ อุณหภูมิสูง
- ออกแบบอุปกรณ์ให้มีการถ่ายเทของเหลวได้ดี เพื่อป้องกันการขังตัวของของเหลว
- ทำความสะอาดพื้นผิวของอุปกรณ์บ่อย ๆ ทุกครั้งที่มีโอกาส เพื่อกำจัดสารตกค้างต่าง ๆ
- เลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในที่อับและแบบหลุมที่สูงขึ้น เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมของ โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) และ ไนโตรเจน (N) มากขึ้น
- เลือกใช้การเชื่อมยึดแทนการใช้หมุดย้ำหรือสลัก
- ใช้การป้องกันแบบ Cathodic Protection

5. การแตกหักที่มีอิทธิพลมาจากสภาพแวดล้อม (Environmentally Induced Cracking)

การแตกหักดังกล่าวอาจทำให้คำจำกัดความได้ว่า “เป็นการแตกหักแบบเปราะของวัสดุอันเป็นผลเนื่องมาจากการใช้งานวัสดุในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive Environment) ภายใต้ความเค้นแบบแรงดึง (Applied Tensile Stress)” วัสดุที่ปกติมีการแตกหักแบบเหนียวอาจจะเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ ถ้าถูกนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมของการกัดกร่อนที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายคลอไรด์ การใช้งานทองเหลืองในการละลายแอมโมเนีย และการใช้งานเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายไนเตรท เป็นต้น การแตกหักดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับประเภทของแรงและสภาพแวดล้อมกัดกร่อนที่ทำให้เกิดการแตกหัก ได้แก่

- การแตกหักอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion Cracking, SCC)
- การแตกหักอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Corrosion Fatigue Cracking, CFC)
- การแตกหักอันเนื่องมาจากไฮโดรเจนร่วมกับ

ความเค้น (Hydrogen Induced Cracking, HIC)

การป้องกันการแตกหักที่มีอิทธิพลมาจากสภาพแวดล้อมเป็นสิ่งที่ยากลำบากเนื่องจากความหลากหลายของแรงที่มากระทำ และสภาพแวดล้อมที่โลหะถูกนำไปใช้งาน จึงไม่สามารถกล่าวได้ทั้งหมดในที่นี้ แต่สามารถกล่าวอย่างย่อ ๆ ในที่นี้ได้ เช่น

- พยายามกำจัดหรือลดความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่ใช้งานอยู่ เช่น สารกัดกร่อนต่าง ๆ หรือ แหล่งกำเนิดของไฮโดรเจน
- เลือกวัสดุที่มีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน
- ลดระดับความเค้นที่ใช้งานลงให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย หรือเปลี่ยนวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมกับการใช้งานให้มากขึ้น

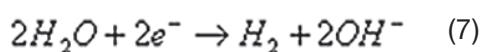
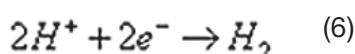
- ลดความเค้นตกค้างแรงดึงในโลหะโดยการทำ Shotpeening

- ใช้การป้องกันแบบ Cathodic Protection (ยกเว้นในกรณีของ HIC)

6. การเสียหายอันเนื่องมาจากไฮโดรเจน (Hydrogen Damage)

เนื่องจากอะตอมของไฮโดรเจนมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นไฮโดรเจนจึงสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะ หรือแม้กระทั่งแพร่เข้าไปในโครงสร้างผลึก (Crystal Structure) ของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้เกือบทุกชนิด ไฮโดรเจนเมื่อแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะจะทำให้โลหะสูญเสียความเหนียว (ductility) และทำให้โลหะเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ นอกจากนี้ไฮโดรเจนที่แพร่เข้าไปในเนื้อโลหะอาจจะรวมตัวกันเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนทำให้เกิดช่องว่างเล็ก ๆ ขึ้นภายในเนื้อโลหะ

(Internal Voids) หรือทำให้เกิดการโป่งพองของผิวโลหะ (Surface Blisters) ได้ ตัวอย่างการเสียหายอันเนื่องมาจากไฮโดรเจนได้แก่ การสูญเสียธาตุคาร์บอนในเหล็กกล้า (Decarburization) โดยไฮโดรเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอน (Carbides) ในเหล็กกล้า (Steel) เกิดเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) เมื่อเหล็กกล้าสูญเสีย คาร์บอนไปทำให้ความแข็งแรงของเหล็กกล้าต่ำลง การเกิดของไฮโดรเจนสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น กระบวนการทางความร้อน (Heat Treating) การเชื่อม (Welding) กระบวนการผลิตต่าง ๆ (Manufacturing Processes) การทำความสะอาดพื้นผิวของโลหะ (Cleaning and Pickling) หรือ ปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนหรือน้ำดังสมการที่ 6 และ 7 เป็นต้น



รูปที่ 7 Hydrogen blister in a carbon steel plate removed from a petroleum process stream (ที่มาของภาพ: Corrosion Engineering, 3rd ed., หน้า 143)

7. การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตามขอบเกรนซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ (Reactive Impurities) ที่แยกตัวออกมาอยู่ตามขอบเกรน (Grain Boundary Segregation) เช่น ในกรณีของเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) ที่มีการแยกตัวของ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) และ ฟอสฟอรัส (P) มาอยู่ตามขอบเกรน ทำให้ตามขอบเกรนมีความอ่อนไหวต่อการกัดกร่อนมากขึ้น จนสามารถทำให้เกิดการแตกหักตามขอบเกรนอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนร่วมกับความเค้นแรงดึง (Intergranular Stress Corrosion Cracking) ได้ หรือในกรณีของโลหะที่มี

ออกไซด์ฟิล์มในการป้องกันการกัดกร่อนโลหะดังกล่าว อาจจะมีการสูญเสียธาตุผลมบางตัวที่มีผลต่อการสร้างออกไซด์ฟิล์ม ทำให้ความต้านทาน ต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรนลดลงจนทำให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ ตัวอย่างที่พบเห็นได้บ่อยคือ การกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) ที่มีการสูญเสียธาตุโครเมียม (Cr) อันเนื่องมาจากโครเมียมทำปฏิกิริยาคาร์บอนได้เป็นโครเมียมคาร์ไบด์ (ส่วนมากจะเป็น Cr_7C_3) อยู่ตามขอบเกรน ทำให้ตามขอบเกรนมีปริมาณโครเมียมลดลง จนสูญเสียความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน การเกิดของโครเมียมคาร์ไบด์ จะเกิดเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติก ผ่านกระบวนการทางความร้อนหรือถูกใช้งานในช่วงอุณหภูมิประมาณ $415-815^\circ\text{C}$

การสูญเสียธาตุโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติกดังกล่าวเรียกว่า Sensitization การเชื่อมในเหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติกก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิด Sensitization เช่น กันการป้องกันการเกิด Sensitization สามารถกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น

- ลดปริมาณธาตุคาร์บอนลงให้เหลือน้อยกว่า 0.03%
- เติมธาตุบางตัวลงไปเพื่อให้ไปรวมตัวกับคาร์บอนแทนโครเมียม เช่น ไททาเนียม (Ti) หรือ ไนโอเบียม (Nb) เป็นต้น
- ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนสูงเกินกว่า 815°C จนโครเมียมคาร์ไบด์แตกตัวและละลายกลับเข้าไปในเนื้อเหล็ก จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อ

ป้องกันโครเมียมและคาร์บอน กลับมารวมตัวกันอีกครั้ง ยกเว้นกรณีที่มีการผสม Ti หรือ Nb ในชิ้นงานไม่จำเป็นต้องทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว

- หลีกเลี่ยงการใช้งานสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนรุนแรง

8. การกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสม (Dealloying)

การกัดกร่อนชนิดนี้มักจะเกิดกับโลหะผสมที่มีการนำโลหะที่อยู่ห่างกันค่อนข้างมากในอนุกรมกัลวานิกมาผสมกันโลหะที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อยกว่า (อยู่ใกล้ Anodic end มากกว่า) มีแนวโน้มที่จะละลายหายไปจากโลหะผสม ทำให้โลหะที่เหลืออยู่มีสภาพเป็นรูพรุนและมีความแข็งแรงน้อยลง ความรุนแรงของการกัดกร่อนชนิดนี้จะเพิ่มมากขึ้น ถ้าถูกนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนรุนแรง เช่น น้ำทะเล

Graphitic Corrosion เป็นการกัดกร่อนที่มักจะเกิดขึ้นกับเหล็กหล่อเทาที่มีโครงสร้างทางจุลภาคของแกรไฟท์เป็นลักษณะโครงข่ายต่อเนื่องกัน (a continuous graphite network) เช่นการสูญเสียธาตุเหล็กในท่อเหล็กหล่อที่ถูกฝังไว้ใต้ดินเป็นเวลาหลายปี โดยแกรไฟท์ (graphite) จะเป็นแคโทด ส่วนเหล็กจะเป็นแอโนด และถูกกัดกร่อนหายไป เหลือไว้แต่โครงข่ายแกรไฟท์ ที่มีความแข็งแรงต่ำ ทำให้ท่อเหล็กหล่อสูญเสียความแข็งแรงอย่างรวดเร็ว และชำรุดเสียหายในที่สุด

Dezincification เป็นการสูญเสียธาตุสังกะสี (Zn) ในทองเหลือง (brasses, Cu-Zn alloys) การเกิด dezincification ของทองเหลือง จะสามารถเกิดได้กับการใช้งานในหลาย ๆ ประเภทด้วยกัน แต่จะมีความรุนแรงมากเมื่อถูกนำไปใช้งานในน้ำที่มี CO₂ และ/หรือ สารประกอบคลอไรด์ ละลายอยู่ในปริมาณมาก ทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีผสมอยู่น้อยกว่า 15% จะมีความต้านทาน dezincification ได้ดี สำหรับการป้องกันการสูญเสียสังกะสีในทองเหลืองเกรด Cu-30Zn สามารถทำได้โดยการเติมดีบุก (Sn) 1% และเติมสารหนู (As) พลวง (Sb) หรือ ฟอสฟอรัส (P) อย่างใดอย่างหนึ่งลงไปเล็กน้อย เช่น Inhibited admiralty brass (Cu-28Zn-1Sn-0.6As)

9. การกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารกัดกร่อนที่มีความเร็ว (Erosion-Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากสารกัดกร่อนที่มีความเร็วสูงไหลผ่านพื้นผิวของโลหะ สารกัดกร่อน ที่มีความเร็วสูงจะกัดเซาะและทำลาย protective film ของโลหะ ทำให้สารกัดกร่อนสามารถสัมผัสเนื้อโลหะโดยตรง การกัดกร่อนประเภทนี้จะมีความรุนแรงมากขึ้นในบริเวณท่อหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีการเปลี่ยนทิศทางหรือความเร็วของของไหล และทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence) เช่น ข้องอ (elbows) เครื่องกังหัน (turbines) และ เครื่องสูบน้ำ (pumps) เป็นต้น สารกัดกร่อนที่มีสารแขวนลอยต่าง ๆ เช่น ทราย ตะกอน หรือเศษโลหะ ก็จะทำให้การกัดกร่อนมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเช่นกัน การป้องกันการกัดกร่อนสามารถทำได้โดยพิจารณาถึงสาเหตุของการกัดกร่อน เช่น ออกแบบอุปกรณ์ เพื่อให้ของไหลมีความเร็วลดลงและมีการไหลที่ราบเรียบมากขึ้น ใช้ตัวกรองเพื่อแยกสารแขวนลอยออก หรือเลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่อสารกัดกร่อน เพื่อให้ protective film ไม่ถูกกัดเซาะออกไปง่ายจนเกินไป

โลหะกันกร่อน (Sacrificial Anodes)

การป้องกันการกัดกร่อนสามารถกระทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับรูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น รวมไปถึงสภาพแวดล้อมที่ใช้งานด้วยเช่นกัน การป้องกันการกัดกร่อนเบื้องต้นได้กล่าวไปบ้างแล้ว ในการกัดกร่อนแต่ละหัวข้อ จากรูปแบบการกัดกร่อนที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่ามีสิ่งหนึ่งที่คล้ายกัน คือ โลหะที่ถูกกัดกร่อนจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่ด้วย ตลอดเวลาไม่มากนักน้อย ซึ่งจากสาเหตุดังกล่าวนี้เอง ทำให้การใช้โลหะกันกร่อนในการป้องกันการกัดกร่อนเป็นวิธีที่สะดวกง่าย และต้นทุนต่ำ โดยโลหะกันกร่อนจะทำหน้าที่เป็นตัวสูญเสียอิเล็กตรอนแทน ทำให้โลหะที่ใช้งานอยู่ได้รับการปกป้องและไม่เกิดการกัดกร่อนหรือเกิดซัลฟ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับว่าปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีส่วนร่วมต่อการกัดกร่อนมากเพียงใด

จากข้อได้เปรียบดังกล่าวข้างต้น กองทัพเรือจึงมักจะใช้โลหะกันกร่อนในการป้องกันการกัดกร่อนของตัวเรือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีการสัมผัสกับน้ำอยู่ตลอดเวลา โลหะกันกร่อนที่ใช้งานมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ สังกะสีกันกร่อน (zinc anode) อะลูมิเนียมกันกร่อน (aluminium anode) และแมกนีเซียมกันกร่อน (magnesium anode) ซึ่งโลหะกันกร่อนแต่ละประเภทมีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ตารางที่ 2 แสดงถึงโลหะกันกร่อนประเภทต่าง ๆ และคุณสมบัติของโลหะกันกร่อนแต่ละชนิด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะกันกร่อนแต่ละชนิด

Alloy	Anode potential (V vs. Ag/AgCl/Seawater)	Max current capacity (Ah/Kg)
Al-Zn-Hg	- 1.00 to - 1.05	2,830
Al-Zn-Sn	- 1.00 to - 1.10	2,600
Al-Zn-In	- 1.00 to - 1.15	2,700
Zn-Al-Cd	- 1.05	780
Mg-Mn	- 1.70	1,230
Mg-Al-Zn	- 1.50	1,230

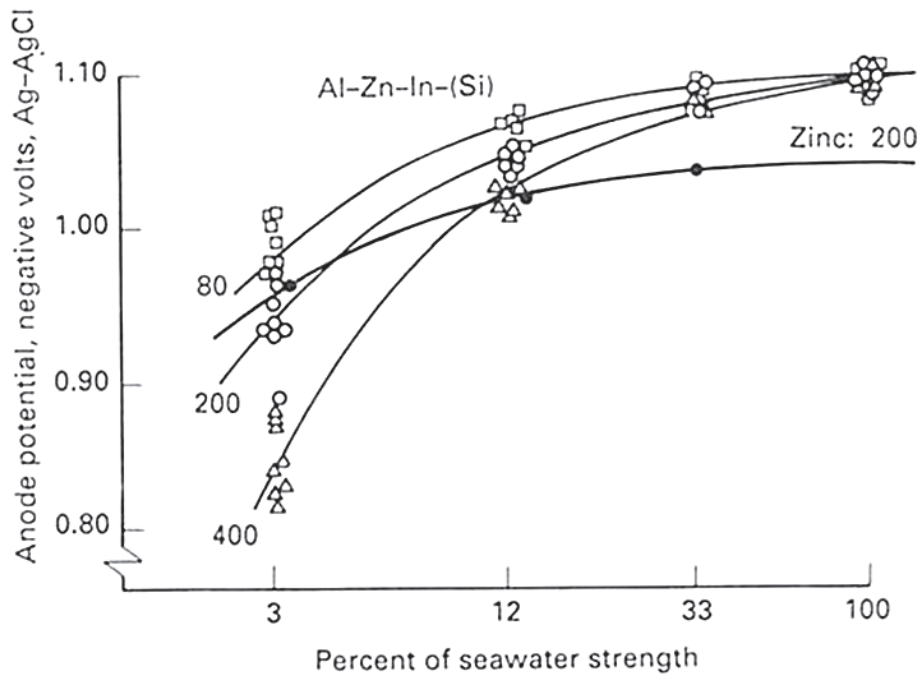
จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าโลหะกันกร่อนจะมีคุณสมบัติที่สำคัญอยู่สองประการด้วยกัน คือ anode potential และ current capacity สำหรับค่า anode potential จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการจ่ายกระแสเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโลหะเป้าหมาย เช่น ในกรณีของแมกนีเซียมกันกร่อน ที่มีค่า anode potential ต่ำที่สุด (more negative) จะมีแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน (driving voltage) สูงที่สุด ทำให้แมกนีเซียมกันกร่อน สามารถป้องกันกัดกร่อนของโลหะได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ว่าโลหะดังกล่าวจะใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการนำไฟฟ้าต่ำ เช่น ในน้ำจืดหรือในดิน ส่วนค่า current capacity จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการจ่ายกระแสที่ต่อเนื่องและคงที่ (steady delivery of current) ของโลหะกันกร่อน ดังนั้นถ้าต้องการป้องกันการกัดกร่อนที่ต่อเนื่องยาวนาน อะลูมิเนียมกันกร่อนจะเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีค่าความจุของกระแส (current capacity) สูงสุด

จะเห็นได้ว่า anode potential เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของโลหะกันกร่อนในการป้องกันการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามการเลือกใช้โลหะกันกร่อน จำเป็นต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบหลาย ๆ อย่างด้วยกัน เช่น ประสิทธิภาพ (efficiency) ความจุกระแส (current capacity) สภาพแวดล้อมที่จะนำไปใช้งาน ราคา รวมถึงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของโลหะกันกร่อน เป็นต้น ยกตัวอย่าง หากต้องการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กในแม่น้ำเจ้าพระยา แมกนีเซียมกันกร่อนจะเหมาะสมที่สุด เพราะน้ำจืดมีความต้านทานไฟฟ้าสูง การเลือกใช้งานโลหะกันกร่อนจึงพิจารณาจาก anode potential เป็นหลัก นอกจากนี้ อะลูมิเนียมกันกร่อน และสังกะสีกันกร่อน เมื่อใช้งานในน้ำจืดจะเกิดฟิล์มที่เป็นฉนวนขึ้นปกคลุมผิว ทำให้โลหะกันกร่อนทั้งสองชนิดสูญเสียคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน

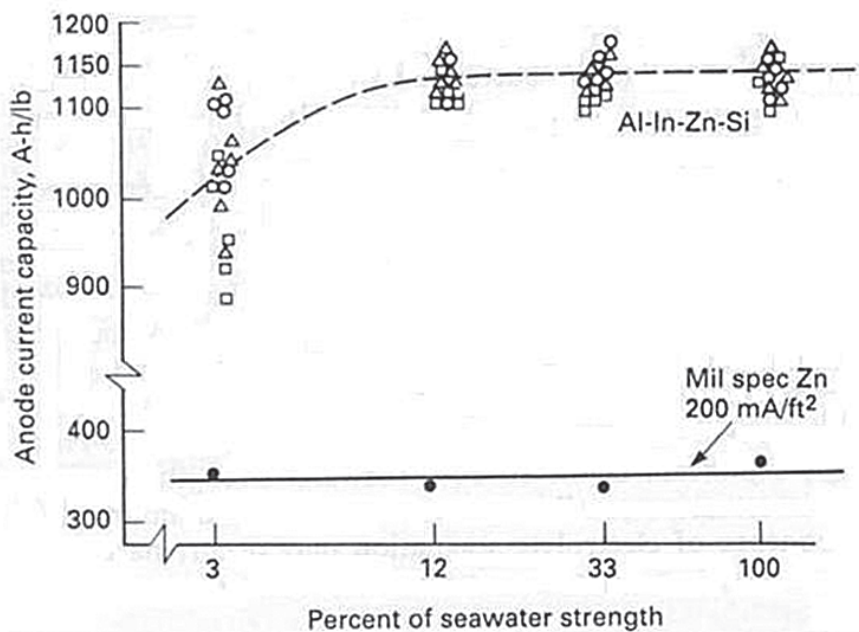
สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนในน้ำทะเล ควรพิจารณาเลือกใช้อะลูมิเนียมกันกร่อนหรือสังกะสีกันกร่อน เนื่องจากแมกนีเซียมกันกร่อนมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนประมาณ 50-60% เท่านั้น กล่าวคือ

แมกนีเซียมกันกร่อน จะถูกใช้ ในการป้องกันการกัดกร่อนเพียง 50-60% โดยน้ำหนักเท่านั้น ส่วนที่เหลือจะถูกกัดกร่อนและละลายหายไปใต้น้ำทะเล แต่ในขณะที่อะลูมิเนียมกันกร่อน และสังกะสีกันกร่อน มีประสิทธิภาพอย่างต่ำ 90% จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในน้ำทะเลมากกว่า นอกจากนี้ อะลูมิเนียมกันกร่อน และสังกะสีกันกร่อน ยังมีราคาถูกกว่าด้วย

ส่วน การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะในน้ำกร่อย นอกจากจะพิจารณาถึง anode potential และ anode current capacity แล้ว ยังจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้มข้นของน้ำทะเล (seawater strength) ด้วย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของน้ำทะเลลดลง คุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของสังกะสีกันกร่อน และอะลูมิเนียมกันกร่อน จะลดลงด้วย ดังตัวอย่างตามรูปที่ 8 และ 9 ดังนั้นการตรวจสอบระดับความเข้มข้นของน้ำทะเล (percent of seawater strength) ในพื้นที่น้ำกร่อยจึงเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาก่อนการเลือกใช้โลหะกันกร่อน สำหรับน้ำกร่อยที่มีระดับความเข้มข้นของน้ำทะเลต่ำ แมกนีเซียมกันกร่อน จะเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 8 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอะลูมิเนียมกันกร่อนและสังกะสีกันกร่อนในน้ำที่มีระดับความเข้มข้นของน้ำทะเลระดับต่างๆ, Current densities (mA/ft^2): 400 (Δ); 200 (\circ); 80 (\square) (ที่มาของภาพ: Corrosion, Vol. 2, Corrosion Control, 3Rev. ed., หน้า 10:41)



รูปที่ 9 ค่าความจุของอะลูมิเนียมกันกร่อนและสังกะสีกันกร่อนในน้ำที่มีระดับความเข้มข้นของน้ำทะเลระดับต่าง ๆ, Current densities (mA/ft^2): 400 (Δ); 200 (\circ); 80 (\square) (ที่มาของภาพ : Corrosion, Vol. 2, Corrosion Control, 3Rev. ed., หน้า 10:42)

เอกสารอ้างอิง

- [1.] D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed., New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [2.] G. Butler and H. K. C. Ison, Corrosion and its Prevention in Waters, New York, Reinhold Publishing Corporation, 1966.
- [3.] L. L. Shreir, R. A. Jarman and G. T. Burstein, Corrosion, Vol. 2, Corrosion Control, 3Rev. ed., Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd., England, 1995.
- [4.] M. G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd ed., Singapore, McGraw-Hill, Inc., 1987.
- [5.] M. L. Free, เอกสารประกอบการสอนวิชา Corrosion Engineering, Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, Utah, 2003.