

การกัดกร่อน SCC ของงานเชื่อมเหล็กออสเทนิติกสแตนเลส AISI 304

Stress Corrosion Cracking of Welded AISI 304 Austenitic Stainless Steel

มนูญ เลิศวิจิตรพันธุ์¹

1. บทนำ

การกัดกร่อน(Corrosion) คือการเสียสภาพของวัสดุเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ทำปฏิกิริยาเคมีและ/หรือไฟฟ้าเคมีกับวัสดุนั้น การเสียสภาพอาจมีลักษณะผุพัง(Corroded) เช่นการเกิดสนิมของท่อเหล็ก, การเสียคุณสมบัติ(Degradation) เช่นการเปราะของท่อ PVC ที่ตากแดดนานๆ, การสึกกร่อน(Wearing)เช่นการสึกกร่อนของรางเลื่อนแท่นใส่ที่หล่อลื่นไม่เพียงพอ

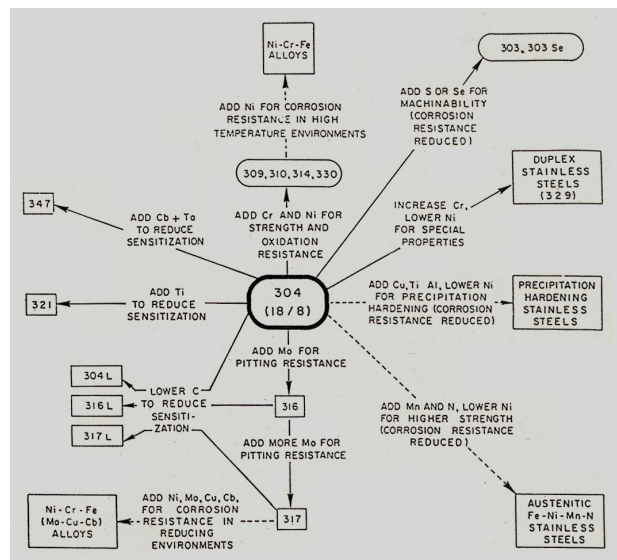
เหล็กกล้าออสเทนิติกสแตนเลส AISI304 (มาตรฐานอเมริกัน) หรือ SUS304 (มาตรฐานญี่ปุ่น) เป็นโลหะที่ใช้มากในอุตสาหกรรมแขนงต่างๆ ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการใช้งานภาคอุตสาหกรรมของเหล็กกลุ่มออสเทนิติกคือการถูกกัดกร่อนเป็นสนิมบริเวณรอยเชื่อมและการกัดกร่อน SCC (Stress Corrosion Cracking) จากสถิติพบว่า การวิบัติ(Failure) ของชิ้นงานที่ผลิตจากเหล็กกลุ่มนี้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีสาเหตุจากการกัดกร่อน SCC การกัดกร่อนลักษณะอื่นมีผลน้อยกว่ามากเนื่องจากกินพื้นที่กว้าง แต่การกัดกร่อน SCC จะกินลงลึกเป็นบริเวณเล็ก ๆ แล้วทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture)

โดยทั่วไปรอยเชื่อมที่ดีจะมีคุณลักษณะที่เทียบเท่าหรือดีกว่าโลหะงานในส่วนที่มีได้ถูกผลกระทบจากการเชื่อม แต่ในสภาพที่เกิดขึ้นจริง ผลกระทบจากการเชื่อมจะทำให้รอยเชื่อมและบริเวณขอบรอยเชื่อมที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) จะมีคุณลักษณะที่ด้อยลงเนื่องจากในกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Fusion Welding) เช่น Shielded Metal Arc Welding: SMAW, Tungsten Inert Gas: TIG, Metal Inert Gas: MIG เป็นต้น ในบริเวณรอยเชื่อมจะต้องใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงถึง 2000°C และมีความเข้มข้นสูงเป็นจุดเล็กๆเมื่อเทียบกับขนาดชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นตกค้างสูงภายหลังการเชื่อมเนื่องจากอัตราเย็นตัวที่แตกต่างกันในรอยเชื่อมกับบริเวณโดยรอบและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาบริเวณกระทบร้อนในระดับจุลภาคที่เอื้อให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายและมากขึ้น

2. เหล็กออสเทนิติกสแตนเลส

ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีเนื่องจากโครเมียมที่ผสมอยู่ถึง 20-30% จะทำให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์(Cr_2O_3) ซึ่งมีลักษณะที่แน่นทึบทนต่อปฏิกิริยาเคมีและไฟฟ้าเคมีที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ทนทานต่อการขีดข่วนและการเสียดสี เหล็กออสเทนิติกสแตนเลสมีความแข็งแรงไม่ด้อยกว่าเหล็กกล้า ผิวที่สามารถขัดให้เป็นเงามันและคงทนอยู่ได้นาน มีคุณสมบัติที่ต่ำในการขึ้นรูปทำให้

เหล็กออสเทนิติกสแตนเลสเป็นวัสดุที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมต่างๆ AISI 304(มาตรฐานอเมริกัน) SUS 304 (มาตรฐานญี่ปุ่น) จัดเป็นชนิดพื้นฐานของเหล็กออสเทนิติกสแตนเลส มีโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนท์(γ -phase) หากต้องการคุณสมบัติเพิ่มขึ้นในด้านใดก็จะเพิ่มธาตุที่เสริมคุณสมบัติหรือลดธาตุที่ก่อให้เกิดปัญหานั้นๆ เช่นเพิ่ม Mo (AISI 316) เพื่อเสริมความต้านทานการกัดกร่อน Pitting เสริม Cr และ Ni (AISI 309, 310) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนทั่วไปให้มากขึ้น ลดคาร์บอนลง (304L, 316L เป็นต้น) เพื่อลดการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) ซึ่งทำให้อลดความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบรอยเชื่อมและขอบเกรนแล้วลุกลามเป็น SCC ได้ เหล็กออสเทนิติก 304 มีคุณสมบัติที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเมื่ออยู่ในบรรยากาศหรือสภาพแวดล้อมปกติ แต่เมื่ออยู่ในบรรยากาศหรือสภาพแวดล้อมจำเพาะ เช่นในสภาพแวดล้อมที่มีอนุมูลกรดเช่น Cl^- , S^- , อนุมูลต่างๆเช่น OH^- เมื่อรวมกับความเค้นจากการผลิตเช่นการขึ้นรูป การเชื่อม ซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นในรูปของความเค้นตกค้างบวกกับความเค้นจากภาระงานจะเกิดการแตกหัก SCC ขึ้นได้ง่ายและหากใช้งานที่อุณหภูมิสูงเข้าด้วยแล้ว จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการแตกหัก SCC



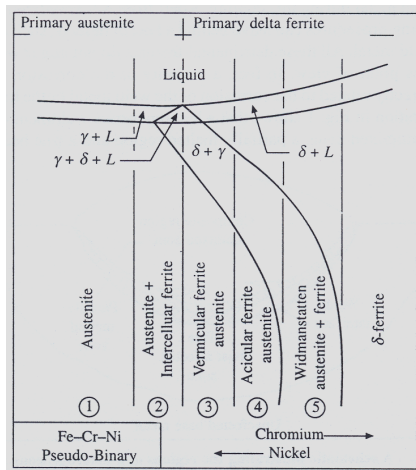
รูปที่ 1 เหล็กออสเทนิติกสแตนเลส มี AISI 304 เป็นเกรดพื้นฐาน

ได้เร็วและรุนแรงขึ้น ในประเทศไทยเหล็กออสเทนิติก 304 ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมทุกประเภทโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตยา อาหาร ปิโตรเคมี ภาชนะบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

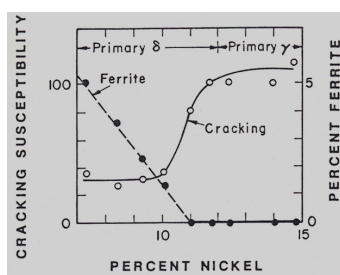
¹ อาจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

2.1 เฟสสำคัญของโลหะผสม Fe-Cr-Ni

เหล็กออสเทนิติคสแตนเลสที่ผ่านการรีดขึ้นรูป (Wrought Products) เมื่อถูกนำมาเชื่อมหลอมละลายเพื่อประกอบเป็นชิ้นงานหรือโครงสร้าง หากสัดส่วน Cr/Ni ประมาณ 1.95 จะเกิดการก่อตัวของโลหะในรอยเชื่อมเป็นเฟส δ -Ferrite + Austenite (FA mode) คือเฟส δ -Ferrite จะเกิดก่อนเฟส Austenite (เช่นรอยเชื่อมเหล็ก 304 ด้วยลวด 308 เป็นต้น) หากสัดส่วน Cr/Ni ประมาณ 1.45 จะเกิดการก่อตัวของโลหะในรอยเชื่อมเป็น Austenite + δ -Ferrite (AF mode) คือเฟส Austenite จะเกิดก่อนเฟส δ Ferrite (เช่นรอยเชื่อมเหล็ก 310 ด้วยลวด 308 เป็นต้น) โดยทั่วไปเหล็ก 304 จะมีธาตุ C ผสมอยู่ 0.08% การเชื่อมเหล็ก 304 ทั่วไปจะเชื่อมด้วยลวด 308, 316 หรือ 309 ภายในรอยเชื่อมจะไม่ค่อยเกิดปัญหาเนื่องจากส่วนผสมในลวดเชื่อมจะทำให้เกิด FA mode ขึ้น และมีเฟสเฟอร์ไรท์(δ) ในปริมาณที่มากพอคือประมาณ 8-9%



รูปที่ 2 เฟสสำคัญในกลุ่มโลหะผสม Fe-Cr-Ni ซึ่งเฟสที่เกิดขึ้นเป็นผลจากสัดส่วนของธาตุ Cr และ Ni ที่ต่างกัน



รูปที่ 3 อิทธิพลของลำดับการเกิดเฟสต่อการเกิดร้าวร้อนในเหล็กออสเทนิติก

โดยปกติเพื่อป้องกันการเกิดการร้าวร้อน (Hot-cracking) จะต้องมีความเฟสเฟอร์ไรท์(δ) ประมาณ 5-15% เนื่องจากเฟสเฟอร์ไรท์(δ) จะละลายธาตุ S และ P ได้มากและการกระจายตัวของเฟสเฟอร์ไรท์(δ) เหมือนร่างแหฝังตัวอยู่ในเฟสออสเตไนท์(γ) แต่หากเป็นเฟสออสเต

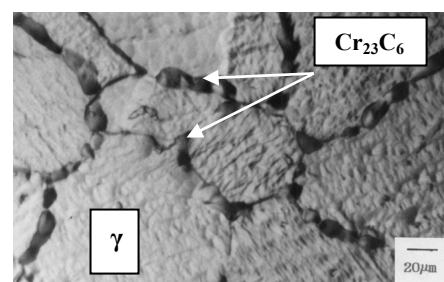
ไนท์(γ) ซึ่งละลายธาตุ S และ P ได้น้อยมากก็จะจับธาตุ S และ P ให้ไปรวมกันอยู่ตามขอบเกรนของเฟสออสเตไนท์ซึ่งเป็นพื้นที่แคบๆ จะทำให้ธาตุ S และ P มีความเข้มข้นสูงมากที่บริเวณขอบเกรน จนเกิดเป็นจุดอ่อนของบริเวณรอยเชื่อม ทั้งนี้เนื่องจากธาตุและสารประกอบระหว่างเหล็กกับ S และ P มีจุดหลอมละลาย $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมละลายของเหล็กออสเทนิติคสแตนเลส ($\sim 1450^{\circ}\text{C}$) มาก

ตารางที่ 1 การละลายได้ของ S และ P ในเฟสเฟอร์ไรท์(δ), และเฟสออสเตไนท์(γ)

	In δ Ferrite	In Austenite(γ)
S (wt pct)	0.18	0.05
P (wt pct)	2.8	0.25

2.2 การเสียหูกัมกันของเหล็กออสเทนิติคสแตนเลส

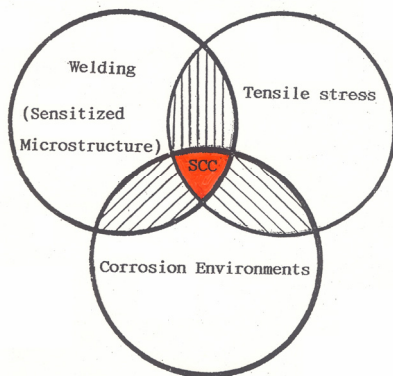
เหล็กออสเทนิติคสแตนเลส AISI 304 ที่ผ่านการรีดขึ้นรูป (Wrought Products) ผลจากการรีดจะทำให้ส่วนผสมต่างๆ ที่มีได้อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid solution) เช่น S, P หรือรวมในสภาพสารละลายแข็งที่มีจุดหลอมละลายต่ำ (เช่น FeS) จะแตกกระจายออกทำให้สามารถหลอมละลายได้ เมื่อถูกนำมาเชื่อมหลอมละลายเพื่อประกอบเป็นชิ้นงานหรือโครงสร้าง ความร้อนจากการเชื่อมจะมีอุณหภูมิและปริมาณที่มากพอให้เกิดการตกผลึกของโครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมเป็น FA mode แต่บริเวณกระแทบร้อน (HAZ) ที่ไม่เกิดการหลอมละลายจะมีอุณหภูมิที่สูงถึง 1350°C แล้วลดลงตามระยะที่ห่างจากขอบรอยเชื่อม ในบริเวณกระแทบร้อนที่มีอุณหภูมิระหว่าง $815^{\circ}\text{C} - 426^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการตกผลึกในระดับจุลภาคของโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) ชั้นที่ขอบเกรน โครเมียมคาร์ไบด์เป็นเฟสที่มีสมบัติแข็งเปราะและมีศักย์ไฟฟ้าเป็น Cathode เมื่อเทียบกับบริเวณข้างเคียงซึ่งเป็น Anode ทำให้เกิดเป็น Electrochemical cell เมื่อสัมผัสกับสาร Electrolyte จากการใช้งาน



รูปที่ 4 โครเมียมคาร์ไบด์(Cr_{23}C_6) ที่เกิดในบริเวณกระแทบร้อน (HAZ) ของรอยเชื่อม

3. การกัดกร่อน SCC

การกัดกร่อน SCC เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและ/หรือไฟฟ้าเคมีในสภาพแวดล้อมจำเพาะ (Specific ions or Substance) + แรงกลสถิต ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแรงเค้นตกค้าง (Residual stress) และ/หรือแรงเค้นที่กระทำต่อวัสดุนั้นเสียภูมิป้องกัน (Sensitized) แล้วทำให้วัสดุที่เคยมีความเหนียวมากกลายเป็นเปราะ



รูปที่ 5 ส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน SCC

เป็นเปราะในบริเวณที่ถูกกัดกร่อน SCC แล้วลุกลามจนเกิดการแตกร้าวแบบเปราะ (Brittle Fracture) เสียสภาพใช้งานไปเช่นทองแดง เมื่อนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีก๊าซหรือสารละลายของแอมโมเนีย (NH_3)



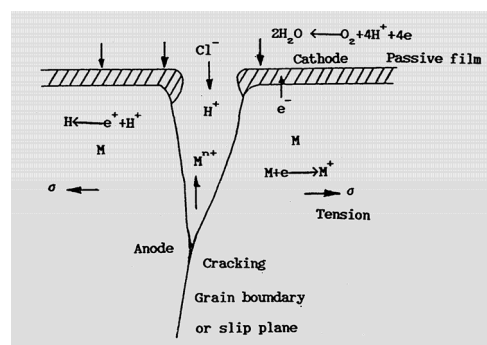
รูปที่ 6 ลักษณะรอยแตกร้าว SCC ที่เริ่มเกิดจากผิวรอยเชื่อมแล้วกัดกินลึกลงในวัสดุฐาน

ตารางที่ 2 สภาพแวดล้อมจำเพาะที่ก่อให้เกิด SCC กับเหล็กสแตนเลส

สภาพแวดล้อมจำเพาะที่ก่อให้เกิด SCC	ชนิดของโลหะ
กลุ่ม Halogen - Fluoride ions (Room Temperature: RT) - Halides in aqueous solution (hot)	- Sensitized austenitic stainless steel - Austenitic stainless steel
กลุ่ม Oxygen (S, Se, Te system) - Polythionic acids (H_2SnO_6) (RT)	- Sensitized austenitic stainless steel - Sensitized Inconel 600
กลุ่ม Nitrogen - Nitrogen, Phosphorus, Arsenic, Antimony, and Bismuth as alloying species in metal (RT)	- Stainless steels (in presence of Cl^-) - Copper alloys (in presence of aerated aqueous NH_3) accelerated cracking
กลุ่ม Oxygen (H_2O, O_2, H_2 system) - O_2 dissolved in liquid H_2O (300°C) - Hydroxides (LiOH , NaOH , KOH) $> 100^\circ\text{C}$	- Sensitized austenitic stainless steel - Carbon steel, Fe-Cr-Ni alloys (caustic cracking)

3.1 กลไกการกัดกร่อน SCC

การกัดกร่อน SCC จะเริ่มที่ผิววัสดุ ในเหล็กอสเทนิติกสแตนเลสโครเมียมออกไซด์ ซึ่งเป็นผิวปกป้อง (Passive film) ในบริเวณที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมจำเพาะซึ่งออกฤทธิ์กัดกร่อนเช่น Cl^- จะถูกทำลายลงทำให้เกิดเป็นกัลวานิกเซลล์ขึ้นโดยมีความชื้นในอากาศเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ผิวโครเมียมออกไซด์จะเป็นแคโทด บริเวณที่ผิวถูกทำลายจะเป็นแอโนด แรงเค้นสถิตจะช่วยถ่วงให้สารกัดกร่อนแทรกซึมผ่านลงไปในเนื้อวัสดุได้ง่าย จึงทำให้การกัดกร่อน SCC กินลึกลงในเนื้องานได้ อัตราการกัดกร่อนจะขึ้นกับระดับแรงเค้นและความเข้มข้นของสารกัดกร่อน โดยมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

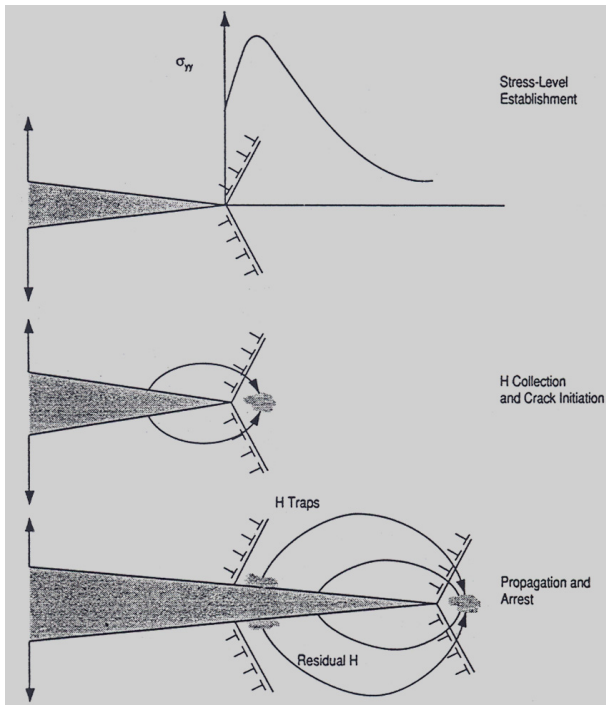


รูปที่ 7 กลไกการกัดกร่อน SCC ในเหล็กอสเทนิติกสแตนเลส



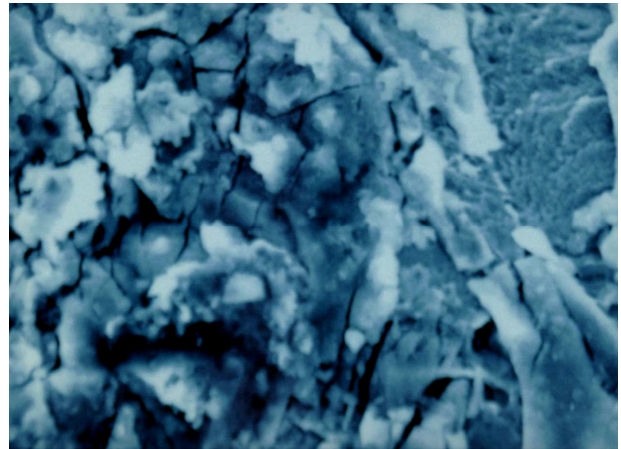
รูปที่ 8 สภาพขึ้นทดสอบเชื่อมด้วยกระบวนการ MIG ตัด U-Bend ให้เกิดความเค้น ต้มในสารละลาย $MgCl_2$ อิ่มตัว (42%) ที่ $142^\circ C$ ประมาณ 500 ชั่วโมง

ลักษณะรอยแตกที่ที่เกิดขึ้นจะเปิดปากสู่ผิวงาน สารกัดกร่อนจำเพาะจะแทรกซึมลึกลงในเนื้อวัสดุที่อยู่ภายใต้ความเค้นดึง และหากมีอะตอมไฮโดรเจนอิสระ (Atomic hydrogen) จากสภาพแวดล้อมเข้าร่วมปฏิกิริยาจะยิ่งเร่งมากขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกไปตามการแทรกซึมของสารกัดกร่อน รอยแตกที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะคล้ายรากไม้ที่ซ่อนไขลงใต้น้ำดิน ความหนาแน่นของรอยแตกจะขึ้นกับความรุนแรงของการกัดกร่อนและความเค้นที่กระทำในขณะเกิดกัดกร่อน



รูปที่ 9 กลไกการแพร่ของรอยแตก SCC

หากวัสดุได้ถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมจำเพาะแล้วจะไม่เกิดการกัดกร่อน SCC ขึ้น เช่น เหล็กอสเทนนิติกสแตนเลสถูกนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มี NH_3 จะไม่เกิดการแตก SCC จากการศึกษาใน



รูปที่ 10 ภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscope: SEM แสดง ผิวรอยแตก (Fracture surface) ของ SUS 304 ที่เกิดการกัดกร่อน SCC (ขึ้นงานในรูปที่ 8) จะปรากฏมีรอยแตกเล็กๆ ที่ผิวรอยแตกนี้คือรอยแตกที่เป็นแขนงย่อยที่เหมือนรากฝอยของต้นไม้ที่ซ่อนลึกในดิน

อดีตการกัดกร่อน SCC มักจะเกิดกับโลหะผสมแต่ไม่พบเกิดกับโลหะบริสุทธิ์ การก่อตัวของการกัดกร่อน SCC ก่อตัวได้เร็วหรือช้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสภาพแวดล้อม + ความเค้น หากสภาพแวดล้อมเบาบาง (ประมาณ 10 ppm) อาจใช้เวลาก่อตัวนานเป็นปี แต่การแพร่ขยาย ตัวจะใช้เวลานั้นมากจนอาจเกิดความวิตกกังวลได้ ปรากฏการณ์ที่วัสดุเกิดการแตก SCC ในบรรยากาศที่กัดกร่อนจำเพาะ โดยมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งนั้น การระบุชื่อกลไกมีกระบวนชื่อของสภาพแวดล้อมนั้นเพื่อต่อการสื่อสารและศึกษา เช่น

- **Chloride cracking** หมายถึงการแตก SCC จากการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมของคลอไรด์ (Cl^-)

- **Caustic cracking** หมายถึงการเกิดการแตก SCC ในสภาพแวดล้อมของ Caustic soda (เช่น $NaOH$)

- **Oxygen cracking** หมายถึงการเกิดการแตก SCC จากการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนละลายอยู่สูง

- **Sulfide cracking** หมายถึงการเกิดการแตก SCC จากกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีซัลไฟด์ ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในรูปของก๊าซไฮโดรเจน (H_2S)

4. การทดสอบการกัดกร่อน SCC ต่อเหล็กออสเทนิติก

กว่า 100 ปี ที่ปัญหาจากสภาพแวดล้อมทำให้เกิดการวิบัติในลักษณะแตกเปราะทั้งที่โลหะชนิดนี้จะเหนียวมาก ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดความพิศวง สงสัย แต่ก็เป็นเสน่ห์ที่น่าหลงใหลสำหรับนักศึกษาวิจัย ปัจจุบันได้มีวิธีทดสอบมาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไป ดังนี้

4.1 ASTM G36

ด้วยการต้มชิ้นทดสอบ(Specimen) ในสารละลายอิ่มตัวของ $MgCl_2$ ความเข้มข้นประมาณ 45% โดยน้ำหนัก มีจุดเดือดที่ $155 \pm 10^\circ C$ เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 1000 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง การทดลองนี้เหมาะกับเหล็กออสเทนิติก นิกเกิลและโลหะผสมนิกเกิล ทั้งในรูปของงานรีด(Wrought) งานหล่อ(Cast) และงานเชื่อม (Weld)



รูปที่ 11 การทดสอบต้มชิ้นงาน U-bend ในสารละลาย $MgCl_2$ ที่ $155 \pm 10^\circ C$

4.2 ASTM G35

ด้วยการทดสอบชิ้นทดสอบในบรรยากาศแวดล้อมของกรด Polythionic ($H_2S_nO_6$) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ H_2S ในอุตสาหกรรมเปโตรเคมี มักเท่ากับ 2 หรือ 5 ที่อุณหภูมิห้อง การทดลองนี้เหมาะกับเหล็กออสเทนิติก เหล็กผสมสูงที่มีนิกเกิลและโครเมียมเป็นหลักเพื่อวัดความทนทานต่อการกัดกร่อน SCC ชนิดเลาะตามขอบเกรน (Intergranular SCC)

4.3 TM-01-77

มาตรฐานการทดสอบของ National Association of Corrosion Engineers: NACE ด้วยการทดสอบชิ้นทดสอบในสภาพแวดล้อมของ H_2S และชิ้นทดสอบมีความเค้นคงที่

4.4 ASTM G85 The Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Test และ ASTM B368 The Copper-accelerated Acetic Salt Spray (Fog) Test: CASS Test

การทดสอบในไอหมอกเกลือโซเดียมคลอไรด์ทั้งสองชนิดจะใช้ตู้ทดสอบเหมือนกัน จะต่างกันที่ชนิดของสารละลายเท่านั้น การทดสอบนี้ใช้ทดสอบความสามารถในการป้องกันของผิว Passive ทั้งชนิด

สารอินทรีย์และอนินทรีย์ การทดสอบนี้จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบ Pitting ก่อนแล้วจึงลุกลามเป็นการกัดกร่อน SCC ต่อไป



รูปที่ 12 ภายในตู้ทดสอบชิ้นงาน C-ring ในตู้ทดสอบในไอหมอกเกลือ NaCl (ขณะเปิดตู้ทดสอบ)

5. การป้องกันการกัดกร่อน SCC

การกัดกร่อน SCC อาจเกิดจากหลายสาเหตุและหลายกลไก ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนเราจึงอาจใช้เพียงวิธีเดียวหรือหลายวิธีร่วมกันเพื่อให้ครอบคลุมถึงสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

5.1 ลดระดับความเค้นให้ต่ำกว่าค่าวิกฤต (Threshold Stress)

ด้วยการอบอ่อนชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างอยู่หรือลดความเค้นในชิ้นงานด้วยการเพิ่มความหนาของภาคตัดที่รับความเค้น หรือลดภาระความเค้นลง โดยทั่วไปเหล็กกล้าคาร์บอนจะอบที่อุณหภูมิประมาณ $1100-1200^\circ F (550-650^\circ C)$ เหล็กออสเทนิติกสแตนเลส จะอบที่อุณหภูมิประมาณ $1500-1700^\circ F (816-927^\circ C)$

5.2 ลดความวิกฤตของสภาวะแวดล้อมให้ต่ำลง

ด้วยการระบายก๊าซและ/หรือสารละลายกัดกร่อนออกจากบริเวณป้องกัน, ลดความเข้มข้นของอนุภาคกัดกร่อนเช่นคลอไรด์(Cl^-) ซัลไฟด์(S^-) หรือใช้การ กลั่นเพื่อแยกสารกัดกร่อนออกจากสารละลายใช้งาน

5.3 เปลี่ยนชนิดของโลหะผสมที่ใช้อย่าให้ตรงกับสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อน

ในสภาพแวดล้อมที่เป็นคู่กัดกร่อนกับโลหะชนิดหนึ่งอาจไม่เกิดการกัดกร่อน SCC กับโลหะอีกชนิดหนึ่งได้เช่นการเปลี่ยนจากการใช้เหล็กสแตนเลส AISI 304 เป็น Inconel ซึ่งเป็นโลหะนิกเกิลผสม(Nickel alloy) จะทำให้สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่คลอไรด์ได้ทนทานต่อการกัดกร่อน SCC ได้ดีกว่ามาก หรือในบางครั้งการเปลี่ยนจากการใช้เหล็กสแตนเลส AISI 304 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนก็จะทนทานต่อการกัดกร่อน SCC ได้ดีกว่า เช่นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(Heat Exchanger) ที่ใช้น้ำทะเลหรือน้ำกร่อยเป็นตัวกลางถ่ายความร้อนออก

การใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะทนทานต่อการใช้งานได้ดีกว่าเหล็ก
ออสเทนิติกสแตนเลส 304

5.4 ใช้การป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic Protection)

ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแทนชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วแอโนด (Anode) ทำให้วัสดุงานเปลี่ยนสภาพเป็นขั้วแคโทด (Cathode) จึงไม่ถูกกัดกร่อน การใช้การป้องกันแบบแคโทดิกต้องระมัดระวังผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าในระบบแคโทดิกมากเกินไปจะทำให้เกิดการเปราะกรอบเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Embrittlement) ได้

5.5 ด้วยการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitor)

การเลือกใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนที่เหมาะสมเช่นสารฟอสเฟต สารอินทรีย์ สำหรับสารอินทรีย์จะลดความรุนแรงของการกัดกร่อน SCC ในสภาพแวดล้อมกัดกร่อนอ่อนๆได้ดี การใช้สารยับยั้งทุกชนิดต้องเติมให้มีผลอย่างเพียงพอที่จะป้องกันการกัดกร่อนในรูปแบบต่างๆ

โดยเฉพาะการกัดกร่อน Pitting ซึ่งมีลักษณะเป็นรูเข็มลึกลงในเนื้องาน จะทำให้พื้นที่ภาคตัดเสถียร ความเค้นจะสูงขึ้นสูง

5.6 การเคลือบผิว (Coating)

เป็นการป้องกันผิวโลหะให้พ้นจากสภาพแวดล้อมกัดกร่อน เช่นการเคลือบผิวท่อน้ำต่างๆ โดยเฉพาะก่อนการหุ้มฉนวนทับ การเคลือบผิวจะป้องกันการกัดกร่อนชนิดต่างๆได้ดีกว่าการหุ้มฉนวนทับไปบนผิวเปลือยของวัสดุเลย

5.7 การพ่นอัดผิว (Shot Peening)

เป็นกรรมวิธีสร้างความเค้นอัด (Compressive Stress) เพื่อต้านความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่ผิวโลหะงาน แรงอัดกระทบของเม็ดเหล็กขนาดเล็กจะทำให้ผิววัสดุงานถูกอัดยุบตัวลง (ประมาณ 1/1000 นิ้ว) ตัวอย่างเช่นภาชนะที่ทำจากวัสดุ AISI 316 ใช้กับสารเคมีที่มีคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 60°C ได้เกิดการแตกร้าวเสียหายจากการกัดกร่อน SCC เมื่อใช้งานได้ประมาณปีเศษ แต่เมื่อเปลี่ยนภาชนะใหม่ซึ่งทำจากวัสดุ AISI 316 เหมือนเดิม แต่ได้ทำการพ่นอัดผิวภาชนะปรากฏว่าใช้งานไปถึง 4 เดือนก็ยังไม่ปรากฏการแตกร้าวแต่การพ่นอัดผิวที่เกิดการแตกร้าวแล้วจะไม่เกิดผลในการป้องกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] มนูญ เลิศวิจิตรพันธ์, การกัดกร่อน SCC ของงานเชื่อมเหล็กออสเทนิติกสแตนเลส SUS 304, วิทยานิพนธ์
- [2] Sedriks A.J., 1979, Corrosion of Stainless Steels, New York, John Wiley and Sons, pp139-173
- [3] Fontana M.G., 1987, Corrosion Engineering, McGraw-Hill, pp63-191
- [4] American Society for Metals, 1987, Metals Handbook Volume 13, Ohio, ASM, pp145-189
- [5] Yoshihiko Mukai and Masato Murata, April 1984, "Mechanism of Stress Corrosion Cracking in SUS 304 Duplex Weld Metal" Tokyo, Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 15 No.1 pp. 57-63
- [6] R.N. Parkins, Current Understanding of Stress Corrosion Cracking, Journal of Metal, December 1992