

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามคำศัพท์สำคัญ

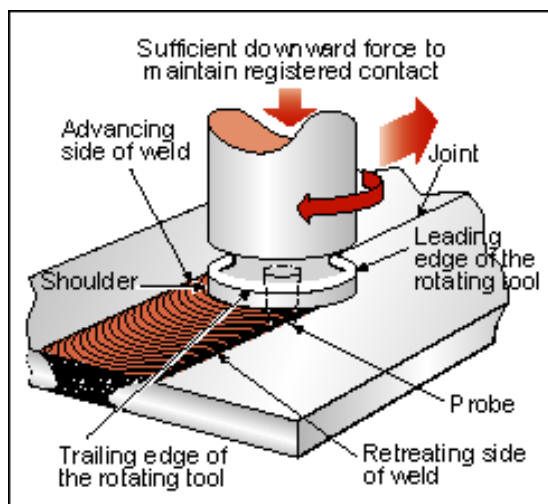
2.1.1 กระบวนการเชื่อม (Welding Processes) คือการประสานโลหะสองชนิดเข้าด้วยกันโดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนถึงจุดการหลอมละลาย แล้วใช้เนื้อโลหะชิ้นงานเป็นตัวประสานเข้าด้วยกัน หรือจะเติมโลหะโดยใช้ลวดเชื่อมซึ่งเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เป็นตัวประสานในขณะที่ชิ้นงานกำลังหลอมละลาย ความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานอาจเป็นพลังงานได้จากพลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานกลขึ้นอยู่กับวิธีการเชื่อมแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป ซึ่งการเชื่อมด้วยความเสียดทานแกนหมุน เป็นการใช้พลังงานกลให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน การเชื่อมสามารถจำแนกเป็น 2 ชนิด คือ

2.1.2 การเชื่อมแบบหลอมเหลว (Fusion Welding) เป็นการประสานโลหะให้รอยต่อเกิดเป็นแนวเชื่อมติดเป็นเนื้อเดียวกันตลอดแนวประสานโดยใช้ความร้อนและลวดเชื่อมเติมเนื้อประสาน การเชื่อมอาจใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อประสานหรือไม่ใช้ก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกชนิดการเชื่อมด้วยเกณฑ์การจำแนกอื่นได้ เช่น ลักษณะของพลังงานความร้อนที่นำมาใช้เชื่อม ลักษณะของแก๊สที่ปกคลุมบริเวณจุดที่ทำการเชื่อม เป็นต้น

2.1.3 การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Non Fusion Welding) เป็นการประสานโลหะให้ติดกันโดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เช่น การเชื่อมจุด การเชื่อมจากเปลวแก๊ส การเชื่อมอัดเย็น และการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) เป็นต้น

2.2 การเชื่อมการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding)

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็งที่ค้นพบในสหภาพโซเวียตแต่มีการใช้งานในประเทศอังกฤษและสหรัฐอเมริกา เป็นวิธีการเชื่อมที่ใช้การหมุนด้วยความเร็วสูงกับแรงดัน ทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากความเสียดทาน ซึ่งใช้เชื่อมงานที่มีขนาดใกล้เคียงกันและรูปร่างคล้ายกัน เพราะค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์และเครื่องมือสูงมาก คาดว่าจะนิยมนำมาใช้ในอนาคต



รูปที่ 2.1 แสดงการเชื่อมเสียดทานหมุนวน (ที่มา: <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-friction-stir-welding>; 25 กันยายน 2554)

2.2.1 ความเสียดทาน (Friction) คือแรงต้านทานที่เกิดขึ้นจากการเสียดสี เมื่อสารกำลังจะเคลื่อนที่หรือขณะเคลื่อนที่ จะเกิดผิวของแข็งเสียดสีกับผิวของแข็ง หรือผิวของแข็งสัมผัสกับของเหลว แต่สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแรงเสียดทานที่เกิดจากผิวของแข็งเสียดสีกับผิวของแข็งเท่านั้น แรงเสียดทานมีลักษณะอยู่ 2 ชนิดดังนี้ แรงเสียดทานสถิตย์ (Static Friction) และแรงเสียดทานจลน์ (Kinetic Friction)

2.2.2 กระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนวน (Friction Stir Welding: FSW) คือการเชื่อมความเสียดทานแบบหนึ่งที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบเชื่อมแบบต่อชน (Butt joint) โดยหลังจากนี้จะใช้คำนี้หรือจะใช้ตัวย่อภาษาอังกฤษ FSW ในการเขียนและอธิบายเนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.2.3 แกนหมุนวน (Pin Tool) คือเครื่องมือที่ใช้การเชื่อมความเสียดทานหมุนวนโดยประกอบด้วยบ่าให้ความร้อน (Shoulder) และสลักแกนหมุน (Pin) ซึ่งจะมีหน้าที่ให้ความร้อนกับการกวนเนื้อวัสดุที่ทำการเชื่อม

2.2.4 บ่าแกนหมุน (Shoulder) คือส่วนที่หมุนสัมผัสกับผิวชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนจากความเสียดทานจลน์ที่ผิวและส่งผ่านความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน

2.2.5 สลักแกนหมุน (Pin) คือส่วนที่หมุนอยู่ภายในชิ้นงานซึ่งจะทำหน้าที่ในการกวนเนื้อวัสดุที่มีสภาพเป็นพลาสติกให้เกิดการประสานหรือเชื่อมติดกัน

2.2.6 Retreating Side คือด้านที่วัสดุถูกดึงเนื้อเข้าไปเติมในด้าน Advancing และในการที่กำหนดทิศทาง จะดูจากทิศทางการเดินแนวเชื่อมเทียบกับทิศทางการหมุน โดยด้าน Retreating จะอยู่ด้านขวามือของทิศทางในการเดินแนวเชื่อมเมื่อหัวกดเชื่อมหมุนตามเข็มนาฬิกา

2.2.7 Advancing side คือด้านที่ได้รับการเติมเนื้อวัสดุจากด้าน Retreating โดยในการกำหนดทิศทางจะดูจากทิศทางการเดินแนวเชื่อมเทียบกับทิศทางการหมุน โดยด้าน Advancing จะอยู่ด้านซ้ายมือของทิศทางในการเดินแนวเชื่อมเมื่อหัวกดเชื่อมหมุนตามเข็มนาฬิกา

2.2.8 Heat Affected Zone คือพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนในการเชื่อมทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไปหรือใช้ตัวย่อภาษาอังกฤษ HAZ

2.2.9 Thermo Mechanically Affected Zone คือพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเชื่อม

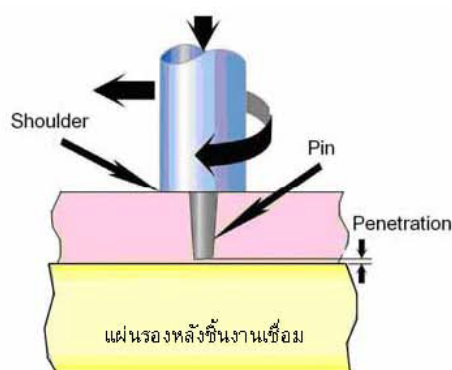
2.3 รูปทรงของแกนหมุนกวน

รูปร่างของแกนหมุนกวนมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการพัฒนาด้านการผลิต ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการไหลตัวของวัสดุและการควบคุมอัตราการเดินเชื่อม แกนหมุนกวนมีส่วนประกอบสำคัญอันได้แก่ บ่าแกนหมุนและสลักแกนหมุน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2-3 โดยแกนหมุนกวนจะมีหน้าที่กระทำแก่งานอยู่สองประการคือ การทำให้เกิดความร้อนและวัสดุเกิดการไหลตัว

1) การทำให้เกิดความร้อน โดยเริ่มแรกแกนหมุนกวนกดจมลงไปในเนื้อของวัสดุทำให้เกิดความร้อนขึ้นซึ่งมาจากการเสียดสีกันระหว่างแกนหมุนกวนกับผิวชิ้นงานที่ทำการเชื่อม ความร้อนจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง และสลักแกนหมุนกดลึกลงไปจนบ่าแกนหมุนสัมผัสกับผิวชิ้นงานซึ่งทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างบ่าแกนหมุนกับชิ้นงานเป็นผลทำให้ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ความร้อนที่บ่าจะส่งถ่ายไปยังสลักแกนหมุนกวนและส่งถ่ายไปยังเนื้อชิ้นงานรอบ ๆ แกนหมุนกวน โดยปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างขนาดของสลักแกนหมุนกับบ่าแกนหมุน ซึ่งตัวบ่าเองนั้นจะเป็นตัวจำกัดปริมาณความร้อนของวัสดุที่เกิดขึ้นในระหว่างที่เกิดการเสียดสี

2) วัสดุเกิดการไหลตัว เมื่อวัสดุได้รับความร้อนถึงจุดที่ทำให้วัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกในช่วงนี้สลักแกนหมุนจะกวนเนื้อวัสดุรอบแกนหมุนและวัสดุรอบ ๆ แกนหมุนจะเกิดการเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการหมุนจนเกิดการประสานติดกันของเนื้อวัสดุ ซึ่งในการออกแบบแกนหมุนจะมีผลต่อการเกิดโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุ รูปร่างของแกนหมุนนี้มีการพัฒนามาใช้สำหรับการไหลตัวของวัสดุ

2.3.1 พารามิเตอร์ในการเชื่อมในการเชื่อมจะมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเชื่อมอันได้แก่ ความเร็วรอบรอบแกนหมุน(Rotational Speed: S) ในการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน มีการใช้รอบการหมุนแบบตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) และแบบทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clockwise) ความเร็วเดินเชื่อม(Travel welding speed : F) การเอียงหัวแกนหมุน (Tool tilt) ในความเร็วรอบแกนหมุน มีผลต่อการหมุนกวนในการประสานติดของวัสดุรอบๆแกนหมุน และการเคลื่อนที่ของแกนหมุนกวนในการกวนวัสดุจากด้านหน้าไปยังด้านหลังของสลักแกนหมุนจนสิ้นสุดการเชื่อม ความเร็วรอบที่สูงจะมีผลต่อความร้อนที่สูงขึ้นด้วยเพราะว่าเกิดการเสียดสีที่มาก ส่งผลต่อการกวนในการเชื่อมประสานกันของเนื้อวัสดุซึ่งจะเป็นผลดี แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการบันทึกไว้เกี่ยวกับการเสียดสีกันแกนหมุนกวนกับชิ้นงานที่ควบคุมในการเกิดความร้อน นอกจากความเร็วรอบแกนหมุน และความเร็วเดินเชื่อมแล้ว ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมที่สำคัญอีกนั่นคือ มุมเอียงของแกนหัวเชื่อมความลึกของสลักแกนหมุน และระยะการหลอมละลายลึกจากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยในต่างประเทศโดยส่วนใหญ่นิยมให้ระยะห่างระหว่างแผ่นรองหลังกับผิวปลายหน้าตัดจะมีระยะอยู่ระหว่างช่วง 0.1 ถึง 0.3 มิลลิเมตร และมักจะเรียกระยะนี้ว่าระยะการหลอมละลายลึกดังแสดงในรูปที่ 2.2 แผ่นรองหลังชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชิ้นงานกับความยาวของสลักแกนหมุน

2.3.2 เครื่องักัดที่ใช้ในการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน สามารถใช้ได้ทั้งเครื่องจักรที่เป็นระบบทำงานแบบทั่วไป (Conventional Milling) หรือเป็นระบบการทำงานแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC Milling) ก็ได้โดยเน้นที่ความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องและระบบส่งกำลังที่สามารถให้แรงบิดที่สูง โดยระบบส่งกำลังที่เหมาะสมควรเป็นระบบเฟือง ส่วนระบบสายพานไม่นิยมใช้เนื่องจากให้แรงบิดน้อย และอาจเกิดการลื่นไถลของสายพานขณะทำการเชื่อมได้

2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยการดึง (Tensile Test)

การทดสอบโดยการดึงเป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุดในทุกวิธีของการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นคุณสมบัติทางกลด้านพื้นฐานพอสมควรเช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว และความเปราะ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบ การเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในด้านนั้นต่อไป โดยทั่วไปในการทดสอบก็ต้องใช้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอถึงขั้นทดสอบให้ยืดออกและขาดในที่สุด สำหรับการทดสอบด้วยการดึงนั้น นิยมทดสอบกับวัสดุที่มีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวมากกว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านความเปราะ เพราะวัสดุที่มีความเหนียวจะมีลักษณะการใช้งานที่มากกว่า ส่วนเครื่องที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงเรียกว่าเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) เครื่องมือชนิดนี้จะทำการให้แรงดึงแก่ชิ้นงานในแนวแกนและวัดความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เครื่องทดสอบเอนกประสงค์เป็นเครื่องมือทดสอบสมบัติทางกลที่นิยมอย่างแพร่หลายที่สุด เพราะสามารถนำไปทดสอบสมบัติทางกลประเภทอื่นได้อีกนอกเหนือจากการทดสอบแรงดึง เช่น การทดสอบแรงอัด การทดสอบแรงบิด การทดสอบแรงเฉือน และการทดสอบแรงอัด เป็นต้น

2.4.1 ประเภทของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์สามารถแบ่งออกเป็นได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามหลักการของการให้แรงแก่เครื่องทดสอบ ได้แก่

1) เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่ขับเคลื่อนด้วยแรงดันไฮดรอลิกในเครื่องทดสอบประเภทนี้จะใช้แรงดันน้ำมันจากถังพักน้ำมันไฮดรอลิก เพื่อมาขับเคลื่อนหัวจับให้เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง เป็นผลให้เกิดแรงดึงในชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากแรงดันในการขับเคลื่อนมาจากแรงดันไฮดรอลิก จึงสามารถให้แรงดันที่สูงและการเปลี่ยนขนาดของแรงดันที่รวดเร็วขึ้น สามารถกระทำได้ทำให้สามารถทดสอบแรงดึงได้ที่แรงดึงสูงๆ โดยอาจมีค่าแรงดึงสูงสุดได้ถึง 500 ตัน โดยทั่วไปนิยมใช้เครื่องทดสอบประเภทนี้กับการทดสอบงานประเภทพลวัต (Dynamic test) หรือการทดสอบที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงแรงดึงอย่างรวดเร็ว เครื่องทดสอบประเภทนี้จะต้องมีเสาต้านข้าง (Column) ที่แข็งแรงมาก

2) เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่ขับเคลื่อนด้วยการเคลื่อนที่ของสกรู สำหรับเครื่องทดสอบประเภทนี้ใช้การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีแรงบิดสูง (High-torque motor) ที่ส่งแรงผ่านเฟืองและสายพานในตัวเครื่องให้ผ่านไปที่ระบบสกรูเพื่อมาขับเคลื่อนหัวจับเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง ด้วยอัตราเร็วคงที่ส่งผลให้เกิดแรงดึงในชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนจึงทำให้มีแรงดึงที่ไม่สูงมากและการเปลี่ยนขนาดของแรงดึงก็ไม่รวดเร็วเมื่อเทียบกับการขับเคลื่อนที่มาจากแรงดันน้ำมัน โดยทั่วไปนิยมใช้เครื่องทดสอบประเภทนี้กับการทดสอบชิ้นงานที่

รับแรงกระทำแบบสถิต (Static) หรือการทดสอบที่ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงแรงดึงอย่างรวดเร็ว เครื่องทดสอบประเภทนี้จะต้องมีสกรูขับเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องทดสอบแรงดึง(ที่มา: <http://www.rockwelltestingaids.com/computerized-universal-testing-machine-187062.html>; 25 กันยายน 2554)

2.4.2 ความเค้น (Stress) คือลักษณะของแรงดันที่อยู่ภายในของโลหะ ที่มีความพยายามในการต้านทานต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุนั้นๆ จะหาค่าได้จากแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงที่กระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายในโดยทั่วไป ความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

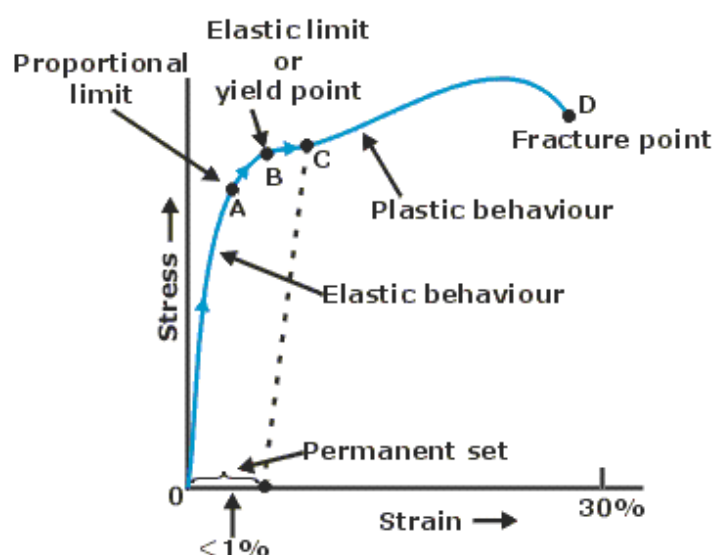
- 1) ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน
- 2) ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้น เมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง
- 3) ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้น เมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้อะตอมของวัสดุเคลื่อนที่ออกจากกันจะมีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน

2.4.3 ความเครียด (Strain) คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกกระทำ การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอะตอมภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1) การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด และสปริง ถ้าเราดึงวัสดุแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

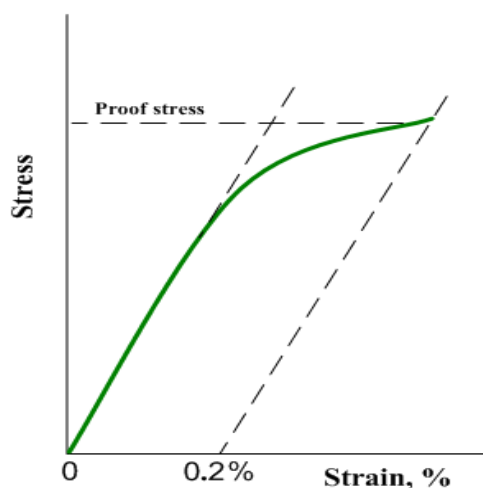
2.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้นความเครียด ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและค่าความเครียดในแกนนอนดังแสดงในรูปที่ 2.4



A typical stress-strain curve for a ductile metal

รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด(ที่มา:<http://www.tutorvista.com/content/physics/physics-iii/solids-and-fluids/elasticity-modulus.php>)

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้นความเครียดเราพบว่าเมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออกจนถึงจุดๆหนึ่ง ในช่วงนี้ที่กราฟมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่ กราฟเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's Law) คือความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดที่จุด A เรียกว่าจุดพิภักสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิภักสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) คือเมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม และเมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปอีกจนเกินพิภักสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรงกราฟ วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆหนึ่งนั่นคือจุด B เรียกว่าจุดพิภักการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งที่จุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Permanent Deformation) กับวัสดุนั้นแต่เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) และที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ที่จุดนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) ซึ่งค่านี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราจะใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ในวัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.20% แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นโค้งของกราฟค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การหาค่าความเค้นพิสูจน์ (ที่มา :http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tensile_test_and_stress-strain_diagram)

2.5 การทดสอบโครงสร้างมหภาค (Macro Testing)

มีจุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาความไม่สม่ำเสมอของเนื้อภายในและสิ่งบกพร่องเกิดความเค้นขัดขึ้นและสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น รอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม การเกิดฟองอากาศ สลักฝังใน ความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อม และในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลความร้อน เป็นต้น ในการทดสอบจะต้องจัดเตรียมชิ้นงานดังต่อไปนี้

2.5.1 การเตรียมผิวชิ้นทดสอบในการตัดผิวชิ้นงานต้องมีขนาดที่เหมาะสม ภาคตัดขวางจะอยู่บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ในการจัดเตรียมนั้นจะต้องไม่ทำงานให้เกิดความร้อนที่จะทำให้ โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงจากนั้นทำการปรับแต่งผิวให้เรียบด้วยการกลึงหรือทำการเจียรในที่ผิวของชิ้นงาน และถ้างานมีขนาดเล็กยากแก่การจับในการเตรียมผิวชิ้นงานนั้น จะต้องทำการขึ้นตัวเรือน (Mounting) คือการฝังชิ้นงานลงในเรซินโดยมีจุดประสงค์ เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เป็นระนาบ และมีขนาดที่พอเหมาะกับการจับยึดได้สะดวก ทั้งยังรักษาขอบของชิ้นงานไม่ให้เกิดลักษณะโค้งมน ก่อนทำการขึ้นเรือนควรลบเหลี่ยมคม และมุมแหลมของชิ้นงานอยู่เสมอ ดังแสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนด้วยสารเคมีชนิดต่างๆแสดงในรูปที่ 2-9 จากนั้นทำการตัดผิวชิ้นงานแบบหยาบด้วยกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์จนถึงความละเอียดของเม็ดขัด 800 กริต

2.5.2 การกักรดการทดสอบโครงสร้างภาคของเนื้อโลหะนั้น ในแต่ละชนิดจะต้องมีความแตกต่างกันในการใช้กรด เนื่องด้วยโลหะมีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาต่อกรดจึงมีความแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้กรดให้เหมาะสมกับโลหะงานนั้นๆ สำหรับที่ทำการทดสอบโครงสร้างภาคของอลูมิเนียมเจือ การใช้กรดกัดจะต้องมีผสมของ น้ำกลั่น และกรดชนิดต่างๆที่ประกอบด้วยชนิด กรดไฮโดรฟลูอริก(HF) กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และเมื่อทำการกัดกรดจนมองเห็น โครงสร้างตามต้องการในเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานล้างกรดออกด้วยน้ำที่สะอาด และเช็ดด้วยเอทานอล และเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน



รูปที่ 2.6 ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นเรือนด้วยสารขึ้นเรือนชนิดต่างๆ

2.6 อลูมิเนียม (Aluminium)

สัญลักษณ์คือ Al ความหนาแน่น 2.7 กก./ดม³. จุดหลอมเหลว 658 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงดึงของอลูมิเนียมหล่อ 9-12Kp/mm² (9-12 กก./ตร.มม.) ความแข็งแรงดึงของอลูมิเนียมอบเหนียว 7Kp/mm² (7 กก./ตร.มม.) ความแข็งแรงดึงรีดแข็ง 13-20 Kp/mm² (13-20 กก./ตร.มม.) อัตรายืดตัว 3-35%

2.6.1 คุณสมบัติของอลูมิเนียม ลักษณะภายนอกของอลูมิเนียมคือมีสีเงิน มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนัก (Strength-to-Weight Ratio) สูงมีความเหนียวจุดหลอมเหลวต่ำหล่อหลอมได้ง่ายอลูมิเนียมบริสุทธิ์ เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดออกไซด์ของอลูมิเนียมขึ้นเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide) เคลือบอยู่เป็นผิวบางๆทำให้อลูมิเนียมนั้นทนต่อบรรยากาศ ไม่ถูกกัดกร่อน คุณสมบัติการนำไฟฟ้าประมาณ 2/3 เท่าของทองแดง แต่อลูมิเนียมเบา กว่าทองแดง สายเคเบิลแรงสูงจึงนิยมใช้อลูมิเนียมเป็นตัวนำความร้อนได้ดีและเหมาะสมอย่างยิ่งกับงานขึ้นรูป และงานปาดผิวโลหะเช่นอัด รีด ดึง ตัด เจาะ กลึง ใส กัด และนอกจากนี้อลูมิเนียมก็ยังเป็นวัสดุประสมที่มีประโยชน์มากคือใช้อลูมิเนียมเพียงเล็กน้อยผสมลงไปในโลหะประสมที่มีทองแดงแมกนีเซียส และ แมกนีเซียม จะให้ความแข็งแรงและคุณสมบัติในการกลึงให้ดีขึ้นมากอย่างประหลาดเลยทีเดียว

2.6.2 ที่มาของอลูมิเนียม อลูมิเนียมเป็นโลหะที่เกิดเป็นสารประกอบอลูมิเนียมออกไซด์ ส่วนมากพบในดินเหนียว และดินต่างๆ วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตอลูมิเนียมคือสินแร่ โบไซด์ หรือ บอกไซด์ (Bauxite) มีลักษณะเหมือนดินแดง หรือดินลูกรัง แต่มีความแข็งกว่าในสินแร่บอกไซด์จะมีดินเหนียวบริสุทธิ์ (Al₂O₃= อลูมิเนียมออกไซด์) ปนอยู่ประมาณ 55-60% เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ไม่เกิน 24% และน้ำในโมเลกุลสินแร่ประมาณ 12-31% แร่ซิลิกา (SiO₂) ไม่เกิน 4% แหล่งแร่บอกไซด์ที่สำคัญๆ คือที่ประเทศฝรั่งเศสตอนใต้ อังการี รัสเซีย สหรัฐอเมริกา มาเลเซีย อินโดนีเซีย

2.6.3 กรรมวิธีผลิตอลูมิเนียม กรรมวิธีผลิตอลูมิเนียม คือนำไปถลุงโดยนำแร่บอกไซด์ที่มีสินแร่ประมาณ 55-60% มา สกัดเอาอลูมิเนียม (Alumina) ออกเสียก่อนโดยการปั่นแร่ ให้เป็นผงละเอียด แล้วนำมาเข้าเครื่องตุ๋นกับน้ำยาโซไฟอย่างเข้มข้น (NaOH) สารจะถูกต้มในหม้อพิเศษ (Autoklaven) ซึ่งปิดสนิทภายใต้ความกดดันประมาณ 7 บรรยากาศ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสในการนี้สารที่เจือปนอยู่จะถูกแยกออกไปโดยการกรองและนำไปเผาหรืออบให้แห้งในเตาหมุนด้วยอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสให้น้ำที่ติดอยู่ในโมเลกุลของอลูมินาออกก็จะได้อลูมินาบริสุทธิ์ หรืออลูมิเนียมออกไซด์นี้จะถูกแยกด้วยไฟฟ้าในเตาไฟฟ้าอีก ในการนี้อุณหภูมิออกไซด์จะต้องอยู่ในสภาพหลอมเหลวแต่เนื่องจากจุดหลอมเหลวของสารชนิดนี้สูงมาก (2000 องศาเซลเซียส) เขาจึงต้องใช้

สารผสมที่เรียกว่ากลีโอลิท์ (Cryolite) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ประมาณ 900 องศาเซลเซียสไป เพื่อให้อลูมินาหลอมตัวได้ง่ายการแยกด้วยเตาไฟฟ้าจะใช้อุณหภูมิประมาณ 900-950 องศาเซลเซียส อลูมิเนียมจะแยกไปจับอยู่ที่ขั้วลบเป็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ สิ้นแร่บอกไซต์ 4 ตันจะให้ผลึกอลูมินาประมาณ 2 ตันและจะให้โลหะอลูมิเนียมประมาณ 1 ตัน

การถลุงอลูมิเนียมด้วยไฟฟ้าต้องใช้กำลังงานไฟฟ้ามากและต้องเป็นกำลังไฟฟ้าราคาถูกกว่ากันว่าการที่จะถลุงให้ได้อลูมิเนียม 1 ตันนั้นต้องใช้ไฟฟ้าจำนวน 18,000 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง เสียเวลาถลุงทั้งหมด 120 ชั่วโมงใช้ไฟฟ้าขนาดแรงดัน 5-6 โวลต์ ปริมาณกระแส 20,000-70,000 แอมแปร์ อลูมิเนียมในสมัยแรกๆ ที่มนุษย์รู้จักถลุงใช้มิได้ถลุงด้วยไฟฟ้า แต่ถลุงด้วยปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ ต้นทุนการผลิตก็สูงมาก ในรัชสมัยพระเจ้านโปเลียนมหาราชของฝรั่งเศส อลูมิเนียมมีราคาสูงกว่าทองคำ ภาชนะต่างๆ ที่ใช้ในพระราชวังสมัยนั้นนิยมทำด้วยอลูมิเนียม เพราะ เป็นโลหะหายาก อลูมิเนียมเพิ่งจะใช้เป็นโลหะราคาถูกเมื่อมนุษย์รู้จักถลุงด้วยไฟฟ้าเมื่อประมาณ 70 ปีมานี้เอง

2.6.4 การนำอลูมิเนียมไปใช้งาน เนื่องจากอลูมิเนียมมีความหนาแน่นน้อยน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูงจึงนำไปใช้ทำเครื่องใช้ต่างๆ เครื่องบิน ยานอวกาศ จรวด ขีปนาวุธ เป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น ท่อ แผ่นหลังคา กรอบโครงหน้าต่าง ประตูบันได ในวงการอุตสาหกรรมใช้ทำถัง ภาชนะและถังรถบรรทุกเคมีภัณฑ์และน้ำมัน ในวงการไฟฟ้าใช้ทำสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง อลูมิเนียมบริสุทธิ์ ใช้ทำแผ่นสะท้อนในแฟลชถ่ายรูป จานสะท้อนแสง ในโคมไฟ ไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนี้อลูมิเนียมยังใช้ทำโลหะผสม เช่น โลหะผสม Alnico ซึ่งเป็นโลหะแม่เหล็ก นิยมใช้ทำลำโพงวิทยุ แม่เหล็กที่ประสมอลูมิเนียมสามารถชุบผิวให้แข็งด้วยกรรมวิธีไนไตรดิง (Nitriding) แผ่นอลูมิเนียมที่รีดบาง ๆ เรียกว่าอลูมิเนียมฟอยล์ เช่น ซองห่อบุหรี่ และใช้เป็นวัสดุหีบห่อเพื่อความสวยงาม และทำคอนเดนเซอร์วิทยุ

2.6.5 ประโยชน์ของอลูมิเนียม อลูมิเนียมมีประโยชน์มากมายเห็นได้ทั่วไปนอกจากที่กล่าวมาแล้วยังใช้ทำภาชนะหุงต้ม และหีบห่อเช่น หม้อ กระทะ ถาด จาน ช้อน แก้ว ฯลฯ

2.6.6 การกัดกร่อน อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีเม็ดเกรนละเอียด คงสม่ำเสมอดีมากโอกาสที่จะถูกกัดกร่อนด้วยสาเหตุจาก เม็ดเกรนในโลหะนั้นไม่มีเลย ยิ่งกว่านั้นบนผิวจะมีฟิล์ม อลูมิเนียมออกไซด์ บางๆ ติดอยู่ซึ่งเป็นฟิล์มที่ป้องกันการกัดกร่อนจากบรรยากาศปกติจึงไม่มีเลย

2.6.7 วิธีป้องกันการกัดกร่อนอลูมิเนียมโดยวิธีเคมี เรียกว่า วิธีอีลอกซาน (Eloxal) วิธีอีลอกซาน (Eloxal) การทำอีลอกซานให้น้ำขี้งานอลูมิเนียมนั้นมาแขวนเป็นขี้บววกให้แผ่นตะกั่วเป็นขี้ลบ นำกรดกำมะถันเจือจางเป็นอิเล็กโทรไลต์ผ่านกระแสไฟตรงเข้าไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง กระแสไฟฟ้าจะทำให้ผิวขี้งานอลูมิเนียม ณ ขี้บววกเปลี่ยนเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ คือฟิล์มบางๆ ปกปิดผิวอยู่โดยรอบโดยที่ขนาดของงานยังคงเดิมและชั้นฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์จะแข็งกว่าอลูมิเนียมแท้ๆ แม้

จะหักหรืองอขึ้นงานนั้นอย่างไรฟิล์มนี้ก็จะไม่หลุดหรือแยกออกมาเลย มีความคงทนต่อการกัดกร่อนและไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า อลูมิเนียมและโลหะผสมอลูมิเนียมที่ใช้กันตามบ้านเรือนทั่วไป ได้แก่กรอบประตู หน้าต่าง มู่ลี่ ภาชนะเครื่องใช้ ตลอดจนกระทะ ตอนบนของขวดใส่นมทำด้วยแผ่นอลูมิเนียมบางๆ อลูมิเนียมมีความเหมาะสมที่ใช้ทำเป็นกระทะเพราะ นำความร้อนได้ดี และก็เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีด้วย ประกอบกับมีน้ำหนักเบาจึงนำมาใช้ประโยชน์ใช้เป็นสายไฟฟ้าจึงพาดไปตามเสาไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีและแพร่หลายมาก

2.6.8 อลูมิเนียมประสม (Aluminums Alloys) อลูมิเนียมประสมส่วนมากจะได้ออกมาจากการเติมแมกนีเซียม,ซิลิกอน,สังกะสีและแมงกานีส ลงไปในอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Aluminums) จะได้โลหะผสมอลูมิเนียม ที่มีความคงทนและความแข็งแรงสูงแต่เปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายและเป็นสื่อนำไฟฟ้าที่ดี อันเป็นคุณสมบัติของอลูมิเนียมบริสุทธิ์จะเสื่อมไปอลูมิเนียมผสมที่มีทองแดงผสมอยู่ในเนื้อ จะทำให้เพิ่มความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อมีทองแดงถึง 8% จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ถ้ามีทองแดงถึง 12% จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านงานปาดผิวโลหะ แต่ความคงทนต่อการกัดกร่อนมีน้อยกว่าอลูมิเนียมที่ไม่มีทองแดงผสมอยู่อลูมิเนียมผสมจะทำการปาดผิวหรือกลึงได้ง่าย เมื่อใช้ความเร็วตัดสูงๆถ้ามีผิเป็นเหล็กเครื่องมือ หรือเหล็กกรอบสูง จะต้องใช้ความเร็วตัด 300-500 เมตร/นาที ถ้ามีผิเป็นโลหะที่แข็งกว่านั้นอีกก็ให้ใช้ค่าความเร็วตัดถึง 2000 เมตร/นาที

หมายเหตุ Al-Alloys คืออลูมิเนียมผสม

วัสดุหล่อเย็นที่ต้องใช้น้ำมันชนิดใส น้ำมันก๊าด ชิ้นงานที่ตัดเกลียวจะต้องใช้ หรือ หล่อเย็นด้วยน้ำมันก๊าด น้ำมันสน ปีโตรเลียม Al-Alloys ทำการกลึงจะต้องใช้ความเร็วตัดสูง มีดที่ใช้กลึงจะต้องมีมุมคายที่โตและใช้น้ำมันหล่อเย็น หรือหล่อลื่นที่เหมาะสม

1) อลูมิเนียมประสมเหนียว (Wrought Alloys) ใช้รีดหรือดึงเป็นแผ่น แถบ แท่ง ท่อ โลหะ ลวด เป็นต้น

2) อลูมิเนียมประสมหล่อ (Casting Alloys) จะถูกใช้หล่อให้เป็นชิ้นส่วนต่างๆ โดยใช้แบบหล่อทราย (G) แบบหล่อถาวร (GK) แบบหล่ออัด (GD)

หมายเหตุ หล่อแบบถาวรชิ้นส่วนที่ออกมาจะมีขนาดที่แน่นอนกว่าแบบหล่อทรายเพราะแบบทำด้วยเหล็ก แบบหล่ออัดน้ำโลหะจะถูกอัดด้วยความดันลงในแบบหล่อซึ่งทำด้วยเหล็กเหนียวจะได้ขนาดที่แน่นอน

ตัวอย่าง

มาตรฐานของอลูมิเนียมประสมตาม DIN 1725 แบ่งโลหะผสมของอลูมิเนียมเหนียวและหล่อ ออกได้ถึง 50 ชนิด

Al Mg7 F34

Al คือ โลหะพื้น หรือ Aluminums (โลหะหนัก หรือ โลหะแม่คืออลูมิเนียม)

Mg7 คือ โลหะที่นำไปผสม 7% (คือเอาแมกนีเซียม Mg มาผสมประมาณ 7%)

F34 คือ แรงดึงต่ำสุดที่ทนได้ (ค่าที่ได้จากการคำนวณ) หรือทนแรงดึงได้ 34 กก./มม² หรือ 34 Kg/mm² (34 กก./ตร.มม²)

2.6.9 อลูมิเนียมผสมชนิดเหนียว (นิ่ม) ที่สำคัญได้แก่

1) Gattung Al Cu Mg (ชุบแข็งได้) ความหนาแน่น 2.8 กก/ดม³ อัตรายืดตัว 8-20% สีประจำโลหะ สีแดงคล้ำ ความเค้นแรงดึงสูงสุดเมื่ออ่อน 18-24 Kp/mm² เมื่อชุบแข็ง 34-50 Kp/mm² ส่วนผสม ทองแดง (Cu) ประมาณ 2.5-5% แมกนีเซียม (Mg) ประมาณ 0.2-1.8% แมงกานีส (Mn) ประมาณ 0.3-1.5% นอกจากนั้นเป็น อลูมิเนียมทั้งหมด

ลักษณะใช้งาน ตามท้องตลาดมีชื่อเรียกว่า Duralumin ชุบแข็งได้ด้วยความร้อนปกติ เป็นโลหะที่แข็งที่สุดในบรรดาอลูมิเนียมผสมทั้งหลายคุณสมบัติในเชิงการทนการกัดกร่อนได้น้อยมากด้วยเหตุนี้เองเขาจึงมักใช้อลูมิเนียมผสมที่ไม่มีทองแดงอาบชุบผิวบน Duralumin หากต้องการให้ปาดผิวโลหะได้สะดวก เขามักจะผสมตะกั่วลงไปด้วยเพื่อช่วยให้เศษกลึงแข็งติดตัวเองออกหนึ่จากงานได้สะดวก ตะกั่วที่ผสม ประมาณ 1.5% (ห้ามใช้ทำภาชนะใส่อาหารเพราะตะกั่วเป็นพิษต่อร่างกาย พิษของตะกั่วทำร้ายเม็ดโลหิต) ในกรณีนี้เขียนนอร์มโลหะใหม่จะได้ Al Cu Mg Pb เป็นโลหะที่เหมาะสมกับเครื่องกลึงอัตโนมัติ

สีที่ทาที่ปลายแท่งเปลี่ยนเป็นสีดำเทา ที่ใช้งานของ Gattung Al Cu Mg คุณสมบัติการขึ้นรูปพอใช้

คุณสมบัติการตัด ดีใช้ทำพวกยานพาหนะ, เครื่องบิน, งานเหมืองแร่, งานช่างกลโรงงาน, วัสดุโครงสร้างที่มีค่าสูงทนต่อแรงกระแทก Al Cu Mg Pb ใช้ทำพวก ชิ้นส่วนกลึง (อัตโนมัติ) งานเจาะ

2) Gattung Al Mg Si (ชนิดชุบแข็งได้) ความหนาแน่น 2.7 กก/ดม³ อัตรายืดตัว 8-25 % สีประจำโลหะ สีขาว ส่วนผสม แมกนีเซียม(Mg) ประมาณ 0.6-1.4% ซิลิกอน(Si) ประมาณ 0.6-1.6% แมงกานีส (Mn) ประมาณ 0.6-1.0% โครเมียม(Cr) ประมาณ 0-0.3% นอกจากนั้นเป็น อลูมิเนียม (Al) ทั้งหมด ความเค้นแรงดึงเมื่ออ่อน 11-13 kp/mm² เมื่อชุบแข็ง 20-23 kp/mm²

ลักษณะงาน โลหะผสมนี้มีความแข็งแรงปานกลาง ชุบแข็งได้ ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ชัดเป็นมันได้สวยงาม เหมาะที่ทำโครงสร้าง ชิ้นส่วน หรือชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมเคมี ตามท้องตลาดที่เรียกว่า แพนทาล (Pantal) แอนติคอร์อดอล (Anticorodal) ที่ใช้งาน ชิ้นงานที่ต้องการความทนทานปานกลาง และทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี ใช้สร้างถังน้ำมันหรือถังเก็บน้ำมัน โรงงานทำอาหาร หรืองานสร้างเรือ

3) Gattung Al Mg 3 ความหนาแน่น 2.65 กก/ดม³ความเค้นแรงดึง 18-26 kp/mm²

สีประจำโลหะ เขียว เหลือง ส่วนประสม แมกนีเซียม(Mg) ประมาณ 2.0-4.0% แมงกานีส (Mn) ประมาณ 0-0.4% โครเมียม (Cr) ประมาณ 0-0.3% นอกจากนั้นเป็น อลูมิเนียมทั้งหมด

ลักษณะงาน มีชื่อเรียกว่า Hydronalium มีความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนดีเยี่ยม โดยเฉพาะน้ำทะเล ชัดเจนได้ เคลือบสีสวย โดยวิธีเติมออกซิเจนที่ขั้วบวก (Anodic Oxidation)

ลักษณะที่ใช้งาน ใช้ได้งานที่ฉาบผิวด้วยไฟฟ้า ที่ต้องการความสวยงาม

4) Gattung Al Mg 7 ความหนาแน่น 22.6 กก/ดม3ความเค้นแรงดึง 22-25 kp/mm2

สีประจำโลหะ เขียว-แดง ส่วนประสม แมกนีเซียม (Mg) ประมาณ 7% แมงกานีส (Mn) ประมาณ 0.4% โครเมียม (Cr) ประมาณ 0.1% นอกจากนั้นเป็น อลูมิเนียมทั้งหมด

ลักษณะงาน มีความคงทนต่อน้ำทะเลและด่างอ่อนๆ ได้ดีกว่า Al บริสุทธิ์ และโลหะผสมที่ไม่ได้อัดผิวไว้ สามารถฉาบผิวมันได้ดีมาก ฉาบผิวด้วยไฟฟ้าได้ เชื่อมได้

ลักษณะงานที่ใช้ ชิ้นส่วนที่ต้องการความคงทนปานกลาง ต้องการความคงทนต่อการผุกร่อน และน้ำทะเลได้ดี งานต่อเรือ งานเคมี และโรงงานทำอาหาร

5) Guattung Al Cu Ni (ชนิดชุบแข็งได้) คุณสมบัติ สีเทา - แดงอ่อน ความหนาแน่น - 2.8 กก/ดม3 ความเค้นแรงดึง 35-42 kp/mm2 อัตรายืดตัว 10-20% ส่วนประสม 3.5-4.5% Cu 1.8-2.2% Ni 1.3-1.8% Mg นอกจากนั้นเป็น อลูมิเนียมทั้งหมด

ลักษณะงาน อลูมิเนียมผสมชนิดนี้ ชุบให้แข็งได้ คงความแข็งแรงได้ ณ อุณหภูมิงานสูงๆ นิยมใช้ทำชิ้นส่วนที่ต้องรับภาระสูงๆ ณ อุณหภูมิงานสูงๆเช่น เป็นชิ้นอัด ชิ้นตีขึ้นรูป ได้แก่ ฝาสูบ และลูกสูบเครื่องยนต์ เป็นต้น

2.6.10 การปฏิบัติงานหล่ออลูมิเนียมผสม อลูมิเนียมบริสุทธิ์นับว่าเป็นโลหะหล่อที่ใช้งานเกือบไม่ได้เพราะมีคุณภาพต่ำเกือบทุกกรณี ส่วนใหญ่จะใช้อลูมิเนียมผสมหล่อเป็นชิ้นงานต่างๆ เพราะอลูมิเนียมผสมมีคุณสมบัติหลายอย่างเหมาะสมกับจุดประสงค์ในงานหล่อกว้างขวางแตกต่างกันออกไปสาเหตุที่ผสมนั้น อลูมิเนียมผสมผสมทุกชนิดจะต้องมีคุณสมบัติสองประการที่จะต้องพิจารณา

ประการแรก คุณสมบัติทางการหล่อ ลักษณะทั้งหมดของธาตุที่ผสมจะเป็นตัวกำหนดว่าหล่อได้ง่ายหรือยากที่จะหล่องานนั้นได้ดี และประการที่สอง:คุณสมบัติทางวิศวกรรม ผู้ใช้หรือนักออกแบบงานหล่อจะต้องสนใจคุณสมบัติข้อนี้เป็นพิเศษ ช่างหล่อจึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทั้งสองประการนี้ควบคู่กันไปด้วย

- 1) ข้อได้เปรียบของอลูมิเนียมผสมหล่อ ข้อได้เปรียบจริงๆ ทางวิศวกรรมของอลูมิเนียมผสมหล่อก็คือน้ำหนักเบา(ต่อหน่วยปริมาตร) เบากว่าเหล็กประมาณ 3 เท่าจึงได้เปรียบกว่าเหล็กในเรื่องความแข็งแรง(Strength) ต่อน้ำหนัก (Weight)หมายความว่า

ว่าถ้าใช้อลูมิเนียมหนักเท่ากับเหล็ก ก็จะได้ความแข็งแรงเท่ากับเหล็ก (Steel) แต่จะได้ความหนาเพิ่มขึ้น เช่น ชิ้นส่วนอากาศยาน ถ้าใช้เหล็กจะได้ความหนาเพียง 0.02 นิ้ว เท่านั้น แต่ถ้าใช้อลูมิเนียมผสมจะได้ความหนาถึง 1/16 นิ้ว หรือ 0.0625 นิ้ว สำหรับข้อได้เปรียบอื่นๆ เกี่ยวกับคุณสมบัติที่ต้องการมีหลายประการดังต่อไปนี้

- มีคุณสมบัติทางกลกว้างขวางกว่า กล่าวคือความแข็งแรง ความแข็ง และคุณสมบัติ

ทุกชนิดจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามธาตุผสมหรือการอบชุบ ถ้าเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียวที่มีความแข็งแรงต่ำอลูมิเนียมผสมจะได้เปรียบเรื่องน้ำหนักเบาว่า
- มีคุณค่าทางสถาปัตยกรรมและศิลปะการตกแต่ง
- มีคุณสมบัติด้านการผุกร่อน เช่น ทนการผุกร่อนต่อบรรยากาศธรรมดาหรือน้ำจืด
- ไม่มีพิษ (Non toxicity) นิยมทำภาชนะต่างๆ และเครื่องครัวพวกหม้อหุงข้าวเป็นต้น
- เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี จึงนิยมทำชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า
- การตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลกระทำได้ง่าย
- มีคุณสมบัติทางการหล่อหลอมดี เพราะมีอุณหภูมิหลอมละลายเพียง 660 องศาเซลเซียส เทียบกับเหล็กหล่อ 1135 องศาเซลเซียส นับได้ว่าอลูมิเนียมผสมใช้อุณหภูมิต่ำมากจึงไม่มีปัญหาเรื่องวัสดุทนไฟของเตาหลอมและทรายหล่อเพราะอุณหภูมิเต้านอกจากนั้นในทางปฏิบัติยังนิยมใช้แบบหล่อถาวรและแบบหล่อแม่พิมพ์กันอย่างกว้างขวางอีกด้วย
- ค่าขนส่งงานหล่ออลูมิเนียมต่อชิ้นถูกกว่าเหล็กเพราะน้ำหนักเบาากนั่นเอง

2) ข้อเสียเปรียบของอลูมิเนียมผสมหล่อ

- ราคาแพงกว่าเหล็กหล่อและเหล็กเหนียวหรือเหล็กกล้าแต่ถ้าพิจารณาการใช้คิดเป็นปริมาตรแล้วจะพอๆกับเหล็กเพราะอลูมิเนียมเบาได้ปริมาตรมาก แต่น้ำหนักน้อย ส่วนเหล็กปริมาตรเท่ากันจะต้องมีน้ำหนักมาก(หนักกว่าอลูมิเนียม 2.90 เท่า หรือประมาณ 3 เท่า)
- ไม่ทนต่อการขัดสี (Abrasion) และการสึกหรอ (Wear)
- ไม่สามารถทำให้อลูมิเนียมผสมมีความแข็งแรงสูง ความเหนียวสูง และความแข็งแรงสูงพร้อมกันเหมือนกับเหล็กผสม

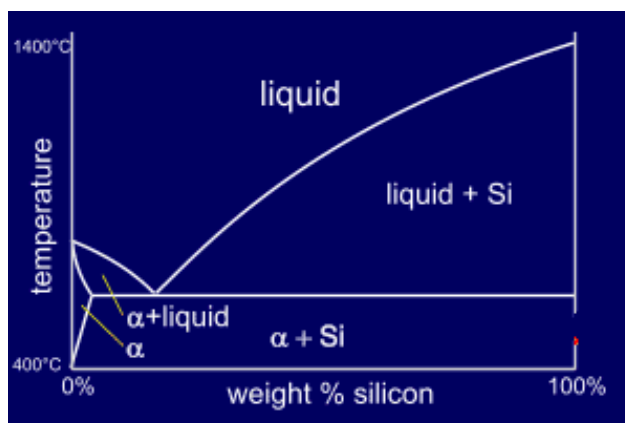
- ทนการผุกร่อน (Corrosion) หลายอย่างสู่พวกทองแดงนิเกิลผสมและเหล็กไร้สนิม (Stainless Steel) ไม่ได้

2.6.11 ธาตุผสมหลักของอลูมิเนียม อลูมิเนียมผสมอาจมีคุณลักษณะทั่วไปทางโลหะวิทยาเป็นการรวมตัวในระบบยูเทคติก (Eutectic) ประกอบด้วยสารประกอบโลหะ (Intermetallic Compound) หรือธาตุที่มีหลายเฟส (Phase) เนื่องจากอลูมิเนียมสามารถละลายธาตุผสมได้ในอัตราต่ำจึงทำให้เกิดธาตุผสมแข็งขึ้นขึ้นมากอลูมิเนียมผสมบางชนิดอาจมีสภาพทางโลหะ (Metallic Phases) หลายชนิดปนกัน ซึ่งมีส่วนผสมที่ซับซ้อนด้วยตามปกติสภาพเหล่านี้มักจะละลายได้ดีที่อุณหภูมิใกล้ๆ อุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) มากกว่าที่อุณหภูมิห้อง อลูมิเนียมผสมบางตัวจึงทำการอบชุบให้แข็งได้ (Solution and Aging Heat Treatment) ตามปกติคุณสมบัติต่างๆ ของอลูมิเนียมผสมมีอิทธิพลมาจากผลของธาตุต่างๆ ที่ผสมในอลูมิเนียม นั้น ธาตุหลักที่ใช้ผสมในอลูมิเนียมผสมมีอยู่หลายตัว เช่น ทองแดง ซิลิกอน แมกนีเซียม สังกะสี โครเมียมแมงกานีส ดินบุก และ ไททาเนียม สำหรับเหล็กที่มีผสมอยู่ด้วยนั้น ส่วนมากเราถือว่าเป็นธาตุมลทิน (Impurity) ตัวอย่างอิทธิพลของของธาตุผสมที่มีในอลูมิเนียมมีดังต่อไปนี้

2.6.12 อิทธิพลของทองแดง อิทธิพลของทองแดงที่มีต่อโครงสร้างอลูมิเนียม ความสามารถของทองแดงที่ละลายได้ในอลูมิเนียม ทองแดงสามารถละลายแข็ง (Solid Solved) อยู่ในอลูมิเนียมได้ตั้งแต่ 0.5% ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งทองแดงละลายแข็งได้สูงสุด 5.65 % ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส ทองแดงเกิน 5.65% ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 590 องศาเซลเซียส จะเป็นสารละลายแข็งในสภาพซีต้า มีสูตรทางเคมีว่า CuAl_2 (46.5%Al และ 53.5%Cu) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรงและเปราะ ส่วนผสมที่มีทองแดงตั้งแต่ 0.50% ถึง 5.56% อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างในสภาพแคปป่า (K) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลและเหนียว สามารถอบชุบให้แข็งได้โดยวิธีบ่ม (Aged Hardening) คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสมด้านความแข็งแรง และความแข็งแรงขึ้นอยู่กับการบ่มเพอร์เซ็นต์ของทองแดง ถ้าทองแดงมากจะแข็งแรงมากแต่จะเปราะ และการยืดตัว (Ductility) จะลดลงโดยทั่วไปแล้วอลูมิเนียมผสมจะมีทองแดงไม่เกิน 12% จะทำให้มีความเหนียว (Toughness) พอเหมาะ แต่ถ้าต้องการความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงสูงก็เพิ่มเพอร์เซ็นต์ทองแดงให้สูงขึ้น

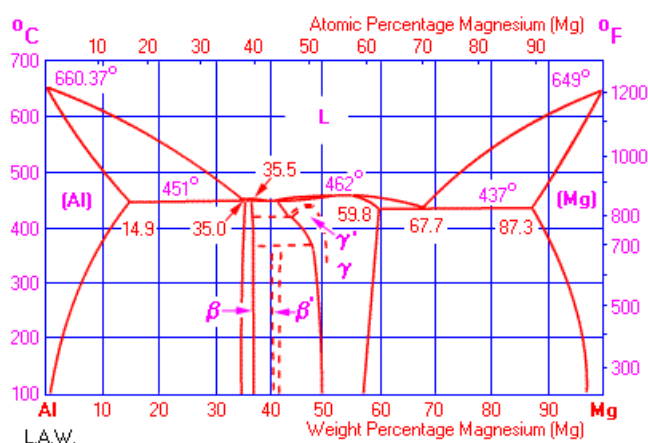
2.6.13 อิทธิพลของซิลิกอน ซิลิกอนที่ผสมอยู่ในอลูมิเนียมทางการค้ามีผสมอยู่ประมาณ 14% อิทธิพลของซิลิกอนที่มีต่อคุณสมบัติด้านการชุบอลูมิเนียมผสมที่สำคัญก็คือ ไม่สามารถอบชุบให้แข็งโดยวิธีบ่ม (Aging) ได้ เพอร์เซ็นต์ของซิลิกอนมีผลต่อโครงสร้างอลูมิเนียมผสมมากเป็นอันดับแรก การที่จะหล่ออลูมิเนียมผสมให้ได้คุณภาพสูงจำเป็นต้องใช้กรรมวิธีพิเศษหลายอย่างซึ่งจะได้กล่าวในลำดับต่อไป ซึ่งผลของการหล่อด้วยกรรมวิธีพิเศษจะทำให้คุณสมบัติทางกลต่างดีขึ้นอย่าง

มาก อลูมิเนียมซิลิกอนส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในลักษณะหล่อเสร็จ (As Cast) ไม่ต้องไปทำการอบชุบ ชาติอื่นๆที่ใช้ในลักษณะเดียวกับซิลิกอนก็คือ แมงกานีส และ นิเกิล



รูปที่ 2.7 แสดงแผนภูมิการรวมตัวของอลูมิเนียม - ซิลิกอน ในระบบสมดุล
(ที่มา: <http://www.southampton.ac.uk/~pasr1/build.htm>)

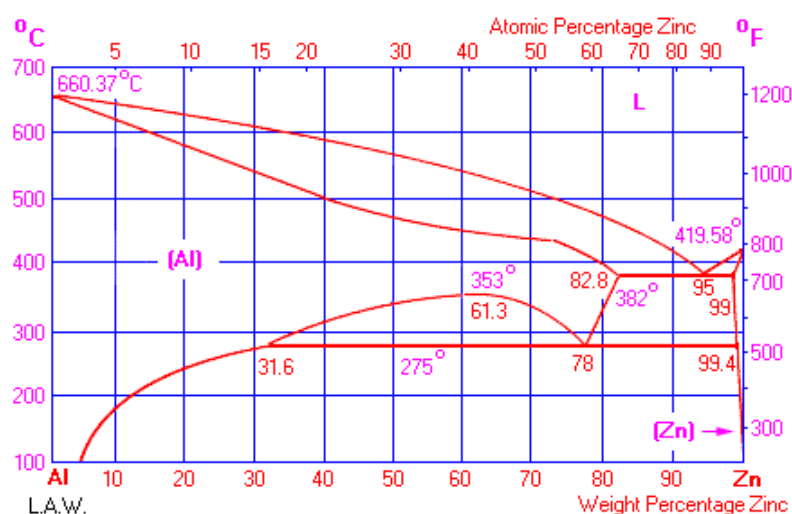
2.7.14 อิทธิพลของแมกนีเซียม อิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมในอลูมิเนียมผสมจะมีลักษณะ คล้ายๆกับธาตุทองแดง แผนภูมิการรวมตัวของธาตุทั้งสองในระบบสมดุลแสดงไว้ในรูปตาม แผนภูมิการรวมตัวของอลูมิเนียม-แมกนีเซียม แล้วจะเห็นว่าสภาพแอลฟา สามารถละลาย แมกนีเซียมไว้ได้สูงสุด 14.9% ที่อุณหภูมิ 451 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิห้อง สภาพ แอลฟา สามารถละลายแมกนีเซียมไว้ได้เพียง 2.90% เท่านั้น ถ้ามีแมกนีเซียมเกิน 14.9 % อลูมิเนียมผสมนี้ จะมีโครงสร้างในสภาพใหม่คือสภาพ เบต้า อลูมิเนียม-แมกนีเซียมนี้สามารถอบชุบให้แข็งแรง ด้วยกรรมวิธีบ่มแข็ง (Aging) เหมือนกับอลูมิเนียม-ทองแดง



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภูมิการรวมตัวของอลูมิเนียม - แมกนีเซียม ในระบบสมดุล
(ที่มา: http://www.aluminiumlearning.com/html/c_5xx_x.html, 27 กันยายน 2554)

2.6.15 อิทธิพลของแมกนีเซียมและซิลิกอน ธาตุทั้งสองนี้ถ้ามีอยู่ในอลูมิเนียมจะมีผลอย่างมากต่ออลูมิเนียมเพราะธาตุทั้งสองเมื่อรวมตัวกันแล้วจะเกิดสารแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) ซึ่งเป็นสภาวะ (Phase) หนึ่งต่างหากไม่เหมือนสภาวะเบต้า ในอลูมิเนียม-แมกนีเซียมแต่อลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน นี้สามารถชุบให้แข็งได้ด้วยกรรมวิธีบ่มแข็ง (Aging) เหมือนกับ อลูมิเนียม-ทองแดงส่วนผสมที่ใช้ได้ผลดีคือมีแมกนีเซียมน้อยประมาณ 0.3% และมีซิลิกอนมากกว่าคือประมาณ 6.0-8.0 % การเติมซิลิกอนมากและแมกนีเซียมลงในอลูมิเนียม จะช่วยให้คุณสมบัติทางการหล่อหลอมดีขึ้นไม่ใช่เพื่อให้เกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) แต่ถ้าต้องการอบชุบอลูมิเนียม-ซิลิกอนให้ได้ ก็จำเป็นจะต้องเติมแมกนีเซียมลงไปด้วย แต่อลูมิเนียมผสมที่ได้ในสภาวะหล่อเสร็จจะเปราะ แมกนีเซียมที่มีในอลูมิเนียมจำพวกเส้นน้อยประมาณ 0.03-0.10 % เราถือว่าเป็นสารมลทิน (Impurity) ไม่มีอิทธิพลใดๆต่ออลูมิเนียม

2.6.16 อิทธิพลของสังกะสี สังกะสีนับว่าเป็นธาตุผสมหลักอีกธาตุหนึ่งที่ใช้ผสมในอลูมิเนียมผสมบางชนิด สังกะสีมีความสำคัญมากในอันที่จะทำให้ได้ผลทางด้านคุณสมบัติทางกลสูงสุดในสภาวะหล่อเสร็จ (As cast condition) จากแผนภูมิการรวมตัวของอลูมิเนียม-สังกะสีจะเห็นว่าสภาวะสารละลายแข็งอลูมิเนียมสามารถละลายแข็งอลูมิเนียมไว้ได้สูงสุดถึง 82.8% ที่อุณหภูมิ 382 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อลูมิเนียมสามารถละลายสังกะสีไว้ได้ประมาณ 4.5 % ในทางปฏิบัตินิยมเติมสังกะสีในอลูมิเนียมไม่เกิน 7.5% อลูมิเนียมผสมสังกะสีอบชุบไม่ได้นิยมใช้ในสภาวะหล่อเสร็จและหล่อได้ในแบบทรายและแบบหล่อถาวร และไม่นิยมหล่อโดยวิธีแม่พิมพ์ (Die Casting)



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภูมิการรวมตัวของอลูมิเนียม - สังกะสี ในระบบสมดุล
(ที่มา: http://www.aluminiumlearning.com/html/w_7xxx.html, 27 กันยายน 2554)

2.6.17 อิทธิพลของธาตุมลทิน (Impurity) ธาตุมลทินที่ปนเข้าไปในอลูมิเนียมผสมหล่อโดยไม่ตั้งใจจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติต่างๆปกติ คุณสมบัติประการที่สองธาตุมลทินทำให้เกิดการเสียหายเป็นอย่างมากคือการยืดตัว (Ductility) หรือความเหนียว (Toughness) และความต้านทานการผุกร่อนอย่างไรก็ดีคุณสมบัติด้านอื่นก็อาจมีผลกระทบกระเทือนบ้างอีกประการหนึ่งมักจะพบบ่อยๆก็คือ ความยากลำบากที่จะบอกว่าธาตุใดเป็นธาตุผสม (เจือ) และธาตุใดเป็นธาตุมลทิน เช่น กรณีของธาตุแมกนีเซียมและซิลิกอน เป็นต้น

1) ซิลิกอน : นับได้ว่าเป็นธาตุมลทินในอลูมิเนียมผสมหล่อทุกชนิดและยอมให้มีอยู่ได้ตั้งหลายเปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าเติมรวมกับ แมกนีเซียมจะเกิดการเปราะขึ้น จึงเติมได้ไม่เกิน 0.2-0.3 %

2) เหล็ก : จำนวน 0.8-2.0% ถือว่าเป็นธาตุมลทินทั้งหมด ทั้งนี้เพราะน้ำอลูมิเนียมสามารถละลายเอาเหล็กจากเตาหลอม(ซึ่งเป็นป้าเหล็ก) หรือจากเหล็กกวนน้ำอลูมิเนียมหรืออื่นๆมันจะไปรวมตัวในรูปของ เหล็ก-อลูมิเนียม และ เหล็ก-ลูมิเนียม-ซิลิกอน เป็นสภาพ (Phase) ฝังอยู่ในโครงสร้างทำให้อลูมิเนียมเปราะ และด้านการผุกร่อนไม่ได้ ถ้ามีเหล็กอยู่มากเกินไปจะทำอันตรายให้กับเม็ดเกรนในสภาพหล่อเสร็จ คือทำให้ได้เม็ดเกรนหยาบ

3) สังกะสี : ใช้เป็นธาตุผสมในอลูมิเนียมพวก ZC และ ZG ส่วนพวกอื่นๆ อาจทำให้เสียความต้านทานการผุกร่อน ถ้ามีสังกะสีเกิน 0.1-0.3% ในบางเกรน อลูมิเนียม-ซิลิกอนที่ไม่เติมทองแดง มักจะเติมสังกะสีได้ถึง 0.5% อลูมิเนียมผสมบางชนิดยอมให้สังกะสีเป็นธาตุมลทินถึง 2.5% มลทินตัวอื่นๆ ได้แก่ ธาตุตะกั่ว ดีบุก พลวง อาซิติก และ แคดเมียม เป็นต้นปริมาณที่มีปะปนอยู่ในอลูมิเนียมซึ่งนับว่าเป็นธาตุมลทินของแต่ละธาตุ ปกติจะมีไม่เกิน 0.05-0.10 %

2.7 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) ของน้ำหนักมีส่วนผสมของโครเมียม อย่างน้อย 10.5% กำเนิดขึ้นในปี พ.ศ.1903 เมื่อนักวิทยาศาสตร์พบว่า การเติมนิเกิล โมลิบดีนัม ไทเทเนียม นีโอเนียม หรือโลหะอื่นแตกต่างกันไปตามชนิด ของคุณสมบัติเชิงกล และการใช้ลงในเหล็กกล้าธรรมดา ทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการเกิดสนิมได้

2.7.1 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) แบ่งออกเป็น 5 ประเภท

1) Ferritic Stainless Steel (รู้จักกันในนาม Plain Chromium Steel) มีการเพิ่มธาตุโครเมียม (Cr) ประมาณ 12-18% และมีปริมาณคาร์บอนต่ำมาก (Very Low Carbon) ที่นิยมใช้ทั่วไป คือ

- เกรด 430 - ราคาถูกที่สุด
- เกรด 409 - ใช้ทำ ท่อไอเสียรถยนต์ เนื่องจาก ราคาถูก ทนต่อการกัดกร่อน และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย (Excellent Formability)



รูปที่ 2.10 ท่อไอเสีย และถังน้ำมันรถยนต์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม

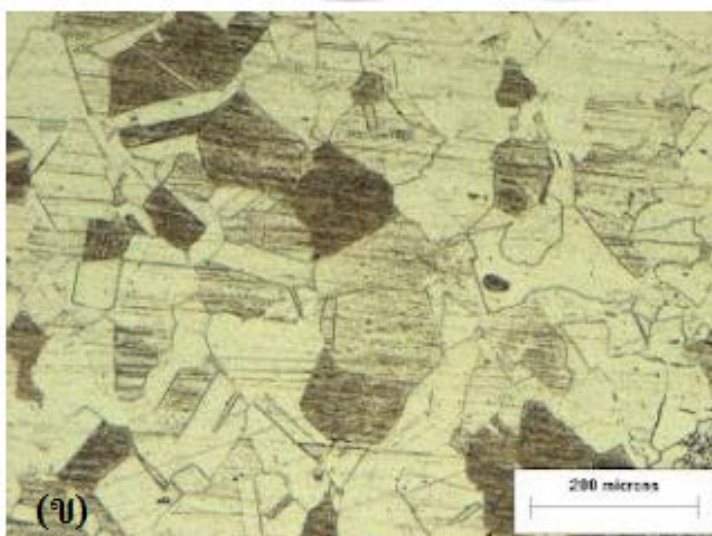
ลักษณะเด่นของ Ferritic Stainless Steel นิยมใช้ทั่วไป คือ

- เกรด 430 - ราคาถูกที่สุด
- แม่เหล็กดูดติดได้ (Magnetic)
- ไม่สามารถทำ Heat Treatment เพิ่มได้
- ทำได้เพียงการอบอ่อน (Annealing)
- เชื่อมได้ไม่ดี (Poor Weld ability)
- ทนต่อการกัดกร่อนปานกลาง (Moderate Corrosion Resistance)

2) ออสเทนนิติก Stainless Steel (รู้จักกันในนาม "18/8" มาจากส่วนผสม Chromium 18% และ Nickel 8%) มีการเพิ่มธาตุ निकิล (Nickel) ทำให้เปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาค (Micro-structure) เรียกว่า "Austenite" ซึ่งจากปริมาณเหล็กกล้าที่ใช้ทั่วไปประมาณ 70% คือ Austenite ที่นิยมใช้ทั่วไป คือ

- เกรด 304 นิยมใช้มากที่สุด มีชื่อเสียงในด้าน "Marine Grade"
- เกรด 316 ใช้กับงานกลึงเหล็กท่อน (Machining Bar Grade)
- เกรด 303 สำหรับงานทั่วไป

หมายเหตุ 304 (1.4301) คือเกรดที่นิยมใช้มากที่สุด และมีการใช้ 50% จากปริมาณการใช้ทั่วโลก ทำให้เมื่อพูดถึง ออสเทนนิติก Stainless Steel ที่มีส่วนผสมที่ต่างออกไป ก็ยังจะนึกถึง 304 เป็นอันดับแรก



รูปที่ 2.11 แสดงท่อไอเสียรถยนต์(ก) และโครงสร้างจุลภาค(ข) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก (ที่มา: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509307006284>, 30 กันยายน 2554)

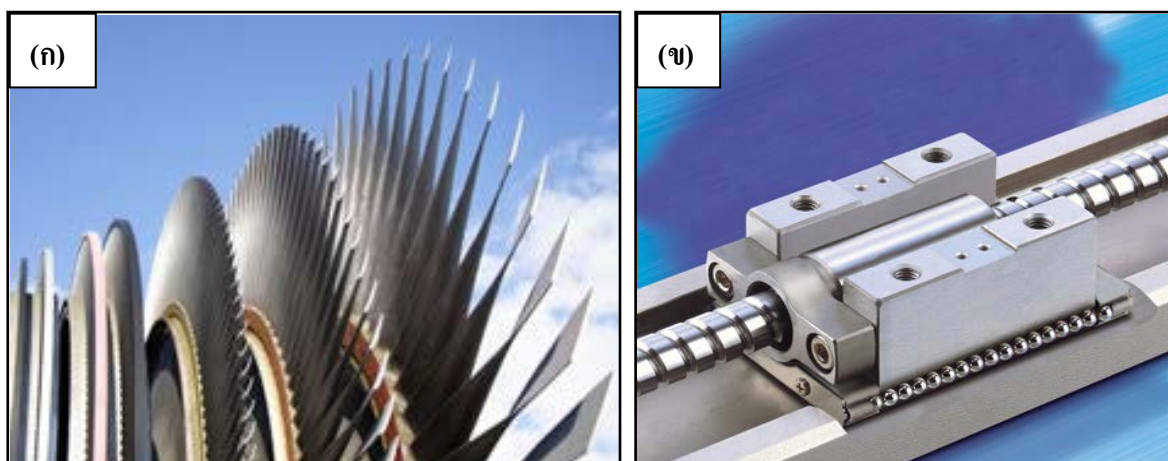
ลักษณะเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Stainless Steel)

- เชื่อมได้ดีเยี่ยม
- สามารถดัดและขึ้นรูปได้
- ไม่สามารถทำ Heat Treatment เพิ่มได้
- การขึ้นรูปเย็น (Cold Work) จะทำให้เหล็กแข็งขึ้น
- มีสมรรถนะ "ดีเยี่ยม" ที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature)
- มีสมรรถนะ "ดี" (Good) ที่อุณหภูมิสูง (High Temperature)

- ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม (Excellent Corrosion Resistance)
- แม่เหล็กดูดไม่ติด (Non-Magnetic) หลังการอบอ่อน (Annealing)
 - สามารถทำความสะอาดได้ดี (Excellent Clean ability) ถูกตามสุขลักษณะ (Hygienic)

3) Martensitic Stainless Steel (มีปริมาณคาร์บอนสูง (High Carbon) ประมาณ 0.1-1.2% คล้ายกับ Ferritic Stainless Steel หรือ Plain Chromium Steel ตรงที่มีส่วนผสมของโครเมียม Chromium) ประมาณ 12-18%) เป็นเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดแรก ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ใช้งานทั่วไป เช่น อุปกรณ์ตัด เกรดที่นิยมใช้ทั่วไป คือ

- เกรด 420 นิยมใช้งานวิศวกรรมต่างๆ
- เกรด 440C มีความแข็งที่สุด ทนทานต่อการเสียดสีได้ดี



รูปที่ 2.12 แสดงใบจักรเครื่องสับดาบ(ก) ลูกบอล และรางสกรู(ข) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติค (ที่มา: <http://www.masteel.co.uk/type-410-stainless-steel.htm>)

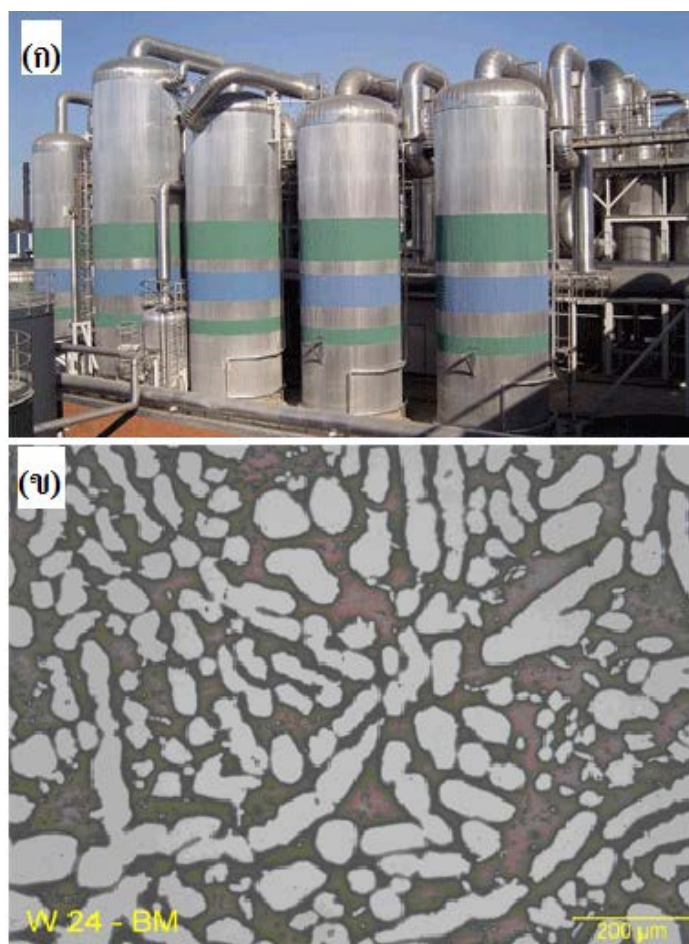
ลักษณะเด่นของ Martensitic Stainless Steel

- แม่เหล็กดูดติดได้ (Magnetic)
- สามารถทำ Heat Treatment เพิ่มขึ้นได้
- ไม่สามารถ (Inability) ขึ้นรูปเย็น (Cold Work)
- เชื่อมได้ไม่ดี (Poor Weld ability)
- ทนต่อการกัดกร่อนปานกลาง (Moderate Corrosion Resistance)

4) Duplex Stainless Steel (มีโครงสร้างทางจุลภาคคล้ายทั้ง Ferritic และ ออสเทนนิติก Stainless Steel ที่มีปริมาณโครเมียมสูง (High Chromium) ระหว่าง 18-28%, นิกเกิล (Nickel) มี

ปริมาณปานกลางที่ 4.5-8% ซึ่งปริมาณนิกเกิล (Nickel) ที่ต่ำนี้ ไม่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็น ออสเทนนิติก อย่างเต็มรูปแบบ แต่พิเศษกว่าตรงที่มีการใส่โมลิบดีนัม (Molybdenum) ประมาณ 2.5-4% เกรดที่นิยมใช้ทั่วไป คือ

- เกรด 2205 มีความทนทานต่อการกัดกร่อนดีเยี่ยมเหมาะสำหรับใช้ทำ ตัวกลาง อุณหภูมิ (Heat Exchangers), ถังบรรจุสารเคมี (Chemical Tanks), โรงกลั่นต่างๆ (Refinery)



รูปที่ 2.13 แสดงอุตสาหกรรมงานท่อ(ก) โครงสร้างจุลภาค(ข) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์
(ที่มา: <http://www.weldreality.com/Duplex.htm>, 30 กันยายน 2554)

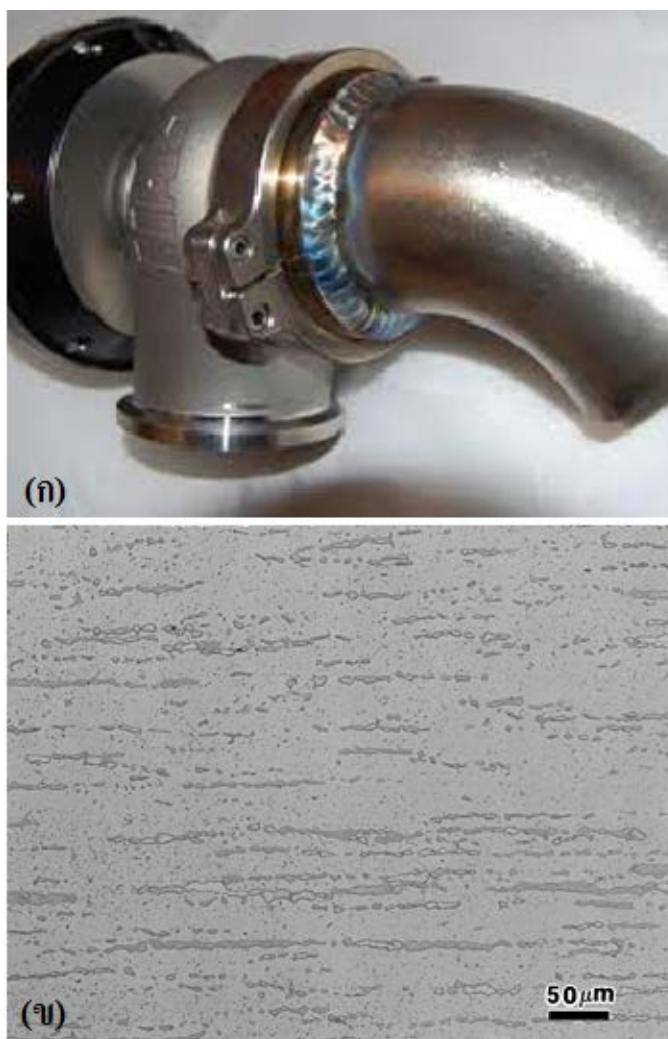
ลักษณะเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

- เชื่อมได้ดี
- สามารถขึ้นรูปได้ดี
- ทนทานต่อการคดล่อไรด์เป็นพิเศษ
- ทนทานได้ดีต่อความเครียดจากการถูกกัดกร่อน

- มีความแข็งแรงทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก และออสเทนนิติก
- ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม (Excellent Corrosion Resistance)

5) Precipitation (Hardening Grade) Stainless Steel มีค่าความแข็งแปรผัน (Precipitation Hardening) คล้ายกับมาร์เทนซิติค , กึ่งออสเทนนิติก หรือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่นำจุดเด่นของทั้ง ออสเทนนิติก คือความทนทานต่อการกัดกร่อน และ Martensitic คือความสามารถในการทำ Heat Treatment เพิ่มได้มารวมไว้ด้วยกัน เกรดที่นิยมใช้ทั่วไป คือ

- เกรด 17-4 PH (รู้จักกันในนาม 630) ผ่านการอบอ่อน (Annealing/Solution Treated) มาแล้ว สามารถขึ้นรูป ก่อนนำไปชุบแข็ง (Hardening) ได้เพียงครั้งเดียว ที่อุณหภูมิต่ำอย่างช้าๆ (Low Temperature Ageing)



รูปที่ 2.14 แสดงชิ้นงานเชื่อม(ก) และ โครงสร้างจุลภาค(ข) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมพรีซิพิเตชัน (ที่มา: <http://www.industrialheating.com>, 30 กันยายน 2554)

ลักษณะเด่นของ Precipitation Stainless Steel

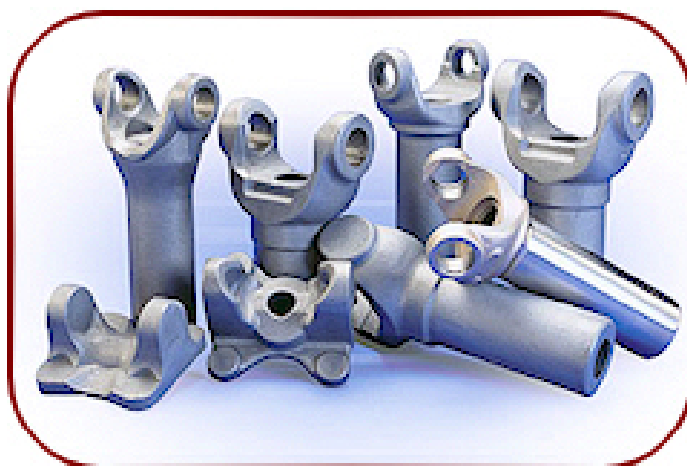
- แม่เหล็กดูดติดได้ (Magnetic)
- เชื่อมได้ดี (Good Weld ability)
- มีความแข็งแรงสูงมาก (Very High Strength)
- ทนต่อการกัดกร่อนปานกลาง (Moderate Corrosion Resistance)

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

- ความแข็งแรง (High Strength)
- อายุการใช้งาน (Long Life Cycle)
- ความสวยงาม (Aesthetic Appeal)
- ความสะดวกในการขึ้นรูป (Ease of Fabrication)
- ค่าความเป็นแม่เหล็ก (Low Magnetic Permeability)
- ความสะอาดตามสุขลักษณะ (Hygiene and Ease of Cleaning)
- ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recyclable~50-80%)
- ความทนทานต่อการกัดกร่อนดี (Corrosion Resistance)

หมายเหตุ

- 1) โลหะผสมต่ำ (Low Alloy) ทนทานต่อการกัดกร่อนปรกติ
- 2) โลหะผสมสูง (High Alloy) ทนทานต่อการกัดกร่อนของ กรดทั่วไป (Acids), กรดอัลคาไลด์ (Alkaline Solutions) และกรดคลอไรด์ (Chloride) ความทนทานต่ออุณหภูมิสูง/ต่ำ (Extreme Temperature Resistance)



รูปที่ 2.15 แสดงข้อเหวี่ยงเหล็กกล้าไร้สนิมพรีซีพิตีชั่น

(ที่มา: <http://www.castingreps.com/casting/sand-castings.aspx>, 30 กันยายน 2554)

ถ้าแบ่งย่อยก็จะได้มากกว่า 50 ชนิด เหล็กกล้าไร้สนิมไม่ใช่ผสมเพียงอย่างเดียว แต่ถูกจัดอยู่ในชนิดของเหล็กผสมจะมีส่วนประกอบเป็นโครเมียมอย่างน้อย 10.5% ส่วนประกอบอื่นๆ ได้ถูกผสมเพิ่มขึ้นมาเพื่อเพิ่มการป้องกันการเกิดสนิมและการเกิดความร้อนได้ดีขึ้น เพิ่มคุณสมบัติทางกลไก และส่วนผสมใหม่ๆ เข้าไป ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมจึงมีมากกว่า 50 ชนิด โดยถูกกำหนดขึ้นโดยองค์กร The American Iron and Steel Institute (AISI) การแยกชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ 3 ข้อคือ

- 1) ส่วนประกอบทางเทคนิคของโลหะ
- 2) ระบบเรียงลำดับของ AISI
- 3) การจัดกลุ่มเดียวกันของระบบเรียงลำดับ ได้ถูกพัฒนาโดยองค์กรของอเมริกาที่ทำหน้าที่ทดสอบแร่ธาตุ(ASTM) และองค์กรยานยนต์วิศวกรรม โดยจะกำหนดตัวเลขให้กับโลหะและผสมทุกชนิด

2.7.2 ประเภทของผสม

- 1) เกรด 304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมพื้นฐานที่ใช้ในการตกแต่งเพื่อความสวยงาม ชนิดนี้ง่ายต่อการขึ้นรูปและป้องกันการเกิดสนิมได้เป็นอย่างดี
- 2) เกรด 304L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304 ที่ใช้คาร์บอนเป็นส่วนประกอบน้อยลงมาใช้ในการเชื่อมอย่างกว้างขวาง
- 3) เกรด 316 ถูกออกแบบให้มาป้องกันการเกิดสนิมได้เป็นอย่างดี ถูกใช้ในงานอุตสาหกรรมหนักและสถานที่ใกล้ทะเล
- 4) เกรด 316L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316 ที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนน้อยลงมา
- 5) เกรด 430 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้โครเมียมเป็นส่วนประกอบ 100% และมีโอกาสเกิดสนิมน้อยกว่าเบอร์ 300 พวกนี้นิยมใช้ตกแต่งภายใน ลักษณะภายนอกของเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วเกือบทุกเกรดล้วนคล้ายคลึงทั้งนี้แล้วยังมีเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่ำที่มีโอกาสของการขึ้นสนิมได้สูงอีกเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 201 เป็นต้น

2.7.3 คุณสมบัติทั่วไป และ คุณสมบัติทางกายภาพคุณสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ค่าที่แสดงในตารางที่ 1 เป็นเพียงค่าประมาณ เนื่องจากการเปรียบเทียบทำได้ยาก ค่าความหนาแน่นสูงของเหล็กกล้าไร้สนิมแตกต่างจากวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อนความสามารถ ทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม มีข้อสังเกต 3 ประการคือ

- 1) การที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีอัตราความคืบดี เมื่อเทียบกับเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส
- 2) การที่มีค่านำความร้อนระดับปานกลาง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนความร้อน (คอนเทนเนอร์) หรือต้องการคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี (เครื่องถ่ายความร้อน)
- 3) การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลาง จึงสามารถใช้ความยาวมากๆ ได้ โดยใช้ตัวเชื่อมน้อย (เช่น ในการทำหลังคา)

2.7.4 คุณสมบัติเชิงกล เหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเหล็กประมาณ 70-80% จึงทำให้มีคุณสมบัติของเหล็กที่สำคัญ 2 ประการคือ ความแข็งและความแกร่ง ในตารางที่ 2 นี้ เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลกับวัสดุชนิดอื่น จะเห็นได้ว่าพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมีความแข็งแรง และโมดูลัส ความยืดหยุ่นต่ำ ส่วนเซรามิกมีความแข็งแรงและความเหนียวสูงแต่มีความแกร่งหรือความสามารถรับแรงกระแทกโดยไม่แตกหักต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิมให้ค่า ที่เป็นกลางของทั้งความแข็ง ความแกร่ง และความเหนียว เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุเหล็กอยู่มาก และจะมีเพิ่มขึ้นอีกในชนิดออสเทนิติก และตารางที่ 3 จะแสดงให้เห็นค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่ว่าจะชนิดที่อ่อนตัวง่าย ซึ่งสามารถทำให้ขึ้นรูปเย็นได้ดี เช่น การขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) จนถึงชนิดความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งได้จากการขึ้นรูปเย็นหรือการทำให้เย็นตัวโดยเร็ว (Quenching) หรือชนิดชุบแข็ง แบบตกผลึก (Precipitation Hardening) ซึ่งเหมาะใช้ทำสปริง

2.7.5 คุณสมบัติของ เหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดกันที่มีโครงสร้างต่างกัน จะมีลักษณะค่าความแข็งแรงที่เปลี่ยนแปลงแตกต่างกันดังในรูปจะแสดงให้เห็น แนวโค้งของค่าความแข็งแรง โดยทั่วไปของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิม 4 ชนิด

- 1) เกรดมาร์เทนซิติค มีค่าความจำนนความแข็งแรง (Yield Strength : YS) และค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength : UTS) สูงมากในสภาวะที่ผ่านกระบวนการอบชุบ แต่จะมีค่าการยืดตัว (Elongation : EL %) ต่ำ
- 2) เกรดเฟอร์ริติก มีค่าความจำนนความแข็งแรง และค่าความแข็งแรงสูงสุดปานกลาง เมื่อรวมกับค่าความยืดตัวสูง จึงทำให้สามารถขึ้นรูปได้ดี
- 3) เกรดออสเทนิติก มีค่าความจำนนความแข็งแรงใกล้เคียงกับชนิดเฟอร์ริติก แต่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดและความยืดตัวสูง จึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก
- 4) เกรดดูเพล็กซ์ (ออสเทนไนท์ - เฟอร์ไรต์) มีค่าความแข็งแรง และค่าความยืดตัวสูงจึงเรียกได้ว่า เหล็กชนิดนี้มีทั้งความแข็งแรง และความเหนียว (Ductility) ที่สูงเป็นเลิศ

2.7.6 ความต้านทานการกัดกร่อน โลหะทุกชนิดทั่วไปจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์บนผิวโลหะ หรือออกไซด์ ที่เกิดบนผิวเหล็กทั่วไป จะทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ และทำให้เกิดสภาพพื้นผิวเหล็กผุกร่อน ที่เราเรียกว่า เป็นสนิม แต่เหล็กกล้าไร้สนิมมีโครเมียมผสม อยู่ 10.5% ขึ้นไป ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไป กลายเป็นฟิล์ม ปกป้อง (Passive Layer) ที่เหมือนเกราะป้องกัน การกัดกร่อน ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า พาสซีวิตี (Passivity) ฟิล์มปกป้องนี้จะมีขนาดบางมาก (สำหรับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมบางขนาด 1 มม. ชั้น ฟิล์มนี้ จะมีความบางเทียบเท่ากับวาทะกระดาษ 1 แผ่น บนตึกสูง 20 ชั้น) และมองตาเปล่าไม่เห็น ฟิล์มนี้จะเกาะติดแน่น และทำหน้าที่ปกป้องเหล็กกล้าไร้สนิม จากการกัดกร่อนทั้งหมด หากนำไป ผิดแปรรูปหรือใช้งานในสภาพเหมาะสม เมื่อเกิดมีการขีดข่วน ฟิล์มปกป้องนี้จะสร้างขึ้นใหม่ได้ เองตลอดเวลา

ความคงทนของชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยหลักของความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับสภาพการกัดกร่อนอันได้แก่ ความรุนแรง ของปฏิกิริยาออกซิไดซ์ ความเป็น กรดปริมาณสารละลายคลอไรด์ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณ โครเมียมจะช่วยเพิ่ม ความ ต้านทาน การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม การเติมนิเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัด กร่อนโดยทั่วไป ให้ทนสภาวะกัดกร่อนรุนแรงได้ ส่วนโมลิบดีนัมจะช่วยเพิ่ม ความต้านทานการ กัดกร่อนเฉพาะที่ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)

ในทางปฏิบัติ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก มีการใช้งานจำกัดในสภาพการกัดกร่อนปาน กลางและในสภาพชนบท ทั้งชนิดเฟอร์ริติกและออสเทนิติก สามารถใช้ทำ อุปกรณ์เครื่องใช้ใน คราวเรือนได้แต่เนื่องจากชนิดออสเทนิติกสามารถทนการกัดกร่อนได้ดี และทำความสะอาดง่าย จึง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่มนอกจากนี้ชนิดออสเทนิติกยังทนการกัดกร่อนจาก สารเคมีหลายประเภทได้แก่ กรด, อัลคาไลด์ เป็นต้น ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมเคมี และกระบวนการผลิตต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดทั่ว ๆ ไป

ผลิตภัณฑ์	ตัวอย่าง	การใช้และข้อควรระวัง
ผงซักฟอก	ผงซักฟอก และสบู่ที่ใช้ในบ้าน	น้ำยาทำความสะอาดกระจก ใช้ล้างเหล็กกล้าไร้สนิมได้เป็นครั้งคราว แต่ต้องล้างออกด้วยน้ำเย็นให้หมด
ยาฆ่าเชื้อ	ในบ้านและในอุตสาหกรรม	ต้องใช้ยาฆ่าเชื้อเจือจาง โดยจำกัดจำนวนครั้งที่ใช้ ต้องล้างออกด้วยน้ำให้สะอาด
สารละลาย	แอลกอฮอล์ และอะซิโตน	สำหรับคราบที่ล้างด้วยสบู่ไม่ออก เช่น สี และคราบมันจากสารอินทรีย์ จากนั้นล้างด้วยสารละลายแล้วเช็ดออกด้วยสบู่ และล้างออกด้วยน้ำสะอาด
กรดทำความสะอาด	สารละลายทำความสะอาดที่มีส่วนผสมของฟอสฟอรัสและไนตริก	เป็นวิธีสุดท้ายที่ควรใช้ทำความสะอาดเหล็กกล้าไร้สนิม ล้างออกด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง โดยใช้ความระมัดระวัง ควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญสำหรับการใช้ที่ถูกต้องและปลอดภัย
ทำความสะอาดโดยใช้เครื่องมือ	การยิงผิวหน้า, การขัดผิวหน้า, การขัดด้วยลวด, การใช้ผงขัด	คราบที่ล้างออกยาก ต้องใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดเชิงกล ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ต้องปลอดภัย หัก และระวังไม่ให้เกิดคราบขึ้นอีก การใช้ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้จะทำให้ พื้นผิวสแตนเลสมีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 2.2 วิธีทำความสะอาดสำหรับคราบสกปรกทั่ว ๆ ไป

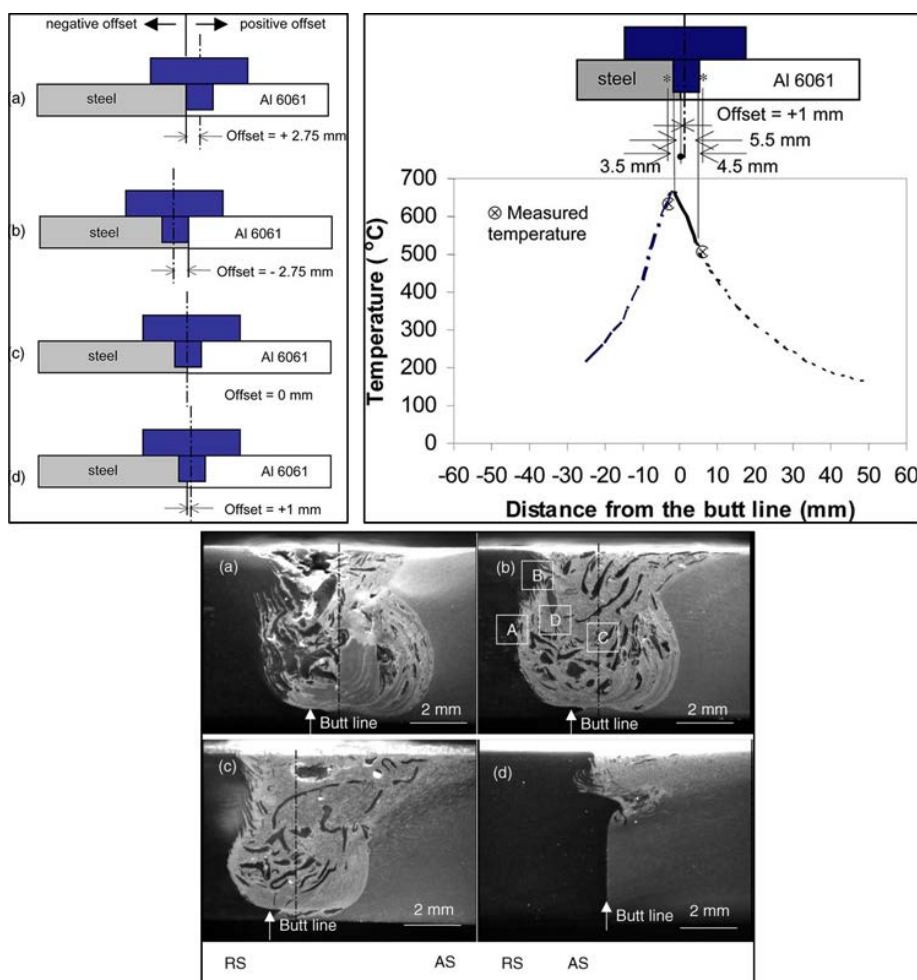
คราบสกปรก	วิธีการทำความสะอาด
รอยนิ้วมือ	ล้างด้วยสบู่ ผงซักฟอก หรือสารละลาย เช่น แอลกอฮอล์ หรืออะซิโตน ล้างออกด้วยน้ำเย็น และเช็ดให้แห้ง
น้ำมัน คราบน้ำมัน	ล้างด้วยสารละลายไฮโดรคาร์บอน / ออร์แกนิก (เช่น แอลกอฮอล์) แล้วล้างออกด้วยสบู่ / ผงซักฟอกอย่างอ่อน และน้ำ ล้างออกด้วยน้ำเย็น และเช็ดให้แห้ง แนะนำให้จุ่มชิ้นงานให้โชกก่อนล้างในน้ำสบู่อุ่น ๆ
สี	ล้างออกด้วยสารละลายสี ใช้แปรงไนลอนนุ่ม ๆ ขัดออก แล้วล้างออกด้วยน้ำเย็นและเช็ดให้แห้ง
Carbob Deposit or Bkcd-on	จุ่มลงในน้ำ ใช้สารละลายที่มีแอมโมเนียเป็นส่วนประกอบ ล้างออกด้วยน้ำเย็น และเช็ดให้แห้ง
เปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อน	ทาครีม (เช่น บรีส) ลงบนแผ่นขัดที่ไม่ได้ทำจากเหล็ก แล้วขัดคราบที่ติดบนเหล็กกล้าไร้สนิมออก ความร้อนจัดไปในทิศทางเดียวกันกับพื้นผิว ล้างออกด้วยน้ำเย็น และเช็ดให้แห้ง
ปายและ สติ๊กเกอร์	จุ่มลงในน้ำอุ่น ๆ ลอกเอาปายออกแล้วถูกวาดออกด้วยเบนซิน ล้างออกด้วยสบู่ และน้ำจากนั้นให้ล้างด้วยน้ำอุ่น เช็ดให้แห้งด้วยผ้านุ่ม ๆ
รอยน้ำ / มะนาว	จุ่มลงในน้ำส้มสายชูเจือจาง (25%) หรือกรดไนตริก (15%) ล้างให้สะอาด ล้างออกด้วยสบู่และน้ำ จากนั้นล้างให้สะอาดด้วยน้ำอุ่น เช็ดให้แห้งด้วยผ้านุ่ม ๆ
คราบชา – กาแฟ	ล้างด้วยโซดาไบคาร์บอเนต ในน้ำ ล้างออกด้วยสบู่และน้ำ จากนั้นล้างให้สะอาดด้วยน้ำอุ่น เช็ดให้แห้งด้วยผ้านุ่ม ๆ
คราบสนิม	จุ่มในน้ำอุ่นที่มีส่วนผสมสารละลายกรดไนตริก ในอัตราส่วน 9 ต่อ 1 ประมาณครึ่งถึงหนึ่งชั่วโมง ล้างออกด้วยน้ำให้สะอาด หรือล้างผิวด้วยสารละลายกรดออกซาลิก ทั้งไว้ประมาณ 20 นาที ล้างออกด้วยน้ำเย็นและเช็ดให้แห้งหรือต้องใช้เครื่องมือล้างหากคราบสนิมติดแน่น

ตารางที่ 2.3 ความรู้และเทคนิค

ควรทำ	ไม่ควรทำ
เมื่อไม่ได้มีการทำความสะอาดเหล็กกล้าไร้สนิม อย่างสม่ำเสมอ เมื่อสังเกตเห็นคราบหรือฝุ่นละอองใด ๆ ต้องรีบทำความสะอาดทันที	ไม่ควรเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยแว็กซ์ หรือวัสดุที่ผสมน้ำมัน เพราะจะทำให้คราบสกปรกหรือฝุ่นละอองติดบนพื้นผิวได้ง่ายขึ้น และล้างทำความสะอาดออกได้ยาก
การทำความสะอาดเหล็กกล้าไร้สนิม ควรเริ่มจากผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด ที่อ่อนที่สุด โดยเริ่มใช้ในบริเวณเล็ก ๆ ก่อนเพื่อดูว่าเกิดผลกระทบอะไร กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิมหรือไม่	ไม่ควรใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด ที่มีส่วนผสมของคลอไรด์และฮาไลด์ เช่น โบรไมน์, ไอโอดีนและผลูออรีน
ใช้น้ำอุ่นล้างทำความสะอาดมันออก	ไม่ควรใช้ยาฆ่าเชื้อในการทำความสะอาดชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม
หมั่นล้างเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยน้ำสะอาด เป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้แห้งด้วยผ้านุ่ม หรือกระดาษชำระ	ไม่ควรใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในการทำความสะอาด เพราะอาจก่อให้เกิดการกัดกร่อน แบบรูเข็ม และการแตกเนื่องจากความเครียด (Stress Corrosion Cracking)
เมื่อใช้กรดทำความสะอาดเหล็กกล้าไร้สนิม ควรใช้ด้วยความระมัดระวัง	ไม่ควรใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่เราไม่แน่ใจ
หลังจากใช้เครื่องครัวที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ควรล้างให้สะอาดทุกครั้ง	ไม่ควรใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดเครื่องเงิน ในการทำความสะอาดเหล็กกล้าไร้สนิม
หลีกเลี่ยงคราบ/สนิมเหล็ก ที่อาจติดมากับอุปกรณ์ทำความสะอาด ที่ทำมาจากเหล็ก หรือใช้ทำความสะอาดชิ้นส่วนเหล็กกล้าคาร์บอน	ไม่ควรใช้สบู่ หรือผงซักฟอกมากเกินไป เพราะจะทำให้ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมัวและหมองลง
ในกรณีที่ประสบปัญหาในการทำความสะอาดเหล็กกล้าไร้สนิม ควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ	ไม่ควรทำความสะอาด และทำพาสซีเวชันในขั้นตอนเดียวกัน ควรทำตามขั้นตอน คือ ล้างก่อนแล้วค่อยทำพาสซีเวชัน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การศึกษาผลกระทบของสถานะของเหลวและของแข็งในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม AI 6061 กับเหล็กกล้า AISI 1018 (Chen, C.M., Kovacevic, 2004:1205-1214) ได้ทำการศึกษการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียมผสม AI6061 กับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1018 ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนโดยการศึกษาถึงผลของการสอดหัวกวนเข้าไปในเนื้อเหล็กกล้าที่ระยะต่าง ๆ โดยมีตัวแปรคือว่าหัวกวนมีขนาด 24 มิลลิเมตร, หัวกวนมีขนาด 5.5 มิลลิเมตร, ความเร็วรอบตั้งแต่ 140-914 รอบต่อนาที สามารถวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมด้านของอลูมิเนียมอุณหภูมิสูงสุด 491 องศาเซลเซียส มีอัตราการเย็นตัว 90 องศาเซลเซียสต่อวินาที สำหรับด้านที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน วัดอุณหภูมิสูงสุดได้ 631 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเย็นตัว 175 เซลเซียสต่อวินาที แสดงตามรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ และ โครงสร้างจุลภาค

(Chen, C.M., Kovacevic, 2004:1205-1214)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่ามีการประกอบเชิงโลหะ $Al_{13}Fe_4$ และ Al_5Fe_2 อยู่ในเขตของแนวเชื่อม แต่ไม่ได้รายงานค่าความแข็งแรงดึงของงานเชื่อมไว้

2.8.2 CAO, KOU (2005: 1-8) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการเกิดของอนุภาค θ (Al_2Cu) ในอลูมิเนียมเจือ AA2219-T6 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม FSW โดยทำการวิจัยและตีพิมพ์ในวารสาร The Welding Journal ในปี 2005 ในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานหมุนวนและการเชื่อมมิก (GMAW) อุณหภูมิต่ำกว่าขอบเส้นหลอมละลายในการเกิดอนุภาค θ (Al_2Cu) การทดลองนี้ใช้แผ่นอลูมิเนียมเจือที่มีความยาว 200 มิลลิเมตร กว้าง 100 มิลลิเมตร และหนา 7.9 มิลลิเมตร สำหรับในการเชื่อมมิก (GMAW) จะใช้ลวดเติมแนวเชื่อม AA 2319 เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร สำหรับกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนวนจะใช้เครื่องกักขนาด 1.5 kw ที่ 2 Hp สำหรับแกนหมุนวนจะทำด้วยเหล็กงานร้อน เกรด H13 มีความโตของบ่าขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และใช้สลักแกนหมุนมีเกลียวขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 5.4 มิลลิเมตร โดยทำมุมเอียงกับชิ้นงาน 2 องศา กำหนดความเร็วเดินเชื่อม 0.26 ถึง 1.4 มิลลิเมตรต่อวินาที และที่ความเร็วรอบแกนหมุน 490 ถึง 960 รอบต่อนาที หมุนทวนเข็มนาฬิกา ผลการทดลองตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ และ Scanning electron microscopy (SEM) ส่วนตำแหน่งที่รวมตัวของสารประกอบอนุภาคจะตรวจพบโดย Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) พบว่าในกระบวนการเชื่อมมิกจะทำให้อลูมิเนียมเจือ AA2219-T6 เกิดการหลอมละลายที่แนวเชื่อม และจะส่งผลต่อการเกิดอนุภาค θ มีเป็นลักษณะอนุภาคยูเทคติก ส่วนที่ในการเชื่อมความเสียดทานหมุนวนจะไม่เกิดอนุภาค θ ดังที่กล่าวมา เนื่องจากได้รับอุณหภูมิในการเชื่อมที่ต่ำกว่าการเกิดปฏิกิริยายูเทคติกอย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมเสียดทานแกนหมุน มีการสร้างรูปร่างของอนุภาค θ ขนาดใหญ่กว่า $100\ \mu m$ ในระหว่างการเชื่อมความเสียดทานหมุนวนที่มีความยาวสม่ำเสมอ 1 มิลลิเมตรตามที่เปรียบเทียบกับขนาดอนุภาค θ ที่มีขนาด 10 ถึง $15\ \mu m$ ในเนื้อเดิมขนาดของอนุภาค θ ที่ใหญ่ขึ้นนี้ จะเป็นไปได้ถ้ามีการมีรูปแบบในระหว่างการเชื่อมจากการจับเป็นกลุ่มก้อนโดยการแยกตัวของอนุภาค θ ขนาดเล็กๆ ในชิ้นงานซึ่งจะมีการก่อตัวขึ้นที่อยู่รอบๆ สลักแกนหมุน

2.8.3 Liu, Fujii, Maedaa, and Nogi (2003: 692-696) ทำการศึกษาวิจัยคุณสมบัติด้านการรับแรงดึง และการแยกตำแหน่งของรอยต่อกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนวนของอลูมิเนียมเจือ AA 2017-T351 ตีพิมพ์ใน Journal of Materials Processing Technology ในปี 2003 เป็นการทดลองทำการศึกษาอลูมิเนียมเจือ AA 2017-T351 ที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ความกว้าง 80 มิลลิเมตร และความยาว 300 มิลลิเมตร โดยทำการเชื่อมแบบต่อชนด้วยกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนวน ที่ใช้ขนาดของแกนหมุนวน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร สลักแกน

หมุนผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 4.7 มิลลิเมตร เอียงแกนหมุน 3 องศา ใช้ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมประกอบด้วย ความเร็วรอบแกนหมุน 1500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 25 ถึง 600 มิลลิเมตรต่อนาที โดยได้กำหนดค่าของ Revolutionary pitch ที่ 0.02 ถึง 0.4 มิลลิเมตรต่อรอบ และทำการทดสอบโครงสร้าง ทดสอบการรับแรงดึงและทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อมผลที่ได้จากการทดสอบ สรุปได้ว่าบริเวณที่เป็นจุดอ่อนจากการเชื่อมคือบริเวณ HAZ ที่มีความชัดเจนเกิดจากการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวนของอลูมิเนียมเกรด AA 2017-T351 ดังนั้น คุณสมบัติรับแรงดึงที่รอยต่อจากการเชื่อมมีค่าต่ำกว่าวัสดุเดิมที่ยังไม่ผ่านการเชื่อม (Base metal) ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมมีอิทธิพลที่สำคัญในเรื่องคุณสมบัติด้านการรับแรงดึงและตำแหน่งการแยกของรอยต่อเมื่อ Revolutionary pitch มากเกินค่าที่เหมาะสม เช่น 0.13 มิลลิเมตรต่อรอบ ไม่เกิดผลต่อการมีอยู่ของข้อบกพร่องในรอยต่อ คุณสมบัติด้านรับแรงดึงที่รอยต่อค่อนข้างต่ำและการแยกเกิดขึ้นที่จุดกึ่งตรงกลาง และเมื่อ Revolutionary pitch มีค่าที่เหมาะสมหรือน้อยกว่าจะไม่เกิดข้อบกพร่องในรอยต่อ คุณสมบัติด้านการรับแรงดึงของรอยต่อใกล้เคียงกับระดับสูงและก้อนที่เกิดการเชื่อม (Weld nugget) และ TMAZ ที่เลื่อนไปด้านข้างและภายใต้สภาพของ Revolutionary pitch ที่ 0.07 มิลลิเมตรต่อรอบ จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 82% ของเนื้อเดิม

2.8.4 Ulysses (2005: 1549-1557) ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองสามมิติของกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน ตีพิมพ์ใน International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application ในปี 2002 โดยที่ในการทดลองนี้จะเป็นการทดลองแบบจำลองของกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวนที่ใช้แบบจำลองในด้านความเหนียวและพลาสติก 3 มิติ (Three-dimensional visco-plastic modeling) ซึ่งการทดลองนี้จะทำการเชื่อมแผ่นอลูมิเนียม AA7050 T7451 แบบต่อชนที่มีความหนา 19.1 มิลลิเมตร ที่จะใช้แกนหมุนกวนมีสลักแกนหมุนเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.4 มิลลิเมตร ยาว 6.4 มิลลิเมตร หรือประมาณ 1/3 ของความหนาแผ่นอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่า 19 มิลลิเมตร ความเร็วเดินเชื่อม และความเร็วรอบแกนหมุนตามตารางของเครื่องกัด โดยในการหาอิทธิพลของอุณหภูมิที่เกิดจากแกนหมุนกวน จะใช้แบบจำลองในการคำนวณหาโดยจะใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของแกนหมุน ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการทดลองจริงกับชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบกับที่เกิดอุณหภูมิโดยการฝังใส่เทอร์โมคัปเปิลตามแนวยาวของรอยต่อจำนวน 6 เส้น ที่ความลึก 13.7 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาในการกระจายอุณหภูมิจากการทดลองโดยการจำลองจากการทำไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ความเร็วรอบแกนหมุน 11.7 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 1.05 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ค่าการเกิดอุณหภูมิที่กระจายที่ขอบของบ่าแกนหมุน จะเกิดอุณหภูมิสูงสุดและจะกระจายลดน้อยลง ส่วนอุณหภูมิที่บ่าแกนหมุนกระจายตัวไปที่สลักแกนหมุน ส่วนจากการ

ทดลองจริงที่ค่าพารามิเตอร์เหมือนกับการทำจำลองพบว่าการกระจายอุณหภูมิเกิดขึ้นเช่นกัน ค่าอุณหภูมิ ที่ได้จากการทำไฟในเอลิเมนต์จะสูงกว่าการทดลองจริงและพบว่าเมื่อความเร็วเดินเชื่อมช้าลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นและความเร็วรอบแกนหมุนมากขึ้นจะส่งผลต่อการเกิดอุณหภูมิจะสูงขึ้นตามด้วย การใช้แบบจำลอง 3 มิติไฟในเอลิเมนต์ในการเชื่อมความเสียดทานแบบแกนหมุนพบว่า เวลาแพร่ของอนุภาคใกล้แกนหมุนอุณหภูมิจะมีอิทธิพลซึ่งจะใช้เวลาน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงและใช้เวลามากเมื่ออุณหภูมิต่ำ และจากการศึกษาค่าตัวแปรในการเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของแรง ในขณะที่รอบได้จากการหมุนจะได้รับจากอิทธิพลภายนอก

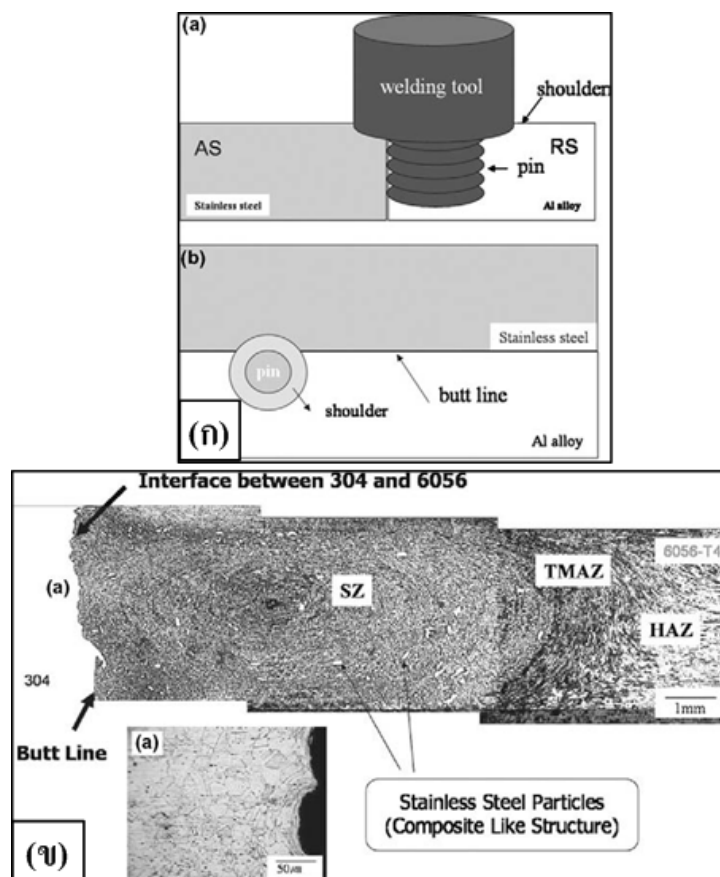
2.8.5 Meran (2005) ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติรอยต่อของแผ่นทองเหลืองโดยกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน ในปี 2005 การทดลองนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกลในกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน เพื่อแทนที่กระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายที่มีปัญหาเรื่องการระเหยกลายเป็นไอของทองแดงและสังกะสี โดยศึกษาในเรื่อง ความเร็วเดินเชื่อม ความเร็วรอบแกนหมุน การทดลองใช้แผ่นทองเหลือง CuZn30 (CW508L) ยาว 120 มิลลิเมตรกว้าง 60 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร เชื่อมต่อชนทำราบใช้เครื่องกัด (Milling machine) รอบสูงแกนหมุนทำจากเหล็กงานร้อน X32CrMoV12-28 (EN ISO 4957) บำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ใช้สลักแกนหมุนเกลียวซ้ายและเกลียวขวา M 5 สลักแกนหมุนยาว 2.9 มิลลิเมตรที่ความเร็วเดินเชื่อม 20, 40, 56, 80, 112 และ 140 มิลลิเมตรต่ออนาที ที่ความเร็วรอบแกนหมุน 2050 รอบต่ออนาที แกนหมุนตามเข็มนาฬิกา ทำการทดสอบด้วย การทดสอบแรงดึงการทดสอบความแข็ง และตรวจสอบโครงสร้างของธาตุด้วยเครื่อง SEM จากการทดลองสรุปได้ว่าข้อพิเศษของกระบวนการเชื่อมทองเหลืองแผ่นเรียบด้วยการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน ได้ผลลัพธ์ที่ดีในบางส่วนของกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น การระเหยกลายเป็นไอของทองแดงและสังกะสีที่มีอยู่ในทองเหลืองไม่เกิดขึ้นกับกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวนโดยไม่มีการไม่ระเหยกลายเป็นไอและจะไม่เกิดการเปลี่ยนสี ส่วนคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่รอยต่อจากการเชื่อมสามารถบรรลุถึงระดับความแข็งแรงของเนื้อวัสดุเดิม ถ้าใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งในการทดลองนี้ใช้ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่ออนาที ที่ความเร็วรอบแกนหมุน 2050 รอบต่ออนาที โดยที่สลักแกนหมุนกวนที่มีเกลียวต้องเข้ากันได้กับทิศทางการหมุนของเครื่องกัดซึ่งถ้าสลักแกนหมุนมีเกลียวขวาทิศทางการหมุนของเครื่องกัดต้องหมุนตามเข็มนาฬิกา และถ้าสลักแกนหมุนเกลียวซ้ายเครื่องกัดต้องหมุนทวนเข็มนาฬิกา ส่วนผิวหน้าของแผ่นชิ้นงานสภาพเดิมจะต้องราบเรียบ รอยต่อซึมลึกของและโลหะที่มีลักษณะอ่อนนุ่มเหนียวไม่สามารถกวนได้สำหรับกระบวนการนี้

2.8.6 KAZUTAKA, SATOSHI, and MASAHISA (2006: 38-41) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมเจือรีดเย็น AA5052-H34 และอลูมิเนียมหล่อ AA360-F การทดลองนี้ได้กำหนดการใช้แผ่นอลูมิเนียมความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และมีความหนา 2 มิลลิเมตร แกนหมุนที่บามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร สลักแกนหมุนผิวเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ใช้เครื่องกัดที่ควบคุมแบบ CNC ที่เอียงแกนหมุน 3 องศาและใช้ความเร็วรอบแกนหมุน 2600 รอบต่อนาทีที่ความเร็วเดินเชื่อม 3 ระดับคือ 50, 200 และ 800 มิลลิเมตร/นาที จากการศึกษาพบว่า การเชื่อมวัสดุทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันสามารถเชื่อมให้คุณสมบัติทางกลด้านการรับแรงดึงได้ดีและให้ค่าที่สูงสุดของการเชื่อมอลูมิเนียมทั้งสองชนิด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 800 มิลลิเมตรต่อนาที โดยที่จะให้ค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าการเชื่อมอลูมิเนียมเจือรีดเย็น AA5052-H34 ชนิดเดียวกันแต่น้อยกว่าการเชื่อมอลูมิเนียมหล่อ AA360-F ชนิดเดียวกันและน้อยกว่าเนื้อวัสดุเดิมของอลูมิเนียมทั้งสองชนิด ส่วนค่าของความแข็งที่บริเวณ HAZ จะพบว่า มีค่าความแข็งลดลงเล็กน้อยและมีลักษณะเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงดึงของการเชื่อมวัสดุในแต่ละอย่างเช่นกัน

2.8.7 Ericsson, Sandstrom (2003: 1379-1387) ทำการศึกษาวิจัยในเรื่อง อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อมที่ส่งผลต่อความต้านการล้าตัวของกระบวนการเชื่อม FSW ที่เปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อม MIG และ TIG ตีพิมพ์ใน International Journal of Fatigue ปีที่ 2003 ทำการการศึกษากับวัสดุอลูมิเนียมเจือ AA6082-T6 ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมแบบต่อชนกำหนดการเชื่อมด้วยการกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน โดยกำหนดให้ใช้ความเร็วรอบแกนหมุนที่ 2200 ถึง 2500 รอบต่อนาทีความเร็วเดินเชื่อม 700 ถึง 1400 มิลลิเมตรต่อนาทีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่าให้ความร้อน 14 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักแกนหมุน 6 มิลลิเมตร สำหรับกระบวนการเชื่อม MIG-pulse และ TIG ตามที่ใช้งานจริงคือที่ทำกรเชื่อมแบบรอยต่อชนบากร่อง ใช้สวดเดิมชนิด AISi5 ใช้ก๊าซคลุมอาร์กอน ความเร็วเดินเชื่อม 120 ถึง 140 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับการกระบวนการเชื่อม TIG และที่ความเร็วเดินเชื่อม 525 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับการเชื่อม MIG-pulse และ TIG โดยทั้งสองกระบวนการมีการให้ความร้อน (Heat Input) 0.46 kJ/mm และ 2.4 kJ/mm ตามลำดับและจากผลการวิจัยที่ทำการทดสอบความแข็งแรงดึง การทดสอบความแข็งที่บริเวณ HAZ และความต้านการล้าตัวโดยจะกำหนดให้ค่า $R = 0.5$ ควบคุมภายใต้ภาระงานคงที่จะมีรูปแบบคลื่นความถี่เป็นแบบ Sine ที่ 9 ถึง 15 Hz พบว่า ค่าความแข็งบริเวณ HAZ ของกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน มีค่าความแข็งลดลงและจะลดลงมาเมื่อทำการเชื่อมแบบ MIG-pulse และ TIG เมื่อเทียบกับเนื้อวัสดุเดิมส่วนที่กระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวน ที่ความเร็วเดินเชื่อมทั้งสองค่าจะ ไม่มีผลแตกต่างกันในบริเวณ HAZ และที่ค่าความแข็งแรงดึง

จะพบว่าการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวนนี้ จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 245 MPa ซึ่งมีค่าที่มากกว่าในการเชื่อม MIG-pulse และการเชื่อมTIGให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 221 MPa และ 219 MPa ตามลำดับ โดยที่เนื้อของอลูมิเนียมเจือAA6082-T6 เดิม มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 317 MPa และในด้านของค่าความต้านการล้าตัวเมื่อพิจารณาที่รอบวัฏจักร 500,000 รอบ จะพบว่าการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวนจะให้ค่าความแข็งแรงด้านความล้ามากที่สุดโดยจะเกิดความเสียหายที่ค่าความเค้น 90 MPa โดยที่การเชื่อม MIG-pulse และ TIG มีค่าความแข็งแรงด้านความล้าน้อยกว่าและเกิดความเสียหายที่ค่าความเค้น 60 MPa และ 70 MPa ตามลำดับ

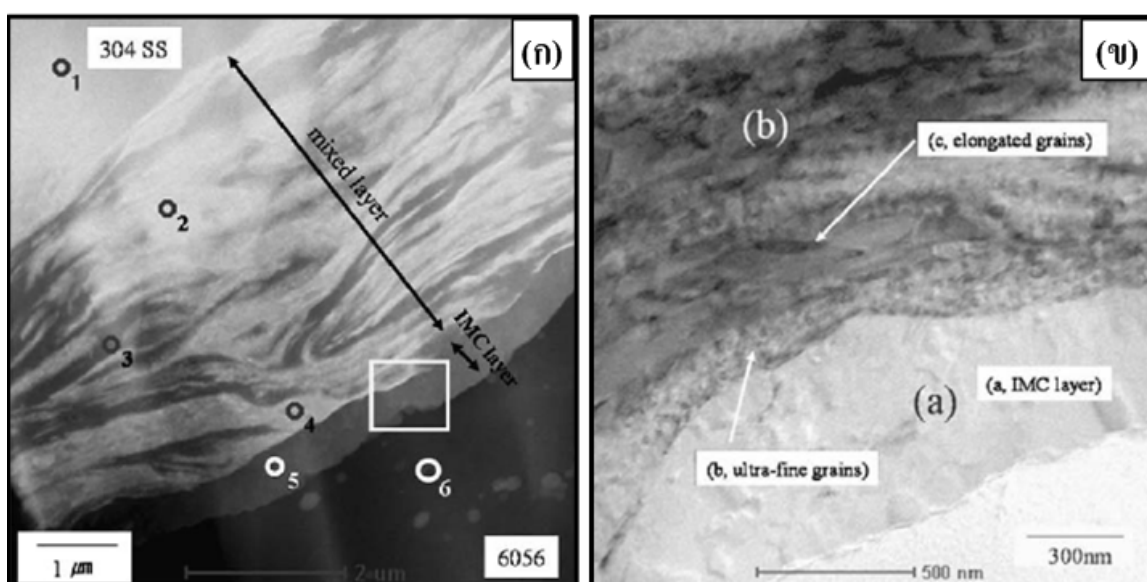
2.8.8 การศึกษาปฏิกิริยาของอินเทอร์เฟสในการเชื่อมเหล็กกล้ากับอลูมิเนียมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนรายงานผลโดย (Won-Bae Lee, et al.,2006: 355-358) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กับอลูมิเนียมผสม Al6056-T4 ความหนา 4 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการเชื่อม 800 รอบต่อนาที และความเร็วเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาทีไม่ได้รายงานผลของระยะสอดหัวกวนตามรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดง (ก)ขั้นตอนการเชื่อมและ (ข)โครงสร้างจุลภาคของงานเชื่อม

(Won-Bae Lee, et al.,2006: 355-358)

จากการทดลองพบว่า การเสียดทานของหัวกววนทำให้เกิดการหลุดของผิวเหล็กกล้าไร้สนิมไปกระจายตัวเป็นลักษณะอนุภาคนาขนาดเล็กเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่อลูมิเนียมในขณะเดียวกัน หัวกววนก็ทำให้เกิดการเสียรูปของผิวหน้าเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเช่นกัน และเมื่อนำชิ้นงานเชื่อมมาวิเคราะห์บริเวณอินเทอร์เฟซผ่านกล้อง TEM, X-Ray และวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (EDS) พบว่าบริเวณอินเทอร์เฟซของเหล็กกล้าไร้สนิมกับอลูมิเนียมมีความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหนาประมาณ 250 นาโนเมตร ขนาดเกรนของสารประกอบน้อยกว่า 50 นาโนเมตรเป็นเกรนที่มีละเอียดมาก(Ultra-Fine Grain) แสดงตามรูปที่ 2.18

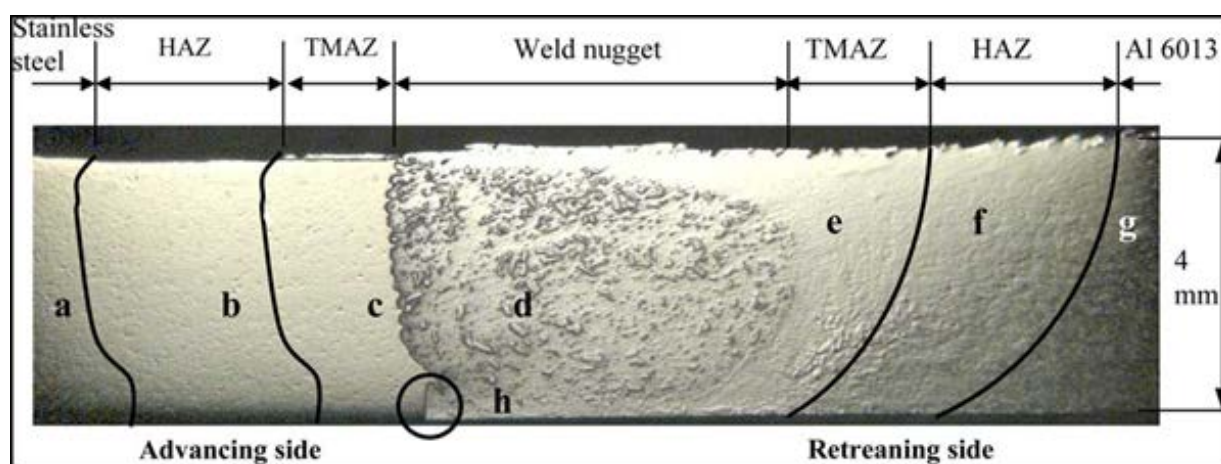


รูปที่ 2.18 แสดง (ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซผ่านกล้อง SEM และ (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคผ่านกล้อง TEM (Won-Bae Lee, et al.,2006: 357)

จากการหมุนของหัวกววนทำให้เกิดการเสียดสีที่กระทำต่อผิวหน้าของเหล็กกล้าไร้สนิมจนทำให้เกิดการเสียรูปของโครงสร้างผลึก และดีสโลเคชั่น(Dislocation) จำนวนมากบริเวณผิวหน้าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใกล้กับอินเทอร์เฟซ การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกววนเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และอลูมิเนียม Al 6056 ทำให้เกิดโครงสร้างอินเทอร์เฟซที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะหมุนวน และมีชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ความหนาอยู่ที่ประมาณ 250 นาโนเมตร และถูกระบุว่าเป็นเฟสของ Al_4Fe ที่มีโครงสร้างเป็นหกเหลี่ยม

2.8.9 Huseyin U., and et.al., 2004: 41-46 ได้ทำการศึกษาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกววนโลหะต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียมผสม (Al 6013-T4) กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (X5CrNi18-10) โดยทำการศึกษาความสามารถในการเชื่อมโลหะต่างชนิด, โครงสร้างจุลภาคของ

รอยเชื่อม, การประเมินค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม, สมบัติทางกลด้านความล้าของรอยเชื่อม และวัดการแพร่ของธาตุบริเวณที่เป็นแนวเชื่อม(Welding Zone) จากผลการศึกษาพบว่าวัสดุทั้งสองชนิดสามารถเชื่อมเข้าด้วยกันได้ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน โดยให้ค่าความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอมากนักในรอยเชื่อมเนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่หลุดจากการเสียดสีของหัวกวนเข้าไปปะปนกระจายตัวในเนื้ออลูมิเนียม และไม่ได้เกิดปฏิกิริยาการแพร่ระหว่างอนุภาคที่หลุดเข้าไปกระจายตัวในเนื้ออลูมิเนียม เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาไม่เพียงพอต่อการเกิดการแพร่ แสดงตามรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับอลูมิเนียม

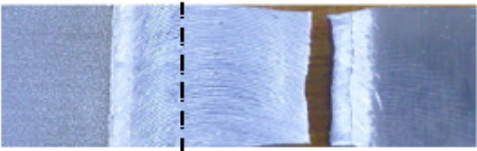
(Huseyin U., and et.al., 2004: 43)

ความแข็งแรงที่วัดได้จากรอยเชื่อมจะให้ค่าความแข็งแรงสูงมากในบริเวณก้นแนวเชื่อมที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมกระจายตัวอยู่ และค่าความแข็งแรงจะค่อย ๆ ลดลงเล็กน้อยในบริเวณที่เป็นผลกระทบทางกลจากหัวกวน(TMAZ) ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณนี้ทำให้ความหนาแน่นของดิสโลเคชันลดลง เนื่องจากการคืนตัว และเกิดผลึกใหม่ในทันที (Dynamic Recovery and recrystallization) ความแข็งแรงที่วัดได้สูงสุดเกิดขึ้นรอบศูนย์กลางของแนวเชื่อม ประมาณ 6-11 มิลลิเมตร

ผลของความต้านทานการล้าจากการทดสอบจะให้ค่าการต้านทานความล้าต่ำกว่าเนื้อโลหะขึ้นงานอลูมิเนียมประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ กลไกของการล้าของขึ้นงานเริ่มเกิดขึ้นจากรอยร้าวที่บริเวณฐาน(Root) ของรอยต่อที่มีการซึมลึกหรือการหลอมไม่สมบูรณ์จากการหมุนกวนเป็นสาเหตุทำให้ขึ้นงานเชื่อมมีค่าความต้านทานต่อความล้าลดลง ส่วนโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมพบว่าอลูมิเนียมเกิดการแพร่รวมตัวกับเหล็กกล้าไร้สนิมได้น้อยมากที่บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม แต่อย่างไรก็ดี เหล็ก(Fe) โครเมียม(Cr) และนิกเกิล(Ni) ที่เป็นอนุภาคนาโนขนาดเล็กหลุดเข้าไป

กระจายตัวในเนื้ออลูมิเนียมทำให้เกิดการแพร่เกิดขึ้นบางเพียงเล็กน้อยที่บริเวณอินเทอร์เฟซของอนุภาคกับเหล็กกับเนื้ออลูมิเนียม และเสนอแนะให้มีการศึกษาค่าตัวแปรอื่นที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของงานเชื่อมเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิม กับอลูมิเนียมต่อไป

2.8.10 จากการวิจัยของ Bang H., et. al., 2012: 48-55 ได้ทำการศึกษาการเชื่อมผสมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนและการเชื่อมทิกอลูมิเนียมผสม Al6061-T6 กับเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยใช้กระบวนการเชื่อมแบบทิกอาร์คให้ชิ้นงานเกิดความร้อนก่อนจะเชื่อมทับด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยเรียกวิธีการนี้ว่า (Hybrid Friction Stir Welding: HFSW) เชื่อมชิ้นงานอลูมิเนียม Al6061-T6 กับเหล็กกล้าไร้สนิม 304 เมื่อนำมาทดสอบสมบัติทางกลโดยการดึงพบว่า การเชื่อมด้วยวิธีผสมระหว่างทิกกับการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนให้ลักษณะของการฉีกขาดเป็นแบบเหนียวรอยขาดเกิดขึ้นห่างจากอินเทอร์เฟซ และมีค่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 93 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุชิ้นงานอลูมิเนียม ส่วนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนเพียงอย่างเดียวจะให้การฉีกขาดแบบเปราะเกิดขึ้นที่บริเวณอินเทอร์เฟซ ดังแสดงตามรูปที่ 2.20 แสดงลักษณะรอยขาดของชิ้นงานเชื่อมทดสอบ

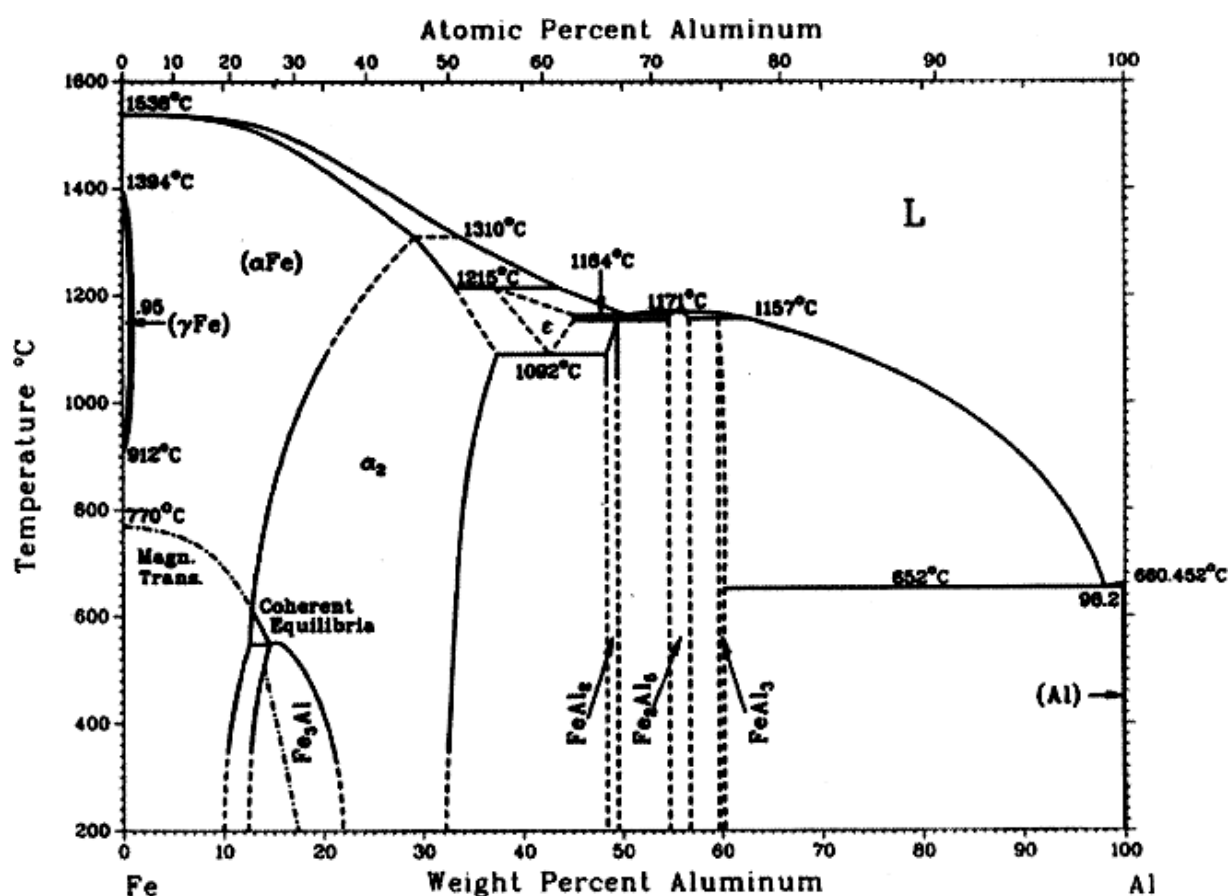
Welding process	Fractured specimens	Fracture mode
FSW	 Inter face	Brittle
HFSW	 Inter face HAZ	Dimple

รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการฉีกขาดของชิ้นงานเชื่อม (Bang H., et. al., 2012: 51)

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้เกิดการยึดตัวดีและเพิ่มความแข็งแรงทางกลให้แก่แนวเชื่อมโลหะต่างชนิด ส่วนค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดวัดได้บริเวณแนวเชื่อมกวน (Stir Zone) เนื่องจากเกิดการตกผลึกและเกรนหยาบสำหรับโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นบริเวณผลกระทบจากความร้อนจะให้เกรนที่ละเอียดเกิดขึ้น

เล็กน้อยสำหรับการเชื่อมแบบผสมเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบกวน การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมทำให้ลักษณะการเลี้ยวรูปเป็นแบบถาวรแสดงให้เห็นถึงการไหลตัวของวัสดุ และทำให้บริเวณดังกล่าวมีขนาดเกรนที่เล็กลง ความหนาแน่นของดิสโลเคชันลดลงจึงทำให้ความแข็งแรงลดลง แต่ความเหนียวเพิ่มขึ้น

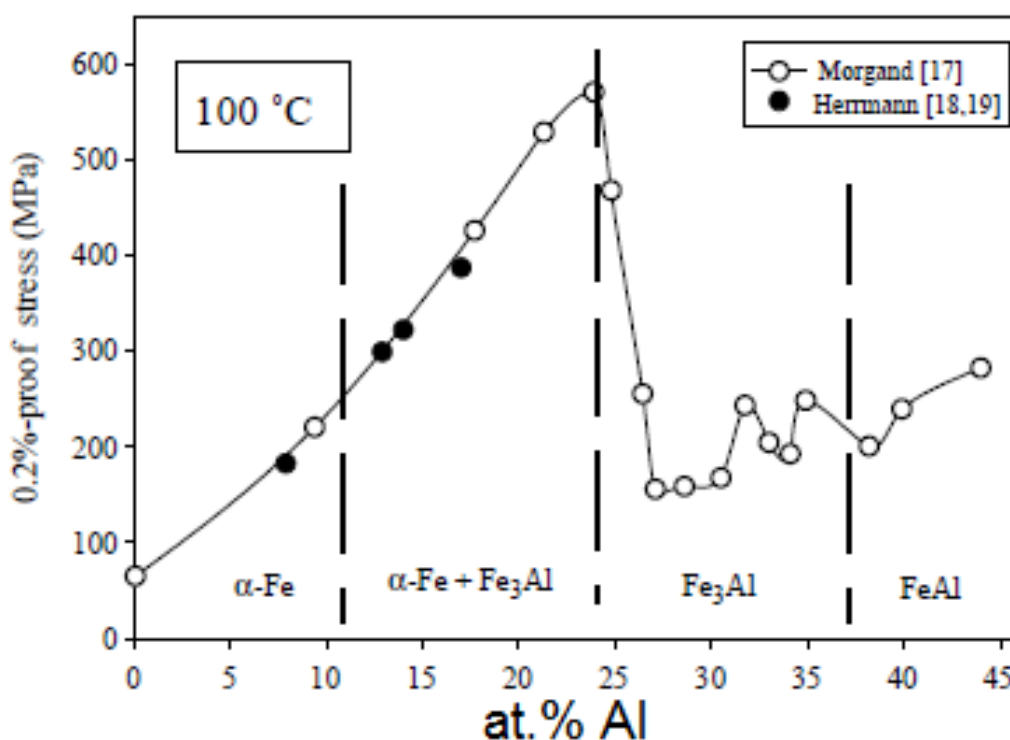
2.8.11 ผลการศึกษาความแข็งแรงของเหล็กกับอลูมิเนียมจากแผนภาพสมดุลโดย Plam M., 2005: 1286-1295 จากแผนภาพสมดุลเหล็กและอลูมิเนียม แสดงการเกิดสารละลายของแข็งสองเฟสระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียมที่จะเกิดกลไกการสร้างเสริมความแข็งแรงจากสารละลายของแข็ง (Solid Solution Hardening) จากการจัดเรียงตัวของอนุภาคในสารละลายของแข็งที่เป็นแบบต่อเนื่อง (Coherent) หรือเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Incoherent) ซึ่งเป็นสาเหตุในการปรับแต่งให้เกรนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยอาศัยอนุภาคของ Fe-Al ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพสมดุลของเหล็กกับอลูมิเนียม

(Plam M., Intermetallic 13, 2005, 1287)

จากแผนภาพสมดุลแสดงให้เห็นว่าเฟส Fe₃Al(D03-ordered) จะเริ่มเกิดขึ้นในช่วงส่วนผสมของ อลูมิเนียมประมาณ 27 at.% ที่อุณหภูมิ 552 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิลดลงเฟสของ Fe₃Al (D03) เริ่มมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น และจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นของเฟส Fe₃Al ก็ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงด้วยเช่นกันจากการทดสอบค่าความแข็งแรงจะได้ค่าความเค้น พิกฐานที่สูงของเฟส Fe₃Al ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงค่าความเค้นพิกฐานของเฟส FeAl ที่เกิดขึ้น ณ ส่วนผสมของ Al

(Palm M., Intermetallic 13, 2005, 1295)

จากการทดสอบค่าความเค้นพิกฐานของสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง FeAl พบว่าเฟสที่มี ส่วนผสมของ α -Fe+Fe₃Al (มีอลูมิเนียมประมาณ 11-24 at.%) เป็นสารประกอบที่ให้ค่าความเค้น สูงที่สุดหรือเป็นสารประกอบที่มีความแข็งแรงสูงสุดเมื่อมีส่วนผสมของอลูมิเนียมไม่เกิน 24 at.%

2.8.12 จากการศึกษาของ ฌูว์, เรืองศักดิ์ และกิตติพงษ์ พบว่ากระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนระหว่างอลูมิเนียมเกรด 6063 กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในลักษณะของการต่อชนสามารถทำการเชื่อมให้วัสดุสองชนิดผสานติดกันได้ทั้ง ๆ ที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันอย่างมาก ซึ่งไม่เพียงแต่ความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลของ กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพราะเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวนและระยะสอด้ก็มี

อิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยเซนกัน และผลที่ได้จากการนำผลของการเชื่อมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวน 2 , 3 และ 4 มิลลิเมตร ระยะสอด 0 , 0.1 , 0.2 และ 0.3 ความเร็วรอบ 580 , 750 และ 830 รอบต่อนาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 44 , 66 และ 102 มิลลิเมตรต่อนาที ไปทำการทดสอบแรงดึงนั้น ทำให้พบว่า ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวน 4 มิลลิเมตร ระยะสอด 0.1 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 66 มิลลิเมตรต่อนาที จะทำให้เกิดค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ที่ 136.06 MPa และเกิดค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยที่ต่ำสุดอยู่ที่ 18.86 MPa ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ระยะสอด 0 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 44 มิลลิเมตรต่อนาทีจากสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมนี้จะทำให้ได้รอยต่อที่ผิวสัมผัสเกิดการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ FeAl₂ (17.13Fe-63.01Al-8.10O % โดยอะตอม และอื่น ๆ) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลให้ความเหนียวแน่น ความแข็งแรงสูง สามารถต้านทานการเปลี่ยนรูป และแตกหักได้ดี อีกทั้งต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยเกิดจากสภาวะการเชื่อมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวน 4 มิลลิเมตร ระยะสอด 0.1 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 66 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ทำให้เกิดการผสมติดกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างสมบูรณ์ จากสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมสามารถให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดของรอยต่อของอลูมิเนียมเกรด 6063 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ได้จากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าเท่ากับ 136 MPa หรือคิดเป็น 93.83 % ความแข็งแรงของเนื้อโลหะงานอลูมิเนียม