

อิทธิพลของการอบคืนตัวต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

EFFECT OF TEMPERING TO THE FRICTION WELDING OF AISI 1045

อนิกร เหล่าพวงศักดิ์

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

อิทธิพลของการอบคืนตัวต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน เหล็กกล้า AISI 1045

อนิกร เหล่าพวงศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

EFFECT OF TEMPERING TO THE FRICTION WELDING OF AISI 1045

ANIKORN LOWPOUNGSAK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
PROGRAM IN MANUFACTURING ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI
ACADEMIC YEAR 2015
COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการอบคืนตัวต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045
ชื่อ - นามสกุล	นายอนิกร เหล่าพวงศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เป็นการเชื่อมอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเพิ่มมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ไม่ต้องการตัวประสานในการเชื่อม ไม่เกิดควัน รอยเชื่อมมีคุณภาพดีเสมอเต็มหน้า ไม่มีรูพรุน ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น เป็นต้น แต่เนื่องจากขณะเชื่อมเกิดความร้อนสูงขึ้นบริเวณรอยเชื่อม จึงส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก บริเวณรอยเชื่อมซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI1045 หลังการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ทำการทดลองโดยนำวัสดุเหล็กกล้า AISI 1045ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ไปผ่านกรรมวิธีอบชุบแบบ อบอ่อน สมบูรณ์ อบคืน และที่ไม่ผ่านกรรมวิธีอบชุบจากนั้นทำการเชื่อมภายใต้แรงดันในการอัด 20, 30, และ 40 บาร์ เวลาในการอัด, 3 และ 4 วินาที กำหนดความเร็วรอบในการเชื่อม, 800 รอบต่อนาที นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบแรงดึง ความแข็งบริเวณรอยเชื่อม และตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อม

ผลการทดลองพบว่ากระบวนการทางความร้อนมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงดึง ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนก่อนการเชื่อมส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง แต่ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านกรรมวิธีอบชุบ ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวก่อนการเชื่อมส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมสูงขึ้น โดยชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวก่อนการเชื่อมที่แรงดันในการอัด 20 บาร์ เวลาในการอัด 2วินาที

มีสมบัติทางกลดีที่สุด มีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 525.6 เมกะปาสกาล ค่าความแข็งบริเวณ รอยเชื่อมเท่ากับ 487.85HV ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคพบว่าเกรนของเหล็กที่บริเวณรอยเชื่อม ซึ่งงานที่ผ่านการอบคืนตัวมีเกรนที่ละเอียดมากกว่าซึ่งงานที่ผ่านการอบอ่อนสมบูรณ์และซึ่งงานปกติ จึงส่งผลทำให้โครงสร้างมีความแข็งมากกว่า

คำสำคัญ: การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานการอบอ่อนสมบูรณ์ การอบคืนตัว

Thesis Title Effects of Tempering on the Friction Welding of AISI 1045 Steel
Name – Surname Mr. Anikorn Lowpoungsak
Program Manufacturing Engineering
Thesis Advisor Assistant Professor Sirichai Torsakul, D.Ing.
AcademicYear 2015

ABSTRACT

Friction Stir Welding has been widely used in many industries because of many advantages such as no filler metal required, no smoke, good uniform-welding surface quality, no porosity, and short welding time. However, due to very high heat generated during the welding process, microstructure change occurs around the welding area and this directly affects the mechanical properties of the welding materials.

This research aimed to study the effects of the heat treatment process on the mechanical properties of AISI 1045, a medium carbon steel, after the Friction Stir Welding process. Before conducting the experiments, the AISI 1045 specimens with 10 mm in diameter did not undergo any heat treatment, except full annealing, and tempering processes. After that, the specimens were welded under 20, 30, and 40 bars with 2, 3, and 4 seconds of compression times. The welding revolution speed was 1,800 rpm. After the welding, the specimens' mechanical properties were tested by conducting tensile test, hardness test and examined their macro and microstructures at the welding lines.

The results indicated that the heat treatment process had great effects on hardness and tensile strength of the materials. The tensile strength of the specimens that had been fully annealed prior to the welding process was lessen. However, their hardness was higher than that of the specimens that did not undergo the heat treatment process. The tensile strength and the hardness at the welding line increased if the specimens had undergone the tempering process. The tempering specimens which have been welded under 20 bars and 2 seconds of compression time provided the best mechanical properties – tensile strength at 525.6 MPa, and hardness at 487.85 HV. For the microstructure, the result showed that the grains of the specimens that have been tempered were finer than those fully annealed and those without the heat treatment, and this resulted in the higher

hardness of the structure.

Keywords: friction welding, fully annealing, tempering

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จ ได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ คณะกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรม การผลิต ขอขอบคุณ คณาจารย์-ครู วิทยาลัยเทคนิคชัชวาท คณาจารย์-ครู มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล กรุงเทพมหานคร เขตเทคนิคกรุงเทพ ที่ให้คำแนะนำ ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ เครื่องมือ อุปกรณ์สถานที่ และให้ความช่วยเหลือ ตลอดช่วงเวลา ของการศึกษา และทำการวิจัยนี้

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณ วุฒิ-คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา บ่มเพาะ วิชาการจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดามารดา ครู อาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อนิกร เหล่าพวงศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(9)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(14)
บทที่ 1 บทนำ	16
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	16
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	17
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	18
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
2.1 เหล็กกล้า (Steel).....	19
2.2 กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน.....	20
2.3 พารามิเตอร์ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding Parameter).....	21
2.4 การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Heat Treatment of Steel).....	26
2.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	37
2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	43
2.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา (Metallographic Examination).....	46
2.8 การหาขนาดเกรนของโครงสร้างโลหะที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะ.....	50
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	54
3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการทางความร้อน.....	56
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	58
3.4 การทดสอบค่าต้านทานต่อความแข็งแรงดึง (Tensile Test).....	62
3.5 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	63
3.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคทางโลหะวิทยา.....	64
3.7 การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงบริเวณรอยเชื่อม.....	67
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	70
4.1 อิทธิพลกระบวนการทางความร้อนมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Test).....	70
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อม.....	73
4.3 อิทธิพลกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อความแข็ง.....	77
4.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อม.....	80
4.5 การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม.....	87
4.6 การเปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบบริเวณรอยเชื่อม.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง.....	93
บรรณานุกรม.....	94
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก ผลการทำ Pre-Test.....	97
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบแรงดึงและความแข็ง.....	105
ภาคผนวก ค ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1045.....	122
ภาคผนวก ง มาตรฐาน ASTM.....	124
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	130
ประวัติผู้เขียน.....	146

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางพารามิเตอร์การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบการหมุนแบบแรงเฉื่อย.....	24
ตารางที่ 2.2 ตารางพารามิเตอร์การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบการหมุนแบบแรงเฉื่อย.....	24
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอันยะรูปของเหล็กบริสุทธิ์.....	32
ตารางที่ 2.4 รูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125).....	40
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก AISI 1045.....	54
ตารางที่ 3.2 ความเร็วรอบของเครื่องกลึงในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์ เวลา 2 วินาที.....	60
ตารางที่ 3.3 เวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานด้วยความเสียดทานที่ความดันที่ความดันกดแช่ ชิ้นงาน 14 บาร์ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์.....	60
ตารางที่ 3.4 ความดันที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์เวลา ในการอัด 2 วินาที.....	61
ตารางที่ 3.5 จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิปกติ Tempering และ Full Annealing.....	61

สารบัญรูป

หน้า	
รูปที่ 2.1 พารามิเตอร์การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบต่อเนื่อง.....	22
รูปที่ 2.2 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบการหมุนแบบแรงเฉื่อย.....	23
รูปที่ 2.3 ลักษณะแรงดันในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ต่างกัน.....	25
รูปที่ 2.4 จังหวะหมุนเริ่มการเชื่อม.....	25
รูปที่ 2.5 จังหวะหมุนเพื่อเสียดสี.....	25
รูปที่ 2.6 จังหวะอัด.....	26
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการอบอ่อนในเหล็กกล้าคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์.....	28
รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงค่า Lattice Parameter a และ c ตามปริมาตรคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอน	30
รูปที่ 2.9 โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่กำลังขยาย 2500.....	31
รูปที่ 2.10 เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ผ่านการชุบแข็งในน้ำ ประกอบด้วยโครงสร้าง ออสเทน ไนท์ เหลือค้างและมาร์เทนไซต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็ม.....	31
รูปที่ 2.11 ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่เกิดในระหว่างการเย็นตัว เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ.....	32
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของคาร์บอนที่มีต่อช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์.....	34
รูปที่ 2.13 ผลของธาตุคาร์บอนต่อความแข็งของโครงสร้างออสเทนไนท์และมาร์เทนไซต์ (ส่วนที่แรงกดตอนปลายแสดงผลของออสเทนไนท์เหลือค้าง).....	34
รูปที่ 2.14 อุณหภูมิกับความแข็งของการอบคืนตัว Tempering.....	37
รูปที่ 2.15 แผนภาพแรงดึง-ระยะยืด	39
รูปที่ 2.16 ขั้นตอนทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125)	40
รูปที่ 2.17 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	41
รูปที่ 2.18 แผนภาพความเค้น-ความเครียด (σ - ϵ Strain Diagram)	42
รูปที่ 2.19 การวัดขนาดความยาวชิ้นงานทดสอบหลังถูกดึงขาด Lu.....	42
รูปที่ 3.1 เหล็กกล้า AISI 1045 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร.....	54
รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน.....	55
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ควบคุมระบบไฮดรอลิก.....	55
รูปที่ 3.4 เครื่องกลึงแนวนอนติดตั้งระบบไฮดรอลิก.....	56

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบคืนตัว เหล็ก AISI 1045 ที่ 870 °C.....	57
รูปที่ 3.6 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนสมบูรณ์ เหล็ก AISI 1045 ที่ 870 °C.....	57
รูปที่ 3.7 เตอบชุบไฟฟ้า 870 องศาเซลเซียส.....	58
รูปที่ 3.8 การจับยึดชิ้นงานกับเครื่องกลึง.....	58
รูปที่ 3.9 การเชื่อมเสร็จสมบูรณ์หุ้ดเครื่องกลึงแบบทันที.....	59
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8-04 ที่ผ่านการกลึง CNC.....	62
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	62
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการกอบนชิ้นงานทดสอบในแนวนอน.....	63
รูปที่ 3.13 เครื่อง Microhardness Test ตามมาตรฐาน ASTM E92.....	63
รูปที่ 3.14 เครื่องตัดผ่าชิ้นงานทดสอบ	64
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานทดสอบที่ถูกตัดผ่าตามแนวนอน.....	65
รูปที่ 3.16 เครื่องหล่อตัวเรือนชิ้นงานทดสอบ	65
รูปที่ 3.17 เครื่องฉีดกระดาษทรายแบบจานหมุน.....	66
รูปที่ 3.18 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรซิน.....	66
รูปที่ 3.19 กล้อง Microscope.....	67
รูปที่ 3.20 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงรอยเชื่อมมาตรฐานการทดสอบ ASTM E602-19.....	68
รูปที่ 3.21 บริเวณตำแหน่งการตรวจสอบการพังทลายของรอยเชื่อม.....	68
รูปที่ 3.22 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	69
รูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045.....	71
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึง ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการความร้อน ก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045.....	73
รูปที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ใช้เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด2, 3 และ 4 MPa.....	74
รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อมตัวแปรเวลาในการอัดและแรงดันในการอัด	75
รูปที่ 4.5 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง.....	76

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งการกดค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E92-82.....	77
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2,3 และ 4 วินาที แรงดันในการอัด 2,34 Mpa.....	78
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบความแข็งกับค่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal ของเหล็กกล้า AISI 1045.....	79
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานของเหล็กกล้า AISI 1045.....	81
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการ Full Annealing ลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะเมื่อได้รับแรงดันในการอัด.....	81
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่ผ่านกระบวนการ Full Annealing.....	82
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะเมื่อได้รับแรงดันในการอัด.....	83
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่ผ่านกระบวนการความร้อน.....	84
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการ Tempering ลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะเมื่อได้รับแรงดันในการอัด.....	85
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบชุบ Tempering ก่อนการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน เหล็กกล้า AISI 1045.....	86
รูปที่ 4.16 ชิ้นงานทดสอบมาตรฐานแรงดึงที่รอยเชื่อม ASTM E602 -18.....	87
รูปที่ 4.17 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM E602-18 ชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering.....	88
รูปที่ 4.18 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM E602-18 ชิ้นงานทดสอบไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal.....	88
รูปที่ 4.19 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM E602-18 ชิ้นงานทดสอบไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full Annealing.....	89
รูปที่ 4.20 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering....	90

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.21 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความ Nor mal.....	90
รูปที่ 4.22 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความ Full Annealing...	91

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AISI	มาตรฐานเหล็กอเมริกัน AISI(The American Iron and Steel Institute)
ASTM	สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี (American Society For Testing and Material)
CNC	เครื่องจักรกลควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control)
BM	โลหะเดิม (Base Metal)
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone)
°C	หน่วยวัดอุณหภูมิองศาเซลเซียส
MPa	แรงกด
mm	มิลลิเมตร
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Viker)
N	แรง (นิวตัน)
AISI 1045	เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมโลหะ มีความจำเป็นต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ซึ่งเทคนิคการเชื่อมโลหะมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับแหล่งความร้อนและขั้นตอนในการเชื่อม ในงานอุตสาหกรรมการเชื่อมโลหะจะต้องคำนึงถึงผลผลิตด้าน โครงสร้างและความแข็งแรงของรอยเชื่อม อีกทั้งการเชื่อมมีความสะดวกและรวดเร็วต้นทุนในการเชื่อมต่ำจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการเลือกใช้เทคนิคการเชื่อมที่เหมาะสม

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเชื่อมโลหะชนิดเดียวกันหรือโลหะต่างชนิดกันโดยไม่ต้องใช้ตัวประสาน ใช้เวลาการเชื่อมที่น้อยกว่าวิธีอื่น การเชื่อมเต็มพื้นที่หน้าตัดและสามารถเชื่อม โลหะต่างชนิดได้ และมีมลภาวะที่เป็นพิษทางอากาศต่ำ ใช้พลังงานในการเชื่อมน้อยกว่ากระบวนการเชื่อมแบบอื่น [1] การศึกษาทฤษฎีและความสำคัญของการเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมความเสียดทานที่ได้รับคือการพัฒนาเพื่อให้ได้รอยต่อที่เหมาะสมในการใช้งาน โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเกิดขึ้นในการเชื่อมต่อชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันหรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน AISI 1040 แล้วนำมาประมวลผลการทดลองด้วยการโปรแกรมจำลอง [2]การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานการเชื่อมได้เลือกวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กเครื่องมือมาเชื่อม ได้มีผลกระทบของเวลา, ความเร็วรอบและแรงดันในการอัดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแต่อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรอื่นๆอีกหลายตัวที่อาจมีผลต่อความแข็งแรงและความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยความเสียดทาน [3]การศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนปานกลาง AISI1045 ที่ผ่านการอบอ่อนและทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กหน้าตัดกลม โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อมจากการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิปกติของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมชิ้นงานค่าแรงดึงมีค่าสูงกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนแต่ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมชิ้นงานที่อุณหภูมิปกติของรอยเชื่อมจะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในส่วนของโครงสร้างจุลภาคพบว่าเกรนของเหล็กที่บริเวณรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนมีเกรนที่ละเอียดมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนจึงส่งผลทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากกว่า [4] การสร้างเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบพบว่าเครื่องเชื่อมต้นแบบสามารถทำงานและเชื่อมต่อชิ้นงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆที่เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบทำได้คือสามารถปรับตั้งค่า

แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ตั้งแต่ 10-60 บาร์แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ตั้งแต่ 20-100 บาร์ความเร็วรอบในการหมุน (Friction Speed) ตั้งแต่ 0-2,500 รอบต่อนาทีและสามารถปรับตั้งเวลาในการเสียดทาน (Friction Time) เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ได้จากการทดลองเชื่อมเหล็กเพลากลมชนิด AISI 1015 พบว่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมต่อมีค่าความแข็งลดต่ำลงซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนจากการวิเคราะห์โครงสร้างของเกรนเหล็กด้วย Microphotograph พบว่าบริเวณแนวเชื่อมต่อมีเกรนของเหล็กที่ละเอียดมากกว่าบริเวณอื่นที่ไม่ได้รับผลกระทบจากเชื่อมส่งผลให้บริเวณแนวเชื่อมต่อมีความแข็งแรงมากขึ้น[5]

การเชื่อมต่อโลหะวัสดุต่างชนิดกันมีความจำเป็นต่อภาคอุตสาหกรรมการผลิต เช่น อุตสาหกรรมการผลิตที่มีการเชื่อมต่อโลหะผสมและเหล็กกล้าคาร์บอนเข้าด้วยกัน เพราะสามารถลดต้นทุนทางวัตถุดิบ โดยวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ผลที่ได้สามารถเชื่อมต่อชนกันได้และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างมหภาค ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของได้เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 อยู่สูงกว่า 6% และค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดของชิ้นงานทดสอบเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 ต่ำกว่า 1.9 %

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีผลต่อสมบัติทางกล เหล็กกล้า AISI 1045 ซึ่งยังไม่มีมีการวิจัยใดได้กล่าวถึงการวิจัยเกี่ยวข้องกับอิทธิพลเวลาในการอัด แรงดันในการอัด โดยการทดลองนี้จะทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ที่จุดกึ่งกลางชิ้นงานตามแนวอนของรอยเชื่อม เพื่อหาค่าความแข็งแรงและความแข็งของรอยเชื่อม ทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และตรวจสอบขนาดเกรน (Grain Size) บริเวณรอยเชื่อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อความแข็งแรงและความแข็งของรอยเชื่อม

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาคและ โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิของกระบวนการความร้อนก่อนการเชื่อมเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงและความแข็งของรอยเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 และศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ขอบเขตของงานวิจัยมีดังนี้

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง เหล็กกล้า AISI 1045 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร
- 1.3.2 วัสดุทดลองผ่านกระบวนการความร้อน Tempering Full Annealing , และ Normal
- 1.3.3 เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4 วินาที
- 1.3.4 เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที
- 1.3.5 แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa
- 1.3.6 แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa
- 1.3.7 ความเร็วรอบชิ้นงาน 1800 รอบต่อนาที
- 1.3.8 ทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E8-04 [7]
- 1.3.9 ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E92-82 [8]
- 1.3.10 ตรวจสอบขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM E112-96 [9]
- 1.3.11 ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค และโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 เข้าใจสถานะของอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อมที่มีผลต่อรอยเชื่อมเสียดทาน
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงค่าตัวแปรการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลและ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค ของรอยเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน
- 1.4.3 เป็นการสร้างองค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยต่อไป และประโยชน์ต่อ นำงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้า (Steel)

เป็นโลหะที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในปัจจุบัน เหล็กกล้ามีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.1-1.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ทำให้เหล็กกล้ามีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เหล็กกล้าถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างมาก นอกจากปริมาณของธาตุคาร์บอนแล้ว ยังมีการผสมธาตุต่าง ๆ ในเนื้อเหล็กกล้าอีกด้วย เช่น โครเมียม นิกเกิล ทังสแตน วาเนเดียม โมลิบดีนัม เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าให้ดีขึ้น เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเฉพาะอย่าง เช่น ทนต่ออุณหภูมิได้สูง ทนต่อกา รเสียดสี ทนต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแรงสูงขึ้น เหล็กกล้าแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ

1) เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนเป็นหลัก อาจจะมีธาตุอื่นผสมอยู่ได้บ้างเล็กน้อย เช่น ซิลิกอน แมงกานีส กำมะถัน ฟอสฟอรัส เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกได้หลายชนิดตามปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก จะทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน และนำไปใช้งานในลักษณะต่างกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จัดได้ว่าเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้อยที่สุด คือ มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.10 – 0.30% โดยน้ำหนักกำหนดตามมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1010-1030 กำหนดมาตรฐานเยอรมัน คือ S37 เนื่องจากมีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่น้อย ทำให้มีความแข็งแรงต่ำไม่สามารถนำไปทำการชุบแข็งได้ เหมาะสำหรับนำไปใช้งานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก เช่น นำไปรีดเป็นแผ่น ทำถังบรรจุของเหลว นำไปทำเป็นเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้าง

2) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ คือมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.31-0.55% โดยน้ำหนัก กำหนดตามมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1031-1055 กำหนดตามมาตรฐานเยอรมัน คือ St 50 สามารถนำไปปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน โดยการนำไปชุบแข็ง (Hardening) คือนำชิ้นงานไปเผาให้ร้อนเพื่อให้เหล็กเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งการจะใช้อุณหภูมิสูงขนาดไหนขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ จากนั้นทำให้เย็นตัวลงโดยเร็ว เหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเหล็กจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เหล็กกล้าชนิดนี้นำไปใช้ผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรง เช่น เพลาส่งกำลัง เฟืองในเครื่องจักรต่าง ๆ

3) เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่ปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในเนื้อสูงสุด คือมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.56 –1.5% โดยน้ำหนัก กำหนดมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1056–1090 กำหนดมาตรฐานเยอรมัน คือ St170 เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูง นำไปผลิตเครื่องมือคมตัดต่างๆ เช่น มีดคิ่ง ดอกสว่าน ดอกคว้านละเอียด ดอกทำเกลียว ใบเลื่อย ตะไบ ซึ่งเครื่องมือคมตัดต่างๆ เหล่านี้ จะนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป ตามขนาด และรูปร่าง แล้วนำชิ้นงานไปปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน โดยการนำไปชุบแข็ง (Hardening) ซึ่งจะทำงานมีความแข็งแรงสูงมาก แต่เมื่อได้รับแรงกระแทกจะเปราะหักได้ง่าย [10]

2.2 กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

2.2.1 การเชื่อมแบบเสียดทาน (Friction Welding)

กระบวนการเชื่อมแบบนี้กระทำได้โดยการนำเอาชิ้นงาน 2 ชิ้นมาเสียดสีกัน (ชิ้นหนึ่งจะหมุนด้วยความเร็วรอบอีกชิ้นหนึ่งจะถูกยึดอยู่กับที่) ระหว่างสองชิ้นที่ผิวหน้าสัมผัส ผัสจะเกิดความร้อนจะทำให้เนื้อวัสดุอ่อนตัวจากความร้อน ที่เกิดการเสียดสี จากนั้นใช้แรงกดให้ชิ้นงานสองชิ้นติดกัน ชิ้นงานมีลักษณะที่เป็นรูปทรงกระบอก เช่น เฟลา รอยต่อที่ได้จะมีคุณสมบัติดีหรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ปริมาณความร้อน ที่เกิดจากการเสียดสี ของวัสดุ และคุณสมบัติทางกลที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของวัสดุ หมายถึง การควบคุมความเร็ว และแรงกดอัดในขณะการเชื่อม ซึ่งเป็นผลให้แนวเชื่อมมีลักษณะแตกต่างกันไป

2.2.2 วิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) Continuous drive friction welding [11] หลักการทำงานของกระบวนการนี้ คือ โลหะชิ้นงานจะถูกจับด้วยหัวจับด้วยหัวจับของเครื่องแล้วถูกทำให้หมุน ส่วนอีกชิ้นหนึ่งจะถูกจับอยู่ที่ยื่นศูนย์ท้ายเครื่อง (Tail stock) หรือจิก ที่ออกแบบมาสำหรับการจับยึดให้แน่น และจะเลื่อนเข้าหาชิ้นงานด้วยระบบไฮดรอลิก ทำให้สัมผัสกับชิ้นงานที่กำลังหมุนด้วยแรงกดดันของเฟลาที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจากแรงเสียดทานจนถึงอุณหภูมิของการเชื่อม การหมุนก็จะหยุดลงอย่างทันใด แรงกดดันที่ยันศูนย์ท้ายเครื่องจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์

องค์ประกอบที่สำคัญในการเชื่อมวิธีนี้ คือ ความเร็วรอบที่หัวจับ แรงดันที่ยันศูนย์และระยะเวลาของแรงกด สำหรับรูปลักษณะของรอยเชื่อมจะขึ้นอยู่กับ

- 1) พื้นที่ภาคตัดของชิ้นงานที่จะเชื่อม
- 2) จุดหลอมละลายและการกระจายความร้อนของโลหะชิ้นงาน

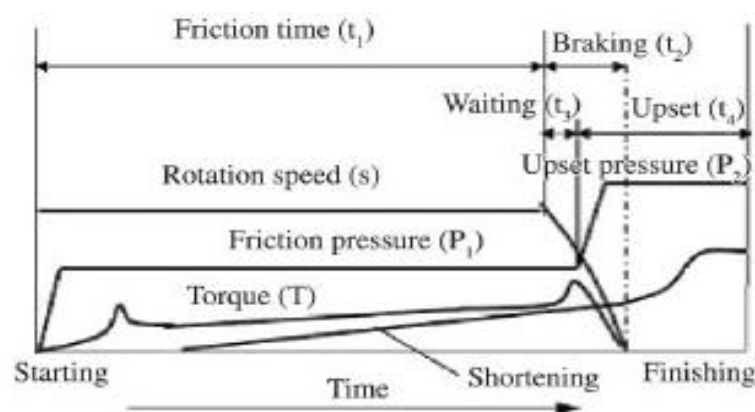
3) โครงสร้างของโลหะที่เปลี่ยนไปซึ่งเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนขณะเชื่อมโลหะตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมในกระบวนการ คือ ความเร็วรอบ แรงกดเริ่มต้น (ความร้อน) ระยะเวลาของการกด เพื่อให้เกิดความเชื่อมจะสูงกว่าแรงกดที่ทำให้เกิดความร้อนแต่บางครั้งก็ใช้เกือบเท่ากัน สำหรับเหล็กคาร์บอน ปานกลางและสูง จะให้แรงกดที่ทำให้เกิดความร้อน 6-15 ksc. การอุ่นชิ้นงานบางครั้งจะใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่แกนหมุนควรจะหยุดอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการบิดหรือแกนสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกว่า $\frac{1}{2}$ นิ้ว เวลาที่ใช้ในการหยุดควรใช้เวลาไม่เกิน 1.5 วินาที และชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางควรจะหยุดภายใน $\frac{1}{2}$ หรือ 2 วินาที

2. Inertia drive friction welding [11] ความร้อนทั้งหมดที่ต้องการในการเชื่อมจะใช้พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการหมุนล้อช่วยแรงในการเชื่อมแบบ (Inertia drive friction welding) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเชื่อมแบบ (Continuous drive friction welding) โดยหลักการทำงานชิ้นงานหนึ่งจะถูกจับยึดอยู่กับที่หรือ หัวจับงาน และชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งถูกจับอยู่ที่หัวจับยึดอยู่กับหัวจับ (Spindle) ที่กำลังหมุนมอเตอร์ขับเคลื่อนจะเร่งอัตราการหมุนของล้อช่วยงานและจะส่งต่อกำลังไปยังหัวจับจนถึงระดับพลังงานที่เพียงพอและแล้วพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนการหมุนจะถูกตัดออก และพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุน (Flywheel) จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวหน้าของรอยเชื่อมด้วยแรงกดดันที่แกนเพลลา ซึ่งจะเป็นผลให้ชิ้นงานเชื่อมติดเข้าด้วยกัน โดยสมบูรณ์ผิวของชิ้นงานที่จะเชื่อมไม่จำเป็นต้องตกแต่งก่อนเชื่อม เช่น ผิวของชิ้นงานที่เกิดจากการตัดด้วยใบหินเจียร เลื่อยตัด แก๊สตัด เพราะว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทานจะทำให้ส่วนที่ไม่เรียบเกิดการหลอมละลายรวมตัวกับเนื้อโลหะที่เชื่อม โดยจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพรอยเชื่อมต่อลดลง สำหรับโลหะที่เคลือบด้วยโครเมียมโลหะที่ชุบแข็งด้วยไนโตรคาร์บูไรต์ โลหะที่มีออกไซด์สูง จะไม่สามารถขจัดออกได้ในขณะที่เชื่อมที่เป็นสาเหตุให้รอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าปกติ แล้วถ้าหากมีสาร ไนโตรจะ เคลือบอยู่หน้าจะไม่สามารถทำการเชื่อมได้เลย

2.3 พารามิเตอร์ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding parameters)

ตัวแปรที่สำคัญในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน มี 3 ตัวแปรคือ ความเร็วรอบ แรงดัน และเวลา การกำหนดขั้นตอนของการออกแบบการทดลองจะต้องอาศัยปัจจัยพื้นฐานของโลหะ ที่อยู่ในสถานะของแข็งซึ่งยังไม่มีกระบวนการทางความร้อนเข้ามาที่จะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการเชื่อมโลหะด้วยแรงเสียดทาน โลหะจะเกิดการหลอมละลายภายในเนื้อของโลหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนผสม ช่วงเวลาการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัวจะทำให้เกิดโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงการที่จะทำให้สมบัติของโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลง การรักษาคุณสมบัติของโลหะให้มี

ความแข็งและความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ ในขณะที่การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานบริเวณ (HAZ: Heat-affected zone) จะเกิดการหลอมเหลวของโลหะบริเวณหน้าสัมผัสที่ถูกการเสียดสีจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะของแข็งกลายเป็นของเหลว ทำให้หน้าสัมผัสกันเกิดการเชื่อมต่อกัน ถ้าเป็นโลหะต่างชนิดกันก็จะเกิดการหลอมละลายรวมตัวกันตามความร้อนที่เกิดขึ้นเพราะค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนและความสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อนก็น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมเข้าด้วยกัน



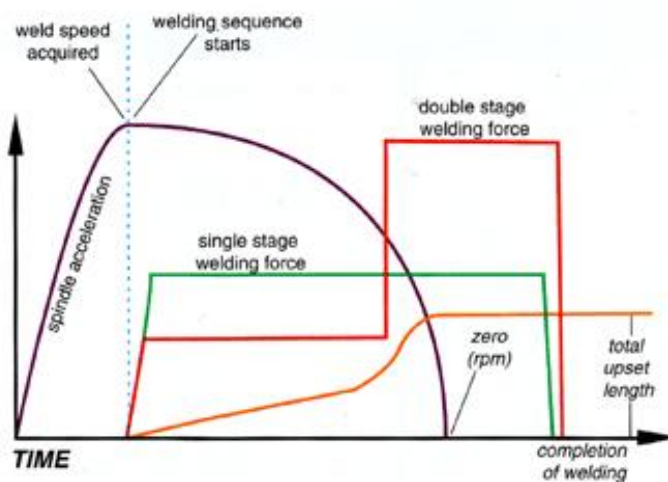
รูปที่ 2.1 พารามิเตอร์การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบต่อเนื่อง [1]

ค่าพารามิเตอร์ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

- 1) ความเร็วรอบในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Rotational Speed : rms) หมายถึงความเร็วรอบของชิ้นงานที่หมุนในการเชื่อม
- 2) แรงดันเสียดทาน (Friction Pressure: P1) หมายถึงแรงดันที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปเกิดการเสียดสีกันที่หน้าสัมผัส
- 3) เวลาของแรงเสียดทาน (Friction Time : T1) หมายถึงเวลาที่ใช้ในการเสียดสีของชิ้นงาน
 - 1) แรงดันในการอัด (Upset Pressure: P2) หมายถึงแรงดันที่ใช้ในการอัดให้ชิ้นงานที่อยู่ระหว่างหลอมละลายติดกันซึ่งจะเกิดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ
 - 2) เวลาในการกดอัด (Pressure Time : T2) หมายถึงเวลาในการกดอัดชิ้นงานเข้าด้วยกัน ในจังหวะการกดอัดและพารามิเตอร์อื่นๆ ของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

- อัตราการป้อน
- การเสียเวลาในการปรับแรงดัน
- อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม
 - การหน่วงเวลาของเบรกที่ยังจำเป็นที่ใช้ในการควบคุมการเชื่อมที่หยุดในช่วงเวลาที่ต้องการและเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเฉื่อยเป็นกระบวนการที่กว้างมาก การกำหนดค่าพารามิเตอร์สามารถกำหนดและควบคุมการเกิดการเปลี่ยนแปลงของวัสดุได้โดยการเลือกค่าพารามิเตอร์จากรายการโดยการกำหนดความเร็วรอบ แรงกดดัน และแรงกดอัดในแนวแกน ขณะที่ล้อช่วยแรงเฉื่อยคือ การคำนวณ จากความต้องการของพลังงานที่ใช้ให้มีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบการหมุนแบบแรงเฉื่อย [1]

ตารางที่ 2.1 ตารางพารามิเตอร์การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบการหมุนแบบแรงเฉื่อย [4]

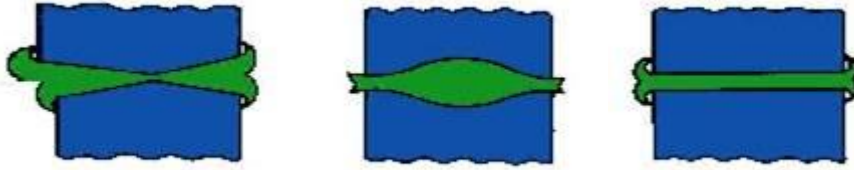
Base Material	Dia(mm)	Relative Rotation Speed (rpm)	Axle Pressure Heating Kg/mm ²	Forging Kg/mm ²	Upset (mm)
Similar material					
Low carbon steel	20	1500	5	12	5
Medium carbon steel	10	3000	4	10	3
Chromium steel	10	1500	12	30	3
Dissimilar material					
High carbon to Low carbon steel	15	1500	12	30	6

ตารางที่ 2.2 ตารางพารามิเตอร์การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบการหมุนแบบแรงเฉื่อย [4]

Base material	Peripheral Speed (m/s)	Min. Weld Energy (Kg/mm ²)	Axial pressure for 25 mm (Kg/mm ²)
Similar material			
Low carbon steel	2.5 to 5.0	6.6	11.2
Medium carbon steel	2.5 to 5.0	7.7	12.8
Chromium steel	3.0 to 4.5	8.2	13.8
Dissimilar material			
High carbon to Low carbon	3.0 to 4.0	3.2	13.8

ลักษณะของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมีลักษณะของรอยเชื่อมที่แตกต่างกันอยู่ 3 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.4

- A) การเพิ่มขึ้นหรือการลดลงของแรงดันในการเสียดสีของวัสดุ
- B) การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงกดอัดในความดันที่ต่างกัน
- C) การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน และการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความเร็วรอบ



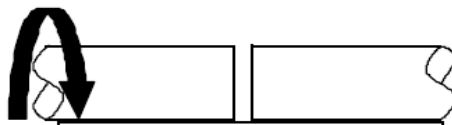
A. High pressure
Low speed

B. Low pressure
Low speed

C. Optimum

รูปที่ 2.3 ลักษณะแรงดันในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ต่างกัน [4]

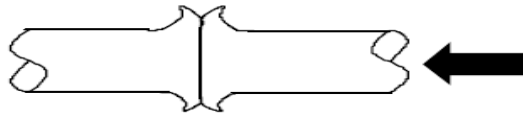
จากรูปที่ 2.3 เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้แนวรอยเชื่อมซึ่งมีอุณหภูมิสูงมากขณะทำการเชื่อมแต่มีอุณหภูมิไม่สูงเพียงพอที่จะเกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อรอยเชื่อมบริเวณนี้จะได้รับความร้อนสูงมากขณะเชื่อมและจะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดมากหรือมีความหนาของชิ้นงานมากจากการเย็นตัวที่รวดเร็วทำให้บริเวณ HAZ มีโครงสร้างที่แข็ง ,เปราะและมีความต้านทานต่อการแตกร้าวได้ต่ำ HAZ จึงเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดความเสียหายได้มาก



รูปที่ 2.4 จังหวะหมุนเริ่มการเชื่อม [11]



รูปที่ 2.5 จังหวะหมุนเพื่อเสียดสี [11]



รูปที่ 2.6 จังหวะอัด [7]

2.4 การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Heat Treatment of Steel)

2.4.1 กระบวนการ/กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) หมายถึงการนำเอาโลหะหรือโลหะผสมที่เป็นของแข็งมาให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอัตราที่แตกต่างกันเพื่อให้มีคุณสมบัติทางกลเป็นไปตามที่ต้องการ โดยทั่วไปการทำกระบวนการทางความร้อนของเหล็กกล้าจะเป็นการทำให้เหล็กกล้ามีโครงสร้างเป็น Austenite แล้วให้ Austenite เปลี่ยนแปลงไป (Transformation or Decomposition) เป็นเฟสที่มีโครงสร้างต่างๆตามที่ต้องการ

1. โดยทั่วไปอัตราการให้ความร้อนมีผลค่อนข้างน้อยต่อลักษณะโครงสร้างวัสดุที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเมื่อเทียบกับอัตราการเย็นตัวแต่ในบางกรณีก็จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับอัตราการให้ความร้อนเช่นกันยกตัวอย่างเช่นวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นและเกิดความเค้นตกค้างสูงควรที่จะให้ความร้อนช้ากว่าวัสดุที่อยู่ในสภาพที่เกิดความเครียดโดยบริเวณที่บางกว่าควรให้ความร้อนอย่างช้าๆเพื่อลดการบิดเบี้ยวและการเกิดความเค้นจากความร้อนให้เกิดน้อยที่สุดกระบวนการทางความร้อนมีหลายกระบวนการได้แก่การอบอ่อน, การอบปกติ, การชุบแข็ง, การอบคืนตัวและการชุบแข็งผิวเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กที่ผ่านกระบวนการผลิตต่างๆมาเช่นการขึ้นรูปร้อน (Forging, Hot Rolling) การขึ้นรูปเย็น (Cold Rolling, Drawing) การเชื่อม (Welding) หรือการหล่อ (Casting) ซึ่งมีลักษณะที่ไม่ดีหลายประการเช่น

1) เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนจะมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอส่วนที่เป็นมุมแหลมหรือบริเวณผิวจะมีความแข็งแรงมากกว่าส่วนอื่นๆเพราะบริเวณดังกล่าวจะมีเกรนขนาดเล็ก (ลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วและถูกแรงกระแทกแรงอัดมากกว่าเนื้อเหล็กภายใน)

2) เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมักจะมี ความเครียด/ความเค้นที่เกิดการถูกอัดถูกบีบค้ำอยู่บางส่วนทำให้มีความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอสูญเสียความเหนียว

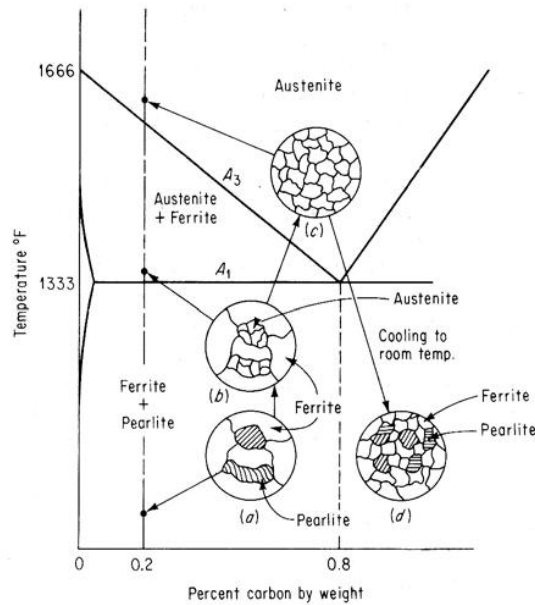
3) เหล็กที่ผ่านการเชื่อมจะได้รับความร้อนบางจุด (ขยายตัวเมื่อถูกความร้อนหดตัวเมื่อถูกปล่อยให้เย็น) ตรงจุดที่ได้รับความร้อนมักจะเกิดความเครียดตกค้างและมีโครงสร้างหรือคุณสมบัติแตกต่างจากเนื้อเหล็กส่วนอื่นๆ

4) เหล็กที่ผ่านงานหล่อจะมีคุณสมบัติที่ผิวและภายในหรือบริเวณที่เป็นส่วนหนาและบริเวณที่เป็นส่วนบางแตกต่างกันส่วนที่เย็นตัวเร็วมักจะมี ความแข็งแรงถ้าเอาเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีหรือกระบวนการต่างๆ

2.4.2 การอบอ่อนแบบสมบูรณ์/เต็มขั้นตอน (Full Annealing) [14]

มีความมุ่งหมายเพื่อต้องการให้เหล็กอ่อนลง (softening) หรือเพื่อทำให้เหล็กเหนียวขึ้น (Toughening) ส่วนใหญ่เหล็กผ่านการขึ้นรูปเย็น (cold working) หรือการหลอมมากจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดการกลึงหรือไสยากดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำลายความแข็งแรงของเหล็กเพื่อจะได้กลึงหรือไสได้สะดวกหลักการทำแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ Full annealing กับ Process annealing โดยมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

1) Full annealing การอบอ่อนสมบูรณ์ประกอบด้วยทำให้ความร้อนกับเหล็ก ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม (Proper Temperature) แล้วปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) อย่างช้าๆ ตลอดการเปลี่ยนแปลงของเฟสออสเทนไนท์ไปสู่เฟสอื่นๆ (ส่วนใหญ่โครงสร้างที่ได้ คือ เฟอร์ไรท์ อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี และอัตราการเย็นตัวเป็นสำคัญ) โดยปกตินิยมให้เย็นตัวในเตา (Air-Cooled) หรือปล่อยให้เย็นในวัสดุกันความร้อน (Insulating Material) จนถึงอุณหภูมิห้องจุดประสงค์ของการอบอ่อนเป็นไปได้อันหนึ่ง ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง (Refine Grain) ทำให้เหล็กมีความอ่อนตัว (Soften) ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (Improve Electrical and Magnetic Properties) และในบางกรณีเพื่อปรับปรุงความสามารถในการกลึง ไส (Improve Machinability) เนื่องจากอุปกรณ์เตาที่ใช้อบ และชิ้นงานเองต้องปล่อยให้เย็นไปพร้อมๆกัน ด้วยเหตุนี้การอบอ่อนจึงเป็นกระบวนการที่เย็นตัวอย่างช้าๆ ใกล้เคียงกับระบบสมดุลในแผนภูมิเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์สมมติว่ามีเหล็กที่มีคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ และมีเกรนหยาบ (จัดเป็นเหล็กกล้าไฮโปยูเทคติก) หากต้องการปรับปรุงขนาดเกรนให้เล็ก (Refine Grain) สามารถทำได้โดยการอบอ่อน (Annealing) รูป 1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กดังกล่าว ณ ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง สามารถอธิบายได้ดังนี้

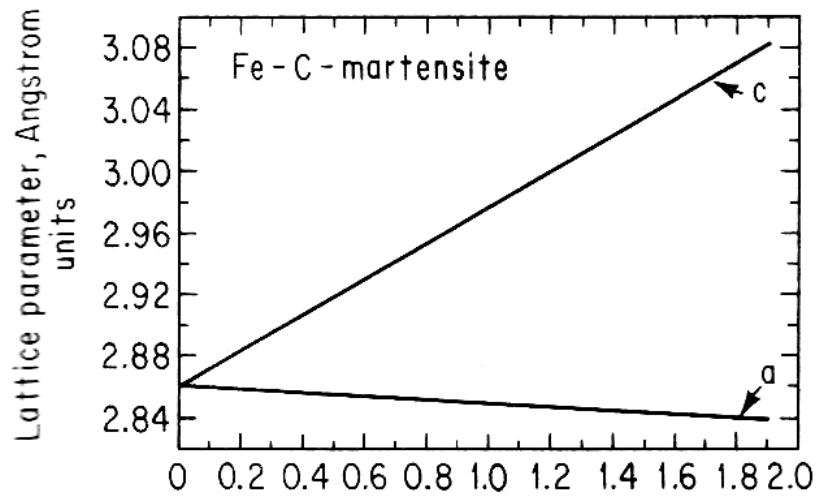


รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการอบอ่อนในเหล็กกล้าคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ [19]

- (a) โครงสร้างเดิมที่มีเกรนหยาบของเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไรต์
- (b) เหนือเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไรต์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนต์ ในขณะที่เฟอร์ไรต์ไม่เปลี่ยนแปลง
- (c) เหนือเส้น A3 มีเพียงเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนต์
- (d) หลังจากเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง

ประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กของเฟอร์ไรต์ -เพิร์ลไรต์ (1)เมื่อให้ความร้อนกับเหล็กจนถึงอุณหภูมิ ณ จุด (a) โครงสร้างพื้นฐานยังคงเป็นเกรนหยาบของเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไรต์ จนกระทั่งให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ จนเหนือเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไรต์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปฏิกิริยายูเทคตอยด์เป็นเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนต์ ณ จุด (b) ถ้าปล่อยให้เย็นตัวจากอุณหภูมิ ณ จุด (b) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนตามต้องการแต่เมื่อให้ความร้อนต่อไปอยู่ระหว่างเส้น A1 และ A3 ทำให้เกรนของเฟอร์ไรต์ขนาดโตบางส่วนเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนต์ จนกระทั่งให้ความร้อนเหนือเส้น A3 โครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ที่มีขนาดเล็กทั้งหมด (จุด C) หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาโครงสร้างสุดท้ายที่ได้ คือ เกรนขนาดเล็กของเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไรต์ ด้วยเหตุนี้จากกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบอ่อนเหล็กกล้าไฮโปยูเทคติก คือ 10°C (50°F) เหนือเส้น A3

2.4.3 การชุบแข็ง (Hardening) ภายใต้อัตราการเย็นตัวช้า หรือปานกลาง (Slow or Medium Cooling Rate) คาร์บอนมีความสามารถในการแพร่ออกจากโครงสร้างออสเทนไนท์ ดังนั้นอะตอมเหล็ก (Iron) เกิดการเคลื่อนที่และเปลี่ยนโครงสร้างอะตอมพื้นฐานเป็น Body Centered Cubic (BCC) การเปลี่ยนแปลงจากเหล็กแกมมา-เหล็กแอลฟา (ออสเทนไนท์ไปสู่เฟอร์ไรท์) เกิดขึ้นด้วยกระบวนการกำเนิดนิวเคลียส การโตขึ้นของเกรน และแปรตามเวลาภายใต้อัตราการเย็นตัวที่เร็ว อะตอมคาร์บอนไม่สามารถเคลื่อนย้ายออกจากสารละลายของแข็ง (ของเหล็ก) ได้ทัน โครงสร้างอะตอมพื้นฐานไม่สามารถเกิด BCC เพราะคาร์บอนอะตอมบางส่วนยังเหลือค้างในโครงข่ายของเหล็กทำให้ได้โครงสร้างชนิดหนึ่งที่เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็งที่อิ่มตัวไปด้วยอะตอมของคาร์บอน (Supersaturated Solid Solution) ในโครงสร้าง Body Centered Tetragonal (BCT Structure) โดยปกติโครงสร้างของออสเทนไนท์ (Face Centered Cubic, FCC Structure) หรือโครงสร้างของเฟอร์ไรท์ (BCC Structure) เกิดจากหน่วยเซลล์เล็กๆ ที่เรียกว่า Unit Cell มาเรียงต่อกันเป็นจำนวนมากทั้งสามทิศทาง (Three Dimensional Directions) และหนึ่งหน่วยเซลล์เกิดจากอะตอมมารวมตัวกันเป็นรูปลูกบาศก์โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอม เป็น a , b และ c ที่เรียกว่า Lattice Parameter ในทิศทางแกน x , y และ z ตามลำดับโดยปกติโครงสร้าง BCC และ FCC มีระยะห่างระหว่างอะตอมที่เท่ากัน แต่ในโครงสร้างซีเมนไตต์ตั้งได้อธิบายข้างต้น เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วทำให้คาร์บอนอะตอมแพร่ออกจากโครงสร้างเหล็กไม่ทัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงจาก FCC ไปเป็น BCC ไม่ทันจึงได้โครงสร้าง BCT แทน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอะตอมในแนวแกน Z (c) มากกว่าปกติ อัตราส่วนของค่าระยะห่างระหว่างอะตอมในแกน Z ต่อแกน X (c/a) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.08 ดังแสดงในรูป 8 ซึ่งการแทรกตัวของอะตอมคาร์บอนใน Lattice ทำให้ Lattice เกิดการบิดเบี้ยว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความแข็งสูงเพราะคาร์บอนอะตอมที่แทรกอยู่นี้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน

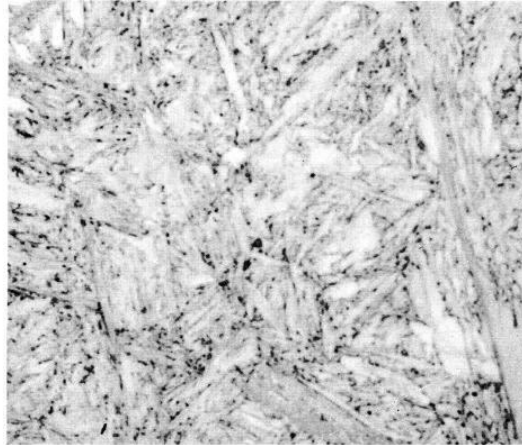


รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงค่า Lattice Parameter a และ c ตามปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอน [19]

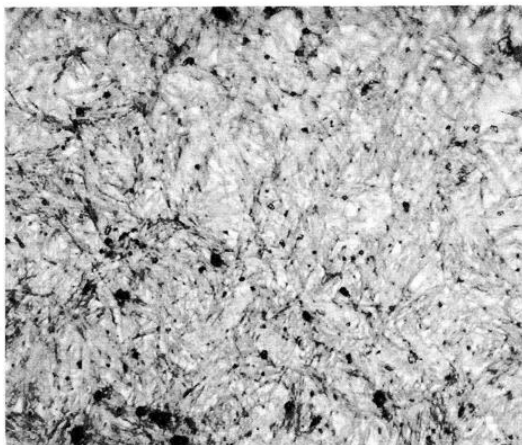
การจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างมาร์เทนไซต์ไม่อัดแน่นเท่ากับโครงสร้างออสเทนไนต์ และการขยายตัวมักเกิดขึ้นในระหว่างการเปลี่ยนแปลงเฟส

การขยายตัวในระหว่างการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ทำให้เกิดความเค้นเฉพาะที่ (Localized Stresses) ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรในแมทริกซ์ (Plastic Deformation of Matrix)

ภายใต้การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Drastic Cooling) ที่เรียกว่า Quenching มาร์เทนไซต์มีรูปร่างคล้ายเข็ม หรือขนนก (Needle-Like or Acicular) ดังรูปที่ 2.9 ในกรณีที่เหล็กมีคาร์บอนสูง โครงสร้างพื้นฐานจึงประกอบด้วยออสเทนไนต์เหลือค้าง (Retained Austenite) จึงทำให้มองเห็นโครงสร้างขนนกของมาร์เทนไซต์ได้ชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่กล้าดึงขยาย 2500 เท่า [19]



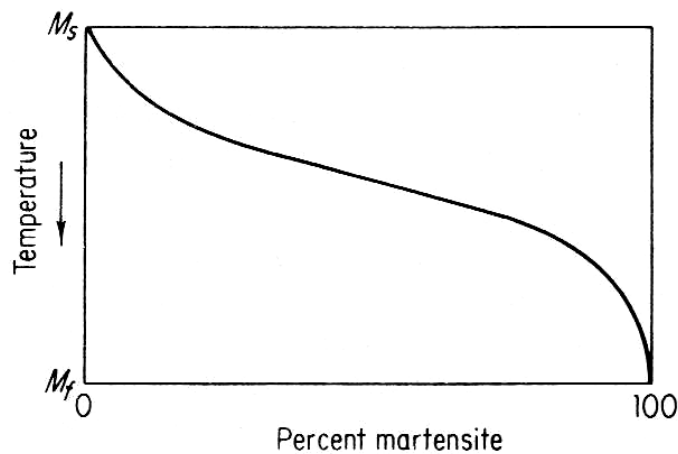
รูปที่ 2. 10 เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ผ่านการชุบแข็งในน้ำ ประกอบด้วยโครงสร้าง
ออสเทนไนต์เหลือค้าง และมาร์เทนไซต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็ม [19]

คุณลักษณะที่สำคัญหลายประการสำหรับการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์

1. เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Diffusionless และไม่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทาง เคมี ปริมาตรเพียงเล็กน้อยของออสเทนไนต์เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกอย่างทันทีทันใดโดยอาศัย ปฏิกริยาแรงเฉือน (Shearing Reaction)
2. การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดเฉพาะในระหว่างการเย็นตัว (Cooling) และหยุดเมื่อถูก

รบกวน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงแปรตามอุณหภูมิที่ลดลงโดยไม่ขึ้นกับเวลา และการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Athermal ซึ่งตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ และเรียกว่า Isothermal Transformation ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงไม่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับอุณหภูมิที่ลดลง ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็มเกิดในขั้นแรกมีปริมาณเพียงเล็กน้อย หลังจากนั้นปริมาณเพิ่มขึ้น แล้วลดลงอีกครั้งในตอนท้ายดังแสดงในรูป 11 อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนต์ไปสู่มาร์เทนไซต์ เรียก Martensite Start Temperature, M_s และอุณหภูมิสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างออสเทนไนต์ไปสู่โครงสร้างมาร์เทนไซต์ เรียก Martensite Ended Temperature, M_f ถ้าเหล็กถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิกงที่ θ อุณหภูมิหนึ่ง และอุณหภูมิ นั้นต่ำกว่าเส้น M_s การเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นมาร์เทนไซต์จะหยุดทันทีและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อไปได้ถ้าอุณหภูมิต่ำลง

3. จุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (M_s -Temperature) ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) แต่ M_s -Temperature เปลี่ยนแปลงตามส่วนผสมทางเคมี (Chemical Compositions) เท่านั้นซึ่งมีหลายสูตรด้วยกันตัวอย่างของสูตรที่ใช้คำนวณหา M_s -Temperature เช่น $M_s(^{\circ}F) = 1000 - (650 \times \%C) - (70 \times \%Mn) - (35 \times \%Ni) - (70 \times \%Cr) - (50 \times \%Mo)$



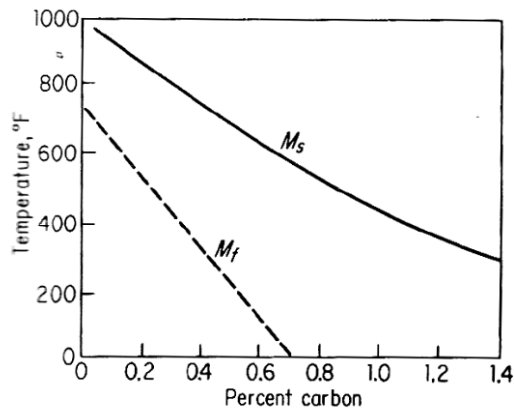
รูปที่ 2.11 ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่เกิดในระหว่างการเย็นตัว เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ [19]

อิทธิพลของธาตุคาร์บอนต่อเส้น M_s และ M_f แสดงดังรูป 12 เส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างออสเทนไนต์ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (M_f) แสดงเป็นเส้นปะเนื่องจากยังไม่เป็นที่ระบุแน่ชัด จากภาคทฤษฎีอธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างออสเทนไนต์ไปเป็นโครงสร้าง

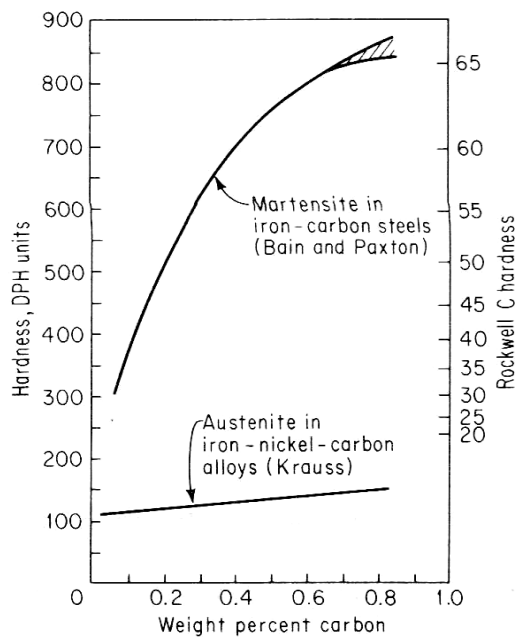
มาร์เทนไซต์ไม่มีโอกาสเปลี่ยนได้สมบูรณ์ และมักมีปริมาณเล็กน้อยของออสเตนไนท์เหลือค้าง (Retained Austenite) แม้ว่าอุณหภูมิลดลงต่ำ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวยังเป็นไปได้การสัดส่วนของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิด โดยพิจารณาจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคดังนั้นก็จะเป็นไปได้ยาก สำหรับการแยกออสเตนไนท์เหลือค้างจากมาร์เทนไซต์ ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่าเส้น Ms คือ อุณหภูมิที่ การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างออสเตนไนท์ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้เกือบสมบูรณ์

4. มาร์เทนไซต์จัดได้ว่าเป็นโครงสร้างที่ไม่อยู่ในระบบสมดุลอย่างแท้จริงถึงแม้ว่า โครงสร้างนี้ดำรงอยู่ได้ที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้างมาร์เทนไซต์สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นรอยต่อ ระหว่างโครงสร้างออสเตนไนท์ที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Austenite Phase) และโครงสร้างที่สมดุล ของของผสมระหว่างเฟอร์ไรท์ และซีเมนไตต์ (Final Equilibrium Condition of a Mixture of Ferrite and Cementite)

สมบัติที่สำคัญที่สุดของมาร์เทนไซต์ คือ มีความแข็งสูง แม้ว่าโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความแข็งมากกว่าโครงสร้างออสเตนไนท์ที่ปริมาณคาร์บอนเท่ากัน ดังแสดงในรูป 13 แต่มีข้อพึงจำ คือ ความแข็งที่ได้ของมาร์เทนไซต์มาจากปริมาณคาร์บอนที่เพียงพอ ความแข็งของมาร์เทนไซต์ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกตามปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 60 Rockwell C ที่ 0.4 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน หลังจากนั้นถึงแม้ว่าปริมาณคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นอีก แต่ค่าความแข็งค่อยๆเพิ่มโดยมี ค่าประมาณ 65 Rockwell C ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน สาเหตุที่ค่าความแข็งไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อคาร์บอนมากกว่า 0.4 เปอร์เซ็นต์ คือ มีออสเตนไนท์เหลือค้างมากขึ้นเมื่อคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นทำให้ความแข็งไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความแข็งของมาร์เทนไซต์เชื่อว่าเป็นผลจากอะตอมคาร์บอนไปแทรกตัวใน Lattice ทำให้ Lattice บิดเบี้ยว (จึงยากต่อการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน หรือทำให้เกิดการเสีรูปของผลึก ดังนั้นจึงต้องใช้แรงกระทำมากขึ้นนั่นเอง) อย่างไรก็ตามคาร์บอนที่แทรกตัวนี้จะแทรกได้ถึงระดับหนึ่งเพราะ (มีขีดจำกัดในการละลาย/แทรกตัว) สุดท้ายจากกล่าวสรุปได้ว่า ความแข็งของมาร์เทนไซต์เป็นฟังก์ชันของคาร์บอนเท่านั้นเป็นเวลาหลายปีที่มีความเชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์เกิดเฉพาะในเหล็กอย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวพบที่สามารถเกิดใน โลหะผสมอื่นๆ ด้วย เช่น เหล็ก-นิกเกิล ทองแดง-สังกะสี และทองแดง-อะลูมิเนียม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์ไม่เกิดเฉพาะในเหล็กเท่านั้น



รูปที่ 2.12 อิทธิพลของคาร์บอนที่มีต่อช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์ [19]



รูปที่ 2.13 ผลของธาตุคาร์บอนต่อความแข็งของโครงสร้างออสเทนไนต์ และมาร์เทนไซต์ (ส่วนที่แรเงาตอนปลายแสดงผลของออสเทนไนต์เหลือค้าง) [19]

แข็งมากกว่าโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ปริมาณคาร์บอนเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แต่มีข้อพึงจำคือ ความแข็งที่ได้ของมาร์เทนไซต์มาจากปริมาณคาร์บอนที่เพียงพอ ความแข็งของมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกตามปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 60 Rockwell C ที่

0.4 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน หลังจากนั้นแม้ว่าปริมาณคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นอีก แต่ค่าความแข็งค่อยๆเพิ่มโดยมีค่าประมาณ 65 Rockwell C ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน สาเหตุที่ค่าความแข็งไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อคาร์บอนมากกว่า 0.4 เปอร์เซ็นต์ คือ มีออสเตนไนท์เหลือค้างมากขึ้นเมื่อคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นทำให้ความแข็งไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความแข็งของมาร์เทนไซต์เชื่อว่าเป็นผลจากอะตอมคาร์บอนไปแทรกตัวใน Lattice ทำให้ Lattice บิดเบี้ยว (จึงยากต่อการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน หรือทำให้เกิดการเสีรูปร่างของผลึก ดังนั้นจึงต้องใช้แรงกระทำมากขึ้นนั่นเอง) อย่างไรก็ตามคาร์บอนที่แทรกตัวนี้จะแทรกได้ถึงระดับหนึ่งเพราะ (มีขีดจำกัดในการละลาย/แทรกตัว) สุดท้ายจากกล่าวสรุปได้ว่า ความแข็งของมาร์เทนไซต์เป็นฟังก์ชันของคาร์บอนเท่านั้นเป็นเวลาหลายปีที่มีความเชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์เกิดเฉพาะในเหล็กอย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวพบว่าสามารถเกิดในโลหะผสมอื่นๆ ด้วย เช่น เหล็ก-นิกเกิล ทองแดง-สังกะสี และทองแดง-อะลูมิเนียม ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์ไม่เกิดเฉพาะในเหล็กเท่านั้น

ตัวกลางในการชุบแข็ง (Quenching Medium)

จากกลไกการถ่ายเทความร้อน ตัวกลางในการชุบแข็งในอุดมคติ ควรมีอัตราการเย็นตัวเริ่มต้นที่ค่อนข้างสูงเพื่อลดความร้อนออกจากชิ้นงานได้เร็ว ทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานเร็วพอที่จะไม่สัมผัสกับมุมของ I-T Diagram เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความแข็ง เช่น มาร์เทนไซต์ อย่างไรก็ตามตัวกลางในการชุบแข็งควรมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป และช่วงที่อุณหภูมิของชิ้นงานลดลงทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลาง และชิ้นงานเร็วมากเกินไปทำให้เกิดการบิดเบี้ยว และการแตกร้าวของชิ้นงานในที่สุดในการเป็นจริง ไม่มีตัวกลางในการชุบแข็งใดที่มีลักษณะดังกล่าวข้างต้น น้ำ และสารละลายของเกลือมีอัตราการเย็นตัวที่สูงทั้งในช่วง A และ B ซึ่งจะขัดขวางการเย็นตัวในช่วงอุณหภูมิต่ำของชิ้นงานทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการบิดเบี้ยว และแตกร้าวของชิ้นงาน ส่วนตัวกลางในการชุบแข็งที่เป็นน้ำมัน จะมีช่วงการเย็นตัว A ที่ยาว และมีช่วงการเย็นตัว B ที่สั้นซึ่งมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าทำให้ความแข็งที่ได้ไม่สูงมากนักตัวอย่างของตัวกลางในการชุบแข็งที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเรียงลำดับตามความรุนแรงในการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

- สารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์
- น้ำ (ที่ปล่อยให้ไหลผ่านชิ้นงาน)
- เกลือหลอมเหลว
- สารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก หรือน้ำมันที่ละลายได้
- น้ำมัน
- อากาศ

2.4.4 การอบคืนตัว (Tempering)

เหล็กภายหลังการชุบแข็งจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ ตกค้าง (Retained Austenite) ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนสูง จะมีโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไต์ต์ กระจายอยู่ทั่วไป นอกจากนี้เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายใน อันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูงคุณสมบัติของเหล็กตามลักษณะที่กล่าวจะมีความแข็งสูงแต่จะขาดสมบัติด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทก (Poor Impact Strength) และความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอ หรืออาจเกิดการแตกร้าวในขณะที่ใช้งานได้ ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้องนำมาทำการอบคืนตัวเพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไปหรือเหลืออยู่น้อยที่สุดและในขณะเดียวกันจะทำให้มาร์เทนไซต์แตกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุล (Tempered Martensite) ซึ่งจะมีผลอย่างกว้างขวางต่อสมบัติของเหล็ก ดังเช่น ความแข็งจะลดลง แต่ความเหนียวจะกลับสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการอบคืนไฟและเวลาที่ใช้

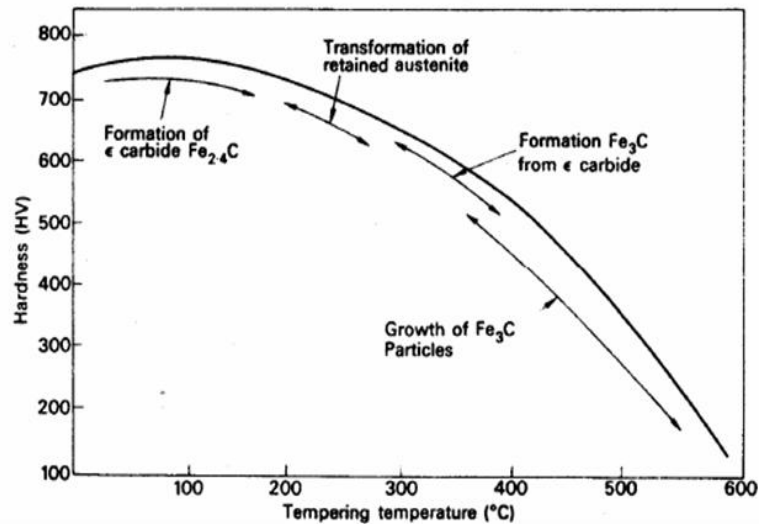
การอบคืนไฟเป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า A_1 ภายหลังเมื่อทิ้งไปเป็นเวลานานพอสมควรแล้วจะปล่อยให้เย็นช้าๆภายในเตาการเปลี่ยนแปลงของมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ตกค้างไปสู่โครงสร้างกึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆกันดังนี้

อุณหภูมิช่วงแรก ($45-200^{\circ}\text{C}$) โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ชนิดที่ใกล้จะเป็นระบบลูกบาศก์ (Pseudo Cubic) ซึ่งมีคาร์บอนละลายอยู่ 0.25% กับคาร์ไบด์ชนิดเอฟซีลอน (carbide) มีสูตร Fe_2C หรือ Fe_2C_4 และมีคาร์บอนประมาณ 8.2% ทั้งคาร์ไบด์และเฟอร์ไรต์ ($0.25\% \text{C}$) จะตกผลึกชนิดละเอียดและกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างสามารถศึกษาได้โดยกล้องขยายอิเล็กตรอนเท่านั้นการอบคืนไฟในช่วงอุณหภูมินี้ความแข็งจะลดลงเล็กน้อยแต่ความเครียดภายในจะถูกทำลายไปเกือบหมด

อุณหภูมิช่วงที่สอง ($235-400^{\circ}\text{C}$) โครงสร้างออสเทนไนต์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ทันในขณะชุบแข็ง (Retained Austenite) จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ ($0.025\% \text{C}$) และซีเมนต์ไต์ต์ (Fe_3C) ที่มีความละเอียดและกระจาย โครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับเบนไนต์ ความแข็งจะลดลงมากแต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิช่วงที่สาม ($400-650^{\circ}\text{C}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฟอร์ไรต์ (Pseudo Cubic) จะแตกตัวให้เฟอร์ไรต์ (Cubic) ที่มีคาร์บอน 0.025% และซีเมนต์ไต์ต์ส่วนเอฟซีลอนคาร์ไบด์จะเปลี่ยนเป็นซีเมนต์ไต์ต์ (Fe_3C) โครงสร้างที่ได้จะยังอยู่ในลักษณะละเอียดและกระจายมีลักษณะคล้ายซอร์ไบต์

อุณหภูมิช่วงที่สี่ (650–725°C) โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะปรับตัวเข้าสู่สภาพสมดุลและมีการขยายตัวของเฟอไรต์และซีเมนต์ไต์โตขึ้นความแข็งจะลดลงมากโดยความเหนียวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กที่ผ่านการทำ สเฟอรรอย ไคซ์ซิ่ง (Incomplete Annealing) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.14 อุณหภูมิกับความแข็งของการอบคืนตัว Tempering [14]

เฟส (Phase) หมายถึงส่วนพื้นผิวหรือระบบที่เป็นเนื้อเดียวกันทางกายภาพและทางกลเฟสล้อมรอบด้วยพื้นผิวและมีสมบัติแตกต่างจากส่วนอื่นๆเช่นตัวอย่างของน้ำที่ประกอบด้วยเฟส 3 เฟสคือ แก๊ส ของเหลว และของแข็ง เป็นต้น สิ่งที่จะช่วยพิจารณาว่าพื้นผิวใดเป็นเฟสคือพื้นผิวนั้นต้องมีโครงสร้างหรือการจัดเรียงอะตอมแบบเดียวกันและต้องมีสมบัติและส่วนผสมทางเคมีเหมือนกันตลอดทั่วทั้งพื้นที่อีกทั้งต้องแบ่งแยกขอบเขตตัวเองจากพื้นที่อื่นๆด้วย [14]

2.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงถ้าแบ่งตามลักษณะของชิ้นทดสอบหลังการทดสอบจัดว่าเป็นการทดสอบแบบทำลาย DT (Destructive Testing) หรือถ้าดูตามลักษณะของแรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบก็จัดว่าเป็นการทดสอบแบบแรงคงที่ (Static Load Testing) การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบวัสดุที่สำคัญที่สุดทั้งนี้เพราะในการออกแบบส่วนใหญ่จะใช้ค่าซึ่งได้จากการทดสอบนี้ไปใช้ในการคำนวณ เพื่อกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน

วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบแรงดึง เพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง R_m (Tensile Strength) ความเค้นคราก R_e (Yield Stress) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว A (Elongation) ของวัสดุเป็นต้นในการทดสอบ โดยทั่วไปชิ้นทดสอบจะถูกดึงจนขาดออกจากกัน โดยในขณะที่ทำการทดสอบแรงที่ใช้ในการดึงและระยะยืดของชิ้นทดสอบจะถูกบันทึกไว้ด้วยเครื่องบันทึก (Recorder)

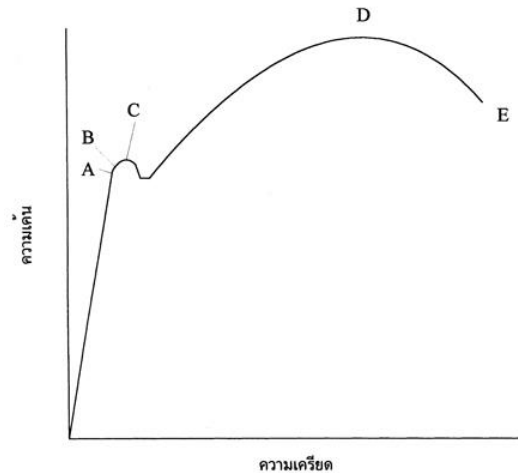
1) ขั้นตอนในการทดสอบในการทดสอบแรงดึงก่อนอื่นชิ้นทดสอบจะถูกนำมาทำรอย โดยการขีดหรือตอกด้วยเหล็กนำศูนย์ เพื่อกำหนดความยาวพิกัด L_0 จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกจับยึดบริเวณปลายทั้งสองข้างด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องทดสอบจะค่อยๆดึงชิ้นทดสอบช้าๆขณะที่ทำการดึงเครื่องจะทำการบันทึกเส้นโค้งแรงดึง F ระยะยืด L ในช่วงแรกเส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีความชันสูง โดยระยะยืดมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดึงซึ่งในช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึงชิ้นงานทดสอบจะหดกลับไปยังความยาวเดิมจึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เมื่อจุดที่แรงเริ่มตกลงนี้เรียกว่าแรงที่จุดคราก F_e (Yield Point) ในขณะที่ชิ้นทดสอบยังคงยืดตัวต่อไปจนกระทั่งแรงดึงเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งแต่คราวนี้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งความชันลดลงเรื่อยๆ ช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึงจะพบว่าชิ้นทดสอบมีความยาวเพิ่มขึ้นดังนั้นจึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดตัวถาวร (Plastic) เมื่อชิ้นทดสอบถูกดึงต่อไปอีกจะพบว่าแรงดึงจะเริ่มลดลงและถ้าสังเกตที่ชิ้นทดสอบจะพบว่าชิ้นทดสอบจะมีลักษณะคอดลงซึ่งจุดที่คอดนี้คือจุดที่ชิ้นทดสอบจะขาดออกจากกัน แรงสูงสุด F_m และแรงที่จุดคราก F_e จะถูกนำไปคำนวณค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความเค้นคราก (Yield Stress) [18]

1) การวัดขนาดชิ้นทดสอบ ก่อนอื่นต้องทำการวัดขนาดชิ้นทดสอบ โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ การวัดต้องทำที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของความยาวเริ่มต้นและบริเวณตรงกลาง จากนั้นจึงนำค่าทั้งสามมาคิดค่าเฉลี่ย ค่าที่ต่ำกว่า 10 มม. ให้วัดให้ได้ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ส่วนค่าที่สูงกว่า 10 มิลลิเมตร. ให้วัดได้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง หลังจากนั้นจึงทำการจัดแบ่งความยาวพิกัดออกเป็น 10 ส่วนเท่าๆกัน เพื่อใช้ในการหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว หรือความยืด A

2) การจับยึดชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบจะต้องถูกจับยึดกับเครื่องทดสอบแรงดึง โดยที่ต้องระมัดระวังให้แกนกลางของชิ้นทดสอบเป็นแนวเดียวกันกับแนวของแรงดึงของเครื่องเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงคดงอ (Bending)

3) ความเร็วในการดึง เนื่องจากความเค้นคราก R_e (Yield Stress) และค่าความต้านแรงดึงสูงสุด R_m (Tensile Strength) ขึ้นอยู่กับความเร็วในการดึงด้วย ดังนั้นความเร็วในการดึงจึงต้องถูก

กำหนดไว้เป็นมาตรฐาน เช่น ความเร็วในการดึงเพื่อหาค่า R_e จะใช้ความเร็วไม่เกิน 30 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ดังแสดงได้ในรูป 2.12

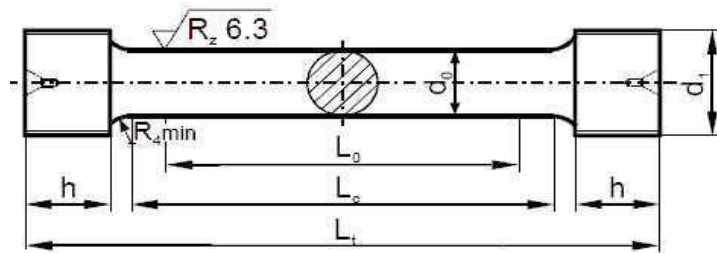


รูปที่ 2.15 แผนภาพแรงดึง-ระยะยืด [14]

2 รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ

รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบตลอดจนวิธีการผลิตเพื่อใช้ในการทดสอบแรงดึงสำหรับโลหะทั่วไปได้ถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐานเช่นตามมาตรฐาน DIN 50125 หรือมาตรฐาน DIN 50120 สำหรับการทดสอบแรงดึงแนวเชื่อมเหล็กกล้าดังแสดงได้ในรูปที่ 2.13 และแสดงในตารางที่ 2.4

Zugprobe DIN 50125-B14*70



d_0 : Probendurchmesser L_0 : Anfangsmesslänge ($L_0=5d_0$)
 d_1 : metrisches ISO-Gewinde L_c : Versuchslänge ($L_c>L_0+d_0$)
 h : Kopfhöhe L_t : Gesamtlänge
 Bezeichnung einer Zugprobe (Form B) mit Probendurchmesser $d_0=14$ mm und Anfangsmesslänge $L_0=70$ mm:

รูปที่ 2.16 ชิ้นทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125) [14]

ตารางที่ 2.4 รูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125) [14]

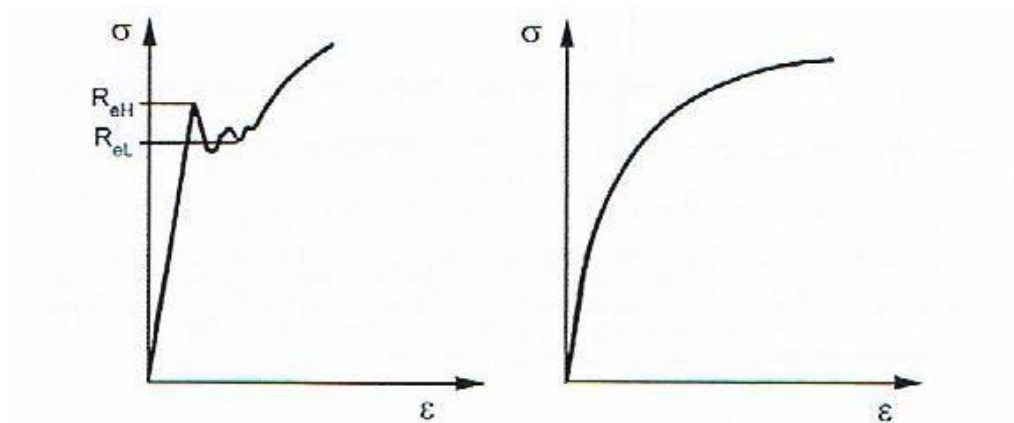
เส้นผ่าศูนย์กลาง ชิ้นงานทดสอบ	เส้นผ่าศูนย์กลาง ปลายจับ	ระยะปลายจับ h	ความยาวพิกัด L0	ความยาวช่วง ขนาน Lc	ความยาวรวม L1
d_0	d_1	เป็นอย่างน้อย			เป็นอย่างน้อย
6	8	25	30	36	95
8	10	30	40	48	115
10	12	35	50	60	140
12	15	40	60	72	160
14	17	45	70	84	180
16	20	50	80	96	205
18	22	55	90	108	230
20	24	60	100	120	250
22	30	70	125	150	300



รูปที่ 2.17 เครื่องทดสอบแรงดึง [18]

แผ่นภาพนี้ไม่สามารถใช้เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกับวัสดุชนิดอื่นซึ่งขนาดและรูปร่างแตกต่างกันได้เช่นชิ้นทดสอบซึ่งมีความหนามากกว่าและสั้นกว่าจะใช้แรงดึงจนชิ้นทดสอบขาดสูงกว่าและถูกยืดน้อยกว่าชิ้นทดสอบซึ่งบางกว่าและยาวกว่าแต่ทั้งนี้ไม่ได้หมายความว่าชิ้นทดสอบที่ใช้แรงดึงสูงกว่าจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเสมอไปดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแรงดึงให้แรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยความยาว

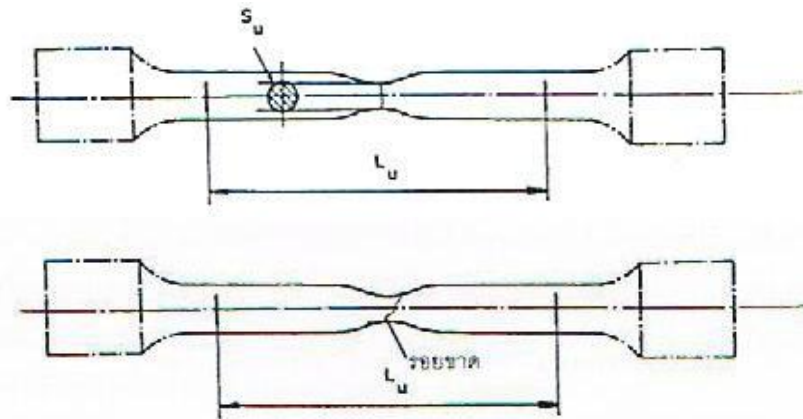
1) การหาค่าความเค้นครากเส้นโค้งของแผ่นภาพ σ - ϵ นี้จะมีอยู่ด้วยกันสองลักษณะซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุคือลักษณะที่หนึ่งส่วนต่อระหว่างช่วงยืดหยุ่นกับช่วงพลาสติกเป็นไปอย่างต่อเนื่องอีกลักษณะหนึ่งเป็นไปได้อย่างไม่ต่อเนื่องโดยมีจุดหักอย่างชัดเจนลักษณะหลังนี้จุดหักจะเป็นจุดกำหนดค่าความเค้นคราก R_e ส่วนลักษณะแรกจะต้องใช้ค่าความเค้นพิสูจน์ R_p (Proof Stress) และสามารถแทนค่าความเค้นครากได้จากการคำนวณโดยนาแรงที่จุดคราก F_e หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



ซ้าย : มีจุดครากชัดเจนขวา

ไม่พบจุดคราก [1]

รูปที่ 2.18 แผนภาพความเค้น-ความเครียด (σ - ϵ Strain Diagram) [18]



รูปที่ 2.19 การวัดขนาดความยาวชิ้นงานทดสอบหลังถูกดึงขาด L_u [18]

2) ความยืด A (Elongation) ค่าความยาวชิ้นทดสอบหลังจากถูกดึงขาด L_u วัดได้โดยการนำชิ้นทดสอบที่ถูกดึงขาดมาต่อเข้ากัน โดยต้องระวังให้แกนของส่วนที่ขาดอยู่ในแนวเดียวกันและต้องถูกประกบกันให้สนิทขณะทำการวัด

ข้อสังเกตผลการทดสอบจะใช้ได้เสมอไม่ว่ารอยขาดจะอยู่บริเวณใดในช่วงความยาวพิคัด L_0 ถ้าค่า A ที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของวัสดุนั้นแต่ในกรณีที่ตำแหน่งของรอยขาดถ้าวัดจากขอบที่ใกล้ที่สุดมีค่าน้อยกว่า $1/3 L_0$ และค่า A ที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของวัสดุนั้นให้ถือว่าผลการทดสอบยังใช้ไม่ได้ต้องทำการทดสอบใหม่เพราะถ้าตำแหน่งรอยขาดอยู่ในช่วง $1/3 L_0$ ถึง $2/3 L_0$ ค่า A ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าเนื่องจากช่วงที่มีการยืดตัวของวัสดุมากที่สุดจะอยู่บริเวณใกล้รอยขาดในขณะที่บริเวณที่ห่างออกไปวัสดุมีการยืดตัว

น้อยลงไปตามลำดับในการกำหนดขนาดความยาวพิคัด L_0 ต้องกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐานในกรณีที่ไม่สามารถกำหนดได้ตามมาตรฐานต้องระบุไว้ในรายงานอย่างชัดเจนถึงขนาด L_0 ที่ใช้ ทั้งนี้ในการทดสอบวัสดุถ้าเพิ่มขนาดความยาวพิคัด L_0 ขึ้นค่าความยืด A ที่ได้จากการทดสอบจะลดลงในขณะที่ถ้าลดความยาวของพิคัด L_0 ลงค่าความยืด A จะเพิ่มขึ้นทั้งๆที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกันทั้งนี้เป็นเพราะบริเวณใกล้รอยขาดเนื้อวัสดุจะยืดตัวถาวรมากที่สุด ในขณะที่ห่างออกไปจะยืดตัวถาวرن้อยลงตามลำดับแต่การคำนวณค่าความยืดเป็นการคำนวณเฉลี่ยทั้งความยาวพิคัด L_0

3) ยิงโมดูลัส E (Young's Modulus) ในแผนภาพ σ - ϵ พบว่าในช่วงต้นของเส้นโค้งวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยที่ค่าความเค้น σ จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด ϵ ตามกฎของฮุก

2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็งเป็นความต้านทานต่อการผิดรูปอย่างถาวรของวัสดุวัสดุที่มีความแข็งสูงก็จะมีค่าความแข็งแรงสูงตามไปด้วยดังนั้นการวัดความแข็งเป็นวิธีที่สะดวกและประหยัดในการที่จะทราบค่า Ultimate tensile strength ของวัสดุนั้นๆ เทคนิคของการวัดค่าความแข็งแบ่งได้ 4 แบบ

โดยมีหลักการที่เหมือนกันคือ เครื่องวัดความแข็งจะมีหัวกด (Indenter) ที่มีรูปร่างทรงกลม หรือปิรามิดสำหรับกดลงบนพื้นผิววัสดุด้วยแรงขนาดต่างๆกัน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดขนาดต่างๆกันด้วย จากนั้นจะทำการวัดขนาดรอยกดเพื่อนำมาคำนวณความแข็ง

1) การวัดความแข็งแบบ บริเนล (Brinell Hardness Test) ใช้สัญลักษณ์ HB หัวกดที่ใช้จะเป็นเหล็กกล้าชุบแข็งทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. และมีความแข็ง 850 HV10-1500 HV 10 จะสามารถวัดความแข็งของโลหะที่มีความแข็งไม่เกิน 300-650 HB แรงที่ใช้สามารถเลือกได้จาก 500, 1500 และ 3000 kgf ความแข็งตาม บริเนลสามารถหาได้จาก

$$HB = \frac{\text{แรงทดสอบ}}{\text{พื้นที่ของรอยกด}}$$

ผิวงานที่จะทดสอบต้องเรียบปราศจากวัสดุหลุดล่อน , ออกไซด์ และเหมาะสมกับวัสดุที่อ่อนเหนียว ความหนาของชิ้นงานต้องมีขนาดอย่างน้อย 8 เท่าของความหนาของรอยกด เวลาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ระหว่าง 15-25 วินาที หลังจากนั้นจึงวัดขนาดของรอยกดและเทียบค่าความแข็งได้จากตารางเทียบความแข็งสมบัติทางกลของวัสดุ หมายถึงความสามารถในการรับแรง หรือภาระ โหลด ในลักษณะต่างๆ โดยสมบัติทางกลของวัสดุที่สำคัญได้แก่ ความแข็ง และความแข็งแรง

ความแข็งคือความต้านทานต่อการผิดรูปอย่างถาวรของวัสดุ วิธีการที่วัดความแข็งได้ อย่างแม่นยำ ทำได้โดยอาศัยเครื่องวัดความแข็ง โดยเครื่องวัดความแข็งจะมีตัวกดสำหรับกดลงบน

พื้นผิววัสดุด้วยแรงขนาดต่างๆ กัน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยบวมขนาดต่างๆ กันด้วย จากนั้นจะทำการวัดรอยบวมนั้นเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความแข็งในแต่ละวิธีการวัดความแข็ง ซึ่งจะมีวิธีการคำนวณหาค่าแตกต่างกันออกไป

2) การวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness test) ในการปฏิบัติการทางวัสดุศาสตร์นี้เราจะใช้การวัดความแข็งแบบ Rockwell หัวกดที่ใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ

- 1) Diamond Cone 120° (เพชรทรงกรวย) ใช้กับโลหะแข็ง
- 2) Steel Ball (เหล็กกล้าทรงกลม) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/16, 1/8, 1/4 หรือ 3/8 นิ้ว ใช้กับโลหะทั่วไป

3) วิธีการใช้เครื่อง Rockwell Scale Hardness Tester (Model : AR-10)

1. เลือกหัวกด และ Load ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุ
2. วางชิ้นงานบนฐานรอง (Anvil) หมุนฐานรองขึ้นให้หัวกดสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงาน เครื่องจะกดผิวหน้าโดยใช้ Minor Load
3. ใช้มือทั้งสองข้างหมุนแกน handle ตามเข็มนาฬิกาอย่างสม่ำเสมอ จนเข็มทั้ง 2 บนหน้าปัดเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่ตั้งชิ้นงานแล้วหยุด หากหมุนเกินให้เปลี่ยนตำแหน่งวัด แล้วเริ่มต้นใหม่
4. กดแป้นสปริงให้ไฟดับ The load control จะเริ่มกดชิ้นงาน โดย Major load
5. เมื่อไฟติดอีกครั้ง อ่านค่าความแข็งที่ได้จากหน้าปัดหมุนฐานรองลง วัดตำแหน่งต่อไป

4) การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) จะใช้หัวกดเป็นเพชรรูปพีระมิด (Square-Based Diamond Pyramid) ที่มีมุม 136° ระหว่างด้านของหน้าเพชรแรงที่ใช้กดต่างๆ ไปจะนิยมเลือกใช้ระหว่าง 2-1000 N. ทั้งนี้ก็ยัง ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาทดสอบ ค่าความแข็งจะหาได้จากอัตราส่วนของแรงที่ใช้ในการกดต่อพื้นที่ ของขนาดรอยกดมีหน่วยเป็น mm^2 โดยหาได้จากเส้นทแยงมุมของรอยกดแล้วแทนค่าสูตรดังต่อไปนี้

1) เงื่อนไขในการทดสอบความแข็งแบบ Vickers

1. ผิวชิ้นทดสอบจะต้องเรียบ ปราศจากออกไซด์ วัสดุชนิดอื่นๆ เช่น สารหล่อลื่น ทุกชนิด
2. ความหนาของชิ้นทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาดำสุด เท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด d
3. ตามเกณฑ์จะทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 10°C หรือ 35°C

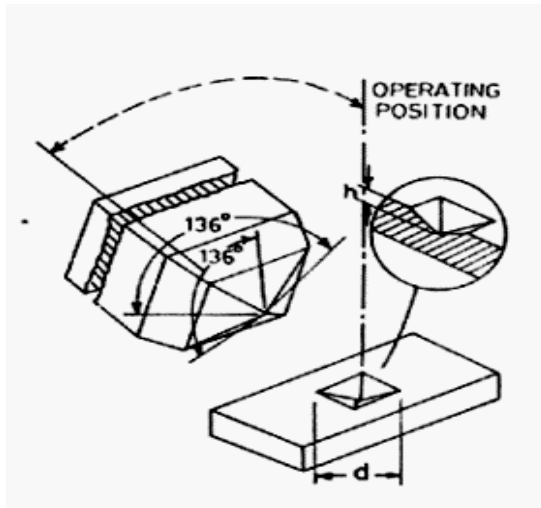
4. ระยะห่างระหว่างรอยกด ให้ถือเกณฑ์ดังนี้

5. เหล็กกล้า ทองแดง และทองเหลือง อย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของความยาวเฉลี่ย เส้น
ทแยงมุมรอยกด 37 องศา

6. โลหะเบา เช่น ดีบุก ตะกั่ว อย่างน้อยที่สุด 6 เท่าของความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

2) Micro-Vickers Hardness Testing (Mitutoyo Model: MVK-H3)

Micro Hardness Test เป็นการวัดความแข็งในระดับจุลภาค รอยกดและการวัดค่าความแข็งจะมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ มีบริเวณที่จะวัดความแข็งน้อย เช่น เกรนของเหล็กเป็นต้น และจะต้องมีการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบ หน่วยที่ใช้วัด คือ VICKERS (HV) หรือ Diamond Pyramid Hardness เนื่องจากหัวกดเป็นเพชรรูปปิระมิด ทำมุม 136° ใช้น้ำหนักในการทดสอบตั้งแต่ 2-1000 N โดยใช้เวลาในการกด 10-15 วินาที และรอยกดจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.20 รูปหัวเพชรและรอยกด [19]

3) เงื่อนไขการทดสอบ

เนื่องจากรอยกดบนผิวชิ้นทดสอบมีขนาดเล็กมากจึงต้องให้ผิวชิ้นทดสอบผิวเรียบปราศจากออกไซด์หรือผ่านการกัดกรดมาก่อนเพื่อที่จะได้เห็น โครงสร้างจุลภาคและสามารถเลือกกดบนโครงสร้างที่ต้องการได้

1. ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาค่าสุดเท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด (d)
2. อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง $10-35^\circ\text{C}$
3. ระยะห่างระหว่างรอยกดให้ถือตามเกณฑ์ดังนี้

4. เหล็กกล้า (Steel) ทองเหลือง (Brass) และทองแดง (Copper) ทำอย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของค่าความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด
5. โลหะเบา เช่น ดีบุก (Sn) ตะกั่ว (Pb)
6. การติดตั้งจะต้องมั่นคง ไม่สั่นสะเทือน เพราะจะส่งผลให้การรอยกดที่ได้คลาดเคลื่อน
7. การให้แรงกดจะต้องสม่ำเสมอ
8. ให้เวลากดเช่นบนผิวงานเท่ากันเมื่อต้องการเปรียบเทียบค่า
9. ขยายและมีแสงสว่างให้เพียงพอในการวัดขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด

2.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา (Metallographic Examination)

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาเป็นสิ่งที่สำคัญ การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานบริเวณรอยเชื่อม มีความสำคัญการตรวจสอบทางโลหะวิทยาเพื่อที่จะทราบถึงโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งเกิดจากอัตราความเร็วของการกระจายตัวความร้อนในบริเวณเขตอิทธิพลของความร้อน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของโลหะในช่วงการเกิดพลาสติกในรูปของความร้อนหรือความเย็นในระหว่างการอัดตัว ดังนั้น โครงสร้างของเม็ดเกรนจะเล็กและละเอียดมาก เมื่อโครงสร้างของโลหะใช้ช่วงที่เกิดจากการอัดเพิ่มขึ้น จากผลที่เกิดขึ้นจะเป็นการเนียนผ่าน ออกไซด์หรือโลหะที่เราเรียกว่า “Mastication” ทำให้โลหะต่างชนิดกันสามารถเชื่อมติดกันได้ แตกต่างจากการเชื่อมแบบทำราบ คือจะไม่มีการเกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนของการหลอมละลาย ผลของการเชื่อมมีลักษณะทางโลหะวิทยาที่ดี แต่ถ้ามีอัตราการเย็นตัวเกิดขึ้นอาจเกิดการเสียหายได้ จากการทดสอบพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมมากขึ้นหรือการเกิดอุณหภูมิของการเชื่อมสูงสุด ควรมีการหล่อเย็นเพื่อให้อุณหภูมิต่ำลง สำหรับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.45 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดที่จำเป็นคือ 1300 องศาเซลเซียส และต้องปล่อยให้เย็นตัวลงโดยใช้เวลาที่อุณหภูมินี้ในการปฏิบัติรอยของการอัดจะทำการลดขนาดของเกรน แต่ถ้าใช้เวลานานมากเกินไปจะทำให้รอยเย็นมาก ดังนั้นการเชื่อมแบบแรงเสียดทานกับเหล็กเหนียวที่มีความแข็งแรงสูงสามารถทำการอบชุบก่อนหรือการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานได้ [17]

2.7.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macroscop) [17]

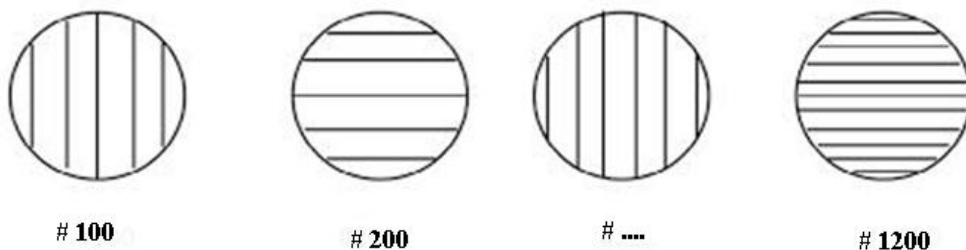
การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบโครงสร้างแบบมหภาคเพื่อจุดประสงค์บางประการดังนี้ ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) สลักฝังในการซึมลึกของแนวเชื่อม และรูพรุนของงานเชื่อม การเตรียม

ชิ้นงานทดสอบ (Macro Specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจด้วยสายตา (Visual Test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า เข้าช่วยในการตรวจสอบเพื่อให้ได้ผลดีที่สุด นั้นผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบอย่างเคร่งครัดและพิจารณารอบบกพร่องที่ปรากฏเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้หรือไม่ [17]

2.7.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope) [17]

1. การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้นควรตัดหน้าชิ้นงานให้มีพื้นที่หน้าตัด และการตัดต้องหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อนให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้เพราะความร้อนอาจจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบเกิดการผิดพลาด [17]

2. การขัดผิวชิ้นงานตรวจสอบ หรือผิวชิ้นงาน ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 200 , 400, 800, 1000 และ 1,200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหน้าผิวเรียบแล้วขัดผิวชิ้นงานลงบนที่ต้องการตรวจสอบ ในขณะที่ขัดจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้น้ำล้างสิ่งสกปรกกับเศษผงโลหะและซิลิกอนคาร์ไบด์ออกให้หมดและเมื่อต้องการเปลี่ยนแผ่นกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นงานอีกแนวหนึ่งเป็นการสลับกับตารางเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายเบอร์ 1,200 [17] แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.21 ทิศทางการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์สุดท้าย [17]

การขัดผิวชิ้นงานควรใช้แรงในการขัดพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไปทั้งนี้จะส่งผลให้ได้โครงสร้างของชิ้นงานตรวจสอบเกิดการผิดพลาดจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างผิดพลาด

1. การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของ ชิ้นงานตรวจสอบที่ผงขัดทำจากผงอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) หรือ อาจจะใช้เพชรขัดผิวหน้าชิ้นงานตรวจสอบในกรณีที่มีค่าความแข็งแรงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมี ขนาดตั้งแต่ 0.05-0.03 ไมโครเมตร แล้วการขัดผงแบบนี้จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้า สักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำแล้วเทลงบนผ้าสักหลาดขัดจนผิวเป็นมันวาว

2. การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นงานที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วจะต้องล้างทำความสะอาด ด้วยแอลกอฮอล์แล้วจากนั้นก็นำไปกัดด้วยน้ำยาซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของ โลหะที่ต้องการตรวจสอบเช่น ถ้าเป็นเหล็กจะใช้กรดไนตริก 2-4 เปอร์เซ็นต์ผสมแอลกอฮอล์

3. การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเริ่มต้นก็ต่อเมื่อชิ้นงานที่ ผ่านการกัดกรดแล้ว ผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องอย่างหนึ่งที่จะต้องศึกษาการใช้งานกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือ ก่อนการใช้

2.7.4 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) [17]

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) คือ เครื่องมือขยายขอบเขตของประสาทสัมผัสทาง สายตาให้เห็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยสายตาเปล่าได้ ที่มีขนาดเล็กมาก

1. ประโยชน์ของกล้องจุลทรรศน์

- 1) ช่วยในการมองเห็นสิ่งที่มีขนาดเล็กที่สายตาเราไม่สามารถมองเห็นได้
- 2) ช่วยในการศึกษาหาข้อมูลในทางชีววิทยา

2. หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ [17]

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองเห็นสิ่งที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็น เครื่องช่วยสายตา ในการศึกษาลักษณะ โครงสร้างของเซลล์ให้ละเอียดยิ่งขึ้น กล้องจุลทรรศน์มี ความสามารถขยาย (Magnification) กำลังขยายของกล้องขึ้นอยู่กับความสามารถในการขยายแยกจาก จุดสองจุดซึ่งอยู่ใกล้กันให้มองเห็นแยกเป็นสองจุดได้ (Two Point of Discrimination) ขึ้นอยู่กับความ ยาวของคลื่นแสงที่ผ่านเลนส์ ถ้าคลื่นแสงมีความยาวสั้น จะช่วยเพิ่ม (Resolving Power) และ ความสามารถในการรวมแสงของเลนส์ (Numerical Aperture of Objective Lenc /NA) โดยที่ค่า NA จะมีความคมชัดมากยิ่งขึ้น

3. ประเภทของกล้องจุลทรรศน์ [17]

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบธรรมดา ประกอบด้วย 2 ส่วน เลนส์ใกล้วัตถุและ เลนส์ใกล้ตา หลักการทำงานโดยใช้แสงผ่านวัตถุแล้วมาที่เลนส์จนเห็นภาพแบบชัดเจน

1) กล้องที่ใช้แสงแบบสเตรียโอ เป็นกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์ที่ทำให้เกิดภาพแบบ 3 มิติ ใช้ในการศึกษาวัตถุที่มีขนาดใหญ่แต่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าที่แยกรายละเอียดได้ กล้องชนิดนี้ช่วยขยาย เนื่องจากมีข้อแตกต่างจากกล้องทั่วไปคือ ภาพที่เห็นเป็นภาพเสมือนจริงมีความคมชัดลึกและเป็นภาพ 3 มิติ เลนส์มีกำลังขยายต่ำ (น้อยกว่า 1 เท่า) ใช้ในการศึกษาทั้งวัตถุที่มีความโปร่งใสและวัตถุทึบแสง ระยะห่างของเลนส์ใกล้กับวัตถุอยู่ในช่วง 63-225 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.22 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) [17]

2) กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้อิเล็กตรอนที่มีความถี่สูงใช้ในการทำงานแทนแสง กำลังขยายได้ถึง 500,000 เท่า จนเห็นระดับของโมเลกุลที่อยู่ในโครงสร้างต่างๆ ได้ แต่ด้วยกำลังขยายที่สูงส่งผลให้มีราคาที่สูงตาม



รูปที่ 2.23 กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด [17]

2.8 การหาขนาดเกรนของโครงสร้างโลหะมีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะ

โดยเฉพาะค่าความแข็งแรง (Strength) ของโลหะ กล่าวคือในชิ้นงานโลหะที่มีขนาดเกรนเล็กเป็นจำนวนมากย่อมมีขอบเกรนมากกว่าโลหะชนิดเดียวกันที่มีขนาดเกรนโตกว่า บริเวณขอบเกรน (Grain Boundary) หรือขอบเกรนย่อย ทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของ ดิสโลเคชัน ซึ่งจะต้องออกแรงกระทำแก่โลหะมากขึ้นเพื่อให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ต่อไปได้ ดังนั้นวัสดุที่มีขนาดเกรนเล็กจึงมีความแข็งแรงสูง

การวัดขนาดเกรนตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุแห่งอเมริกา (ASTM Standard American Standard of Testing Material) มีวิธีในการวัดอยู่ 3 วิธี

1) วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison Method) โดยปกติจะถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่มีกำลังขยายประมาณที่ 100 X แล้วพิจารณาขนาดเกรนโดยการเปรียบเทียบกับภาพโครงสร้างจุลภาคมาตรฐาน แล้วกำหนดหมายเลขมาตรฐานที่เรียกว่า ASTM Grain Size Number โดยมีหมายเลขยิ่งมาก ขนาดเกรนยิ่งเล็ก วิธีนี้เหมาะสำหรับโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนแบบ (Equiaxed Grain) คือเกรนค่อนข้างกลม

2) วิธีกำหนดพื้นที่ (Planimetric Method หรือ Jeffries Method) สร้างพื้นที่วงกลมหรือสี่เหลี่ยมพื้นผ้า บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคให้มีพื้นที่ 5000 ตารางมิลลิเมตร ทั้งนี้ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคนั้นจะต้องมีจำนวนเกรนไม่น้อยกว่า 50 เกรนและมีจำนวนเกรนไม่เกิน 100 เกรน

3) วิธีการลากเส้นตัดผ่าน (Intercept Method) การหาขนาดเกรนด้วยวิธีการลากเส้นตัดผ่านมีหลายวิธี

1. Heyn Line Intercept Procedure กระทำโดยการลากเส้นตัดผ่านภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคแล้วนับจำนวนเกรนที่เส้นตรงตัดผ่านเกรนทำจำนวนหลายๆครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย (Arithmetic Average)

2. Circular Intercept Procedure กระทำโดยการลากเส้นวงกลม 3 วงบน ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ต้องการหาขนาดเกรน โดยวงกลมทั้ง 3 วงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 79.58 , 53.05 และ 26.53 ตามลำดับ จากนั้นทำการนับเกรนที่ถูกเส้นตัดผ่านนับเป็น 1 เกรน ส่วนเกรนที่อยู่ รอยต่อของเส้นที่ตัดผ่านรอยต่อ 3 เกรน ให้นับเป็น 1 เกรน

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนตัวหลัง การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและตัวที่มีผลต่อสมบัติทางกลและ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

MüminSahin, H.ErolAkta and TurgutGulmez [1] การศึกษาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน โดย การกำหนดค่าพารามิเตอร์เช่นความเร็วรอบในการหมุนแรงกดคั่นและเวลาในการกดคั่นชิ้นงาน ในขณะที่เชื่อมด้วยแรงเสียดทานและลักษณะของคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า AISI 1040 ด้วย ความเสียดทาน การศึกษาทฤษฎีและความสำคัญของการเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมความเสียดทานที่ได้รับ คือการพัฒนาเพื่อให้ได้รอยต่อที่เหมาะสมในการใช้งาน โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมด้วย แรงเสียดทาน โดยใช้กับชิ้นงานที่มีลักษณะทรงกระบอกสามารถรับแรงกด แรงคั่นและความเร็วใน การหมุนเป็นพารามิเตอร์ ในการศึกษาโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเกิดขึ้นในการ เชื่อมต่อชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันหรือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่แตกต่างกัน AISI 1040 แล้วหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตัวแปรต่างๆ การเชื่อมต่อโดยการตรวจสอบชิ้นงานเชื่อมและ สมบัติทางกลของรอยต่อโดยใช้การทดสอบแรงดึง การทดสอบความล้า และการทดสอบความแข็ง แล้วนำมาประมวลผลการทดลองด้วยการโปรแกรมจำลอง

สุริยา ประสมทองและคณะ [2] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานการเชื่อมอิกิวีตี หนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีข้อดีหลายประการเช่นสามารถใช้เชื่อมชิ้นงานที่เป็นวัสดุต่าง ชนิดกันได้ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น ไม่มีความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงเพราะชิ้นงานมีการเชื่อมผสาน ติดกันทั้งพื้นที่หน้าตัดโดยกระบวนการทางความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นโดยการแปลงพลังงานกลเป็น พลังงานความร้อนที่อินเตอร์เฟสของชิ้นงานในระหว่างการหมุนภายใต้แรงคั่นตัวแปรที่น่าสนใจใน การเชื่อมแรงเสียดทานคือแรงเสียดทาน ,เวลา,แรงคั่น,แรงเสียดทาน, เวลาในการอัด, และความเร็วใน การหมุนในการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองการหาค่าตัวแปรเหล่านี้สามารถเห็นได้ในบทความ

ต่างๆ ได้กล่าวถึงกระบวนการอัดในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของเหล็กเครื่องมือ (Fomichev) ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของเหล็กรอบสูงกับเหล็กโครงสร้าง (Ishibashi et al.) ได้เลือกวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กเครื่องมือมาเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเพื่อประเมินขีดความสามารถของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและศึกษาโลหะผสมบริเวณผิวอินเตอร์เฟซโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ (Murti) และ (Sundaresan) ได้มีการศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของวัสดุต่างชนิดกันจึงได้มีการศึกษาผลกระทบของเวลา , ความเร็วรอบและแรงดันในการอัดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแต่อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรอื่นๆอีกหลายตัวที่อาจมีผลต่อความแข็งแรงและความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยความเสียดทาน

จักรินทร์ คงสิบ [3] ได้ศึกษาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเป็นการเชื่อมอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยมเพิ่มมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ไม่ต้องการตัวประสานในการเชื่อม ไม่เกิดควัน รอยเชื่อมมีคุณภาพดีเสมอเต็มหน้า ไม่มีรูพรุน ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น เป็นต้น แต่เนื่องจากขณะเชื่อมเกิดความร้อนสูงขึ้นบริเวณรอยเชื่อมจึงส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กบริเวณรอยเชื่อมซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนปานกลาง AISI1045 ที่ผ่านการอบอ่อนและทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร จำนวน 720 ชิ้น ภายใต้เงื่อนไขการเชื่อม คือ แรงดันในการอัด 20, 30 และ 40 บาร์ เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที อุณหภูมิในการอบอ่อน 790, 850 และ 970 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที เมื่อเชื่อมเสร็จได้นำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบความแข็งแรง ทดสอบแรงดึง และองค์ประกอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อมจากการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิปกติของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมชิ้นงานค่าแรงดึงมีค่าสูงกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อน แต่ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมชิ้นงานที่อุณหภูมิปกติของรอยเชื่อมจะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในส่วนของการเชื่อมพบว่าเกรนของเหล็กที่บริเวณรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนมีเกรนที่ละเอียดมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนจึงส่งผลทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากกว่า

สุรสิงห์ อารยางค์กูร และคณะ [4] ได้ศึกษาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบต้องสามารถเชื่อมชิ้นงานที่เป็นเหล็กกลมชนิด AISI 1015 ได้และต้องทำงานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆ จากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเครื่องเชื่อมต้นแบบพบว่าเครื่องเชื่อมต้นแบบสามารถทำงานและเชื่อมต่อชิ้นงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดโดยเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆที่เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบทำได้คือสามารถปรับตั้งค่าแรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ตั้งแต่ 10-60 บาร์แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ตั้งแต่ 20-100 บาร์ความเร็วรอบใน

การหมุน (Friction Speed) ตั้งแต่ 0-2,500 รอบต่อนาทีและสามารถปรับตั้งเวลาในการเสียดทาน (Friction Time) เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ได้จากการทดลองเชื่อมเหล็กเพลากลมชนิด AISI 1015 พบว่าค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมต่อมีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม (Base Iron) ในส่วนของการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นพบว่าความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมต่อมีค่าความแข็งแรงลดลงซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมทำให้เปอร์เซ็นต์ของ Pearlite ลดลงในส่วนของความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างของเกรนเหล็กด้วย Microphotograph พบว่าบริเวณแนวเชื่อมต่อมีเกรนของเหล็กที่ละเอียดมากกว่าบริเวณอื่นที่ไม่ได้รับผลกระทบจากเชื่อมส่งผลให้บริเวณแนวเชื่อมต่อมีความแข็งแรงมากขึ้น

Sare Celik and Ismail Eroglu [5] ศึกษาการเชื่อมต่อโลหะวัสดุต่างชนิดกันมีความจำเป็นต่อภาคอุตสาหกรรมการผลิต เช่นอุตสาหกรรมการผลิตที่มีการเชื่อมต่อโลหะผสมและเหล็กกล้าคาร์บอนเข้าด้วยกัน เพราะสามารถลดต้นทุนทางวัตถุดิบ ในการศึกษาเป็นการเชื่อมต่อโลหะผสม AISI 4140 กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 เข้าด้วยกัน โดยวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ผลที่ได้สามารถเชื่อมต่อกันได้และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างมหภาค ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน การทดสอบความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน นอกจากนั้นยังทำการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการเชื่อมที่บริเวณรอยเชื่อม จากการทดลอง การเชื่อมต่อโลหะผสม AISI 4140 และเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 โดยการเชื่อมเสียดทาน ผลที่ได้คืออุณหภูมิที่ 2 วินาทีแรกอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณรอยเชื่อม ต่อมาแรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจึงทำให้บริเวณที่หน้าตัดชิ้นงาน อ่อนตัวทำให้เกิดครีกรอบๆ แนวเชื่อม การที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าลง เป็นเงื่อนไขที่คิดต่อการเชื่อมโลหะผสม AISI 4140 และเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 การศึกษานี้คือความเร็วรอบที่ 3000 รอบต่อนาที ความดันในการเสียดทาน 81 MPa เวลาในการเสียดทาน 6 วินาที ความดันในการอัด 162 MPa และเวลาในการเชื่อม 14 วินาที ตามลำดับ จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ได้เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 อยู่สูงกว่า 6% และค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดของชิ้นงานทดสอบเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 ต่ำกว่า 1.9 %

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของการอบชุบทางความร้อนก่อนการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน เหล็ก AISI 1045 ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม มีผลต่อโครงสร้างมหภาคและจุลภาค บริเวณรอยเชื่อม จากการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบว่า อุณหภูมิในการกระบวนการทางความร้อน เวลาในการอัด และแรงดันในการอัดมีอิทธิพลต่อความแข็ง ความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาค ของรอยเชื่อมแบบแรงเสียดทาน การวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือเหล็กกล้า AISI 1045 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง แสดง ส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 และเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ตัดแบ่งให้มีความยาวที่ 100 มิลลิเมตร โดยประมาณ แสดงดังรูปที่

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก AISI 1045

วัสดุ	%C	%Cr	%Si	%Mn	%Ni
AISI 1045	0.43	-	0.42	0.52	-



รูปที่ 3.1 เหล็กกล้า AISI 1045 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร

2) เครื่องกลึงแนวนอนเครื่องกลึงแนวนอนจะนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องทดสอบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เครื่องกลึงที่ใช้ต้องมีเบรกที่สามารถหยุดหัวจับเครื่องได้ โดยใช้ระยะเวลาในการหยุดน้อยที่สุด โดยใช้ความเร็ว 100 รอบ/นาที ลักษณะของเครื่องกลึงที่ใช้ดังแสดงได้ในรูปที่



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

3) ชุดไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แทนแท่นขันศูนย์ท้ายแทนทำให้ชิ้นงานเคลื่อนที่เกิดแรงเสียดทาน เป็นผลทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนซึ่งทำให้ชิ้นงานติดกัน โดยแรงดันที่ใช้ในการกดแช่ชิ้นงาน (P_1) คือ 14 บาร์ และแรงดันที่ใช้ในการอัดคือ 20 บาร์ , 30 บาร์ และ 40 บาร์ตามลำดับ แสดงดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ควบคุมระบบไฮดรอลิก

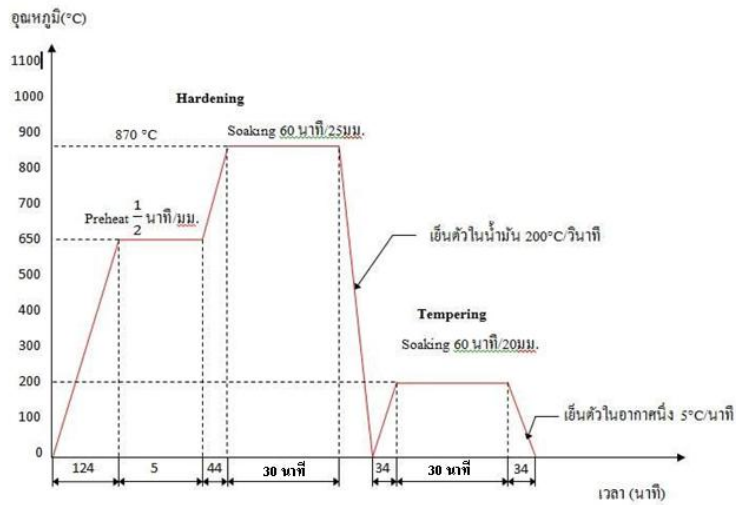


รูปที่ 3.4 เครื่องกลึงแนวอนาคิดตั้งระบบไฮดรอลิก

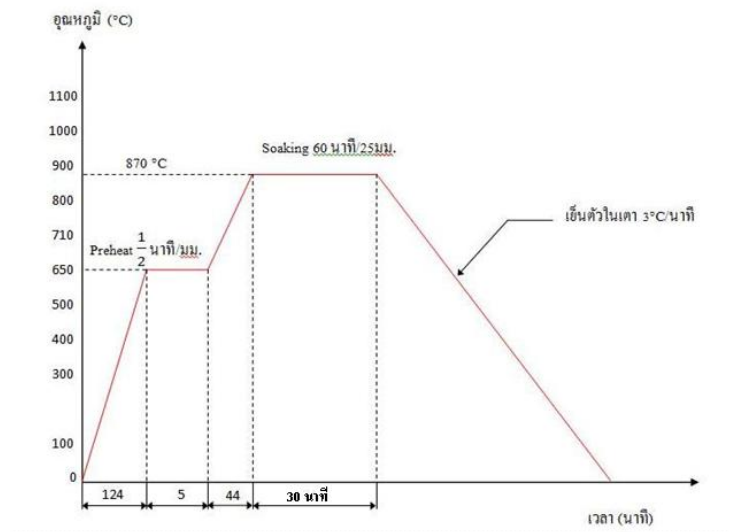
3.2 ชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการทางความร้อน

นำชิ้นงานทดลองที่ได้จัดเตรียมมาผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างชิ้นงานด้วยวิธีการชุบแข็ง Hardening ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในการอบคืนตัว Tempering โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัว คือ 200°C และ ตามลำดับ ลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการอบชิ้นงาน ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.1

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการตัดให้มีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร จำนวน 720 ชิ้น ไปผ่านกระบวนการความร้อนที่ 870° แล้วทำการชุบแข็งโดยการจุ่มชุบในน้ำมันเครื่อง เพื่อให้เหล็กมีความแข็งที่ 50-60 HRC แล้วนำมาผ่านกระบวนการอบคืนตัว Tempering แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบคืนตัว เหล็ก AISI 1045 ที่ 870 °C



รูปที่ 3.6 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนสมบูรณ์ เหล็ก AISI 1045 ที่ 870 °C

2. เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วต่อมาทำการอบคืนตัว Tempering อุณหภูมิที่ 200-400 °C เพื่อให้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาเพื่อให้เหล็กคลายความเค้นระดับของอุณหภูมิแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงในเตา ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.7

3. เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วต่อมาทำการอบอ่อนสมบูรณ์ Full Annealing อุณหภูมิเหนือเส้น A3 ประมาณ 50 °C ภายในเตาที่ควบคุมอุณหภูมินี้ไม่เกิน 2 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้

ให้เย็นภายในเตาโครงสร้างที่เป็นมาเทนไซด์หรือเบนไนท์ ก็จะกลับมาเป็นเฟอร์ไรต์และซิเมนไซด์ทำให้ความแข็งลดลงกลายเป็นเหล็กอ่อน ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เตาอบชุบไฟฟ้า 870 องศาเซลเซียส

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) นำเหล็กกล้า AISI 1045 มาจับยึดที่หัวจับเครื่องกลึง และอีกหนึ่งชิ้นมาจับยึดที่หัวจับของชุดไฮดรอลิก ดังแสดงได้ในรูป 3.5



รูปที่ 3.8 การจับยึดชิ้นงานกับเครื่องกลึง

- 2) กำหนดความดันที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งความดันที่ใช้ในการกดแช่คือ 14 บาร์ และความดันที่ใช้ในการกดอัด 20 บาร์
- 3) ตั้งความเร็วรอบของเครื่องกลึง 1,800 รอบ/นาที จากนั้นเปิดเครื่องกลึงทำการเชื่อมชิ้นงาน
- 4) ใช้ความดัน 14 บาร์เพื่อให้กระบอกไฮดรอลิกเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานที่จับยึดที่หัวจับของเครื่องกลึง โดยใช้เวลาในการกดแช่ชิ้นงาน 4 วินาที (เป็นการเสียดทานของชิ้นงาน)
- 5) เพิ่มความดันในช่วงระยะเวลาที่สองคือ 20 , 30 และ 40 บาร์ เพื่อทำการกดแช่ชิ้นงาน และใช้เวลาในการกดแช่ชิ้นงานคือ 2 , 3 และ 4 วินาทีตามลำดับ
- 6) หยุดเครื่องกลึงแบบทันที ดังแสดงได้ในรูป 3.6



รูปที่ 3.9 การเชื่อมเสร็จสมบูรณ์หยุดเครื่องกลึงแบบทันที

- 7) ถอดชิ้นงานทดลองออกจากเครื่องกลึง
- 8) ตรวจสอบการเชื่อมด้วยสายตาว่าชิ้นงานเชื่อมติดกันหรือไม่
- 9) ทำการทดลองวัสดุเหล็กกล้า AISI 1045 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและชิ้นงานที่ไม่ ทำตามขั้นตอนที่ 1-9 โดยทำการเชื่อมชิ้นงานตามตัวแปรที่กำหนด ตามลำดับ

3.3.2 นำเหล็กที่ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้มาทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน โดยใช้เวลาในการกดแช่ชิ้นงาน 4 วินาที ความดัน 14 บาร์ และเวลาในการกดอัดชิ้นงาน 2 , 3 และ 4 วินาที ความดันที่ใช้ 20 , 30 และ 40 บาร์ ตามลำดับ จากการทำ Pre-Test เชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าตัวแปรในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045

ตารางที่ 3.2 ความเร็วรอบของเครื่องกลึงในการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ที่ความดันกดแข็งชิ้นงาน ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์ เวลา 2 วินาที

ความเร็วรอบ (รอบ / นาที)	การเชื่อมติดกัน	เวลาที่ชิ้นงานเกิดความร้อน (วินาที)
1,500	✓	9
1,800	✓	4
2,200	✓	2

จากตารางที่ 3.2 พบว่าที่ความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาทีชิ้นงานเกิดความร้อนในการเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทานน้อยที่สุดคือ 2 วินาทีแต่ระยะเวลาในการเชื่อมนั้นเกิดขึ้นเร็วเกินไป จึงทำให้ความคุมเวลาในการเชื่อมได้ยาก ความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาทีชิ้นงานเกิดความร้อนในการเสียดทานใช้เวลาในการเสียดทานคือ 4 วินาทีเป็นความเร็วรอบและเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็กกล้า AISI 1045 เพราะเวลาในการแข็งชิ้นงานนั้นมีเวลาในการควบคุมความดันในการเชื่อมชิ้นงาน และความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาทีชิ้นงานเกิดความร้อนในการเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทานมากที่สุดคือ 9 วินาทีซึ่งใช้เวลาในการเชื่อมนานเกินไปจึงไม่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ดังภาคผนวก ก. รูปที่ ก.1- รูปที่ ก.3

ตารางที่ 3.3 เวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแข็งชิ้นงาน 14 บาร์ ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์

เวลา (วินาที)	การเชื่อมติดกัน	ลักษณะรอยเชื่อม	หมายเหตุ
1	✓	เล็ก	รอยเชื่อม ไม่สมบูรณ์
2	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
3	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
4	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
5	✓	ใหญ่	ใช้เนื้อวัสดุมากเกินไป

จากตารางที่ 3.3 พบว่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมชิ้นงานคือ 2 วินาที 3 วินาที และ 4 วินาทีซึ่งเชื่อมชิ้นงานติดกันสมบูรณ์และเนื้อของวัสดุเกิดน้อยทำให้ไม่สิ้นเปลืองวัสดุ ดังภาพผนวก ก. รูปที่ ก.4 - รูปที่ ก.8

ตารางที่ 3.4 ความดันที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์เวลาในการอัด 2 วินาที

ความดัน (บาร์)	การเชื่อมติดกัน	ลักษณะรอยเชื่อม	หมายเหตุ
20	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
30	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
40	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
50	✓	ใหญ่	ใช้เนื้อวัสดุมากเกินไป

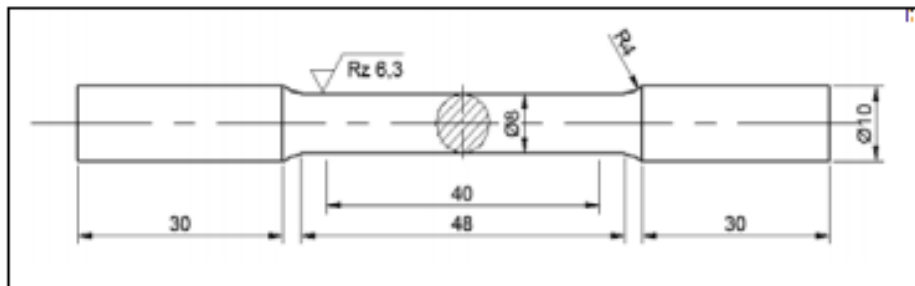
จากตารางที่ 3.4 พบว่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานความดันในการอัดที่เหมาะสมในการเชื่อมชิ้นงานคือ 20 บาร์ 30 บาร์ และ 40 บาร์ ซึ่งเชื่อมชิ้นงานติดกันสมบูรณ์และเนื้อส่วนเกินของวัสดุเกิดน้อยทำให้ไม่สิ้นเปลืองวัสดุ และเมื่อทำการเพิ่มความดันมากขึ้นจะให้ทนต่อค่าแรงดึงได้น้อยลงรอยเชื่อมจะมีลักษณะคิบใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุ ดังภาพผนวก ก. รูปที่ ก.9- รูปที่ ก.12

ตารางที่ 3.5 จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิปกติ Tempering และ Full Annealing

เวลา ความดัน	2 วินาที	3 วินาที	4 วินาที
20 บาร์	10	10	10
30 บาร์	10	10	10
40 บาร์	10	10	10

3.4 การทดสอบค่าความต้านทานต่อความแข็งแรงดึง (Tensile Test)

1. หลังจากชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน นำชิ้นงานที่แบ่งไว้เป็น 3 ตัวแปร ไปทำการกลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องกลึง CNC เพื่อให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรงและมีขนาดที่กัน ตามมาตรฐาน ASTM E8-04 [6] แสดงดังรูปที่ 3.10 หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปทำการดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง แสดงดังรูปที่ 3.11 และทำการบันทึกผลการทดสอบแรงดึงเพื่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ดีที่สุดมาทำการพล็อตกราฟเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ



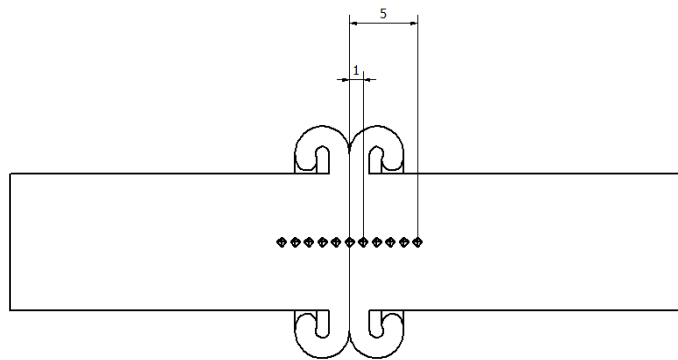
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8-04 ที่ผ่านการกลึง CNC [17]



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

3.5 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานตามตัวแปรการเชื่อม ตัวแปรละ 3 ชิ้นงานมาทำการตัดผ่าชิ้นงานตามตัวอย่างที่มีความยาวประมาณ 25 มิลลิเมตร โดยที่บริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมให้อยู่ตรงกึ่งกลางของการตัดผ่า แล้วนำชิ้นงานไปหลอตัวเรือนเพื่อเป็นการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบค่าความแข็ง Microhardness Test ตามมาตรฐาน ASTM E92 [7]



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการกดบนชิ้นงานทดสอบในแนวนอน



รูปที่ 3.13 เครื่อง Microhardness Test ตามมาตรฐาน ASTM E92

เมื่อได้ชิ้นงานหลังจากการหล่อตัวเรือนแล้วแบ่งชิ้นงานตามตัวแปรละ 3 ชิ้น ไปทำการทดสอบค่าความแข็ง (Microhardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM E92 [7] ด้วยเครื่องทดสอบค่าความแข็ง (Vickers Microhardness Test) แสดงดังรูปที่ 3.13 โดยการกำหนดตำแหน่งการทดสอบอยู่ที่กึ่งกลางของรอยเชื่อม เป็นตำแหน่งที่ 0 ,0 ตามแนวนอน Horizontal แสดงดังรูปที่ 3.12 แล้วทำการบันทึกค่าความแข็งที่ได้มาทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบ

3.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา

ที่กำหนดเป็นจุดศูนย์กลาง หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วยเครื่องตัดแบบ ไมโครมาทำการหล่อตัวเรือนด้วยเครื่องหล่อตัวเรือนเรซิน แสดงดังรูปที่ 3.16 เมื่อทำการหล่อตัวเรือนเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานทดสอบแต่ละตัวแปรมาทำการขัดด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย แสดงดังรูปที่ 3.17 โดยทำการขัดจากกระดาษทรายเรียงจากเบอร์ที่มีความหยาบมากไปหาความหยาบน้อยใช้กระดาษทรายเบอร์ 100 200 300 400 600 800 1000 1200 และผ้าสักหลาด ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 เครื่องตัดผ่าชิ้นงานทดสอบ



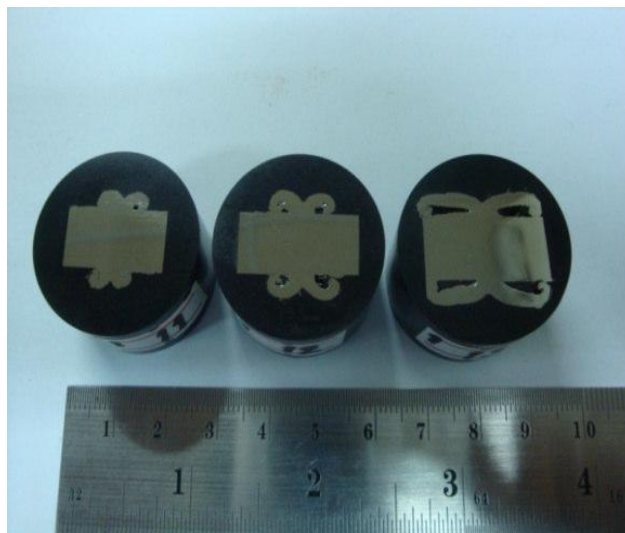
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานทดสอบที่ถูกตัดผ่าตามแนวนอน



รูปที่ 3.16 เครื่องหล่อตัวเรือนชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.17 เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรซิน

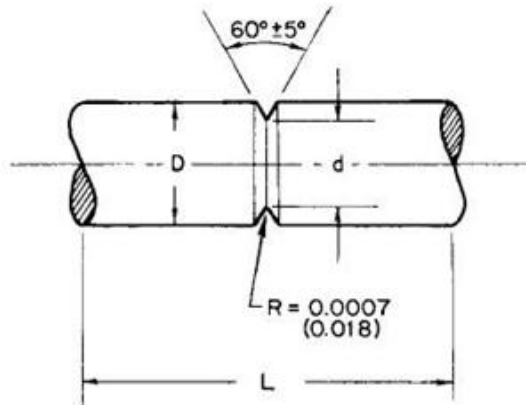
เมื่อได้ชิ้นงานหลังจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 แล้ว แบ่งชิ้นงานตามตัวแปรละ 3 ชิ้น แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียดแล้วมาทำการขัดด้วยผ้าสักกราด เพื่อให้ได้ผิวที่มีความเรียบมัน แล้วนำไปทำการกัดกรด เพื่อเป็นการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมแล้วมาทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ทำการบันทึกภาพแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 กล้อง Microscope

3.7 การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงบริเวณรอยเชื่อม

จากนั้นนำชิ้นงานที่มีค่าตัวแปรที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด แล้วนำชิ้นงานมาทำการบากร่องแสดงดังรูปที่ 3.20 ตามมาตรฐาน ASTM E602-19 [6] เพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม แล้วนำมาดึงด้วย เครื่องทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐานการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงที่รอยเชื่อม ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.18 จากการดึงชิ้นงานให้ขาดออกจากกันแสดงดังรูปที่ 3.20แล้ว นำแล้วทำการบันทึกกราฟค่าความต้านทานแรงที่บริเวณรอยเชื่อม ต่อจากนั้นชิ้นงานไปทำการตรวจสอบจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope : SEM) เพื่อศึกษาการพังทลายของรอยเชื่อม โดยนำชิ้นงานไปทำการตัดให้ขนาดที่ 25 มิลลิเมตร ทำการตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนกำลังขยายที่ 350 เท่า บริเวณรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.22



NOTE 1—Dimensions are in millimetres and (inches).

NOTE 2— d must be concentric with D within 0.025 mm (0.001 in.).

Nominal Size	D	d	L , minimum
	10	7	100

รูปที่ 3.20 ชิ้นงานทดสอบแรงดิ่งรอยเชื่อมมาตรฐานการทดสอบ ASTM E602-19



รูปที่ 3.21 บริเวณตำแหน่งการตรวจสอบการพังทลายของรอยเชื่อม



รูปที่ 3.22 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด(Scanning Electron Microscope : SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างโดยใช้อิเล็กตรอนจะส่องกราดไปลงบนผิวของวัตถุ ซึ่งสามารถมองได้ในลักษณะภาพ 3 มิติ มีกำลังขยาย 20-800 ,000 เท่า เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และแสดงผลเป็นชนิดและปริมาณธาตุได้ ซึ่งข้อมูลสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงและการพัฒนางานวิจัย

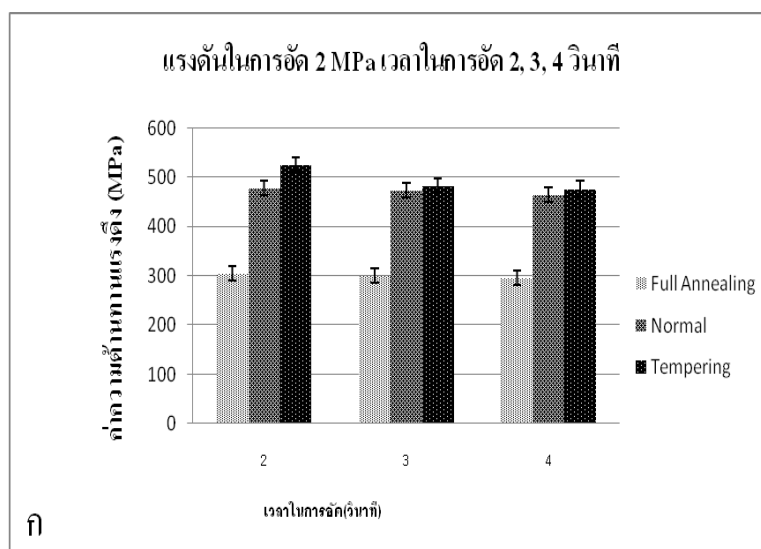
บทที่ 4

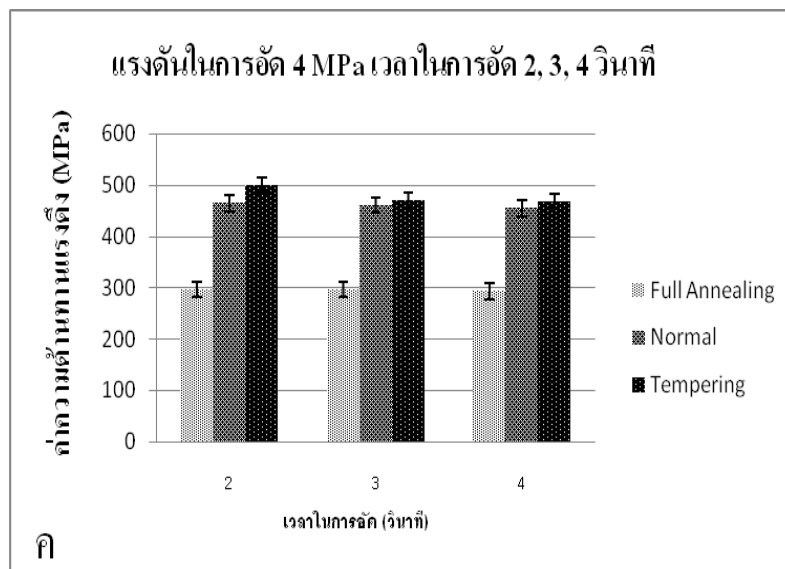
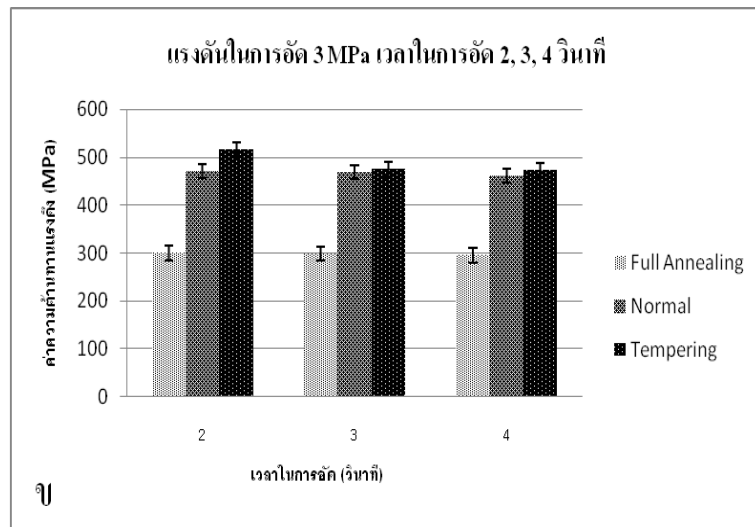
ผลการทดลองและวิเคราะห์

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของอบการอบคืนต่อนำเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม ในส่วนนี้เป็นการนำเสนอการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบ

4.1 อิทธิพลกระบวนการทางความร้อนมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Test)

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal, Full Annealing และ Tempering ก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ทำการเชื่อมชิ้นงานทดสอบตามตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้ แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1800 รอบต่อนาที เวลาในการเสียดทาน 40 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 2, 3 และ 4 MPa เวลาในการเสียดทาน 2, 3 และ 4 วินาที ต่อจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานไปทำการกลึงขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E8-04 (6) ชนิดเพลากลม จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบความต้านทานแรงดึง การดึงชิ้นงานแรงดึงจะต้องปราศจากการกระแทก ใช้ความเร็วในการยึดตัวต่ำเพื่อไม่ให้ค่าที่ได้จากการทดสอบผิดพลาด ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงจำนวน 3 ตัวแปร เพื่อให้เห็นถึงอิทธิพลของการอบคืนตัวที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงดังนี้





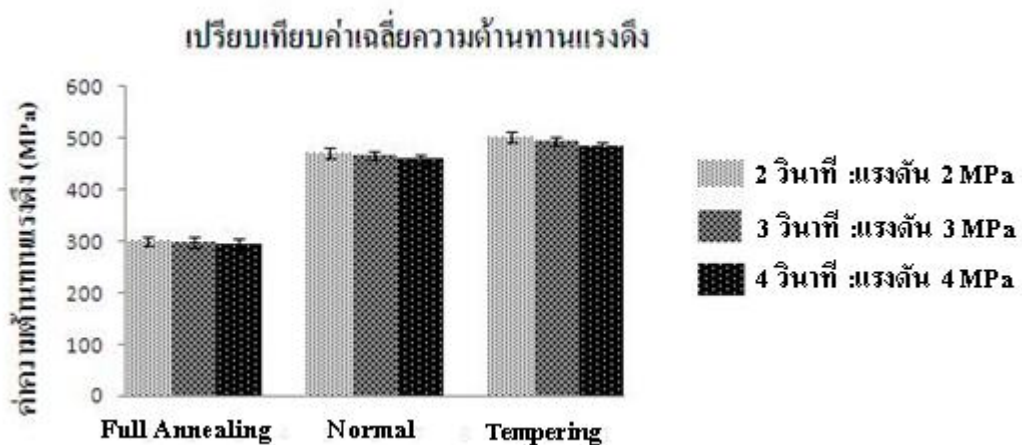
รูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

- (ก) แรงดันในการอัด 2 MPa เวลาในการอัด 2, 3, 4 วินาที
- (ข) แรงดันในการอัด 3 MPa เวลาในการอัด 2, 3, 4 วินาที
- (ค) แรงดันในการอัด 4 MPa เวลาในการอัด 2, 3, 4 วินาที

รูปที่ 4.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการกำหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4วินาที

แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1800 รอบต่อนาที แรงดันในการอัด 2 MPa เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 2 ,3,4 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.1 ก) ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering , Full Annealing และ Normal ที่เวลาในการอัดที่ 2 วินาที สามารถต้านทานแรงดึงได้ 525.6 MPa ชิ้นงาน Normal สามารถต้านทานแรงดึงได้ 478.8 MPa ชิ้นงาน Full Annealing สามารถต้านทานแรงดึง 305.5 MPa รูปที่ 4.1 (ข) พบว่าผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1800 รอบต่อนาที แรงดันในการอัด 3 MPa เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 2 ,3,4 วินาที ผลการทดสอบพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering , Full Annealing และ Normal ที่เวลาในการอัดที่ 3 วินาที สามารถต้านทานแรงดึงได้ 515.9 MPa ชิ้นงาน Normal สามารถต้านทานแรงดึงได้ 471.1 MPa ชิ้นงาน Full Annealing สามารถต้านทานแรงดึง 300.1 MPa รูปที่ 4.1 (ค) การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1800 รอบต่อนาที แรงดันในการอัด 4 MPa เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 2 ,3,4 วินาที ผลการทดสอบพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering, Full Annealing และ Normal ที่เวลาในการอัดที่ 4 วินาที สามารถต้านทานแรงดึงได้ 498.6 MPa ชิ้นงาน Normal สามารถต้านทานแรงดึงได้ 464.2 MPa ชิ้นงาน Full Annealing สามารถต้านทานแรงดึง 297.2 MPa

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบรูปที่ 4.1 (ก) (ข) และ(ค) ผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดทั้งสามตัวแปรการเชื่อมและชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบ Full Annealing และชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full Annealing มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึง ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

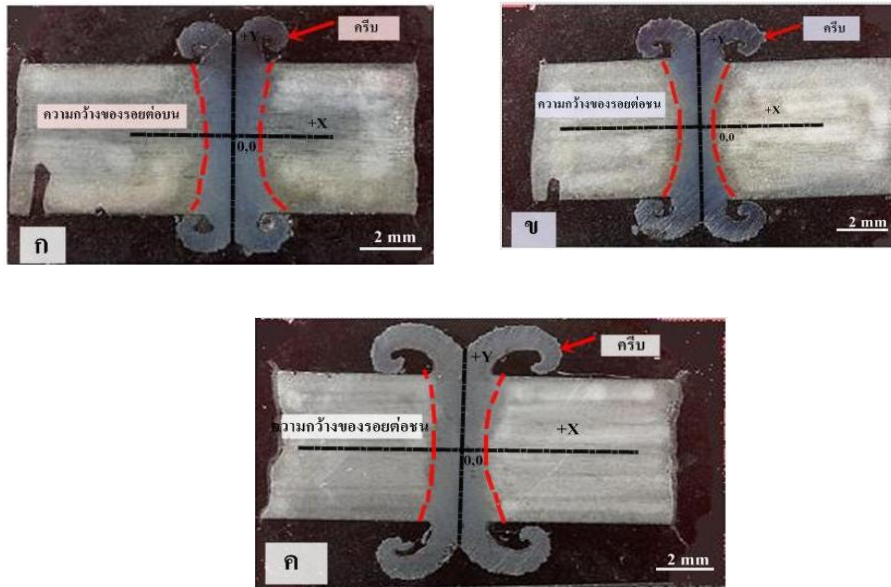
รูปที่ 4.2 จากผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 มาทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึง ชิ้นงาน Normal กับ Tempering พบว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงชิ้นงานทดสอบ Tempering มากกว่า Normal 4.50 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงาน Normal กับ Full Annealing พบว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงชิ้นงานทดสอบ Normal มากกว่า Full Annealing 36.09 เปอร์เซ็นต์ ผลทดสอบชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงได้ดี

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบรูปที่ 4. 2 ผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดทั้งสามตัวแปรการเชื่อมและชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering ซึ่งผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering ในส่วนชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full Annealing มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยทั้งสามตัวแปรการเชื่อม

4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อม

ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1800 รอบต่อนาที แรงดันในการอัด

2,3,4 MPa เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 2,3,4 วินาที ส่งผลให้เกิดขนาดความกว้างของบริเวณรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.3

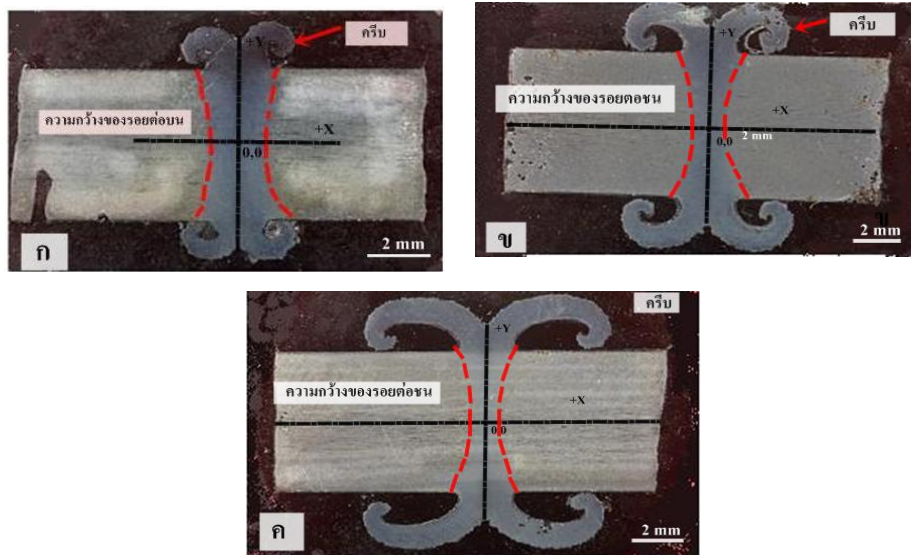


รูปที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ใช้เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa

- (ก) ความกว้างของรอยเชื่อมที่เวลาในการอัด 2 วินาที; แรงดันในการอัด 2MPa
- (ข) ความกว้างของรอยเชื่อมที่เวลาในการอัด 2 วินาที; แรงดันในการอัด 3MPa
- (ค) ความกว้างของรอยเชื่อมที่เวลาในการอัด 2 วินาที; แรงดันในการอัด 4MPa

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นตัวแปรที่มีผลต่อความกว้างของรอยเชื่อม รูปที่ 4.3 ก) ตัวแปรเวลาในการอัดที่ 2 วินาที แรงดันในการอัดที่ 2 MPa พบว่าบริเวณรอยเชื่อมกึ่งกลางตามแนวนอนมีความกว้างของรอยเชื่อมที่กว้างมากและมีขนาดของรอยเชื่อมเต็มและค่อนข้างที่จะเท่ากัน รูปที่ 4.3 ข) ตัวแปรเวลาในการอัดที่ 2 วินาที แรงดันในการอัดที่ 3 MPa พบว่าบริเวณรอยเชื่อมกึ่งกลางตามแนวนอนมีความกว้างของรอยเชื่อมเริ่มที่มีลักษณะเว้าและบริเวณกึ่งกลางเริ่มมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับแรงดันในการอัด 2 MPa รูปที่ 4.3 ค) ตัวแปรเวลาในการอัดที่ 2 วินาที แรงดันในการอัดที่ 4 MPa พบว่าบริเวณรอยเชื่อมกึ่งกลางตามแนวนอนมีความกว้างของรอยเชื่อมเริ่มที่มีลักษณะเว้าและบริเวณกึ่งกลางเริ่มมี

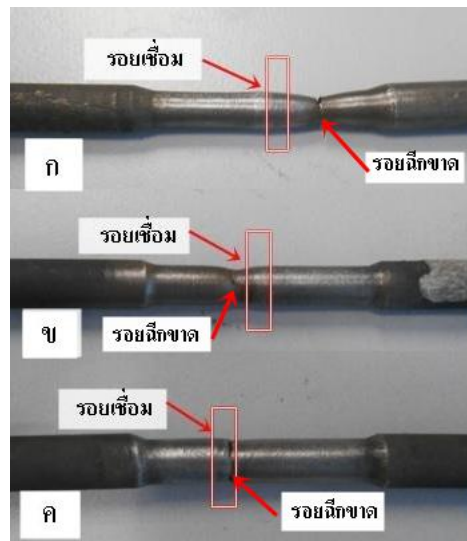
ขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับแรงดันในการอัด 3 MPa ซึ่งสรุปได้ว่าตัวแปรในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแรงดันในการอัดสูงขึ้นจะส่งผลให้รอยเชื่อมบริเวณกึ่งกลางเล็กลง



รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อมตัวแปรเวลาในการอัดและ แรงดันในการอัด

- (ก) ความกว้างของเชื่อมที่เวลาในการอัด 2 วินาทีที่แรงดันในการอัด 2 MPa
- (ข) ความกว้างของรอยเชื่อมที่เวลาในการอัด 3 วินาทีที่แรงดันในการอัด 3 MPa
- (ค) ความกว้างของรอยเชื่อมที่เวลาในการอัด 4 วินาที; แรงดันในการอัด 4 MPa

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นตัวแปรแรงดันในการอัดมีผลต่อรอยเชื่อมเมื่อทำการทดลอง ที่ตัวแปรเวลาในการเชื่อม 2, 3, และ 4 วินาทีที่แรงดันในการอัด 2, 3, และ 4 MPa รูปที่ 4.4 ก) (ข) และ (ค) พบว่าตัวแปรที่ให้ความแตกต่างของขนาดความกว้างของรอยต่อชนเกิดขึ้นจากตัวแปรแรงดันในการอัดที่เพิ่มขึ้นและเวลาในการอัดเพิ่ม ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น จะเกิดความร้อนที่หน้าสัมผัสเกิดการเสียดสี และเวลาในการเสียดสีมากเท่าไรก็จะทำให้เนื้อโลหะบริเวณที่เสียดสีกันเกิดการอ่อนตัวมากขึ้น เมื่อมีแรงดันเพิ่มมากขึ้น โลหะที่อ่อนจะถูกแรงดันดันออกมาบริเวณขอบของชิ้นงานและบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานมีความร้อนน้อยกว่าบริเวณขอบจึงทำให้เกิดรอยเชื่อมบริเวณกึ่งกลางมีลักษณะคล้ายนาฬิกาทรายเมื่อมีแรงดันในการอัดเพิ่มและเวลาในการอัดเพิ่ม



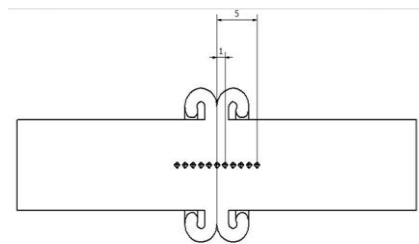
รูปที่ 4.5 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง

- (ก) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full annealing
- (ข) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal
- (ค) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering

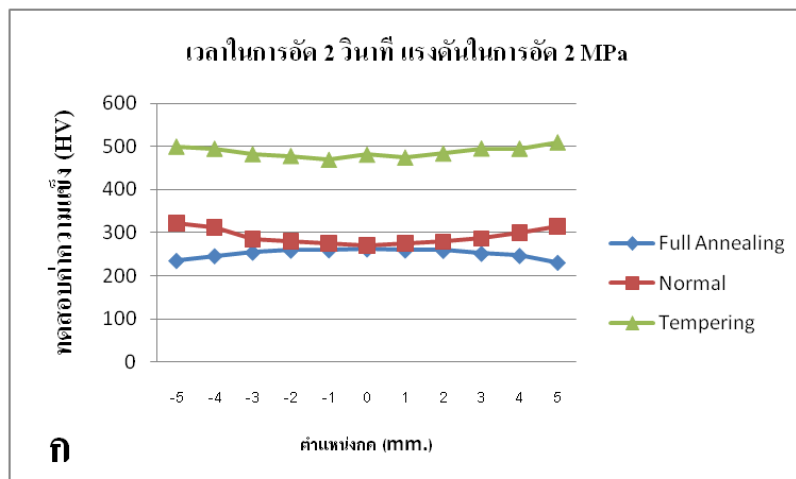
รูปที่ 4.5 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering Full Annealing Normal และไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal ก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจากการแตกหักของชิ้นงานทดสอบทั้งสามทำให้ทราบว่ารอยเชื่อมของทุกตัวแปรมีความแข็งแรงมากกว่าส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิม (Base Metal : BM) สังเกตได้จากรอยแตกหักจะอยู่นอกบริเวณรอยเชื่อมทุกชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึง ซึ่งรอยเชื่อมหรือรอยต่อจะอยู่ที่กลางของชิ้นงานทดสอบการแตกหักจะแตกหักอยู่ในบริเวณเนื้อเดิมของชิ้นงาน รูปที่ 4.5(ก) (ข) เป็นการแตกหักแบบเหนียว มีลักษณะการแตกหักแบบถ้วยและโคน (Cup and Cone) ซึ่งเริ่มต้นจากการเกิดคอคอด จากนั้นจะเกิดรูหรือช่องว่างขนาดเล็ก บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบ เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นช่องว่างขนาดเล็กก็จะขยายเพิ่มขึ้น รวมตัวกันเป็นช่องว่างขนาดใหญ่และเพิ่มมากขึ้นจนถึงฉีกขาด รูปที่ (ค) เป็นลักษณะ การแตกหักของ Tempering เป็นการแตกหักแบบ มีลักษณะการแตกหักแบบฉีกขาดซึ่งเริ่มต้นจากการเกิดคอคอดเล็กน้อย บริเวณใกล้กับรอยเชื่อมของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบบริเวณขอบเกรน และเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นช่องว่างขนาดเล็กก็จะขยายเพิ่มขึ้น รวมตัวกันเป็นช่องว่างขนาดใหญ่และเพิ่มมากขึ้นจนถึงฉีกขาดแบบของของแข็ง

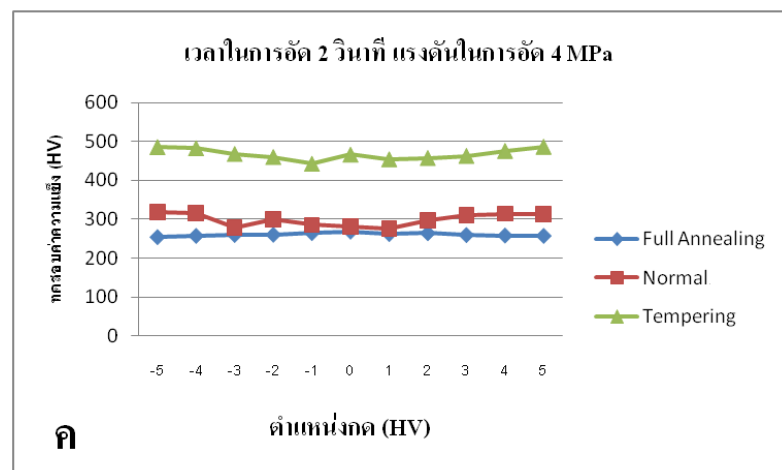
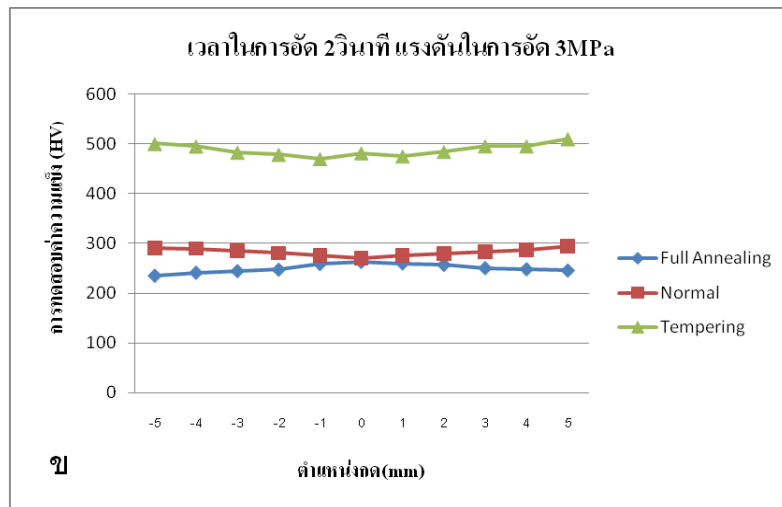
4.3 อิทธิพลกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อความแข็ง

การทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เหล็กกล้า AISI 1045 ทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์ (Vicker Microhardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM E92-82 [7] ซึ่งจะทำการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Tempering Full Annealing และ Normal ตามแนวอนทั้งหมด 11 จุด แต่ละจุดมีระยะห่างกัน 1 มิลลิเมตร โดยการกำหนดจุดกึ่งกลางของชิ้นงานอยู่ที่ตำแหน่ง 0 ,0 ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งได้ผลการทดสอบความแข็งดังนี้



รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งการกดค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM ASTM E92-82 [7]

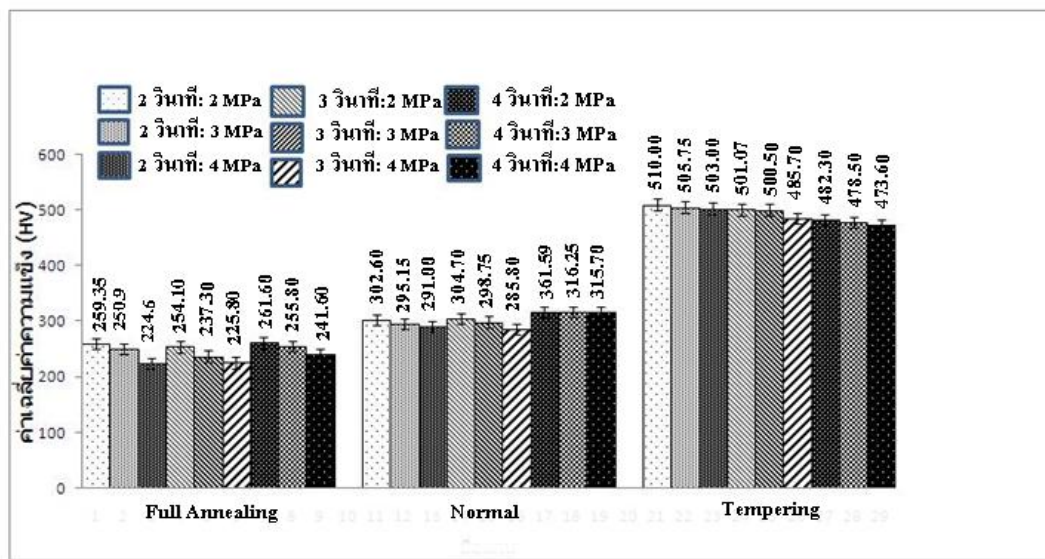




รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2,3 และ 4 วินาที แรงดันในการอัด 2,3 และ 4 MPa
 (ก) เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa
 (ข) เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa
 (ค) เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa

รูปที่ 4.7 (ก) (ข) และ (ค) ผลการทดลองพบว่า จากกราฟค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานทดสอบความแข็งเปรียบเทียบกับค่าความแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 โดยไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal โดยได้ผลลัพธ์เปรียบเทียบ จากกราฟพบว่ากลุ่มตัวแปรชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบชุบ Tempering จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงาน ทดสอบ ก่อนการทดลอง

Normal และมีแนวโน้มความแข็งแรงลดลงเมื่อเวลาในการอัดเพิ่มขึ้น และแรงดันในการอัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงที่บริเวณรอยเชื่อม ค่าตัวแปรที่ให้ค่าความแข็งแรงสูง ของชิ้นงานทดสอบ อยู่ที่ที่ตัวแปรเวลาในการอัดที่ 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa สูงสุดของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal ให้ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงชิ้นงาน Full Annealing อยู่ในระดับเดียวกันที่ตัวแปรเวลาในการเสียดทาน 4 วินาทีเวลาในการอัด 2 ,3 และ4 วินาทีแรงดันในการอัด 2,3 และ 4 MPa



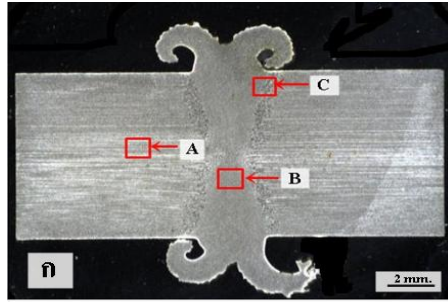
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงกับค่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal ของเหล็กกล้า AISI 1045

รูปที่ 4.8 จากกราฟค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเหล็กกล้า AISI 1045ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal โดยการเปรียบเทียบอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ จากการเปรียบเทียบพบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการ Normal อยู่ที่ 37.34 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มความแข็งแรงลดลงเมื่อเวลาในการอัดเพิ่มขึ้นและแรงดันในการอัดเพิ่มขึ้น ในส่วนชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full Annealing ให้ค่าความแข็งแรงน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน 18.90 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบความแข็งในแต่ละตัวแปรมาเปรียบเทียบให้ได้ผลลัพธ์การเปรียบเทียบอยู่ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์กับค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI 1045 โดยไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีค่าเฉลี่ย 309.15 HV พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering ให้ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม ทุกตัวแปรมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full Annealing อันเนื่องมาจากแรงดันในการอัดน้อยส่งผลให้บริเวณรอยเชื่อมหรือบริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone : HAZ) ที่บริเวณกึ่งกลางตามแนวนอน มีความกว้างมากกว่า Normal และ Full Annealing กระบวนการทางความร้อนที่ทำการอบชุบอุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่อยู่เหนือเส้น A3 โดยเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่มีส่วนผสมทางเคมีที่เปอร์เซ็นต์คาร์บอนอยู่ที่ 0.42-0.50 เปอร์เซ็นต์ มาผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ ชุบที่ 200 องศาเซลเซียส ในขณะที่อบแช่ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจะปรับเปลี่ยนให้เป็น โครงสร้างที่สมดุล ความแข็งจะลดลงเล็กน้อยแต่จะได้รับความเหนียวเพิ่มขึ้น [19] [21] ชิ้นงานทดลองที่ผ่านกระบวนการอบชุบ Full Annealing ในการอบอ่อนอุณหภูมิอยู่เหนือเส้น A3 อยู่ที่ 870 องศาเซลเซียสทำให้โครงสร้างของเหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นออสเทนไนต์ (Austennite)เมื่อปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบอย่างช้าๆ โครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟิร์ลไลต์ชนิดหยาบจะประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ เมื่อได้โครงสร้างเป็นชนิดหยาบจึงทำให้ชิ้นงานทดสอบมีสมบัติอ่อนเหนียวจึงทำให้ค่าความแข็งที่อุณหภูมิในการอบชุบชิ้นงานก่อนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ระหว่าง ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal กับ ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full Annealing มีแนวโน้มค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.7 ก

4.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อม

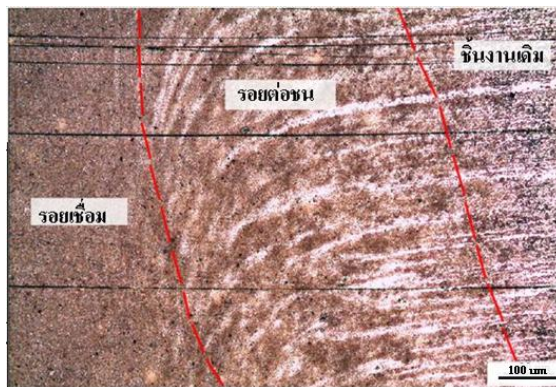
ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม บริเวณรอยต่อชน บริเวณชิ้นงานเดิม และทำการตรวจสอบขนาดเกรน (Grain Side) บริเวณรอยเชื่อมกับบริเวณชิ้นงานเดิม เพื่อเปรียบเทียบขนาดเกรนชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการอบชุบก่อนทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเหล็กกล้า AISI 1045

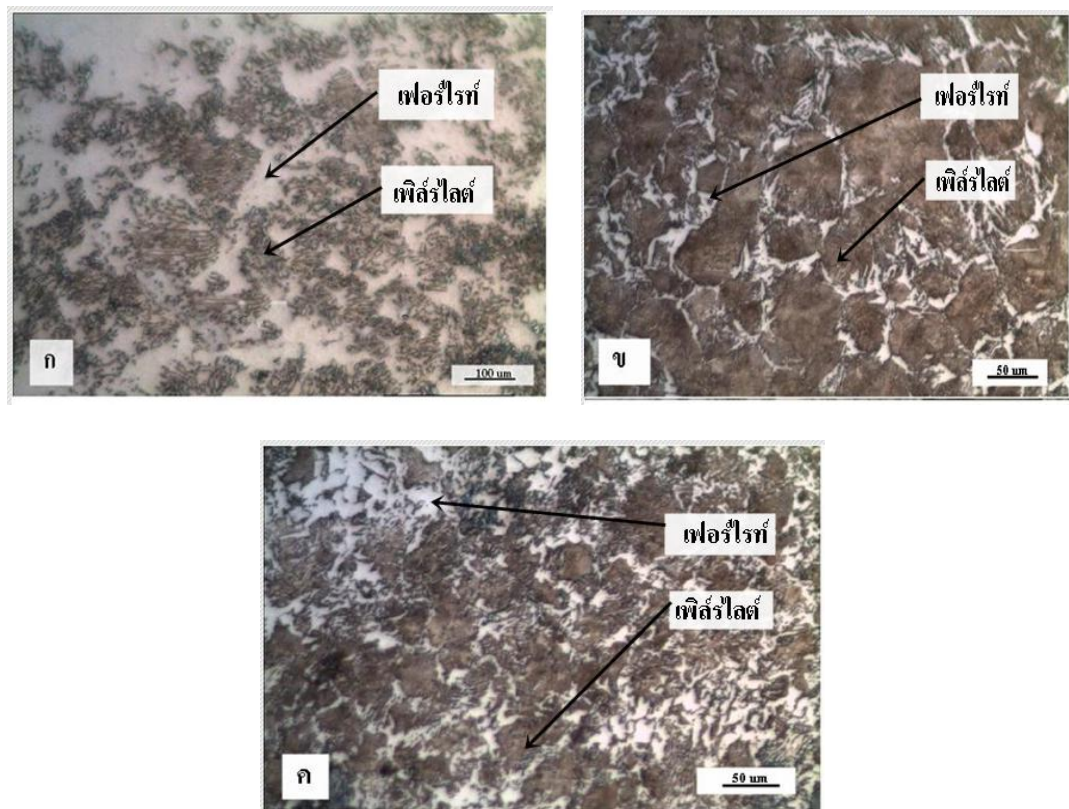
- (ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A)
- (ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมตำแหน่งตรวจสอบ (B)
- (ค) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อชนตำแหน่งตรวจสอบ (C)

รูปที่ 4.9 (ก) ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิม (A) บริเวณรอยเชื่อม (B) บริเวณรอยต่อชน (C) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแบบแรงเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนด ดังรูปที่ 4.10 (ข) โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเหล็กกล้า AISI 1045 ชิ้นงานก่อนทำการทดลองที่มีส่วนผสมของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอยู่ที่ 0.47 เปอร์เซ็นต์ ทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้ลำแสงที่ก้ำกัวยาย 100 เท่า และทำการวัดขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [8]



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการ Full Annealin ลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะเมื่อได้รับแรงดันในการอัด

รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาค ณ.ตำแหน่ง (C) ดังรูปที่ 4.10 (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุเมื่อได้รับแรงดันในการอัด วัสดุที่ได้รับความร้อนจากการเสียดทานจะเกิดความร้อนทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัวลง และเมื่อมีแรงดันจากกระสวยไฮดรอลิก กดเนื้อวัสดุที่อ่อนตัวเคลื่อนที่จากภายในศูนย์กลางของชิ้นงานสู่ภายนอกบริเวณรอยเชื่อม มีทิศทางเคลื่อนที่ในลักษณะโค้งออกจากบริเวณแกนกลางสู่รอบนอกออกจากเนื้อวัสดุเดิมมีลักษณะหยาบมากกว่า ช่วงรอยต่อชนมีลักษณะเกรนเรียวยาวละเอียดมากกว่ารอยเชื่อม บริเวณรอยเชื่อมจะมีเนื้อวัสดุบริเวณรอยเชื่อมมีเกรนขนาดเกรนละเอียดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณเนื้อวัสดุเดิมดังรูปที่ 4.10



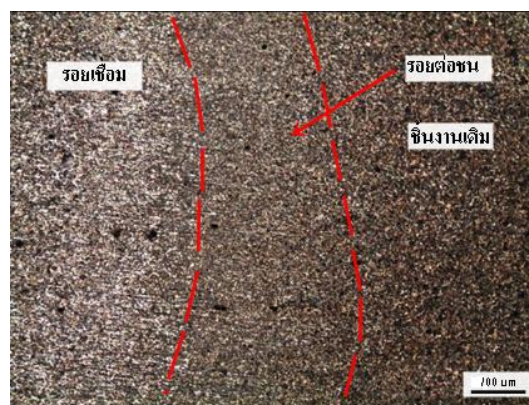
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่ผ่านกระบวนการ Annealing

(ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A)

(ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมตำแหน่งตรวจสอบ (B)

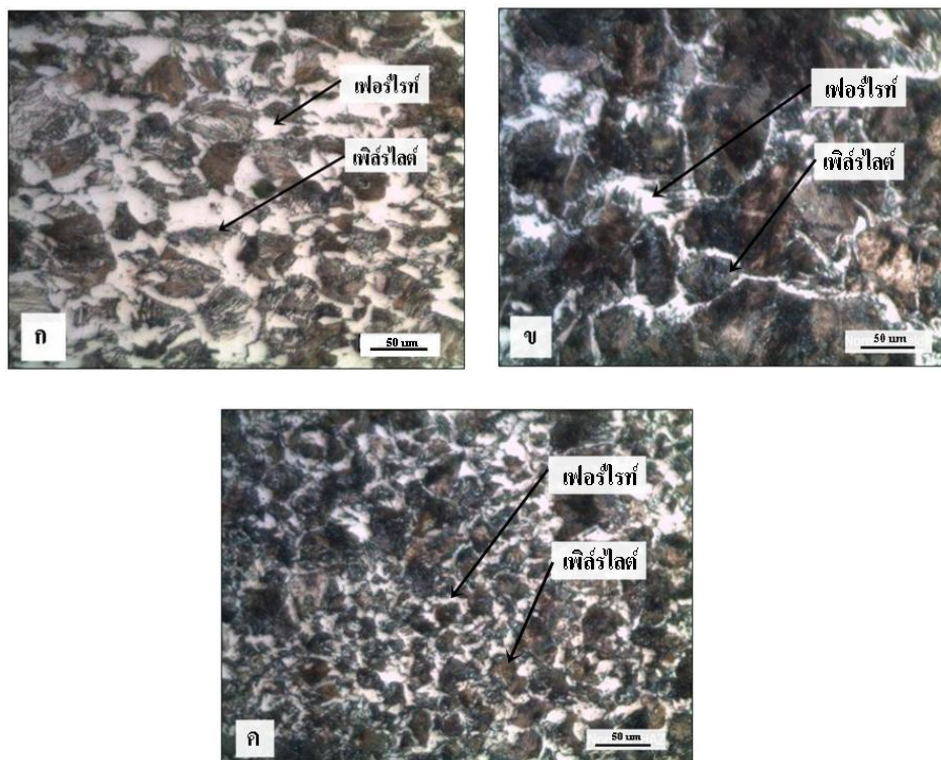
(ค) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อชนตำแหน่งตรวจสอบ (C)

รูปที่ 4. 11 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบชุบ Full Annealing ก่อนการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน เหล็กกล้า AISI 1045 ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.11 (ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลท์ (Pearlite) และเฟสเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ลักษณะของเกรนมีการเรียงตัวกันเป็นแถบยาวและทำการวัดเกรนได้ 48 ไมโครเมตร มี ตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [8] โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ตำแหน่งตรวจสอบ (B) ที่ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.1 1 (ข) จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนที่หยาบกว่าบริเวณชิ้นงานเดิม และทำการวัดขนาดเกรนได้ 32 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [8] (C) ที่ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.1 1 (ค) จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนที่ละเอียดกว่าบริเวณชิ้นงานเดิม และทำการวัดขนาดเกรนได้ 61 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [8]



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ไม่ผ่านกระบวนการ ทางความร้อนลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะเมื่อได้รับแรงดันในการอัด

รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาค ณ.ตำแหน่ง (C) ดังรูปที่ 4.12 ลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุ เมื่อได้รับแรงดันในการอัด วัสดุที่ได้รับความร้อนจากการเสียดทานจะเกิดความร้อนทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัว และเมื่อมีแรงดันจากกระสวยไฮดรอลิก ดันเนื้อวัสดุที่อ่อนตัวเคลื่อนที่จากภายในสู่ภายนอกรอบๆบริเวณรอยเชื่อม มีทิศทางการเคลื่อนที่ในลักษณะโค้งออกจากบริเวณแกนกลางสู่รอบนอกออกจากเนื้อวัสดุเดิมมีลักษณะหยาบมากกว่า ช่วงรอยต่อชนมีลักษณะเกรน เล็กเรียวยาว บริเวณรอยต่อชนจะมีลักษณะที่แคบเนื่องจากเนื้อวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal มีความอ่อน บริเวณรอยต่อชนมีเกรนขนาดเกรนละเอียดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณเนื้อวัสดุเดิมดังรูปที่ 4.12



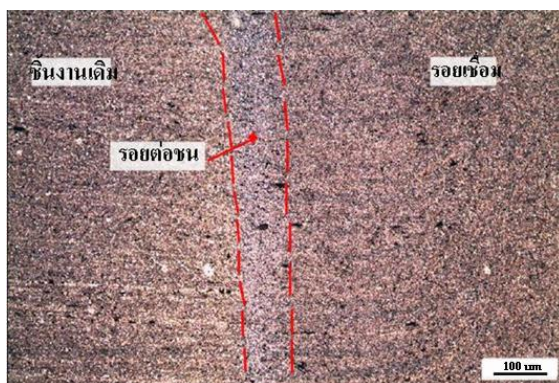
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่กระบวนการทางความร้อน

(ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A)

(ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมตำแหน่งตรวจสอบ (B)

(ค) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อชนตำแหน่งตรวจสอบ (C)

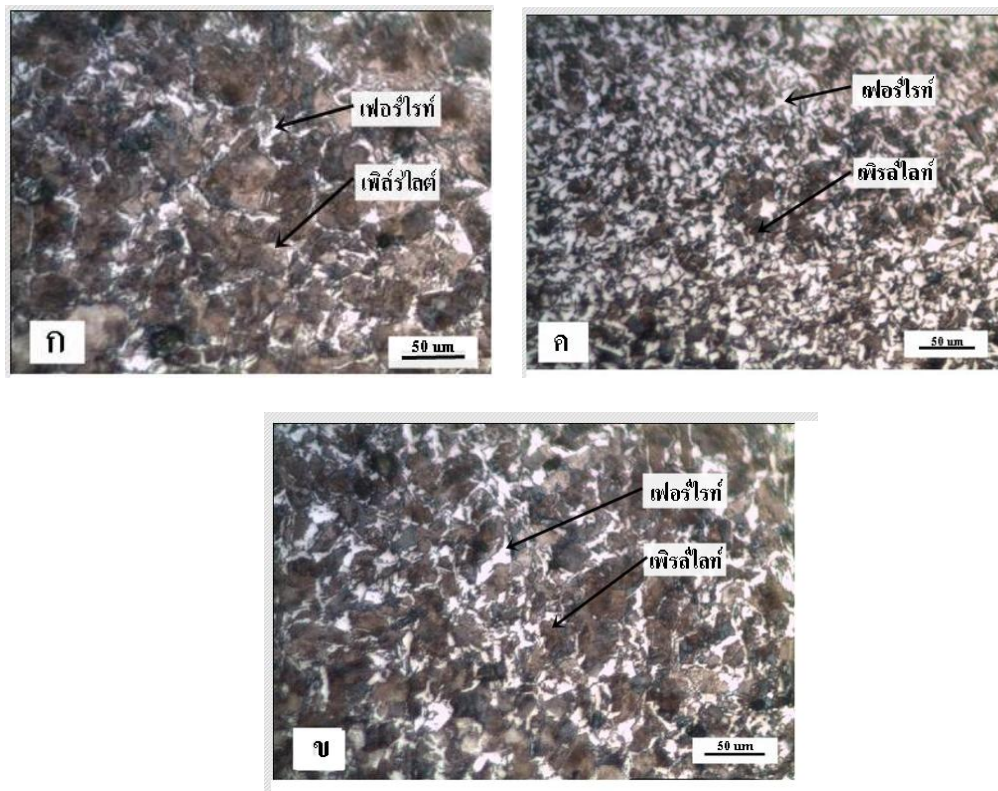
รูปที่ 4.1 3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ไม่ ที่ผ่านกระบวนการ ทางความร้อน การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน เหล็กกล้า AISI 1045 ทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 4.13 (ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟสเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ลักษณะของเกรนมีการเรียงตัวกันเป็นแถบยาวและทำการวัดเกรนได้ 67 ไมโครเมตร มาตรฐาน ASTM E1382-97 [8] โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ตำแหน่งตรวจสอบ (B) ที่ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.1 3 (ข) จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนที่หยาบกว่าบริเวณชิ้นงานเดิม และทำการวัดขนาดเกรนได้ 45 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [8] (C) ที่ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.13 (ค) จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนที่ละเอียดกว่าบริเวณชิ้นงานเดิม และทำการวัดขนาดเกรนได้ 57 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [8]



รูปที่ 4.1 4 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการ Tempering ลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะเมื่อได้รับแรงดันในการอัด

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาค ณ ตำแหน่ง (C) ดังรูปที่ 4.15 (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุเมื่อได้รับแรงดันในการอัด วัสดุที่ได้รับความร้อนจากการเสียดทานจะเกิดความร้อนทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัว และเมื่อมีแรงดันจากกระสวยไฮดรอลิคดันเนื้อวัสดุที่อ่อนตัวเคลื่อนที่จากภายในสู่

ภายนอกกรอบๆบริเวณรอยเชื่อม มีทิศทางการเคลื่อนที่ในลักษณะ โคน์ออกจากบริเวณแกนกลางสู่รอบนอกออกจากเนื้อวัสดุเดิมมีลักษณะหยาบมากกว่า ช่วงรอยต่อชนมีลักษณะเกรนเรียวยาว บริเวณรอยเชื่อมจะมีเนื้อวัสดุบริเวณรอยเชื่อมมีเกรนขนาดเกรนละเอียดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณเนื้อวัสดุเดิมดังรูปที่ 4.14



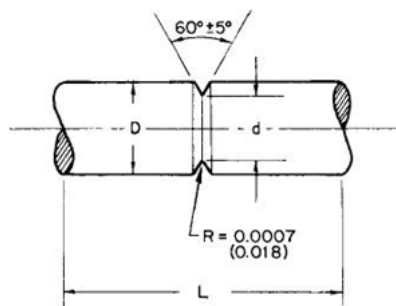
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบชุบ Tempering ก่อนการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน เหล็กกล้า AISI 1045

- (ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A)
- (ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมตำแหน่งตรวจสอบ (B)
- (ค) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อชนตำแหน่งตรวจสอบ (C)

ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 50 เท่า ดังรูปที่ 4.15 (ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลต์ (Prarlite) และ เฟสเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ลักษณะของเกรนมีการเรียงตัวกันเป็นเหลี่ยมๆและทำการวัดเกรนได้ 64 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [8] โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ตำแหน่งตรวจสอบB(ที่ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.15 (ข) จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนที่ละเอียดกว่าบริเวณชิ้นงานเดิม และทำการวัดขนาดเกรนได้ 87 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [8] (C) ที่ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.15 (ค) จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนที่ละเอียดกว่าบริเวณชิ้นงานเดิม และทำการวัดขนาดเกรนได้ 5 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [8]

4.5 การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม

จากรูปที่ 4.6 มาตรฐานการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม นำชิ้นงานมาทำการกลึงด้วยเครื่อง CNC ตามมาตรฐาน ASTM E602 -18 หัวข้อที่ 4.1-4.2 พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ให้ค่าแรงดึงสูงสุด คือค่าตัวแปรการเชื่อมตามค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้ เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาที่ใช้ในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 Mpa แรงดันที่ในการเสียดทาน 1.4 MPa ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด

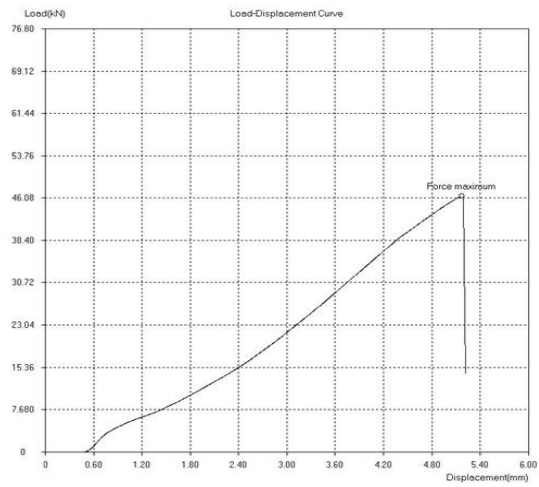


NOTE 1—Dimensions are in millimetres and (inches).

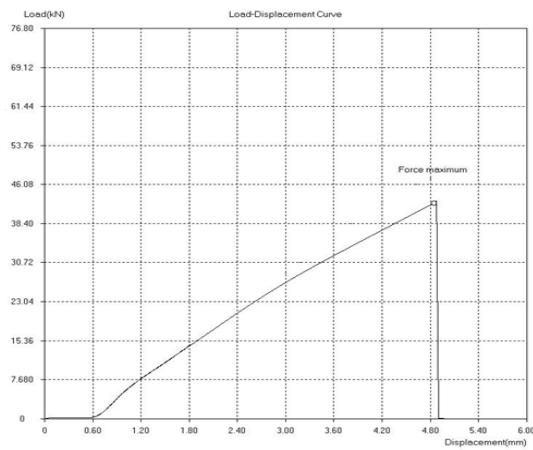
NOTE 2— d must be concentric with D within 0.025 mm (0.001 in.).

Nominal Size	D	d	L , minimum
	10	7	100

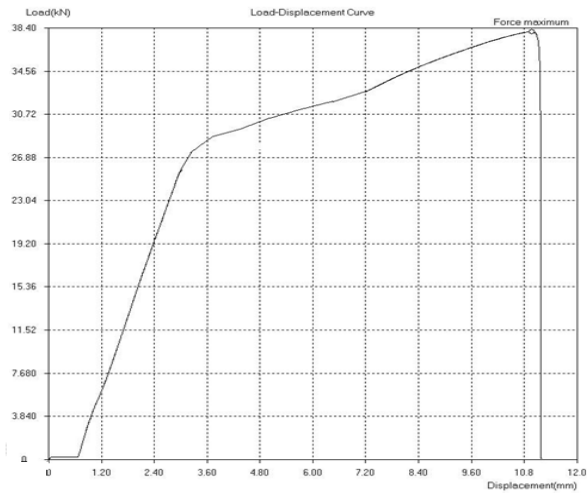
รูปที่ 4.16 ชิ้นงานทดสอบมาตรฐานแรงดึงที่รอยเชื่อม ASTM E602 -18



รูปที่ 4.17 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM E602-18 ชิ้นงาน
ทดสอบผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering



รูปที่ 4.18 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM E602-18 ชิ้นงาน
ทดสอบไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal

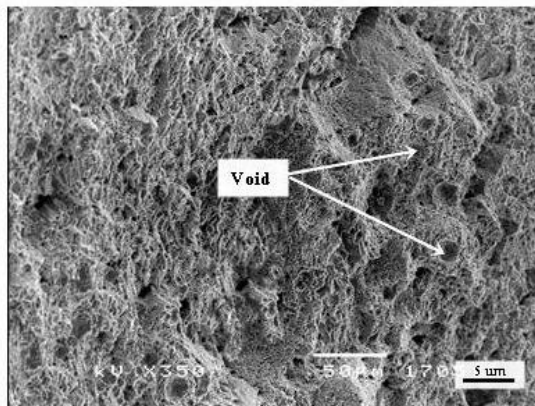


รูปที่ 4.19 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM E602-18 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full Annealing

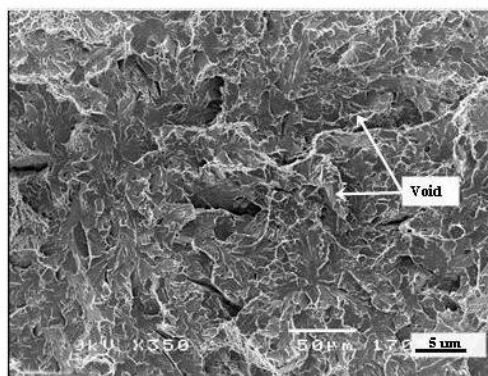
รูปที่ 4.17 ค่าตัวแปรการเชื่อมตามค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้ เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาที่ใช้ในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 Mpa แรงดันที่ในการเสียดทาน 1.4 MPa ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด แสดงรูปที่ 4.17 กราฟแสดงการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงบริเวณรอยเชื่อม ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมที่ 46.06 kN แสดงดังรูปที่ 4.18 กราฟแสดงการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมที่ 42.06 kN แสดงดังรูปที่ 4.19 กราฟแสดงการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full Annealing พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมที่ 38.04 kN พบว่าจากผลการทดลองพบว่าบริเวณรอยเชื่อมที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานทำให้ชิ้นงานทดลองมีค่าความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมลดลงเล็กน้อย กว่าบริเวณที่ไม่ได้รับความร้อนจากการเสียดทานอาจเกิดได้จากเวลาในการเชื่อมน้อยประกอบกับขนาดความยาวของชิ้นงานทดสอบยาว 100 มิลลิเมตรทำให้การถ่ายเทความร้อนของเหล็กได้ดีจึงไม่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเปลี่ยนแปลง

4.6 การเปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบบริเวณรอยเชื่อม

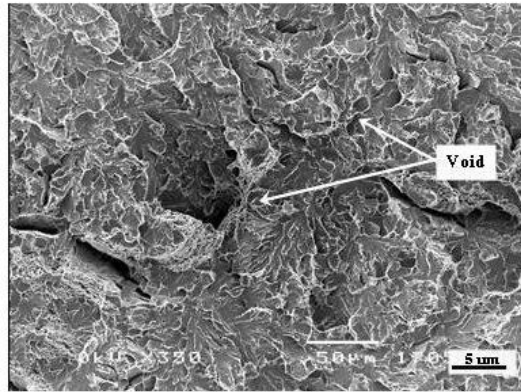
การเปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering , Normal และ Full Annealing ทดสอบการพังทลายของรอย ขาดที่จะส่งผลต่อแรงดึงใน หัวข้อที่ 4.1-4.2 พบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ให้ค่าแรงดึงสูงสุด คือค่าตัวแปรการเชื่อมตามค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้ เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาที่ใช้ในการอัด 2 วินาทีแรงดันที่ในการเสียดทาน 1.4 MPa ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเป็นค่าเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของการพังทลายที่มีผลต่อแรงดึง แสดงดังรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 โดยผ่านการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope)



รูปที่ 4.20 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering



รูปที่ 4.21 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal



รูปที่ 4.22 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Full Annealing

รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบค่าความต้านแรงดึงที่บริเวณรอยเชื่อมชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering มีลักษณะการพังทลายรอยเชื่อมมีลักษณะเป็นหลุมเล็กกระจายตัวตามพื้นผิว Tempering [22] เป็นพังทลายแบบเปราะสอดคล้องกับงานวิจัย D.R. NI et.al [22] ได้ศึกษาความต้านแรงดึงต่อค่าความเครียดรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง ดังรูปที่ 4.21, 4.22 ผลการทดสอบค่าความต้านแรงดึงที่บริเวณรอยเชื่อมการพังทลายของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Normal และ Full Annealing เป็นการแตกหักแบบเหนียวเป็นรอยหลุมเล็กๆกระจายทั่วไป จะเกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานรับแรงหรือความเค้นสูงเกินไปทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรจะทำให้เกิดรอยแตกจะเกิดช่องว่างขนาดเล็กๆ (Void) และสิ่งเจือปนมีลักษณะเป็นร่องหลุมเล็กๆที่เกิดจากช่องว่างมาเชื่อมกัน (micro-void coalescence)ลักษณะคล้ายสาหร่ายน้ำเป็นลักษณะการพังทลายแบบเหนียวสอดคล้องกับงานวิจัยของ การศึกษาการเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่มี อิทธิพลของความดัน ในแนวแกนและความเร็วในหมุนของชิ้นงานและการเกิด อุณหภูมิของ บริเวณรอยเชื่อมมาวิเคราะห์ผล การศึกษา อุณหภูมิที่เหมาะสม Wenya Li , Feifan Wang [23]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยการนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering Full Annealing และ Normal ก่อนการเชื่อมเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนด การเชื่อมใช้เหล็กกล้า AISI 1045 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกิดขึ้นจาก ตัวแปร การเชื่อม ด้วยแรง เสียดทาน โดยจะทำการศึกษาสมบัติทางกล ค่าความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรงของรอยเชื่อม อิทธิพลที่มีผลจากกระบวนการทางความร้อนและ การความร้อน ที่เกิดจากการเชื่อมที่เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม จากผลการทดลองในบทที่ผ่านมาสามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ในปัจจัยที่กำหนดได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 อิทธิพลของตัวแปรเวลาในการอัด มีผลต่อขนาดความกว้างของรอย เชื่อม เมื่อเวลาในการอัดเพิ่มขึ้นทำให้ บริเวณรอยเชื่อมมีความร้อนทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัว จากการเสียดสีและ ถูกแรงดันในการอัดให้เนื้อโลหะ ที่อ่อนตัว ไหลออกมาด้านข้าง พบว่าขนาดความกว้างของรอยต่อชนที่ตำแหน่ง 0,0 มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม เมื่อเวลาการเชื่อมมากจะทำให้ความแข็งแรงของรอย เชื่อมลดลง

5.1.2 อิทธิพลของตัวแปรแรงดันในการอัดมีผลต่อความกว้างของรอยเชื่อม ความกว้างของ ครีปรอยเชื่อม และขนาดความกว้างของรอยต่อชนบริเวณรอยเชื่อม เมื่อเพิ่มแรงดันในการอัดทำให้เกิดความร้อนมากขึ้น เมื่อโลหะเกิดการอ่อนตัวแรงดันในการอัดสูงขึ้นจะทำให้เกิดครีปที่ใหญ่และ บริเวณรอยเชื่อมจะมีลักษณะคอดบริเวณกึ่งกลาง ขนาดความกว้างมากที่สุดอยู่ที่ตัวแปรแรงดันในการอัด 2 MPa ทำให้พื้นที่ในการทดสอบความแข็งแรงที่ตำแหน่ง 0,0 มีมากขึ้น เพิ่มแรงดันในการอัดจะทำให้ รอยเชื่อมมีขนาดเล็กลง

5.1.3 อิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อการความแข็งแรง คือชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย มากกว่า, Normal และ มีค่าความแข็งแรงโดยเฉลี่ยมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนอยู่ที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาพบว่า Tempering มีโครงสร้างจุลภาค

และขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณชิ้นงานเดิมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเนื้อเดิม 64 ไมโครเมตร ขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดเกรน ๑5 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E1382-97 [9]

5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและกระบวนการทางความร้อนชิ้นงานก่อนการเชื่อมเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนด โดยได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลที่มีต่อสมบัติทางกลและการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน จึงควรทำการศึกษาวิจัยด้านอื่นเพิ่มเติมเพื่อเป็นการพัฒนาสำหรับผู้ที่สนใจ

5.2.1 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นงานด้วยแรงเสียดทาน เพิ่มเวลาในการเสียดสีมากขึ้น ลดแรงดันในการอัด ชิ้นงานบริเวณรอยเชื่อมจะยังคงมีความแข็งแรงมากกว่าส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิมอยู่ มากหรือไม่

5.2.2 ควรมีการศึกษาวิจัยกับวัสดุที่มีค่าความแข็ง ที่สูง มาผ่านกระบวนการความร้อน ก่อนและหลังการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเพื่อทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงได้ดีกว่าวัสดุที่ค่าความแข็งต่ำหรือไม่

5.2.3 ควรมีการศึกษาวิจัยในแง่ของการนำไปใช้ในงานจริง และปรับปรุงกระบวนการให้มีขีดความสามารถในด้านสมบัติเชิงกลมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] MuminSahin, H.ErolAkata and TurgutGulmez .2550. “ Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding “, Department of Mechanical Engineering, Trakya University.
- [2] สุริยา ประสมทอง, และคณะ. 2556. “ การวิเคราะห์กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง.”วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [3] จักรินทร์ คงสิบ. “อิทธิพลของการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็ก AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทาน.”วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] สุรสิงห์ อารยางกูร1,* ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์2 และชูชาติ พยอม1, “ คุณลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วย ความเสียดทาน,” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี,
- [5] Sare Celik and Lsmail Ersozlu, 2009. “Invesstigation of the Mechanical Properties and Microstructure of Friction Welded Joint Between AISI 4140 and AISI 1050 Steels,”Materails&Design, Vol.30,2009.pp.269-273.
- [6] ASTM International.,” Standard Test Method for Sharp-Notch Tension Testing with Cylindrical Specimens1 E602-18
- [7] ASTM International.,”Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials E8-04& Annual Book of ASTM Standard, Volume03.01.pp.1-24
- [8] ASTM international.,”Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materals E92+82,& Annual Book of ASTM Standard, Volume03.01,1996.pp 1-9
- [9] ASTM international., “Standard Test Methods for Determining Average Size E112-96 and Standard Test Methods for DeterminingAverage Grain Size Using Semiaautomatic and Automatic Image Analysis E 1382-97,& Annual Book of ASTM Standard, Volume03.01, 1996. Pp. 1-26

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] โลหะเหล็ก ASIS 1045. เว็บไซต์อาจารย์มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก: <http://www.teachher.snru.ac.th/preechasat>
- [11] อติศักดิ์ วรรณะวัลย์.2521.วิศวกรรมการเชื่อม.กรุงเทพฯ:พิมพ์ประกอบมิตรไมตรีครั้งที่ 2
- [12] ชลิตต์ มธุรสมนตรี และคณะ.2544.กระบวนการผลิต. กรุงเทพฯ : ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ
- [13] Enriq. Forge Welding, [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก :
<http://www.artmetal.com/Enrique/wrought/architectural/railings/Jessie/weld04.JPG> (30 ตุลาคม 2555).
- [14] มนต์ สติระจินตนิศวรรณการอบชุบเหล็ก. กรุงเทพฯ:ลงกรณ์มหาวิทยาลัยไทยญี่ปุ่น) 2543
- [15] Sammak. Microscope[ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : http://www.princess-it.org/kp9/hrhprojects/file/20060327_sammakkee/Aee /lunla/ndex.htm (2 ธันวาคม 2555)
- [16] มานพ ต้นตระกูลชัย.2546.งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม.กรุงเทพฯ : ทีเอสบี โปรดักส์
- [17] มานพ ต้นตระกูลชัย. งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม (ฉบับปรับปรุง).กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- [18] เครื่องทดสอบแรงดึง. เครื่องทดสอบแรงดึง [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก :
<http://ayuthaya.olxthailand.com/iid63350218> (18 ธันวาคม 2555)
- [19] พรวิสา วงศ์ปัญญาเอกสารประกอบการสอนวิชา 431 204 ปฏิบัติการโลหะกรรมภาพ 2
- [20] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, วัสดุวิศวกรรม (ฉบับปรับปรุง).พิมพ์ครั้งที่ 1. ส.เอเวียเพรส (1989)จำกัด กรุงเทพฯ; บริษัท ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2549.16-118
- [21] บัณฑิต ใจดีการอบชุบโลหะพิมพ์ครั้งที่ 1 . สำนักพิมพ์ประกอบมิตรไมตรี กรุงเทพฯ.11-6.16
- [22] D.R. NI , D.L. Chen , D.Wang , B.L. Xiao , Z.Y. Ma , “ Tensile Properties and strain-hardening behavior of friction stir welded SiCp/AA2009 composite joints. “ Materials Science & Engineering A 608. Pp. 1-10 , 2014
- [23] Wenya Li , Feifan Wang , “ Modeling continuous drive friction welding of mild steel. “Materials Science & Engineering A 528. Pp. 5921-5926 , 2011

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบก่อนการทดลอง (Pre-Test)

ก 1.1 ผลการทดสอบวัสดุเหล็กกล้า AISI 1045 ก่อนทำการทดลอง (Pre-Test)

หลังจากทำการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทาน ชิ้นงานจะเกิดครีบบริเวณรอยต่อเชื่อม ดังรูปที่ ก. 1 (ก) ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มของแรงดันในการอัดที่เพิ่มขึ้น จึงได้ทำการทดสอบชิ้นงานเชื่อมก่อนทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาความแตกต่างกันของผลทดสอบความต้านทานแรงดึง ความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนด

ตารางที่ ก.1 ความเร็วรอบของเครื่องกลึงในการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ที่ความดันกดแข็งชิ้นงาน 1.4

MPa ความดันในการอัดชิ้นงาน 2 MPa เวลาในการอัดแข็ง 4 วินาที		
ความเร็วรอบ (รอบ / นาที)	การเชื่อมติดกัน	เวลาที่ชิ้นงานเกิดความร้อน (วินาที)
1,500	✓	9
1,800	✓	4
2,200	✓	2

จากตารางที่ ก.1 พบว่าที่ความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาทีชิ้นงานเกิดความร้อนในการเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทานน้อยที่สุดคือ 2 วินาทีแต่ระยะเวลาในการเชื่อมนั้นเกิดขึ้นเร็วเกินไป จึงทำให้ความคุมความดันในการเชื่อมได้ยาก ความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาทีชิ้นงานเกิดความร้อนในการเสียดทานใช้เวลาในการเสียดทานคือ 4 วินาทีเป็นความเร็วรอบและเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็กกล้า AISI 1045 เพราะเวลาในการแข็งชิ้นงานนั้นมีเวลาในการควบคุมความดันในการเชื่อมชิ้นงาน และความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาทีชิ้นงานเกิดความร้อนในการเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทานมากที่สุดคือ 9 วินาทีซึ่งใช้เวลาในการเชื่อมนานเกินไปจึงไม่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ดังภาพผนวก ก. รูปที่ ก.1

ตารางที่ ก. 2 เวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแซ่ชิ้นงาน 1.4 MPa
ความดันกดอัดชิ้นงาน 2 MPa

เวลา (วินาที)	การเชื่อมติดกัน	ลักษณะรอยเชื่อม	หมายเหตุ
1	✓	เล็ก	รอยเชื่อมไม่สมบูรณ์
2	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
3	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
4	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
5	✓	ใหญ่	ใช้เนื้อวัสดุมากเกินไป



รูปที่ ก.1 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที
เวลา 2 วินาที ความดัน 20 บาร์



รูปที่ ก.2 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาที
เวลา 2 วินาที ความดัน 20 บาร์



รูปที่ ก.3 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาที เวลา 2 วินาที ความดัน 20 บาร์



รูปที่ ก.4 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาที ที่เวลา 1 วินาที ความดัน 20 บาร์



รูปที่ ก.5 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาที ที่เวลา 2 วินาที ความดัน 20 บาร์



รูปที่ ก.6 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาทีที่เวลา 3 วินาที
ความดัน 20 บาร์



รูปที่ ก.7 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาทีที่เวลา 4 วินาที
ความดัน 20 บาร์



รูปที่ ก.8 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาทีที่เวลา 5 วินาที
ความดัน 20 บาร์



รูปที่ ก.9 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาทีที่เวลา 2 วินาที
ความดัน 20 บาร์



รูปที่ ก.10 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาทีที่เวลา 2 วินาที
ความดัน 30 บาร์



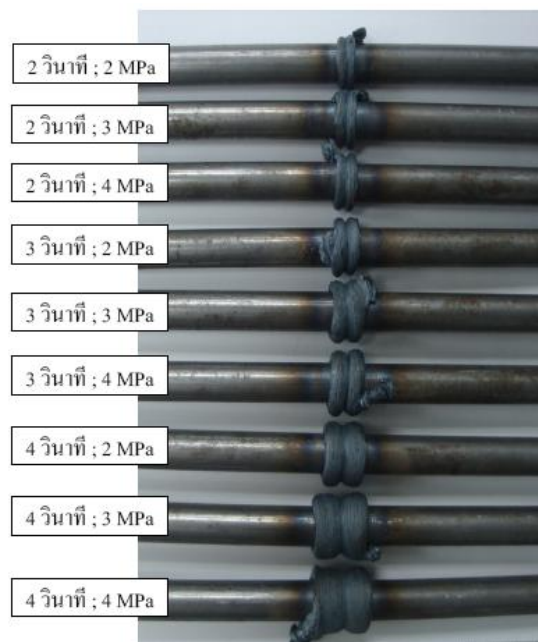
รูปที่ ก.11 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาทีที่เวลา 2 วินาที
ความดัน 40 บาร์



รูปที่ ก.12 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาทีที่เวลา 2 วินาที ความดัน 50 บาร์

จากตารางที่ 3.4 พบว่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานความดันที่เหมาะสมในการเชื่อมชิ้นงานคือ 20 บาร์ 30 บาร์ และ 40 บาร์ ซึ่งเชื่อมชิ้นงานติดกันสมบูรณ์และเนื้อของวัสดุเกิดน้อยทำให้ไม่สิ้นเปลืองวัสดุ และเมื่อทำการเพิ่มความดันมากขึ้นจะให้ทนต่อค่าแรงดึงได้น้อยลงรอยเชื่อมจะมีลักษณะคิบใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุ ดังรูปที่ ก. 10

รูปที่ ก.9- รูปที่ ก.12



รูปที่ ก. 13 ชิ้นงานทดสอบงานเชื่อม

ก.1.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

นำชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนไปทำการกลึงขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E8-04 [6] จากนั้นไปทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ปราศจากการกระแทก จนชิ้นงานขาดออกจากกัน โดยใช้ความเร่งในการยืดตัวต่ำ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ค่าที่ทดสอบเกิดการผิดพลาดซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ ก.14 ชิ้นงานกลึงตามมาตรฐาน ASTM E8-04

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบแรงดึงและความแข็ง

ข. 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ข.1.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ข.1.1 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่อุณหภูมิปกติ Normal

ชิ้นงาน		แรงดึงสูงสุด (kN)					ค่าเฉลี่ย
ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)	1	2	3	4	5	แรงดึง สูงสุด (kN)
20	2	46.62	49.04	47.98	46.7	49.06	47.88
	3	49.08	45.43	47.56	48.42	46.31	47.36
	4	46.35	46.54	46.43	47.02	45.86	46.44
30	2	46.93	46.97	46.32	47.14	48.19	47.11
	3	46.31	48.23	45.67	46.88	47.11	46.84
	4	46.27	45.54	46.5	46.75	45.54	46.12
40	2	46.58	46.27	46.98	46.18	46.09	46.42
	3	45.93	47.12	46	46.48	45.22	46.15
	4	44.93	46.01	45.75	45.46	45.65	45.56

ตารางที่ ข.1.2 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานโดยกระบวนการ Full Annealing

ชั้นงาน		แรงดึงสูงสุด (kN)					ค่าเฉลี่ย
ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)	1	2	3	4	5	แรงดึง สูงสุด (kN)
20	2	30.13	30.19	30.09	30.26	30.08	30.15
	3	29.8	30.12	30.16	30.01	29.92	30
	4	29.8	29.56	29.42	29.65	29.67	29.62
30	2	29.66	30.61	29.76	29.87	30.15	30.01
	3	29.92	30.05	29.95	30.14	30.31	29.82
	4	29.66	29.57	29.56	29.63	30.68	29.53
40	2	29.01	29.53	29.91	29.93	30.22	29.72
	3	29.65	29.64	29.56	29.71	29.59	29.63
	4	28.86	28.96	29.69	29.43	29.56	29.30

ตารางที่ ข.1.3 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเลียดทานโดยผ่านกระบวนการทางความร้อน Tempering

ชั้นงาน		แรงดึงสูงสุด (kN)					ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (kN)
ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)	1	2	3	4	5	
20	2	52.12	53.03	53.76	51.05	52.84	52.56
	3	49.11	48.04	48.18	47.53	48.39	48.25
	4	47.47	47.99	47.45	47.76	47.83	47.7
30	2	51.91	51.45	52.58	50.78	51.23	51.59
	3	46.58	48.35	46.09	48.14	48.24	47.48
	4	46.77	47.05	46.78	48.17	47.28	47.21
40	2	49.53	48.38	50.45	50.12	50.82	49.86
	3	47.23	47.69	47.03	47.04	46.31	47.06
	4	45.77	46.83	47.34	46.74	47.47	46.83

ข 2 ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ ข 2.2 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเลียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ (m) ครั้ง	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	289.3	293.7	270.1	240.0	251.6	238.9	250.1	260.1	280.1	286.1	321.8
2	300.0	290.2	280.1	266.2	250.1	240.7	252.0	266.2	284.1	293.7	305.6
3	301.1	290.0	284.1	261.2	252.0	240.9	248.1	261.2	281.1	290.2	300.0
เฉลี่ย	296.8	291.3	278.1	255.8	251.2	240.2	250.1	262.5	281.1	290.0	309.1

ตารางที่ ข.2.3 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนว
นอน (Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ (mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	301.6	311.5	287.5	267.5	259.7	276.1	270.8	268.7	266.2	292.8	288.3
2	300.8	300.1	283.1	275.7	265.3	275.0	271.4	280.0	275.0	290.7	290.2
3	295.1	298.4	282.8	279.1	268.9	276.4	272.2	289.7	277.5	286.4	295.1
เฉลี่ย	299.1	303.3	284.4	274.1	264.6	275.8	271.4	279.4	272.9	289.9	291.2

ตารางที่ ข.2.4 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ (mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	327.4	324.4	284.2	280.3	277.1	270.6	272.7	270.0	287.2	290.0	310.7
2	320.6	310.1	285.1	279.6	274.3	270.8	278.2	289.1	285.0	310.6	316.5
3	318.9	300.1	286.1	281.3	275.4	268.1	275.6	278.9	286.4	299.8	318.5
เฉลี่ย	322.3	311.5	285.1	280.4	275.6	269.8	275.5	279.3	286.2	300.1	315.2

ตารางที่ ข2.5 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาที และสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ mm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	296.7	292.6	270.4	256.6	235.1	243.3	261.5	291.9	304	308.7	311.9
2	308.7	291.9	270.0	259.0	259.0	238.2	259.0	290.3	300.1	300.2	310.0
3	300.2	290.3	272.2	258.2	238.2	239.9	258.2	288.0	290.3	310.0	301.1
เฉลี่ย	301.8	291.6	270.8	257.9	244.1	240.4	259.5	290.0	298.1	306.3	307.6

ตารางที่ ข 2.6 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาที และสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ mm ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	289.0	302.8	300.5	281.9	251.9	240.2	249.8	280.1	290.1	290.1	298.2
2	299.2	296.1	289.2	280.5	250.3	240.0	248.1	280.5	288.8	296.1	299.2
3	299.2	295.7	288.8	278.8	252.8	241.0	250.1	278.8	280.8	295.7	307.6
เฉลี่ย	295.8	298.2	292.8	280.4	251.7	240.4	249.3	279.8	286.3	294.0	301.7

ตารางที่ 2.7 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที และสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ mm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	286.1	276.1	271.7	265.3	249.2	234.1	229.7	239.1	276.7	277.2	285.3
2	285.9	277.2	276.7	265.0	250.0	235.6	234.1	240.9	270.3	275.0	286.1
3	285.5	275.0	270.3	264.3	250.0	238.6	235.6	241.1	275.0	276.7	285.9
เฉลี่ย	285.8	276.1	272.9	264.9	249.7	236.1	233.1	240.4	274.0	276.3	285.8

ตารางที่ 2.8 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาที และสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ mm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	323.1	317.3	302.4	298.0	277.8	248.7	267.5	289.7	296.0	307.7	312.7
2	320.1	320.1	300.1	285.2	276.8	250.1	274.8	290.2	295.1	302.4	310.4
3	319.5	318.3	305.1	294.4	275.6	251.1	271.2	293.1	297.1	300.1	315.8
เฉลี่ย	320.9	318.6	302.5	292.5	276.7	250.0	271.2	291.0	296.1	303.4	313.0

ตารางที่ ข 2.9 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาที และสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ mm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	310.0	300.1	296.2	288.8	245.1	262.4	300.3	297.2	298.2	310.0	320.1
2	315.8	310.2	295.1	295.1	240.9	260.0	297.2	296.2	300.1	310.0	315.0
3	317.7	300.0	294.3	294.3	240.1	260.6	298.2	295.1	310.2	315.8	319.0
เฉลี่ย	314.5	303.4	295.2	292.7	242.0	261	298.5	296.16	302.8	311.9	318.0

ตารางที่ ข 2.10 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที และสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ mm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	319.3	319.7	328.3	300.1	285.4	284.0	273.7	294.8	311.5	326.6	301.6
2	319.7	320.8	294.8	300.0	289.0	280.9	275.7	300.0	310.9	319.3	319.3
3	320.8	310.8	300.0	300.0	284.0	281.1	278.9	300.1	309.8	300.0	319.7
เฉลี่ย	319.9	317.1	278.9	300.3	286.1	282	276.1	298.3	310.7	315.3	313.5

ตารางที่ ข 2.11 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Full annealing

ระยะ mm. ครึ่งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	269.1	263.8	276.2	248.6	282.4	285.8	269.1	272.3	268.6	263.4	251.6
2	267.2	270.7	275.9	244.9	285.6	287.7	278.9	271.4	266.8	267.1	251.8
3	267.2	272.1	275.6	248.2	282.4	283.8	279.6	269.7	267.9	265.8	249.4
เฉลี่ย	267.8	268.1	275.8	276.2	283.4	285.7	275.8	271.1	267.8	265.4	250.9

ตารางที่ ข 2.12 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Full annealing

ระยะ mm. ครึ่งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	234.3	244.8	256.1	258.8	259.5	262.4	260.1	261.3	251.1	245.9	231.1
2	235.8	245.7	255	258.5	260.3	259.5	258.2	257.2	252.2	247.4	231.3
3	234.3	247.1	252.2	258.7	258.4	263.1	259.2	256.3	251.3	245.9	229.2
เฉลี่ย	234.8	245.8	254.1	258.6	259.4	261.6	259.1	258.3	251.5	246.4	230.5

ตารางที่ ข2.13 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045ด้วยความเสียดทานในแนวนอน(Horizontal)ที่ความดัน 20 บาร์เวลา4วินาทีและตามกรรมวิธีการอบชุบ Full annealing

ระยะmm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	229.3	233.8	233.2	248.6	259.5	265.4	260.1	248.4	237.1	221.4	221.6
2	228.2	230.7	235.1	244.9	257.3	267.7	258.9	245.4	232.8	223.4	221.4
3	227.3	229.1	234.2	248.2	258.4	263.8	259.6	246.7	235.7	222.2	220.2
เฉลี่ย	228.2	231.2	234.1	247.2	258.4	265.6	259.5	246.8	235.2	222.3	221

ตารางที่ ข 2.14 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045ด้วยความเสียดทานในแนวนอน(Horizontal) ที่ความดัน 30บาร์เวลา2วินาทีและตามกรรมวิธีการอบชุบ Full annealing

ระยะmm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	252.8	256.2	264.4	270.2	272.2	274.8	269.9	267.9	267.1	257.4	252.6
2	254.8	254.1	267.6	269.2	272.8	276.8	272.1	270.3	263.8	258.2	255.1
3	253.4	257.5	268.5	270.1	273.5	275.8	273.4	269.8	263.9	258.2	256.2
เฉลี่ย	253.6	255.9	266.8	269.8	272.8	275.8	271.8	269.3	264.9	257.9	254.6

ตารางที่ ข 2..15 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Full annealing

ระยะ mm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	233.8	243.8	246.2	255.6	262.2	265.8	261.1	252.9	248.6	247.4	239.8
2	234.7	245.7	248.2	254.8	265.1	267.8	262.1	252.8	250.8	249.1	241.1
3	234.6	247.1	249.2	253.9	262.4	265.8	262.6	254.1	247.9	248.1	240
เฉลี่ย	234.3	245.5	247.6	254.7	263.2	266.4	261.9	253.3	249.1	248.2	240.3

ตารางที่ ข 2.16 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Full annealing

ระยะ mm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	226.8	240.8	254.4	265.6	278.2	284.5	278.1	267.9	258.1	257.4	223.2
2	228.8	240.1	257.6	267.8	278.1	282.5	278.1	265.8	259.2	252.8	225.1
3	226.9	242.5	254.5	268.9	279.1	282.8	279.4	266.8	260.9	254.2	224.2
เฉลี่ย	227.5	241.1	255.5	267.4	278.4	283.2	278.5	266.8	259.4	254.8	224.1

ตารางที่ ข 2.17 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Full annealing

ระยะ mm. ครึ่งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	263.3	268.2	270.9	270.2	272.2	275.9	271.4	271.2	266.8	263.1	258.4
2	265.2	267.1	267.8	269.2	273.2	276.7	273.5	269.2	265.7	267.2	258.8
3	264.1	266.5	269.4	271.2	271.8	277.8	272.3	270	267.2	265.2	259.8
เฉลี่ย	264.2	267.2	269.4	270.2	272.4	276.9	272.4	270.1	266.6	265.1	259

ตารางที่ ข 2.18 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Full annealing

ระยะ mm. ครึ่งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	253.8	256.8	258.9	259.2	263.2	268.8	260.9	266.5	259.8	257.9	256.6
2	254.2	259.1	260.6	261.2	263.8	266.5	262.1	262.7	258.7	258.2	257.4
3	254.7	256.5	259.8	260.4	266.5	269.4	263.4	263.2	259.9	258.6	258.2
เฉลี่ย	254.2	257.4	259.7	260.2	264.5	268.2	262.1	264.1	259.4	258.2	257.4

ตารางที่ ข 2.19 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนว
นอน(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ
Full annealing

ระยะ mm ครึ่งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	233.8	256.8	270.9	272.2	278.2	288.8	280.9	276.5	271.8	259.1	248.6
2	235.2	259.1	267.1	269.9	276.8	286.8	278.8	272.7	268.7	258.2	247.4
3	234.9	256.5	269.4	271.2	276.8	286	277.9	273.6	268.9	258.2	249.8
เฉลี่ย	234.6	257.4	269.1	271.1	277.2	287.2	279.3	274.2	269.8	258.5	248.6

ตารางที่ ข 2.20 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนว
นอน(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ
Tempering

ระยะ mm ครึ่ง	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	501.6	489.4	472.8	475.9	471.2	482.1	479.6	478.2	498.6	492.6	515.2
2	494.8	494.2	484.2	476.2	467.2	481.2	469.2	499.4	498.8	491.6	513.2
3	504.4	502.2	490.4	482.6	469.8	480.4	475.6	474.8	489.6	501.8	502.2
เฉลี่ย	500.2	495.2	482.4	478.2	469.4	481.2	474.8	484	495.6	495.3	510.1

ตารางที่ ข 2.21 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Tempering

ระยะ mm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	502.2	489.4	472.8	484.9	461.2	482.4	469.6	478.2	498.2	485.6	486.2
2	490.8	494.2	484.2	480.4	459.2	489.8	467.8	499.4	501.8	481.6	489.2
3	492.4	502.2	490.4	481.6	457.8	483.4	464.2	474.8	489.6	482.8	492.2
เฉลี่ย	495	495.2	482.4	482.3	459.4	485.2	467.2	482	484.4	483.2	489.2

ตารางที่ ข 2.22 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Tempering

ระยะ mm. ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	495.8	489.4	472.8	478.2	477.2	482.4	480.6	478.2	498.2	495.6	511.2
2	500.8	494.2	484.2	482.4	457.2	479.8	477.8	499.4	501.8	504.6	507.2
3	504.4	502.2	490.4	474.2	471.8	481.4	464.8	474.8	489.6	485.8	512.2
เฉลี่ย	500.2	495.2	482.4	478.2	469.4	481.2	474.8	484	495.6	495.3	510.1

ตารางที่ ข 2.23 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Tempering

ระยะ mm. ครึ่ง	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	494.6	489.4	478.6	464.2	448.2	479.7	458.6	469.2	487.2	496.6	508.2
2	494.8	491.2	476.2	464.2	454.8	462.5	456.8	466.6	487.6	493.6	514.2
3	496.6	490.2	480.2	474.2	455.2	464.4	458.2	465.8	493.2	495.8	510.2
เฉลี่ย	495.3	490.2	478.3	467.5	452.7	468.8	457.8	467.2	489.3	495.2	510.7

ตารางที่ ข 2.24 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Tempering

ระยะ mm. ครึ่ง	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	504.6	492.4	487.8	485.2	472.2	479.7	462.6	482.2	480.2	496.6	508.2
2	494.2	494.2	484.2	484.2	469.8	482.8	456.8	499.4	481.1	499.6	496.2
3	497.2	502.2	490.2	487.2	476.2	480.4	462.2	475.4	485.8	495.8	510.2
เฉลี่ย	498.7	496.2	487.3	485.3	472.7	480.9	460.5	485.7	482.3	497.2	504.7

ตารางที่ ข 2.25 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Tempering

ระยะ mm ครึ่ง	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	505.6	489.4	472.8	475.9	471.2	479.1	452.6	462.2	480.2	492.6	497.2
2	504.2	494.2	484.8	476.8	467.2	472.2	456.2	459.4	480.8	490.6	493.2
3	504.2	502.2	490.4	463.6	466.2	475.4	454.2	462.4	477.8	485.8	496.2
เฉลี่ย	504.6	492.2	487.6	472.1	468.2	476.1	454.3	461.3	478.9	488.9	495.5

ตารางที่ ข 2.26 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Tempering

ระยะ mm ครึ่ง	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	505.6	485.4	475.6	463.8	448.2	460.2	450.6	476.8	488.2	487.6	512.2
2	506.4	488.4	470.6	468.6	446.4	456.5	446.4	478.6	484.6	493.8	509.2
3	510.6	489.4	483.2	473.3	451.6	458.8	449.2	479.8	483.4	496.8	516.2
เฉลี่ย	507.5	487.7	476.4	468.9	448.7	458.5	448.7	478.4	485.4	492.7	512.5

ตารางที่ ข 2.27 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Tempering

ระยะ mm. ครึ่ง	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	484.6	480.4	466.6	456.2	438.2	470.2	452.6	459.6	457.2	467.6	494.2
2	484.8	484.4	469.2	458.2	442.2	462.5	456.8	456.6	457.6	493.6	484.2
3	486.4	482.2	467.2	464.6	446.2	464.4	452.2	455.8	493.2	465.2	480.2
เฉลี่ย	485.2	482.3	467.6	459.6	442.2	465.6	453.8	457.3	462.7	475.5	486.2

ตารางที่ ข 2.28 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน (Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที และตามกรรมวิธีการอบชุบ Tempering

ระยะ mm ครึ่ง	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	474.6	464.4	465.6	457.2	448.2	465.2	432.6	452.6	460.2	462.6	468.2
2	476.4	474.6	467.6	458.6	446.6	456.2	441.4	453.6	462.6	463.6	479.2
3	472.6	462.8	463.2	462.3	451.2	460.2	442.2	450.8	473.4	460.8	470.2
เฉลี่ย	474.5	467.3	465.4	459.3	448.7	460.5	438.7	452.3	465.4	462.3	472.5

ภาคผนวก ค

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1045


品質證明書

MILL TEST CERTIFICATE

TAMARISC

客戶名稱 SEND TO	產品名稱 TEST REPORT OF	備註 REMARKS	
規格名稱 SPEC	客戶編號 CLIENT NO.	說明書日期 CERTIFICATE DATE	交貨日期 SHIPPING DATE
IS 6451 SAC	產品編號 CLIENT ORDER NO.	發票號碼 INVOICE NO.	說明書編號 CERTIFICATE NO.

尺寸及規格 MATRIAL DESCRIPTION	機械 SPECIFICATION	化學成分 CHEMICAL ANALYSIS													備註 REMARKS
		C	MON	P	S	SI	CU	NI	CR	MO	V	AL	NB		
規格 DIM. (LENGTH)	數量 QTY														
90	4														
規格 SPECIFICATION	數量 QTY														
HEAT 100	4														
規格 SPECIFICATION	數量 QTY														
3M169	4														

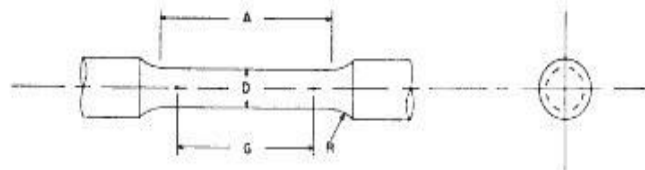


此證明書係根據本廠之試驗結果而發給，其內容與本廠之試驗結果一致。如有任何疑問，請向本廠查詢。

TAMARISC
MILL TEST CERTIFICATE
85 2 14

ภาคผนวก ง
มาตรฐาน ASTM

ASTM E 8 - 04



	Dimensions				
	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	in.	in.	in.	in.	in.
Nominal Diameter	0.500	0.350	0.250	0.160	0.113
G—Gage length	2.000 ± 0.005	1.400 ± 0.005	1.000 ± 0.005	0.640 ± 0.005	0.450 ± 0.005
D—Diameter (Note 1)	0.500 ± 0.010	0.350 ± 0.007	0.250 ± 0.005	0.160 ± 0.003	0.113 ± 0.002
R—Radius of fillet, min	3/8	1/4	3/16	9/32	3/32
A—Length of reduced section, min (Note 2)	2 1/4	1 3/4	1 1/4	3/4	5/8

NOTE 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1% larger in diameter than the center (controlling dimension).

NOTE 2—If desired, the length of the reduced section may be increased to accommodate an extensometer of any convenient gage length. Reference marks for the measurement of elongation should, nevertheless, be spaced at the indicated gage length.

NOTE 3—The gage length and fillets may be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the load shall be axial (see Fig. 9). If the ends are to be held in wedge grips it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

NOTE 4—On the round specimens in Figs. 8 and 9, the gage lengths are equal to four times the nominal diameter. In some product specifications other specimens may be provided for, but unless the 4-to-1 ratio is maintained within dimensional tolerances, the elongation values may not be comparable with those obtained from the standard test specimen.

NOTE 5—The use of specimens smaller than 0.250-in. diameter shall be restricted to cases when the material to be tested is of insufficient size to obtain larger specimens or when all parties agree to their use for acceptance testing. Smaller specimens require suitable equipment and greater skill in both machining and testing.

NOTE 6—Five sizes of specimens often used have diameters of approximately 0.505, 0.357, 0.252, 0.160, and 0.113 in., the reason being to permit easy calculations of stress from loads, since the corresponding cross-sectional areas are equal or close to 0.200, 0.100, 0.0500, 0.0200, and 0.0100 in.², respectively. Thus, when the actual diameters agree with these values, the stresses (or strengths) may be computed using the simple multiplying factors 5, 10, 20, 50, and 100, respectively. (The metric equivalents of these five diameters do not result in correspondingly convenient cross-sectional areas and multiplying factors.)

FIG. 8 Standard 0.500-in. Round Tension Test Specimen with 2-in. Gage Length and Examples of Small-Size Specimens Proportional to the Standard Specimen

6.5.1 For material with a nominal thickness of 0.0005-0.1875 in., use the sheet-type specimen described in 6.3.

6.5.2 For material with a nominal thickness of 0.1875-0.500 in., use either the sheet-type specimen of 6.3 or the plate-type specimen of 6.2.

6.5.3 For material with a nominal thickness of 0.500-0.750 in., use either the sheet-type specimen of 6.3, the plate-type specimen of 6.2, or the largest practical size of round specimen described in 6.4.

6.5.4 For material with a nominal thickness of 0.750 in., or greater, use the plate-type specimen of paragraph 6.2 or the largest practical size of round specimen described in 6.4.

6.5.4.1 If the product specifications permit, material of a thickness of 0.750 in., or greater may be tested using a modified sheet-type specimen conforming to the configuration shown by Fig. 2. The thickness of this modified specimen must be machined to 0.400 ± 0.020 in., and must be uniform within 0.004 in. throughout the reduced section. In the event of disagreement, a round specimen shall be used as the referee specimen.

6.6 Specimens for Wire, Rod, and Bar:

6.6.1 For round wire, rod, and bar, test specimens having the full cross-sectional area of the wire, rod, or bar shall be used wherever practicable. The gage length for the measurement of elongation of wire less than 1/8 in. in diameter shall be as

prescribed in product specifications. In testing wire, rod, or bar that has a 1/8-in. or larger diameter, unless otherwise specified, a gage length equal to four times the diameter shall be used. The total length of the specimens shall be at least equal to the gage length plus the length of material required for the full use of the grips employed.

6.6.2 For wire of octagonal, hexagonal, or square cross section, for rod or bar of round cross section where the specimen required in 6.6.1 is not practicable, and for rod or bar of octagonal, hexagonal, or square cross section, one of the following types of specimens shall be used:

6.6.2.1 Full Cross Section (Note 10)—It is permissible to reduce the test section slightly with abrasive cloth or paper, or machine it sufficiently to ensure fracture within the gage marks. For material not exceeding 0.188 in. in diameter or distance between flats, the cross-sectional area may be reduced to not less than 90% of the original area without changing the shape of the cross section. For material over 0.188 in. in diameter or distance between flats, the diameter or distance between flats may be reduced by not more than 0.010 in. without changing the shape of the cross section. Square, hexagonal, or octagonal wire or rod not exceeding 0.188 in. between flats may be turned to a round having a cross-sectional area not smaller than 90% of the area of the maximum inscribed circle. Fillets, preferably with a radius of 3/8 in., but

E 92 - 82 (2003)²

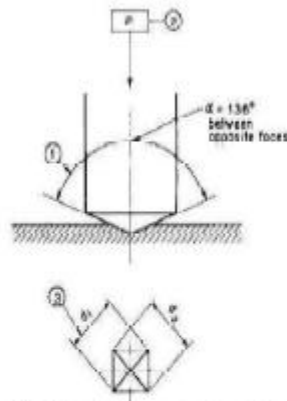


FIG. 1 Vickers Hardness Test (see Table 1)

TABLE 1 Symbols and Designations Associated with Fig. 1

Number	Symbol	Designation
1	—	Angle at the vertex of the pyramidal indenter (136°)
2	P	Test force in kilograms-force
3	d	Arithmetic mean of the two diagonals d ¹ and d ²

TABLE 2 Vickers Hardness Numbers
(Diamond, 136° Face Angle, force of 1 kgf)

Diagonal of Impression, mm	Vickers Hardness Number for Diagonal Measured to 0.0001 mm									
	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.005	74 170	71 200	68 580	66 020	63 590	61 300	59 130	57 080	55 120	53 270
0.006	51 510	49 640	48 240	46 720	45 270	43 890	42 570	41 310	40 100	38 950
0.007	37 840	36 750	35 770	34 800	33 860	32 970	32 100	31 280	30 480	29 710
0.008	28 970	28 260	27 590	26 920	26 280	25 670	25 070	24 500	23 950	23 430
0.009	22 690	22 390	21 910	21 440	20 990	20 560	20 120	19 710	19 310	18 920
0.010	18 540	18 180	17 820	17 480	17 140	16 820	16 500	16 200	15 900	15 610
0.011	16 330	16 050	14 780	14 520	14 270	14 020	13 780	13 550	13 320	13 090
0.012	12 860	12 670	12 450	12 260	12 060	11 870	11 680	11 500	11 320	11 140
0.013	10 970	10 810	10 640	10 480	10 330	10 170	10 030	9 880	9 737	9 593
0.014	9 461	9 327	9 195	9 065	8 943	8 820	8 698	8 581	8 465	8 353
0.015	8 242	8 133	8 028	7 922	7 819	7 718	7 620	7 523	7 428	7 335
0.016	7 244	7 154	7 065	6 975	6 895	6 811	6 729	6 649	6 570	6 493
0.017	6 416	6 342	6 269	6 196	6 125	6 055	5 986	5 919	5 853	5 787
0.018	5 723	5 660	5 600	5 537	5 473	5 416	5 360	5 303	5 247	5 191
0.019	5 137	5 083	5 030	4 978	4 927	4 877	4 827	4 778	4 730	4 683
0.020	4 638	4 590	4 545	4 500	4 458	4 413	4 370	4 328	4 286	4 245
0.021	4 205	4 165	4 126	4 083	4 040	4 002	3 975	3 938	3 902	3 866
0.022	3 831	3 797	3 763	3 729	3 696	3 663	3 631	3 599	3 567	3 536
0.023	3 505	3 475	3 445	3 416	3 387	3 358	3 329	3 301	3 274	3 246
0.024	3 219	3 193	3 168	3 140	3 115	3 089	3 064	3 039	3 015	2 991
0.025	2 967	2 943	2 920	2 897	2 874	2 852	2 830	2 808	2 786	2 764
0.026	2 743	2 722	2 701	2 681	2 661	2 641	2 621	2 601	2 582	2 563
0.027	2 544	2 525	2 506	2 488	2 470	2 452	2 434	2 417	2 399	2 382
0.028	2 365	2 348	2 332	2 315	2 299	2 283	2 267	2 251	2 236	2 220
0.029	2 205	2 190	2 175	2 160	2 145	2 131	2 116	2 102	2 088	2 074
0.030	2 060	2 047	2 033	2 020	2 007	1 993	1 980	1 966	1 955	1 942
0.031	1 930	1 917	1 905	1 893	1 881	1 869	1 857	1 845	1 834	1 822
0.032	1 811	1 800	1 788	1 777	1 766	1 756	1 745	1 734	1 724	1 713
0.033	1 703	1 693	1 682	1 672	1 662	1 652	1 643	1 633	1 623	1 614

TABLE 2 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. (G)	N_A		A		N_L or P_L	l	
	(No./in ² @ 100 ×)	(No./mm ² @ 1 ×)	(mm ²)	(μm ²)	(mm ⁻¹)	(mm)	(μm)
00	0.25	3.88	0.2581	258100	2.210	0.4525	452.5
0	0.50	7.75	0.1290	129000	3.125	0.3200	320.0
0.5	0.71	10.96	0.0912	91200	3.716	0.2691	269.1
1.0	1.00	15.50	0.0645	64500	4.419	0.2263	226.3
1.5	1.41	21.92	0.0456	45600	5.256	0.1903	190.3
2.0	2.00	31.00	0.0323	32300	6.250	0.1600	160.0
2.5	2.83	43.84	0.0228	22800	7.433	0.1345	134.5
3.0	4.00	62.00	0.0161	16100	8.839	0.1131	113.1
3.5	5.66	87.68	0.0114	11400	10.511	0.09514	95.1
4.0	8.00	124.00	0.00806	8060	12.500	0.08000	80.0
4.5	11.31	175.36	0.00570	5700	14.865	0.06727	67.3
5.0	16.00	248.00	0.00403	4030	17.678	0.05657	56.6
5.5	22.63	350.73	0.00285	2850	21.023	0.04757	47.6
6.0	32.00	486.00	0.00202	2020	25.000	0.04000	40.0
6.5	45.25	701.45	0.00143	1430	29.730	0.03364	33.6
7.0	64.00	992.00	0.00101	1010	35.356	0.02828	28.3
7.5	90.51	1402.90	0.000713	713	42.045	0.02378	23.8
8.0	128.00	1984.00	0.000504	504	50.000	0.02000	20.0
8.5	181.02	2805.81	0.000356	356	59.461	0.01682	16.8
9.0	256.00	3968.01	0.000252	252	70.711	0.01414	14.1
9.5	362.04	5611.61	0.000178	178	84.090	0.01189	11.9
10.0	512.00	7936.02	0.000126	126	100.001	0.01000	10.0
10.5	724.08	11223.22	0.0000891	89.1	118.922	0.008409	8.4
11.0	1024.00	15872.03	0.0000630	63.0	141.423	0.007071	7.1
11.5	1448.15	22446.44	0.0000446	44.6	168.181	0.005946	5.9
12.0	2048.00	31744.06	0.0000315	31.5	200.002	0.005000	5.0
12.5	2896.31	44892.89	0.0000223	22.3	237.844	0.004204	4.2
13.0	4096.00	63488.13	0.0000158	15.8	282.845	0.003536	3.5
13.5	5792.62	89785.77	0.0000111	11.1	336.362	0.002973	3.0
14.0	8192.00	126976.25	0.0000079	7.9	400.004	0.002500	2.5

- NOTE 1— \bar{N}_A is the number of grains per unit area.
 NOTE 2— A is the average grain area.
 NOTE 3— \bar{N}_L is the number of grains intercepted per unit length.
 NOTE 4— P_L is the number of grain boundary intersections per unit length.
 NOTE 5— l is the mean lineal intercept distance.
 NOTE 6— $\bar{N}_L = \bar{P}_L$ for a single phase grain structure.
 NOTE 7—The above table was calculated based upon the grain size definitions in Test Methods E 112.

TABLE 3 Grain Size Equations Relating Measured Parameters to the ASTM Grain Size, G

Determine the ASTM Grain Size, G, using the following equations:	
Equation	Units
1. $G = (3.321928 \text{ Log } \bar{N}_A) - 2.954$	\bar{N}_A in mm ⁻²
2. $G = (6.643856 \text{ Log } \bar{N}_L) - 3.288$	\bar{N}_L in mm ⁻¹
3. $G = (6.643856 \text{ Log } P_L) - 3.288$	P_L in mm ⁻¹
4. $G = (-6.643856 \text{ Log } \bar{l}) - 3.288$	\bar{l} in mm
5. $G = (-3.3223 \text{ Log } A) - 2.955$	A in mm ²

- NOTE 1—Equations 2 and 3 are for single phase grain structures.
 NOTE 2—To convert micrometres to millimetres, divide by 1000.
 NOTE 3—To convert square micrometres to square millimetres, divide by 10⁶.
 NOTE 4—A calculated G value of -1 corresponds to ASTM G = 00.

14.7 For a duplex grain size distribution, the analysis is conducted as described in Appendix X2 of Test Methods E 1181.

15. Test Report

15.1 The report should document the identifying information regarding the specimen, its composition, specification

TABLE 4 95 % Confidence Interval Multipliers, t (Eq 13 and Eq 14)

No. of Fields, n ^A	t multiplier	No. of Fields, n ^A	t Multiplier
5	2.776	19	2.101
6	2.571	20	2.093
7	2.447	21	2.086
8	2.365	22	2.080
9	2.306	23	2.074
10	2.262	24	2.069
11	2.228	25	2.064
12	2.201	26	2.060
13	2.179	27	2.056
14	2.160	28	2.052
15	2.145	29	2.048
16	2.131	30	2.045
17	2.120	40	2.020
18	2.110	60	2.000
		∞	1.960

^A or, number of grains, N.

designation or trade name, customer or data requester, date of analysis, heat treatment or processing history, specimen location and orientation, etchant and etch method, analysis method, and so forth, as required.

NOTICE: This standard has either been superceded and replaced by a new version or discontinued. Contact ASTM International (www.astm.org) for the latest information.



Designation: E 602 – 91 (Reapproved 1997)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19420
Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM

Standard Test Method for Sharp-Notch Tension Testing with Cylindrical Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation E 602; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of a comparative measure of the resistance of thick-section materials to fracture under plane-strain conditions originating from a very sharp stress-concentrator or crack (Note 1). The quantity determined is the sharp-notch strength of a specimen of particular dimensions, and this value depends upon these dimensions as well as the characteristics of the material. The sharp-notch strength-to-yield strength ratio is also determined.

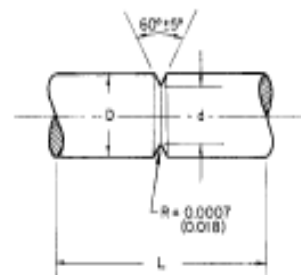
Note 1—Direct measurements of the plane-strain fracture toughness may be made in accordance with Test Method E 399. Comparative measures of resistance to fracture for sheet and thin plate may be obtained in accordance with Test Method E 338.

1.2 This test method is restricted to sharp machine-notched specimens (notch tip radii less than or equal to 0.018 mm (0.0007 in.)), and applies only to those materials (for example, aluminum and magnesium alloys) in which such sharp notches can be reproducibly machined.

1.3 This test method is restricted to cylindrical specimens of two diameters as shown in Fig. 1. The 27.0-mm (1 1/8-in.) diameter specimen extends the range of application of this test method to higher toughness levels than could be accommodated by the 12.7-mm (0.5-in.) diameter specimen.

1.4 This test method is restricted to materials equal to or greater than 12.7 mm (0.5 in.) in thickness. Since the notch strength depends on the specimen diameter and, within certain limits, on the length, comparison of various material conditions must be based on tests of specimens having the same nominal diameter and a test section length sufficient to prevent significant interaction between the stress field of the specimen heads and that of the sharp notch (see Fig. 1).

1.5 The sharp-notch strength may depend strongly upon temperature within a certain range depending upon the characteristics of the material. This test method is suitable for tests at any appropriate temperature. However, comparisons of various material conditions must be based on tests conducted at the same temperature.



Note 1—Dimensions are in millimetres and (inches).
Note 2— d must be concentric with D within 0.025 mm (0.001 in.).

Nominal Size	D	d	L , minimum
1/2 in.	12.7 ± 0.13 (0.500 ± 0.005)	8.98 ± 0.13 (0.353 ± 0.005)	25.4 (1.00)
1 1/8 in.	28.9 ± 0.13 (1.060 ± 0.005)	19.0 ± 0.13 (0.750 ± 0.005)	54.1 (2.13)

FIG. 1 Standard Test Sections

1.6 The values stated in SI (metric) units are to be regarded as the standard.

Note 2—Further information on background and need for this type of test is given in the Fourth Report of ASTM Committee E-24 (1)² on Fracture Testing, as well as other committee documents (2, 3, 4).

1.7 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- B 557 Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products³
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁴
- E 8 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials⁴
- E 139 Practice for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials⁴

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E-8 on Fatigue and Fracture and is the direct responsibility of Subcommittee E08.02 on Standards and Terminology.

Current edition approved Aug. 15, 1991. Published October 1991. Originally published as information only November 1974. Last previous edition E 602 – 81 (1986)².

² The boldface numbers in parentheses refer to the list of references appended to the method.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 02.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.

NOTICE: This standard has either been superseded and replaced by a new version or discontinued. Contact ASTM International (www.astm.org) for the latest information.

E 602

E 338 Test Method for Sharp-Notch Tension Testing of High-Strength Sheet Materials⁴
 E 388 Test Method for Spectral Bandwidth and Wavelength Accuracy of Fluorescence Spectrometers⁵
 E 399 Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials⁴
 E 602 Test Method for Sharp Notch Testing with Cylindrical Specimens⁴
 E 616 Terminology Relating to Fracture Testing⁶

a = crack size (length of notch or notch plus precrack), m (or in.),
 X = loading hole offset, m (or in.), and
 M = bending moment, N·m (in·lbf), and the result, σ_N , is given in Pa (or psi). See Test Method E 399 for further explanations of symbols.

3.1.3 *sharp-notch strength*, σ_s [FL⁻²]⁷—the maximum nominal (net-section) stress that a sharply notched specimen is capable of sustaining.

3.1.3.1 *Discussion*—See definition of nominal (net-section) stress.

3.1.3.2 *Discussion*—Values of sharp-notch strength may depend on notch and specimen configuration as these affect the net cross section and the elastic stress concentration.

3.1.3.3 *Discussion*—The tensile specimens used in Test Methods E 388 and E 602 have notch root radii that approach the limit of machining capability. For these specimens, the radius is believed to be small enough that any smaller radius that is obtainable by standard machining methods would not produce changes, in notch strength, that are significant from an engineering viewpoint.

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *crack strength*, σ_c [FL⁻²]⁷—the maximum value of the nominal (net-section) stress that a cracked specimen is capable of sustaining.

3.1.1.1 *Discussion*—See definition of nominal stress in Terminology E 616.

3.1.1.2 *Discussion*—Crack strength is calculated on the basis of the maximum load and the original minimum cross-sectional area (net cross section or ligament). Thus, it takes into account the original size of the crack, but ignores any crack extension which may occur during the test.

3.1.1.3 *Discussion*—Crack strength is analogous to the ultimate tensile strength, as it is based on the ratio of the maximum load to the minimum cross-sectional area of the specimen at the start of the test.

3.1.2 *nominal (net-section) stress*, σ_N [FL⁻²]⁷—in fracture testing, a measure of the stress on the net cross section calculated in a simplified manner and without taking into account stress gradients produced by geometric discontinuities such as holes, groove, fillets, etc.

3.1.2.1 *Discussion*—In tension specimens (tension only), the average stress is used: $\sigma_N = P/A$, where $A = B(W - a)$ for rectangulars, and $A = (\pi d^2)/4$ for circulars.

3.1.2.2 *Discussion*—In bend specimens (bending only), a fiber stress is used:

$$\sigma_N = \frac{6M}{B(W - a)^2} \quad (1)$$

3.1.2.3 *Discussion*—In compact specimens (tension and bending),

$$\sigma_N = \frac{2P(2W + a)}{B(W - a)^2} \quad (2)$$

3.1.2.4 *Discussion*—In C-shaped specimens (tension and bending),

$$\sigma_N = \frac{2P(3N + 2W + a)}{B(W - a)^2} \quad (3)$$

In 3.1.2.1 to 3.1.2.4:

d = diameter of notched section of a circumferentially-notched specimen, m (or in.),

P = load, N (or lbf),

B = specimen thickness, m (or in.),

W = specimen width, m (or in.),

4. Significance and Use

4.1 The sharp notch-to-yield strength ratio provides a comparative measure of resistance to plane-strain fracture originating from cracks or crack-like discontinuities. However, at sufficiently high values, the notch-to-yield strength ratio progressively loses sensitivity to changes in plane-strain fracture toughness. Available data indicate that useful sensitivity is maintained up to a value of about 1.3. At a given level of toughness the notch-strength ratio decreases with an increase in notch specimen size. Therefore, when the notch-to-yield strength ratio of the 12.7-mm (0.5-in.) diameter specimen exceeds 1.3, the 27.0-mm (1 1/16-in.) diameter specimen is recommended. The sharp notch-to-yield strength ratio is not intended to provide an absolute measure of resistance to crack propagation which might be used in calculations of the strength of structures. However, it can serve the following purposes:

4.1.1 In research and development of materials, to study the effects of the variables of composition, processing, heat-treatment, etc.

4.1.2 In service evaluation, to compare the resistance to plane-strain fracture of a number of materials that are otherwise equally suitable for an application, or to eliminate materials when an arbitrary minimum acceptable sharp-notch strength can be established on the basis of service performance correlation, or some other adequate basis.

4.1.3 For specifications of acceptance and manufacturing quality control when there is a sound basis for establishing a minimum acceptable sharp-notch strength or ratio of sharp-notch strength to tensile yield strength. Detailed discussion of the basis for setting minimum values in a particular case is beyond the scope of this method.

4.2 The sharp-notch strength may vary with temperature. The temperature of the specimen during each test shall, therefore, be controlled and recorded. Tests shall be conducted throughout the range of expected service temperatures to ascertain the relation between notch strength and temperature.

ภาคผนวก จ
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

OPPORTUNITY

CHALLENGE

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11

“พหุวัฒนธรรม : โอกาสและความท้าทาย”

วันศุกร์ที่ 25 มีนาคม 2559

ห้องประชุม 1-1 ชั้น 1 (อาคารสนม สุทธิพิทักษ์อนุสรณ์)

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาผลงานวิชาการ
การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11

1. รองศาสตราจารย์ ดร.สรณัฐ ไทลิ่งตะ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. รองศาสตราจารย์ ดร.ปวีณา บุญญลี	นักวิชาการอิสระ
3. รองศาสตราจารย์ ดร.พัชรี ชยากรโสภิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออกเฉียง
4. รองศาสตราจารย์ศันติ เขียววิชัย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
5. รองศาสตราจารย์ยุทธนา ธรรมเจริญ	มหาวิทยาลัยอุทัยธานีธรรมมาธิราช
6. รองศาสตราจารย์วรินทร์ วุรงค์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
7. รองศาสตราจารย์สุวัฒนา เลี่ยมประวิติ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัศวิน เนตรโพธิ์แก้ว	สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุลศักดิ์ ชาบุญมรงค์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
10. ดร.ศรัทษ์ เพชรเชิดชู	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11. รองศาสตราจารย์ ดร.นงการ หอมมาน	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
12. รองศาสตราจารย์ ดร.สรชัย พิศาลบุตร	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
13. รองศาสตราจารย์ ดร.อัศวิน แสงพิกุล	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
14. รองศาสตราจารย์พินิจ ทิพย์มณี	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คม คัมภีรานนท์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินันท์ บุญภาพ คอมนมอน	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญธัช วิภักดิ์ภูมิประเทศ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิฎฐิตินันท์ ทิพรส	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑาทานติ ชูบุชวงศ์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลีลา เดียงสูงเนิน	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร โกมารทัต	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ เฑษมณี	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อติลล่ำ พงศ์ยี่หล้า	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนาวรัตน์ สัม	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นศพัทธ์ชาณมัย ชินปัญชธนะ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพรินทร์ ชลไพศาล	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัญญวิรัตน์ หงส์วรรณันท์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเทพ พันประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
29. ดร.โชติ แยมแสง	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
30. ดร.อมรงค์ เกษ กิริติพรานนท์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
31. ดร.นักรบ หมื่นแสน	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
32. ดร.รชฎ ขำบุญ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
33. ดร.รอบทีศ ไวยสุศรี	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
34. ดร.เกียรติอนันต์ ล้วนแก้ว	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
35. ดร.ศยามล นองบุญนาท	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

55. ปัญหาทางกฎหมายในการจัดซื้อจัดจ้างโดยวิธีพิเศษขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่น	778
56. ปัญหาและสถานการณ์ในการเรียนการสอนภาษาจีนของประเทศไทย ในปัจจุบัน 泰国华文教育的现状和问题	791
57. ผลกระทบของการชุมนุมเรียกร้องการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหล็กกล้า ไร้สลิม AISI 420	803
58. ผลกระทบของการอบคืนตัวต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045	814
59. พฤติกรรมการเปิดรับสื่อ การใช้ประโยชน์และความพึงพอใจของแรงงานต่างด้าว ในกรุงเทพมหานคร	826
60. พื้นที่และสภาพแวดล้อมภายในศูนย์การเรียนรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นโดยผ่าน กระบวนการการเรียนรู้แบบมีส่วนร่วม กรณีศึกษา กลุ่มอาชีพเห็ดบ้านคลองวัดใหม่ หมู่ที่ 1 ตำบลทรงคนอง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ	841
61. ภาพลักษณ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้-ชุมพรทางการรับรู้ของประชาชน อำเภอละแม จังหวัดชุมพร	853
62. มาตรการการเยียวยาผู้ได้รับความเสียหายจากควินบุทรีในรูปแบบของ กองทุนเพื่อการเยียวยาความเสียหายจากควินบุทรี	868
63. มาตรการทางกฎหมายเพื่อควบคุมการปล่อยทิ้งมลพิษที่เกิดขึ้น จากปฏิบัติการของแท่นสำรวจและผลิตปิโตรเลียมนอกชายฝั่ง: ศึกษาเปรียบเทียบเฉพาะกรณีมลพิษทางน้ำ	880
64. โมเดลกลยุทธ์การตลาดบริการสำหรับสร้างความภักดีของลูกค้า: กรณีศึกษาร้านอาหารญี่ปุ่น ในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา	893
65. ยุทธศาสตร์การพัฒนาผู้บริหารสถานศึกษาขั้นพื้นฐานเพื่อการจัดการ การศึกษาสู่อาเซียน	905
66. รูปแบบการสื่อสารการตลาดแบบผสมผสานที่มีอิทธิพลต่อการบริโภคสินค้า เกษตรอินทรีย์ของกลุ่มแม่บ้านเมือง ในกรุงเทพมหานคร	919
67. วิธีการเล่าเรื่อง การเสนอแนวคิด และการใช้ภาษาในหนังสือ “บันทึกของตุ๊ด เล่มที่ 1”	933

ผลกระทบของการอบคืนตัวต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

Effect of Tempering to the friction welding of AISI 1045 steel

อภิกร เหล่าพงษ์ศักดิ์

ศิวชัย ต่อสกุล

บทคัดย่อ

การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน เป็นกระบวนการเชื่อมที่สามารถเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันหรือวัสดุ ต่างชนิดกันโดยไม่ต้องใช้วัสดุประสานและใช้เวลาในการเชื่อมน้อย ความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมสูงเพราะชิ้นงานหลอมติดกันเต็มพื้นที่หน้าตัดและไม่มีรูพรุน แต่เนื่องจากขณะเชื่อมเกิดความร้อนสูงขึ้นบริเวณรอยเชื่อมจึงส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อ ศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI1045 ที่ผ่านกระบวนการอบชุบ ความร้อน และทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ชิ้นงานทดลองเหล็กกล้ามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. จำนวน 720 ชิ้นภายใต้เงื่อนไขการเชื่อมคือ ความดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 s ความเร็วรอบ 1800 rpm แล้วนำชิ้นงานไปทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไข ไปทำการทดสอบ ความแข็ง แรงดึง และองค์ประกอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคที่บริเวณรอยแนวเชื่อม ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนและชุบผิวแข็ง และลายผิวโลหะเหล็กกล้าที่บริเวณแนวเชื่อมจะแตกต่างจากชิ้นงานที่ผ่านการชุบผิวแข็ง

คำสำคัญ : การชุบผิวแข็ง, การอบคืนตัว, การอบอ่อน

Abstract

The friction welding is the process that can weld the same material or different materials without merger and using less time in welding. There strength at the heat effect zone are high because the piece combining full sectional-cross is end non porous. While the welding heats up . The arc of the weld can effect changes to the structure of the steel and the mechanical property of that piece . The purpose of this research is to study the micro structure of the medium carbon steel AISI 1045 that passed heat treatment process, and friction welding. The experimental 720 pieces had of 10 mm diameter. The conditions for this experiment were compression pressure of 2, 3 and 4 MPa, compression time of 2,3 and 4 s, a rotating speed of 1800 rpm. Welded the pieces by friction welding and passed to the test of hardness, tensile, and the element of the micro structure at the heat effect zone. The results are as follows. The tempering pieces had higher tensile study than the full annealing and hardening pieces. The micro structure of the tempering pieces for had that the grains of steel at the welding area fine than the full annealing and hardening pieces

Keywords: Hardening, Tempering, Annealing

บทนำ

การเชื่อมต่อวัสดุโลหะหลายวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้ได้รับความนิยมมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตเช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นส่วนรถยนต์ที่เชื่อมแบบแรงเสียดทาน

เนื่องจากแนวเชื่อมมีความแข็งแรงรอยเชื่อมมีความแข็งแรงและเต็มหน้าสัมผัส แตกต่างจากการเชื่อมด้วยวิธีอื่นที่แนวเชื่อมไม่สามารถซึมเข้าด้านในของชิ้นงานได้ การเชื่อมต้องอาศัยทักษะประสบการณ์สูงในการเชื่อมนอกจากนี้คุณสมบัติของลวดเชื่อมมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมากในการเชื่อม การเชื่อมแบบแรงเสียดทานเป็นกระบวนการทางความร้อนที่การต่อประสานของชิ้นงานเกิดช่วงภายใต้การหมุนแรงกดอัดและเวลาในการอัดซึ่งเป็นตัวแปรที่น่าสนใจในเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ในการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรเหล่านี้สามารถพบเห็นได้ในบทความ (Vil,TyLecote, 1962) ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพการเชื่อม ความแข็งแรงของแนวเชื่อม และความแข็ง (Mumin, Erol, 2003) ได้ศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมที่มีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่มีหน้าสัมผัสเท่ากันและต่างกัน (Mitelea, Craiunescu 2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมแบบแรงเสียดทานของวัสดุต่างชนิดกัน (Murti, S. Sunderesan,1983) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแบบแรงเสียดทานของเหล็กอบสูง R6M5 กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI1045 (Selvemei, Palanikumar 2014) ได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงแนวเชื่อม AISI1035 (Mumin, Erol, 2007) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เชื่อมแบบแรงเสียดทานโดยการทดสอบ แรงดึง แรงกระแทก ความล้า และความแข็ง

งานวิจัยมีจุดประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของการอบคืนตัวที่มีผลต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 โดยการศึกษาในส่วนของผลกระทบเวลาในการอัด ความดันในการอัด โดยการทดลองนี้จะทำการทดสอบแรงดึง และความแข็ง ที่จุดกึ่งกลางชิ้นงานตามแนวของแนวเชื่อมเพื่อหาค่าความแข็งของแนวเชื่อมและการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และตรวจสอบขนาดเกรน (Grain size) บริเวณแนวเชื่อม

วิธีการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

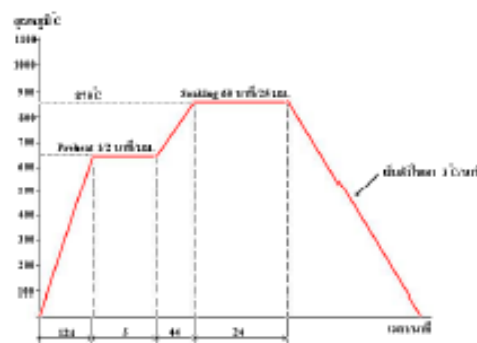
วัสดุที่ใช้ในการทดลองเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 มีองค์ประกอบทางเคมีดัง ตารางที่ 1 ชิ้นงานทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ยาว 100 mm. โดยการแบ่งชิ้นงานออกเป็น 3 กลุ่ม ไปผ่านในกระบวนการชุบผิวแข็งก่อนการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี Chemical composition of base metals AISI 1045

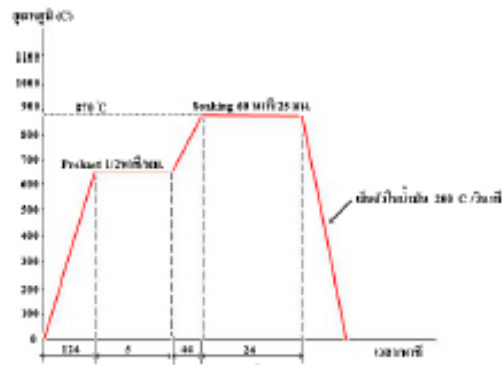
วัสดุ	%C	%Si	%Iron,Fe	%S	%Mn	%P
AISI 1045	0.47	0.28	98.53	0.045	0.56	0.031

2. กระบวนการอบชุบทางความร้อน

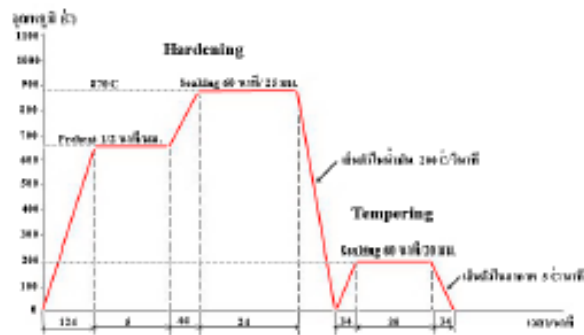
ชิ้นงานที่ผ่านการกระบวนการทางความร้อนในขั้นตอนการอบ แสดงดังรูปที่ 2(ก) โดยทำการอบอ่อนสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 870 °C ใช้เวลา 3 ชั่วโมงและอบแข็งไว้ 1/2 ชั่วโมงหลังจากนั้นปล่อยให้การเย็นตัวในเตาใช้เวลารวมประมาณ 5.7 ชั่วโมง รูปที่ 2 (ข) ชิ้นงานทำการการชุบผิวแข็งที่อุณหภูมิ 870 °C ใช้เวลา 3 ชั่วโมง และอบแข็งไว้ 1/2 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในน้ำมัน 200 °C /s รูปที่ 2 (ค) ชิ้นงานทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 200 °C ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 5°C /min (มบิต สภีร์จินดา, 2543). เหล็กที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อนทั้ง 3 ขั้นตอน ถูกนำไปทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาในหัวข้อต่อไป



ก. กราฟอุณหภูมิการอบอ่อนสมบูรณ์



ข. กราฟอุณหภูมิการอบผิวแข็ง



ค. กราฟอุณหภูมิการอบคืนตัว
รูปที่ 2 กระบวนการทางความร้อน

ตารางที่ 2 ตัวแปรของการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

ชิ้นงานทดสอบ	Ø 10 mm. L=100 mm.
เวลาที่ใช้ในการตัด (s)	2,3,4
ความดันในการตัด p (MPa)	2,3,4
เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน (s)	4
ความดันในการเสียดทาน (MPa)	1.4
ความเร็วในการหมุนชิ้นงาน (rpm)	1800



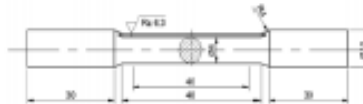
รูปที่ 3 เครื่องเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

3. วิธีการศึกษา

การทดลองการเชื่อมแบบแรงเสียดทานสำหรับบทความนี้กล่าวถึงค่าความต้านทานแรงดึงเฉพาะ บริเวณแนวเชื่อม ความแข็งแรงแนวเชื่อม การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างมหภาค

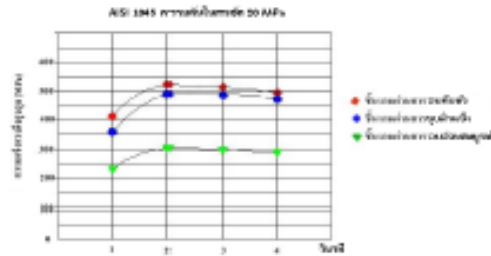
3.1 ผลการตรวจสอบแรงดึง

นำชิ้นงานมาทำการดึงขึ้นรูปตามมาตรฐานดังรูปที่ 4 แล้วนำมาทดสอบแรงดึงผลการทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่ผ่านกระบวนการ Full Annealing

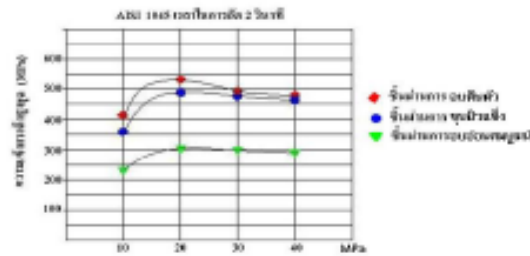


รูปที่ 4 การทดสอบแรงดึง A (DIN 50125)

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ทำการเปรียบเทียบเวลาในการยึด 2 ๔ และความสั่นในการยึด 2 MPa ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดความแข็งแรงดึงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาและความสั่นอื่น ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว ผลการทดลองที่เวลาในการยึด 2 ๔ และความสั่นในการยึด 2 MPa จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 525.6 MPa ชิ้นงานที่ผ่านการชุบผิวแข็งที่เวลาในการยึด 2 ๔ และความสั่นในการยึด 2 MPa ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 492.0 MPa ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนสมบูรณ์ เวลาในการยึด 2 ๔ ความสั่นในการยึด 2 MPa ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 301 MPa ผลจากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเมื่อความสั่นในการยึดเพิ่มเป็น 2, 3 และ 4 MPa ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมด้วยการเชื่อมแบบแรงเสียดทานมีแนวโน้มลดลง (ช่วงชัย ชูปวา & ขวสิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ 2553) เวลาในการเสียดทานมีผลต่อความแข็งแรงแนวเชื่อมของเหล็ก AISI 1015 ที่เชื่อมแบบแรงเสียดทาน (วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 3 ฉบับที่ 2)

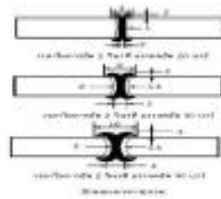


รูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงสูงสุดชิ้นงานตามเวลาในการชุบ



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบแรงดึงสูงสุดชิ้นงานตามเวลาในการชุบ

จะเห็นได้ว่าเวลาในการชุบ 2 วินาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดกว่าเวลาในการชุบ 3, 4 วินาที ตามลำดับ และจากการทดลองยังพบว่าเวลาในการชุบเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าลดลง จากรูปที่ 6 พบว่าภายใต้เงื่อนไขในการทดลองต่างๆ เมื่อความดันในการชุบและแรงดันในการชุบเพิ่มสูงขึ้นความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีแนวโน้มลดลงสาเหตุมาจากความร้อนของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องส่งผลให้แนวเชื่อมมี ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำลง จึงมีผลต่อขนาดแนวเชื่อม ในรูปที่ 7 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของแนวเชื่อมที่กระทบร้อน Heat affect zone (HAZ) เพื่ออธิบายความแข็งของแนวเชื่อมต่อไป



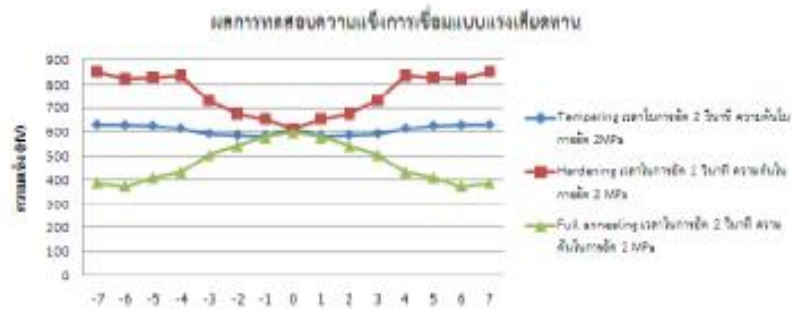
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบการเพิ่มเวลาในการยึดมีผลต่อขนาดของแนวเชื่อม

3.2 ผลการตรวจสอบความแข็งของแนวเชื่อม

ผลการทดสอบค่าความแข็งเมื่อทำการกดแรงบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมและกึ่งกลางชิ้นงานออกไปด้านละ 6 จุด ตามมาตรฐาน ASTM-E 92 แล้วนำผลของความแข็งที่ได้มาวิเคราะห์ตามพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากหัวแปรง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ตำแหน่งตรวจสอบความแข็ง



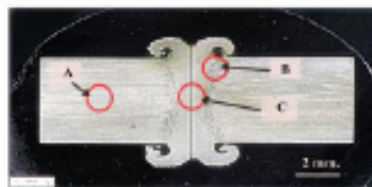
รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

ในการทดสอบความแข็งเมื่อทำการกดแรงบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานออกไปด้านละ 6 จุด ตามมาตรฐาน ASTM-E92 แล้วนำผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งตามพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากหัวแปรง ดังรูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ที่บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมบริเวณจากผลการ

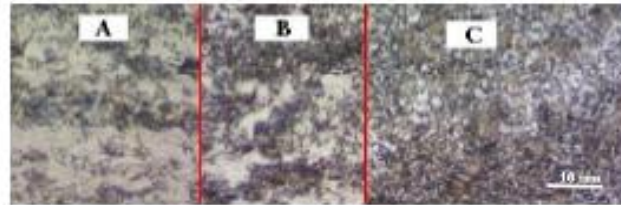
ทดสอบความแข็ง ขึ้นงานที่ผ่านการชุบผิวแข็ง ที่บริเวณตัวประสานมีความร้อนที่เกิดจากการความสั่นในการขัด ทำให้บริเวณแนวเชื่อมมีความแข็งน้อยกว่าโลหะฐาน ขึ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวทำให้โครงสร้างมีความสมดุลย์ และลดความเครียดทำให้คุณสมบัติความเหนียวเพิ่มขึ้นความแข็งลดลงทำให้บริเวณตัวประสานมีความแข็งใกล้เคียงกับโลหะฐาน ขึ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนโครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ชนิดหยาบ ที่บริเวณตัวประสานมีความร้อนที่เกิดจากความสั่นในการขัดทำให้มีผิวคายโลหะมีขนาดเล็กลงส่งผลให้มีแข็งที่บริเวณตัวประสานมีความแข็งมากขึ้น จากผลการทดสอบพื้นที่บริเวณตัวประสานจะมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณกระทบร้อนซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความร้อนจากการเสียดทาน

3.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม

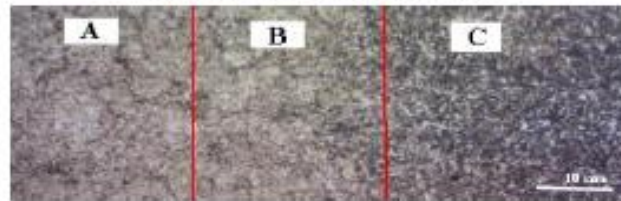
จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน พบว่าโครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ที่ผ่านอบคืนตัวให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดด้วย เวลาในการขัด 2 วินาที และความสั่นในการขัด 2 MPa เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของแนวเชื่อมที่บริเวณตัวประสานโลหะฐาน และบริเวณกระทบร้อน เพื่ออธิบายความแข็งแรงของแนวเชื่อม จากรูปที่ 11 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ B เป็นพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ที่ผ่านการอบอ่อนสมบูรณ์ พบว่าใกล้บริเวณตัวประสานจะมีความละเอียดเกิดจากแรงขัดและความร้อนจากการเสียดทานส่งผลให้สมบัติทางความแข็งบริเวณกระทบร้อนลดลงแต่ จากรูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ B เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ที่ผ่านการชุบผิวแข็ง พบว่าความแข็งจะลดลง พบว่าบริเวณใกล้ตัวประสานจะมีลายผิวโลหะขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเกิดจากแรงขัดและความร้อนจากการเสียดทานส่งผลให้บริเวณกระทบร้อนความแข็งบริเวณลดลงกว่าปกติ จากรูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ B เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัว เหล็กที่ผ่านการทำ Tempering เพื่อคลายความเครียดในเนื้อโลหะในขณะที่เลี้ยวจะเพิ่มความเหนียวแต่ความแข็งจะลดลง พบว่าบริเวณพื้นที่ใกล้ตัวประสานจะมีลายผิวโลหะที่ละเอียดขึ้นซึ่งเกิดจากแรงขัดและความร้อนจากการเสียดทานส่งผลให้มีความแข็งบริเวณกระทบร้อนลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 10 ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้าง



รูปที่ 11 โครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ที่ผ่านการอบอ่อนสมบูรณ์ ด้วยเวลาในการชด 2 วินาทีและความดันในการชด 2 MPa



รูปที่ 12 โครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ที่ผ่านการชุบผิวแข็ง ด้วยเวลาในการชด 2 วินาทีและความดันในการชด 2 MPa



รูปที่ 13 โครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัว ด้วยเวลาในการชด 2 วินาทีและความดันในการชด 2 MPa

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวิจัยการเชื่อมแบบแรงเสียดทานบีได้ข้อสรุปเบื้องต้นว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบชุบความร้อนได้แก่ การอบอ่อนสมบูรณ์ การอบคืนตัว เป็นการปรับสภาพโครงสร้างให้มีความสมดุลย์ทุกแห่ง และมีความแข็งลดลงแต่เพิ่มความเหนียวขึ้นโดยมีข้อสังเกต ดังนี้

1. แนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงาน เพราะผลจากการทดสอบแรงดึง ตำแหน่งที่ขาดออกจากกัน จะอยู่บนอกบริเวณรอยเชื่อม
2. ตัวแปรเวลาในการขัดและความดันในการขัดมีผลต่อขนาดความกว้างของแนวเชื่อมโดยการเพิ่มเวลาในการขัดและความดันในการขัดจะทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมลดลง
3. โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมแตกต่างกันเนื่องจากผลของการอบคืนตัวโครงสร้างจุลภาคมีความสมดุลและสามารถรับแรงดึงได้มาก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

บรรณานุกรม

- ช่วงชัย ชูบวา และ ขวสิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. (2553). การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก AISI 1050 ที่เชื่อมด้วยแรงเสียดทาน. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์. 3(2)
- นบิต ฤทธิจินดา. (2543). วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Dobrovidov. AI. (1975). Selection of optimum condition for the friction welding of high-speed steel 45, Weld. Prod, 22 (3), 22-26
- Mumin Shin. (2007). Characterization of mechanical properties in AISI 1040 part welding by friction, Welding materials characterization, 58, 1033-1038
- Mumin Sahin, & Erol Aketa H. (2003). Joining with friction welding of plastically deformed Steel. Journal of Materials Processing Technology, 142, 239-246
- Selvamani ST. & Palanikumar K. (2012). Optimizing the friction welding parameters to attain maximum tensile strength in AISI 1035 grade carbon Steel Rods. Journal of Materials Processing Technology, 212, 1892-1899.
- .VILLV.I. (1962). Friction Welding of Metals, New york.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอนิกร เหล่าพวงศักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	7 กรกฎาคม 2509
ที่อยู่	228 หมู่ 6 ตำบล ลาดยาว อำเภอ ลาดยาว จังหวัด นครสวรรค์ 60150
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศน์
ประสบการณ์การทำงาน	สำนักพัฒนาสมรรถนะครูและบุคลากรอาชีวศึกษา ตั้งแต่ พ.ศ. 2540 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	084-1287100
อีเมล	Anikorn_Siam@hotmail.com