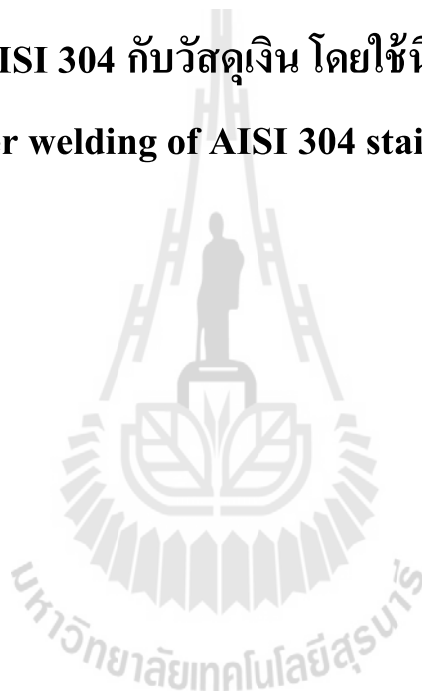




รายงานการวิจัย

**การเชื่อมสแตนเลส AISI 304 กับวัสดุเงิน โดยใช้เลเซอร์ชนิดนีโอดีเมียมแฉกเลเซอร์
(Pulse Nd:YAG laser welding of AISI 304 stainless steel and silver)**



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

**การเชื่อมสแตนเลส AISI 304 กับวัสดุเงิน โดยใช้ไนโอติเมียมแย็กเลเซอร์
(Pulse Nd:YAG laser welding of AISI 304 stainless steel and silver)**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ดร. สุกัญญา เตชะไทรภาพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และโฟตอนิกส์

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

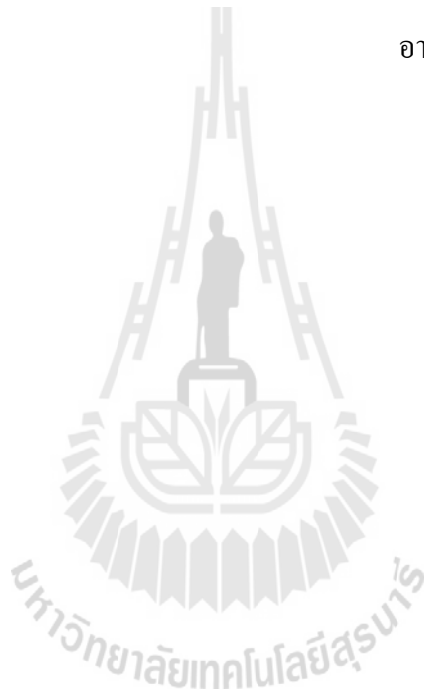
กันยายน 2558

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง เป็นเพราะรับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จึงขอขอบพระคุณมา ณ. ที่นี้ อีกทั้งเจ้าหน้าที่F5 ตัดจัดเตรียมชิ้นงาน อีกทั้งนางสาว อพันธ์ร่ำ ขำช่วย นาย
อำนาจ สอนเจริญ ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องเลเซอร์ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งนักศึกษา ฤชกานต์
พลพิทักษ์ ที่ช่วยดำเนินการจัดชิ้นงาน และถ่ายภาพด้วยกล้องกำลังขยายสูง

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ. โอกาสนี้

อาจารย์ ดร. สุกัญญา เตชะไตรภพ



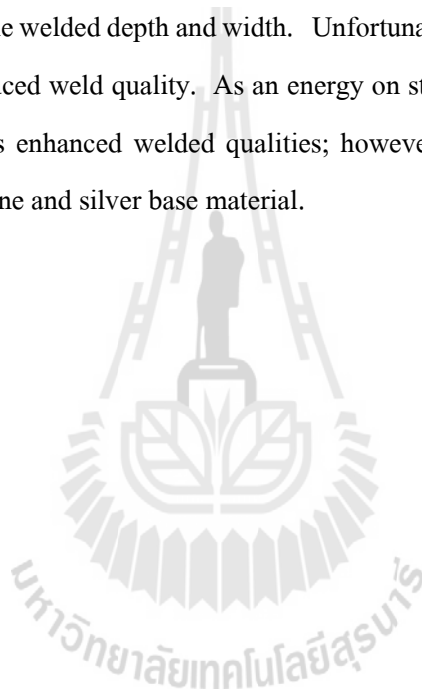
บทคัดย่อ

การเชื่อมสแตนเลส AISI 304 กับวัสดุเงิน โดยใช้ไนโอดิเมียมแยกเลเซอร์ ในลักษณะของ Butt joint โดยใช้พัลส์เลเซอร์รูปสี่เหลี่ยม พบว่าการเชื่อมของวัสดุต่างชนิดให้ลักษณะรอยเชื่อม ความลึก ความกว้าง และลักษณะทั่วไปที่ซับซ้อนกว่าการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกัน เนื่องจากคุณสมบัติทางวัสดุ การตอบสนองต่อพลังงานตกกระเลเซอร์ที่แตกต่างกันของวัสดุเงิน และสแตนเลส วัสดุเงินมีความยากในการเชื่อมมากกว่าวัสดุสแตนเลส เนื่องด้วยมีการสะท้อนแสงเลเซอร์ ค่าการนำไฟฟ้า และค่า Thermal diffusivity ที่สูง ถึงแม้ว่าจะมีค่าอุณหภูมิการหลอมละลายที่ต่ำกว่า แต่เมื่อนำวัสดุเงินมาเชื่อมกับวัสดุสแตนเลส โดยกำหนดให้อัตราส่วนพลังงานเลเซอร์ตกกระทบบนสแตนเลสและวัสดุเงินที่เท่ากันคือ 50% วัสดุเงินให้การเชื่อมที่ง่ายขึ้น กล่าวคือ ใช้พลังงานงานตกกระทบบที่น้อยกว่าให้รอยเชื่อมที่ลึกและกว้างขึ้น แต่ให้ผลเสียเรื่องการกระจายของโลหะที่ขอบบนของวัสดุเงินและส่วนวัสดุสแตนเลสมีรอยเชื่อมที่ตื้นและแคบกว่าเดิม แต่เมื่อเพิ่มพลังงานเลเซอร์ตกกระทบบนวัสดุสแตนเลสเป็น 75% รอยเชื่อมที่ฝั่งสแตนเลสมีคุณภาพที่ดีขึ้น ส่วนด้านวัสดุเงินมีฟองอากาศที่รอยต่อระหว่างรอยเชื่อมกับวัสดุเงิน



Abstract

Nd:YAG laser was set as a square pulse to weld on the AISI 304 stainless steel and silver, attached in the form of butt joint. Laser welding on dissimilar materials is more complicated than on similar materials since there are differences of the material properties and material responses to a laser radiation. Normally, welding silver is required higher laser energy density than a stainless steel because the silver has a higher reflectivity, thermal conduction, and thermal diffusivity even though it has a lower melting temperature than the stainless steel does. When the laser impinged on the stainless steel and silver joint with equally incident laser energy on both materials, the silver had improved weld qualities, the welded depth and width. Unfortunately, the silver had weld splatter and the stainless steel had reduced weld quality. As an energy on stainless steel side was increased to 75%, the stainless steel has enhanced welded qualities; however, the silver had an air bubble trapped between the welded zone and silver base material.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser Welding)	5
2.2 โหมดการเชื่อม (Welding mode)	7
2.2.1 เกิดตามดหรือรูพรุน (Porosity)	9
2.2.2 การกระจายของโลหะ (Spatter)	9
2.2.3 บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone)	9
2.3 คุณสมบัติของวัสดุเงินและสแตนเลส (Properties of silver and AISI 304 material)	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 การเตรียมการทดลอง	11
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	12
3.3 การแสดงผลการทดลอง	12
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	14
4.1.1 การเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกัน	14
4.1.2 การเชื่อมวัสดุเงินและสแตนเลส	17
บทที่ 5 บทสรุป	
5.1 สรุปผลการวิจัย	23

5.2	ข้อเสนอแนะ	25
	บรรณานุกรม	26
	ประวัติผู้วิจัย	29



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติโดยทั่วไปของเงินและสแตนด์เลส



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะ หลังจากที่ใช้แสงเลเซอร์ตกกระทบ	6
2.2	ขบวนการเชื่อมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงาน (Power) และเวลา	7
2.3	แสดงลักษณะของรอยเชื่อมในแนวตัดขวาง ก. คอนดักชัน โหมด (Conduction mode) และ ข. คีย์โฮลโหมด (Keyhole mode)	8
2.4	แสดงบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณกระทบร้อน	9
3.1	การเชื่อมชิ้นงานในลักษณะ Butt joint เพื่อกำหนดระยะช่องว่างของชิ้นงานทั้งสอง	11
3.2	กล้องDino-lite ที่ใช้ในการทดลอง	11
3.3	เครื่อง Nd: YAG เลเซอร์ยี่ห้อ Z-Tech advanced technology	12
3.4	กล้อง Carl Zeiss optical microscope รุ่น Axio Imager.A1M ที่มีกำลังขยายสูง	13
3.5	แสดง ก. เรซินและสารทำให้แข็งตัว และ ข. ชิ้นงานถูกยึดด้วยเรซิน	13
4.1	แสดงผลการเชื่อมวัสดุเงินเข้าด้วยกันที่ กำลังเลเซอร์ ก. 2.5 ข. 3.0 และ ค. 3.5 กิโลวัตต์	15
4.2	แสดงรอยเชื่อมด้านบนและด้านข้างของวัสดุสแตนเลส ที่กำลังเลเซอร์ ก. 2.0 และ ข. 3.5 กิโลวัตต์	15
4.3	แสดงรอยเชื่อมด้านข้างของวัสดุสแตนเลส ที่เวลาเลเซอร์พัลส์ ก. 1.5 และ ข. 3.5 มิลลิวินาที	16
4.4	แสดงรอยเชื่อมด้านข้างของวัสดุสแตนเลส ที่ขนาดลำแสงเลเซอร์ ก. 0.6 มม. และ ข. 0.2 มม.	16
4.5	เลเซอร์ตกกระทบที่รอยต่อกำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์ รอยเชื่อม ก. ด้านบน ข. ด้านข้าง	18
4.6	เลเซอร์ตกกระทบที่ฝั่งวัสดุสแตนเลสกำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์ รอยเชื่อม ก. ด้านบน ข. ด้านข้าง	18
4.7	เลเซอร์ตกกระทบที่ฝั่งวัสดุสแตนเลสกำลังเลเซอร์ 3.5 กิโลวัตต์ รอยเชื่อม ก. ด้านบน ข. ด้านข้าง	18
4.8	เลเซอร์ตกกระทบที่ฝั่งวัสดุเงินกำลังเลเซอร์ 3.5 กิโลวัตต์ รอยเชื่อม ก. ด้านบน ข. ด้านข้าง	19
4.9	กำลังเลเซอร์ 3.5 กิโลวัตต์ตกกระทบที่ฝั่งวัสดุเงิน รอยเชื่อม ก. ด้านเงิน ข. ด้านสแตนเลส	21

รูปที่	หน้า
4.10	21
เลเซอร์ตกกระทบที่ฝั่งวัสดุสแตนเลส กำลังเลเซอร์ ก. 2.5 กิโลวัตต์ และ ข. 3.5 กิโลวัตต์	
4.11	22
ภาพถ่ายกำลังขยาย 500 เท่าแสดงรอยเชื่อม ก. ด้านเงิน ข. ด้านสแตนเลส	



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันการเชื่อมโลหะสองชนิด (Dissimilar materials) เข้าด้วยกัน ได้ถูกผลักดันโดยความต้องการของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรูปแบบที่ซับซ้อน การพัฒนาทั้งรูปแบบและประสิทธิภาพ รวมทั้งการลดต้นทุนการผลิต ทำให้การเชื่อมโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกันได้มีการวิจัยอย่างแพร่หลาย [Sun, 1996, Berretta, 2007, Arivzhagan, 2011 และ Zhang, 2011] อย่างไรก็ตามการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน ที่มีคุณสมบัติทางโลหะ (Metallurgical properties) และคุณลักษณะ (Physical properties) ที่แตกต่างกัน ทั้งการดูดกลืน (Absorption) พลังงานของเลเซอร์ การกระจายความร้อน (Thermal properties) และอุณหภูมิการหลอมละลาย (Melting temperature) ทำให้การเชื่อมโลหะต่างชนิดมีความซับซ้อนมากกว่าการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน

เลเซอร์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการเชื่อม เนื่องจากเลเซอร์ให้การกระจายความร้อนไปสู่บริเวณใกล้เคียงต่ำ รอยเชื่อมที่เล็ก บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) มีขนาดเล็ก และมีความแข็งแรงคั้งนั้นอุปกรณ์ละเอียดอ่อน อาทิ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใกล้เคียงจึงไม่เกิดความเสียหาย และไม่เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานเนื่องจากความร้อนที่มากเกินไป [Capello, 2003, Faerber, 2003, Mackwood, 2005, Messer, 2006, Nawi, 2011, Ping, 2008 และ Santos, 2003]

วัสดุสแตนเลส AISI 304 ใช้อย่างแพร่หลายในวงการผลิต Hard Drive การทำเซ็นเซอร์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ สปริงขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูง (Precision microsprings) แผ่นสั่นที่มีความละเอียดสูง (Precision vibrator plates) มีดบล็อก (Cutting dies) แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Print circuit board) [Ping, 2008 และ <http://www.htch.com/primer.asp>] ส่วนวัสดุเงิน มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดี จึงได้ถูกนำไปใช้ป็นสายสัญญาณ สำหรับการส่งข้อมูลที่ต้องการความเร็วสูง หรือการส่งสัญญาณไฟฟ้าที่ต้องการความสูญเสียของสัญญาณน้อย อีกทั้งวัสดุเงินยังถือว่าเป็นวัสดุมีค่าที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมผู้ผลิตของไทยได้ปรับตัว และพยายามปรับตัว โดยใช้เทคโนโลยีช่วยในขบวนการผลิต เนื่องจากค่าแรงของไทยได้มีปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้โอกาสการแข่งขันของอุตสาหกรรมไทยกับเพื่อนบ้านลดลง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น ผลิตภัณฑ์ย่อมมีความซับซ้อนมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มสัดส่วนของกำไร และเพื่อความอยู่รอดขององค์กรการผลิตสินค้าที่มีคุณภาพที่สูงขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีจึงเป็นทางออกเดียวที่จะสามารถทำให้อุตสาหกรรมของไทยคงอยู่ และสามารถแข่งขันได้ เมื่อต้องการเชื่อมประกอบงานที่มีคุณภาพด้วย

เลเซอร์จึงเป็นเทคโนโลยีแขนงหนึ่งที่ ผู้ประกอบการต้องนำไปใช้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ในอนาคต อุตสาหกรรมที่ต้องการสร้างอุปกรณ์ที่ต้องการความละเอียดสูง ขนาดชิ้นงานมักมีขนาดเล็ก การเชื่อมด้วยเลเซอร์ไม่ได้ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานเนื่องจากความร้อนที่สูงเกินไป หรือรอยเชื่อม อีกทั้งอุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับปัจจุบัน ประสบปัญหาวัตถุดิบราคาแพง การทำเครื่องประดับด้วยโลหะมีค่าคือเงิน และทองแบบเดิม จึงมีต้นทุนสูง ประกอบกับผู้ผลิตต้องการรูปแบบเครื่องประดับที่แปลกใหม่ เครื่องประดับสแตนเลสจึงได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้อาจมาซึ่งการสนับสนุนทางวิชาการเพื่อสร้างพื้นฐานทางความรู้เทคโนโลยี ในการผลิตเครื่องประดับที่ประกอบด้วยวัสดุสแตนเลสและเงิน

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาร่วมสแตนเลส AISI 304 และวัสดุเงินเข้าด้วยกันโดยใช้เลเซอร์ ซึ่งการทดลองนี้ยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน โดยมุ่งเน้นในการศึกษารูปลักษณะของรอยเชื่อม บริเวณกระแทกร้อนที่ได้ ซึ่งเป็นผลจากตัวแปรเลเซอร์ และตำแหน่งของเลเซอร์ตกกระทบที่บริเวณรอยต่อ รูปลักษณะของรอยเชื่อมที่เป็นผลเสีย อาทิ การกระจายของโลหะ ตามด (porosity) หรือการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์จะถูกนำมาวิเคราะห์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการสนับสนุนทางวิชาการ และให้คำแนะนำทางวิชาการและเทคโนโลยีให้กับอุตสาหกรรมผู้ผลิตของไทย ในการนำเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ไปใช้ให้เหมาะสมในการผลิตสินค้า ส่งผลให้มีการพัฒนาสินค้า เพิ่มผลิตภาพ และคุณค่าของสินค้า

งานวิจัยนี้คาดว่าจะเป็งานวิจัยที่ให้ความรู้ การชี้แนะทางวิชาการและเทคโนโลยีให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ เพื่อให้เป็นการพัฒนาสินค้าคุณภาพ และสร้างโอกาสทางการตลาด หรืออุตสาหกรรมอื่นที่ประยุกต์ใช้วัสดุไททาเนียม

เป้าหมายของงานวิจัยนี้ครอบคลุม ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืน ในด้าน (3.1) การปรับโครงสร้างการผลิตเพื่อเพิ่มผลิตภาพ และคุณค่าของสินค้าและบริการ บนฐานความรู้และความเป็นไทย และภายใต้ยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 5 กลยุทธ์การวิจัยที่ 2 วิเคราะห์และประเมินผลเพื่อการพัฒนาศักยภาพและความสามารถด้านการวิจัยของประเทศที่มีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาร่วมสแตนเลส AISI 304 และวัสดุเงินเข้าด้วยกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการทำมาก่อน การเชื่อมวัสดุต่างชนิดชนิดเข้าด้วยกันโดยใช้เลเซอร์ ต้องคำนึงถึงความแตกต่างของคุณสมบัติทางโลหะ (Metallurgical properties) และคุณลักษณะ (Physical properties) ที่แตกต่างกัน อีกทั้งการดูดกลืน (Absorption) พลังงานของเลเซอร์ โดยปกติโลหะเงินมีความเงา ทำให้เกิดการสะท้อนสูง อีกทั้งยังมีอัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตรต่ำ [Davis, 2003 และ Togaya, 1999] ทำให้การกระจายความร้อน (Thermal properties) และ

อุณหภูมิการหลอมละลาย (Melting temperature) บริเวณรอยเชื่อมของวัสดุทั้งสองย่อมมีความซับซ้อน งานวิจัยกระทำโดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเลเซอร์ อาทิ กำลัง เวลา และขนาดของเลเซอร์ อีกทั้งจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของเลเซอร์ที่ตกกระทบบนชิ้นงาน เมื่อเทียบกับบริเวณรอยต่อ รูปลักษณะของรอยเชื่อมที่เป็นผลเสีย อาทิ การกระจายของโลหะ ตามด (porosity) หรือการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์จะถูกนำมาวิเคราะห์ สรุปวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยได้ดังนี้

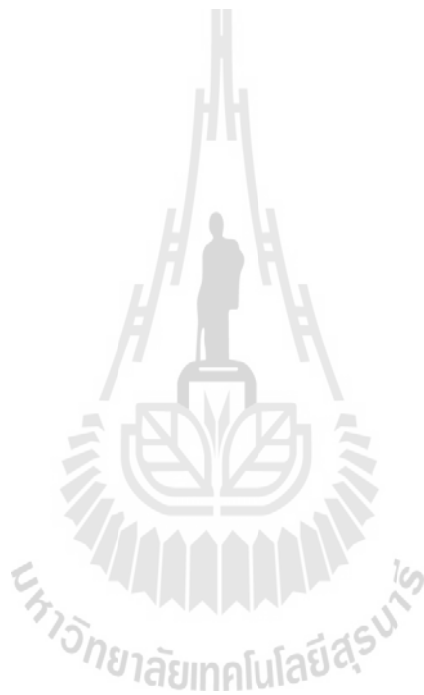
1. เพื่อเป็นศึกษาการเชื่อมของวัสดุที่ไม่เหมือนกัน ที่ยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน กล่าวคือ สแตนเลส 304 และวัสดุเงิน โดยใช้เลเซอร์
2. การส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตของไทย ให้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล
3. เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตสินค้าของอุตสาหกรรมไทย โดยการผลิตสินค้าที่มีความซับซ้อน และคุณภาพสูง โดยการใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยทำการทดลองเชื่อม วัสดุสแตนเลสและเงินด้วยเลเซอร์ โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรทางเลเซอร์ อาทิ กำลัง เวลา และขนาดของเลเซอร์ ที่มีผลต่อรอยเชื่อม และบริเวณกระทบบรรยากาศ
4. ทำการทดลองเชื่อมวัสดุสแตนเลสและเงินด้วยเลเซอร์ โดยศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของเลเซอร์ที่ตกกระทบบนชิ้นงาน เมื่อเทียบกับระยะทางจากบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสอง และตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลต่อรอยเชื่อม และบริเวณกระทบบรรยากาศ
5. ทำการทดลองเชื่อมวัสดุสแตนเลสและเงินด้วยเลเซอร์ โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ อาทิ ตามด การกระจายของโลหะ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษารอยเชื่อมสแตนเลสและเงินใช้เครื่องนีโอดีเมียมแอกต์เลเซอร์ (Nd:YAG Laser) แบบพัลส์ ในการทดลองนี้กระทำโดยปรับตัวแปรเลเซอร์ (Laser parameters) กล่าวคือ กำลังของแสงเลเซอร์ (Power) ขนาดของเลเซอร์ (Laser spot size) ที่กระทบบนชิ้นงาน เวลา (Pulse duration) ของเลเซอร์พัลส์ รวมถึงผลของตำแหน่งที่เลเซอร์ที่ตกกระทบบนชิ้นงาน เมื่อเทียบกับระยะทางจากบริเวณรอยต่อ และการศึกษารอยเชื่อมที่ได้โดยกล้องกำลังขยายสูง (Optical microscope) เพื่อดูรอยแตก (Crack) ตามด (Porosity) และดูรูปร่างการเชื่อม (Weld geometry) และ บริเวณกระทบบรรยากาศ (Heat affected zone: HAZ)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ส่วนหนึ่งงานวิจัยนี้ ได้มีการเผยแพร่ความรู้เพื่อให้เป็นองค์ความรู้ในการวิจัย เทคโนโลยี การบริการความรู้ ในรูปบทความ การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2010 และ National Conference of Optics and Applications ครั้งที่ 6 ปี 2011



บทที่ 2

ทฤษฎี

การเชื่อมประกอบโลหะเข้าด้วยกันมีหลายวิธี แต่งานวิจัยนี้เป็นการกล่าวถึงการเชื่อมโลหะต่างชนิดคือเงินและสแตนเลส 304 ด้วยเลเซอร์ เนื่องด้วยลำแสงเลเซอร์มีขนาดเล็กและเดินทางเป็นเส้นตรง ทำให้การควบคุมตำแหน่งและกำหนดบริเวณการเชื่อมได้ดี ดังนั้นจึงการกระจายความร้อนจากรอยเชื่อมเป็นบริเวณแคบ ทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีขนาดเล็ก บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) มีขนาดเล็ก และชิ้นงานที่ไม่บิดเบี้ยว การเชื่อมด้วยเลเซอร์จึงเป็นที่นิยม [Brown, 2003, Duley, 1998, Kugler, 2003, Mackwood, 2005, Messer, 2006, และ Togaya, 1999]

การเชื่อมโลหะเงินและสแตนเลส 304 เป็นโลหะที่สามารถเชื่อมเข้าด้วยกันได้ ถึงแม้ว่าโลหะทั้ง 2 จะความแตกต่างทางด้านคุณสมบัติทางโลหะ (Metallurgical properties) และคุณลักษณะ (Physical properties) ที่แตกต่างกัน ทั้งการดูดกลืน (Absorption) พลังงานของเลเซอร์ การกระจายความร้อน (Thermal properties) และอุณหภูมิการหลอมละลาย (Melting temperature) แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมโลหะต่างชนิดมีความซับซ้อนมากกว่าการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน ลักษณะรอยเชื่อมที่ได้เป็นผลจากคุณสมบัติของโลหะ ตัวแปรเลเซอร์ที่ตกกระทบ กล่าวคือ กำลัง เวลา และขนาดของเลเซอร์ อีกทั้งตำแหน่งที่เลเซอร์ตกกระทบบนรอยต่อของชิ้นงาน หรือเปอร์เซ็นต์ของพลังงานเลเซอร์ที่ตกกระทบที่วัสดุเป้าหมาย

2.1 การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser welding)

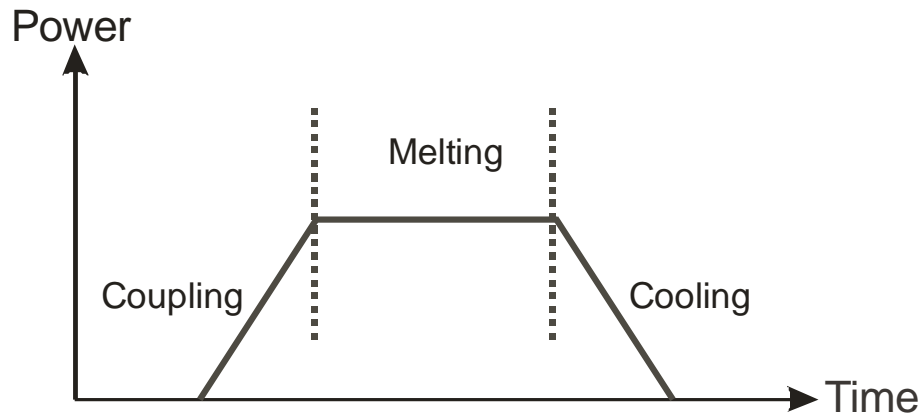
ขบวนการเชื่อมเป็นการทำให้โลหะหลอมละลาย จากนั้นผ่านขบวนการเย็นตัวทำให้เกิดการเชื่อมประสานที่รอยต่อเป็นเนื้อเดียวกัน การเชื่อมด้วยเลเซอร์เป็นขบวนการเชื่อมแบบหลอมเหลว (Fusion welding) ที่ต่อเนื่อง เริ่มจากเมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบยังโลหะเป้าหมาย พลังงานส่วนหนึ่งของเลเซอร์ถูกสะท้อนกลับการสะท้อนกลับของแสงสามารถแสดงได้ด้วยค่า Reflectance โลหะเงินมีค่า Reflectance สูงถึง 99% [Bennett and Ashley, 1965 และ Togaya, 1999] ดังนั้นพลังงานส่วนใหญ่ของเลเซอร์ได้ถูกสะท้อนไม่ได้ถูกดูดกลืนและนำไปใช้ในการหลอมละลาย ประกอบกับถ้าชิ้นงานมีความเงามันลำแสงเลเซอร์จะเกิดการกระเจิง (Scattering) ออกจากเป้าหมายมากขึ้น ก็ทำให้ชิ้นงานได้รับพลังงานจากเลเซอร์น้อยลงไปอีก ดังนั้นเพื่อลดพลังงานที่จำเป็นในการเชื่อม ก็คือการลดการสะท้อน เช่นการทาสีดำ หรือสีเข้ม หรือใช้ประโยชน์ตากเขม่า (Surface oxidation) ที่เกิดจากการเชื่อม ส่วนสแตนเลสมีค่า Reflectance ที่ต่ำกว่าโลหะเงิน [<http://en.wikipedia.org/wiki/Reflectivity>] การเชื่อมสแตนเลสจึงต้องการพลังงานจากเลเซอร์ที่น้อยกว่าโลหะเงิน อย่างไรก็ตามการดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ที่ชิ้นงานมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเป็นการเชื่อมเป็นคีย์โฮโมมอดจึงจะกล่าวต่อไป

พลังงานของเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนที่โลหะเป้าหมาย จะถูกนำไปทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะและการฟอร์มตัวของกลุ่มแก๊ส (Gaseous) เหนือชิ้นงานที่เรียกว่าพลาสมา (Plasma) ดังรูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์นี้ไม่เป็นสิ่งที่ปรารถนาของการเชื่อม [Wang, 1995] เนื่องจากไปทำให้เกิดการลดขนาดของพลังงานที่ตกกระทบโลหะเป้าหมาย อีกทั้งพลาสมาและกลุ่มแก๊สในบรรยากาศทำปฏิกิริยากับโลหะในระหว่างขบวนการเชื่อม ซึ่งอาจเกิดการแทรกตัวเข้าไปยังเนื้อโลหะหลอมละลาย เมื่อโลหะเกิดการเย็นตัว อาจมีฟองอากาศภายในรอยเชื่อม ทำให้รอยเชื่อมไม่แข็งแรง หรือไม่สวยงาม ส่วนของพลังของเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนที่โลหะเป้าหมายจะถูกใช้ในการทำให้โลหะละลาย ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณหลอมละลาย (Liquid Zone) ส่วนพลังงานที่มีขนาดไม่สูงเพียงพอที่จะทำการละลายโลหะได้ ก็จะเปลี่ยนสภาพเป็นพลังงานความร้อนและกระจายไปยังบริเวณใกล้เคียงทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะห่างจากจุดที่เลเซอร์ตกกระทบ เมื่อบริเวณหลอมละลายเย็นตัวลงจะปรากฏรอยเชื่อม



รูปที่ 2.1. รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะ หลังจากที่ถูกเลเซอร์ตกกระทบ [Faerber et al., 2003]

ภายหลังจากที่เลเซอร์ถูกดูดกลืนที่เป้าหมายเกิดขบวนการเชื่อมที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง สามารถอธิบายได้ดังนี้ โลหะจะรับพลังงานจากเลเซอร์ผ่านขบวนการคับปิ้ง (Coupling process) ดังรูปที่ 2.2 โลหะได้รับการถ่ายเทพลังงานจากเลเซอร์ทำให้พลังงานที่โลหะสูงขึ้น เมื่อโลหะได้รับพลังงานถึงจุดหลอมละลายของโลหะ นำไปสู่ขบวนการหลอมละลาย (Melting process) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวของโลหะ ส่วนพลังงานที่เหลือและไม่เพียงพอต่อการหลอมโลหะเปลี่ยนสภาพเป็นพลังงานความร้อนและถูกถ่ายเทไปยังบริเวณใกล้เคียงกับรอยเชื่อม เมื่อพลังงานของเลเซอร์ได้สิ้นสุดลง โลหะจะเกิดการเย็นตัวและเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็ง (Solidification) ผ่านขบวนการเย็นตัว (Cooling process) ทำให้เกิดการเชื่อมของเนื้อโลหะเข้าด้วยกัน



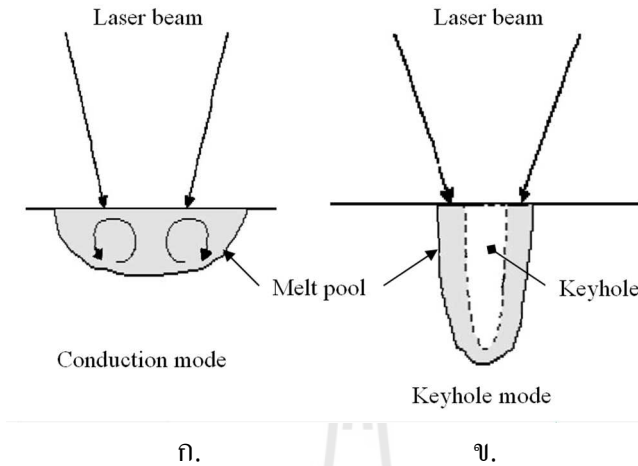
รูปที่ 2.2 ขบวนการเชื่อมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงาน (Power) และเวลา

ตัวแปรของเลเซอร์ (Laser parameters) เกี่ยวเนื่องโดยตรงต่อขบวนการเชื่อม ในเรื่องระดับความหนาแน่นของพลังงานที่สัมพันธ์กับเวลาคือ กำลังของพัลส์ (Power) และขนาดของเลเซอร์ (Laser spot size) กำลังของพัลส์ที่มีค่าสูงหรือขนาดของเลเซอร์ที่มีขนาดเล็กก็จะให้ความหนาแน่นของพลังงานที่มากกว่า ทำให้ระดับพลังงานที่ส่งผ่านไปยังขบวนการคืบปิ้งมีค่าสูง ซึ่งงานเข้าสู่เกิดการหลอมละลาย เมื่ออุณหภูมิของรอยเชื่อมมีค่าสูงเกินกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย (Melting temperature) จากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะกระจายไปยังรอบๆ รอยเชื่อมของโลหะด้วยคุณสมบัติการนำความร้อน (Thermal conductivity) และเวลาที่เลเซอร์ให้พลังงานกับชิ้นงาน นั่นคือเวลาของพัลส์ จากนั้นโลหะจะเข้าสู่ขบวนการเย็นตัว เมื่อพัลส์ของเลเซอร์หยุดลง ความหนาแน่นของพลังงาน เวลาพัลส์ และคุณสมบัติของโลหะจะมีผลโดยตรงต่อรอยเชื่อมที่ได้ โลหะแต่ละชนิดมีการตอบสนองต่อเลเซอร์ที่แตกต่างกันเป็นไปตามค่า Reflectance อีกทั้งคุณลักษณะทางโลหะที่แตกต่างกัน อาทิการนำความร้อนที่แตกต่างกัน ทำให้การกระจายพลังงานในรูปความร้อนไปยังบริเวณใกล้เคียงต่างกัน การตอบสนองของพลังงานที่ได้รับกับการเก็บพลังงานไปใช้ในการหลอมละลายในรูป Thermal diffusivity และอุณหภูมิหลอมละลายทำให้การเชื่อมโลหะต่างชนิดมีความซับซ้อน ขนาดรอยเชื่อมและความลึกที่ไม่เท่ากัน

2.2 โหมดการเชื่อม (Welding mode)

รอยเชื่อมที่ได้มี 2 ลักษณะกล่าวคือ คอนดักชันโหมด (Conduction mode) และ คีย์โฮลโหมด (Keyhole mode) คอนดักชันโหมดเกิดจากระดับความหนาแน่นของพลังงานเลเซอร์ที่ชิ้นงานต่ำ เนื่องจากพลังงานเลเซอร์มีค่าน้อยหรือพลังงานส่วนใหญ่ของเลเซอร์ถูกสะท้อนกลับ ทำให้ได้รอยเชื่อมเป็นรูปเสมือนถ้วย (Bowl-shape) ความลึกของรอยเชื่อมตื้น (Shallow) ดังรูปที่ 2.3 โดยทั่วไปเลเซอร์มีการกระจายของพลังงานในรูปแบบเกาส์เซียน (Gaussian beam profile) โดยบริเวณตรงกลางของลำแสงมีระดับพลังงานสูงสุด และส่วนที่ขอบของลำแสงทั้งสองข้างมีระดับพลังงานต่ำกว่า เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเป้าหมาย

โลหะ พลังงานลำแสงจะถูกดูดกลืนบริเวณผิวโลหะ และเมื่อพลังงานมีขนาดเพียงพอในการหลอมละลายโลหะ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจากโลหะเป็นของเหลวในบ่อหลอมละลาย (Melt pool) สำหรับระดับพลังงานบริเวณขอบของลำแสงที่ไม่เพียงพอต่อการหลอมละลายของโลหะก็จะถูกถ่ายเทไปยังด้านข้างของบ่อหลอม



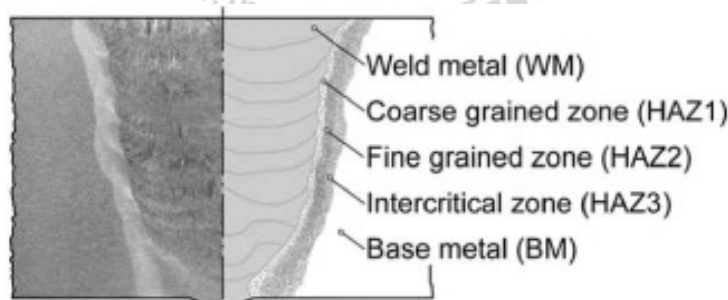
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมในแนวตัดขวาง ก. คอนดัคชัน โหมด (Conduction mode) และ ข. คีย์โฮล์โหมด (Keyhole mode) [Duley, 1998]

ละลายในรูปของความร้อน ผลของการกระจายของพลังงานดังกล่าวทำให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อทิศทางของปรากฏการณ์การละลาย (Melting dynamic) ของโลหะภายในบ่อหลอมละลาย ผลของแรงตึงผิว (Surface tension) ทำให้เกิดแรงดึงออกจากบริเวณตรงกลางบ่อหลอมละลาย อีกทั้งมีแรงดันจากข้างล่างของบ่อหลอมละลาย เนื่องจากข้างล่างมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าด้านบนที่ได้รับพลังงานมากกว่าจากลำแสงเลเซอร์ เป็นผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม (Weld diameter) ด้านบนที่ได้มีขนาดกว้าง และระดับความลึก (Weld penetration) ของรอยเชื่อมที่ตื้น เมื่อระดับความหนาแน่นของพลังงานของลำแสงเลเซอร์มีค่าสูงขึ้น ระดับพลังงานที่สูงถึง $10^4 \text{ Watt.mm}^{-2}$ ทำให้โลหะที่ผิวหน้าเกิดการกลายเป็นไอ (vaporize) เรียกว่า plume และไอนี้ถูกไอออไนซ์ (Ionize) กลายเป็นกลุ่มแก๊สพลาสมา (Plasma formation) เป็นผลทำให้เกิดรู (Hole) ที่บ่อหลอมละลาย พลังงานของเลเซอร์จึงสามารถถูกดูดกลืนที่ด้านล่างของผิวหน้าโลหะได้ จากนั้นพลังงานถูกสะท้อนและหักเหไปภายในรูหลอมละลาย เป็นผลให้อัตราการดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ที่บ่อหลอมละลายเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และทำให้ได้อัตราส่วนความลึกของรอยเชื่อมต่อพลังงานที่สูงขึ้น [Duley, 1998 และ Messler, 1999] รอยเชื่อมที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมเท่ากับขนาดของลำแสงเลเซอร์โดยประมาณ [Ponpitak, 2009] เรียกโหมดการเชื่อมนี้ว่าคีย์โฮล์

2.2.1 การเกิดตามคหรือรูพรุน (Porosity) ระหว่างขบวนการเย็นตัวของการเชื่อม แก๊สที่แทรกตัวเข้าไปยัง Liquid metal กลายสภาพเป็นฟองอากาศ (Bubbles) ฟองอากาศพยายามลอยตัวออกจากบ่อหลอมละลาย ตามทิศทางของแรงดึงดูด อาทิต ผลของแรงดึงดูดผิวมีแรงดึงไปยังด้านข้างและด้านล่างของรอยเชื่อม ฟองอากาศไม่สามารถหลุดออกมาได้ทันก่อนที่เนื้อโลหะและรอยเชื่อมเกิดการประสานระหว่างขบวนการเย็นตัว ทำให้เนื้อโลหะที่รอยประสานมีจำนวนน้อยเนื่องจากผลของการแทรกตัวของฟองอากาศ ซึ่งเป็นผลให้ความแข็งแรง และความคงทนที่ได้จากการเชื่อมลดลง การเกิดฟองอากาศภายในรอยเชื่อม นับว่าเป็นผลกระทบเนื่องจากชนิดของโลหะ ระดับพลังงาน และรูปลักษณะของพลังงานสัมพันธ์กับเวลา ระหว่างขบวนการคัปปีงและเย็นตัว ในระหว่างที่มีการคัปปีงของพลังงานไปยังเนื้อโลหะ และพลังงานมีอัตราการเพิ่มอย่างรวดเร็วก็เป็นผลต่อการเพิ่มอัตราการถูกกักของฟองอากาศเช่นกัน

2.2.2 การกระจายของโลหะ (Spatter) ระหว่างขบวนการหลอมละลายของโลหะ บ่อหลอมละลายได้รับพลังงานจากเลเซอร์เป็นปริมาณมากและรวดเร็ว ทำให้เกิดการกระเด็นของโลหะออกจากบ่อหลอมละลาย รอยเชื่อมเป็นหลุม โลหะหายไปจากรอยเชื่อมด้านบนหรือด้านล่างเรียกลักษณะนี้ว่า Underfill หรือเมื่อโลหะที่กระเด็นและแข็งตัวที่ขอบรอยเชื่อมด้านบนหรือบริเวณใกล้เคียงมีเศษเรียกว่า Spatter [Kaplan, 2011]

2.2.3 บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) คือบริเวณที่อยู่ห่างจากบ่อหลอมละลาย เมื่อพลังงานที่ได้รับไม่เพียงพอต่อการหลอมละลาย แต่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของโลหะในรูปของ grain แต่เนื่องด้วยเลเซอร์มีขนาดลำแสงที่เล็กและพลังงานเลเซอร์กระจุกตัวภายในพัลส์ขนาดมิลลิเมตรและมิลลิวินาที ทำให้การกระจายความร้อนจากบ่อหลอมละลายไปยังบริเวณใกล้เคียงจำกัด ดังนั้นบริเวณกระทบร้อนจึงมีขนาดเล็ก [Ion, 2005]



รูปที่ 2.4 แสดงบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณกระทบร้อน [Kou, 2003]

2.3 คุณสมบัติของวัสดุเงินและสแตนเลส 304 (Properties of silver and AISI 304

material)

คุณสมบัติโดยทั่วไปของโลหะทั้งสองแสดงดังตาราง 2.1 ถึงแม้ว่าโลหะเงินมีค่าอุณหภูมิการหลอมละลาย (Melting temperature) ที่น้อยกว่าโลหะผสมสแตนเลส แต่โลหะเงินมีการสะท้อน Reflectance สูงถึง 98% ส่วนสแตนเลสมีค่า 95% ทำให้โลหะสแตนเลสรับพลังงานจากลำแสงเลเซอร์ได้ดีกว่า สแตนเลสมีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่ำกว่าโลหะเงินทำให้พลังงานตกกระทบไม่กระจายความร้อนไปบริเวณใกล้เคียงด้วยความรวดเร็วเหมือนโลหะเงิน ความหนาแน่นของพลังงานที่ขึ้นงานไม่ลดลงไปกับการกระจายพลังงานเท่ากับโลหะเงิน อีกทั้งมีค่า Thermal diffusivity ต่ำ ทำให้สแตนเลสเก็บพลังงานที่ตกกระทบที่เนื้อโลหะได้ดี พลังงานความร้อนกระจุกตัวอยู่ในบริเวณแคบ ถึงแม้ว่าโลหะสแตนเลสจะมีค่าการหลอมละลายที่สูงกว่า แต่ใช้พลังงานในการเชื่อมที่น้อยกว่า

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติโดยทั่วไปของเงินและสแตนเลส 304 [Togaya, 1999, Bennett และ Ashley, 1965 <http://en.wikipedia.org/wiki/Reflectivity>, Wright, 2002 และ Steen, 2003]

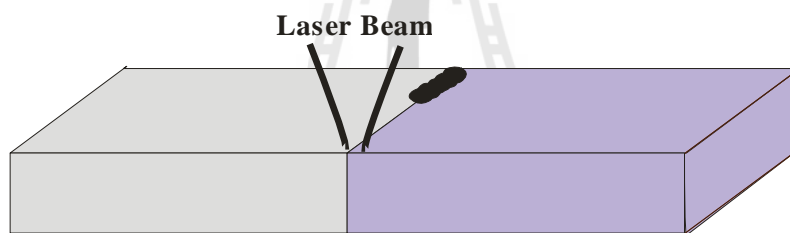
โลหะ	Density g/cm ³	Melting Temperature (degree C)	Thermal conductivity W/(m. K)	Thermal diffusivity mm ² . s ⁻¹	ค่า Reflectance At 1000 nm
เงิน Ag	10.5	880-960	361	174	99%
AISI 304	8	1400-1455	16.2	4	95%

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมการทดลอง

ในการทดลองการเชื่อมวัสดุสแตนเลสและเงินด้วยเลเซอร์ ได้ใช้วัสดุเงินทำการหล่อโดยใช้เนื้อเงินบริสุทธิ์ 92.5% ทองเหลือง 3.75% ทองแดง 3.75% จากนั้นทำการรีดชิ้นงานให้เป็นแผ่นที่มีความหนา 1 มม. ส่วนวัสดุสแตนเลส 304 ที่จัดหาจากท้องตลาด ชิ้นงานได้ถูกนำมาตัดด้วยใบมีดเพชร ความหนาของใบตัด 0.4 มม. ยี่ห้อ Struers มีขนาดความกว้าง 10 มม. และยาวประมาณ 10 – 15 มม. หลังจากนั้นนำมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 เพื่อให้ได้ความหนา 1 มม. จากนั้นทำการตัดชิ้นงานเป็นสองชิ้น ก่อนจะนำชิ้นงานไปเชื่อม ชิ้นงานได้ผ่านการกำจัดคราบน้ำมัน และทำความสะอาดด้วยอะซิโตน จากนั้นโลหะสองชนิดจะนำมาเชื่อมต่อในลักษณะของ Butt joint เพื่อเป็นการจัดวางชิ้นงานที่จะเชื่อมให้มีรอยต่อน้อยกว่า 20 ไมครอน ชิ้นงานทำการเชื่อมที่ปลายด้านหนึ่ง แสดงดังรูป 3.1 ชิ้นงานได้ทำการวัดและตรวจสอบด้วยกล้อง Dino-lite กำลังขยายสูงสุด 90 ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.1 การเชื่อมชิ้นงานในลักษณะ Butt joint เพื่อกำหนดระยะช่องว่างของชิ้นงานทั้งสอง



รูปที่ 3.2 กล้องDino-lite ที่ใช้ในการทดลอง

3.2 การดำเนินการทดลอง

การทดลองการเชื่อมด้วยเลเซอร์นีโอติเมียมแอนด์เลเซอร์ ให้พลังงานแบบพัลส์สูงสุด 150 จูล รุ่น LW6V ยี่ห้อ Z-tech advanced Technology ผลิตภัณฑ์ประเทศอเมริกา ได้ถูกนำมาใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.3 พลังงานของเลเซอร์ถูกใช้ที่ 2.0, 3.0 และ 3.5 กิโลวัตต์ ขนาดลำแสงที่ 0.2 มม. และ 0.6 มม. เวลาของพัลส์ที่ 1.5, 2.5 และ 3.5 มิลลิวินาที ลักษณะของพัลส์เป็นรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.3 เครื่อง Nd: YAG เลเซอร์ยี่ห้อ Z-Tech advanced technology

3.3 การแสดงผลการทดลอง

การแสดงผลของการเชื่อมด้วยนีโอติเมียมแอนด์เลเซอร์แบบพัลส์ หลังจากที่ยืนยันงานได้ผ่านการเชื่อม ด้วยค่าตัวแปรเลเซอร์ค่าต่างๆ ผลการทดลองจะใช้กล้อง Dino-lite microscope แสดงภาพทั่วของการเชื่อม เครื่อง SEM ใช้ดูรายละเอียดรอยเชื่อมทั่วไป ส่วนกล้อง Carl Zeiss optical microscope รุ่น Axio Imager.A1M ที่มีกำลังขยายสูงสุด 500 เท่าใช้เพื่อดูบริเวณกระทบร้อนในส่วนของภาพแนวตัด (Cross section) แสดงดังรูป 3.4 แต่ก่อนที่ยืนยันงานที่ผ่านตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยกล้องกำลังขยายสูง ยืนยันงานจะต้องถูกนำไปติดตั้งในแนวตัดขวาง cross section ด้วยเรซิน ดินน้ำมันทำการยึดชิ้นงานและแผ่นพลาสติกที่ถูกม้วน ดินน้ำมันและถาดด้านล่างทำการกั้นบริเวณเรซินไม่ให้ไหลออกจากพิมพ์ ใช้เรซิน 200 มิลลิลิตร และสารทำให้แข็งตัว 10 มิลลิลิตรผสมกันและเทลงไปยังพิมพ์ที่เตรียมไว้ หลังจากเวลาประมาณ 6 ชั่วโมงเป็นอย่างต่ำ เรซินจะแห้งอย่างสมบูรณ์จึงสามารถแกะพิมพ์ดินน้ำมันออกได้ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 กล้อง Carl Zeiss optical microscope รุ่น Axio Imager.A1M ที่มีกำลังขยายสูง



ก.



ข.

รูปที่ 3.5 แสดง ก. เรซินและสารทำให้แข็งตัว และ ข. ชิ้นงานถูกยึดด้วยเรซิน

ชิ้นงานที่ถูกยึดด้วยเรซินจะถูกขัดไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมในแนวตัดขวาง ในการขัดส่วนของชิ้นงานและรอยเชื่อมจะกระทำด้วยกระดาษทรายที่ความละเอียดต่างๆ กัน เริ่มด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบมากที่สุดเบอร์ 180 จะทำการกำจัดเรซิน ส่วนของรอยเชื่อมและโลหะที่ไม่ต้องการ จากนั้นก็ด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด กระทำให้รอยขัดมีความเรียบขึ้น โดยใช้เบอร์ 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 1600 ตามลำดับ ขั้นตอนสุดท้ายผงอะลูมินาขนาด 0.05 ไมครอนทำการขัดผิวงานให้มีความเงาเหมือนกระจก ก่อนที่จะมีการสังเกตรอยเชื่อมในเชิงลึกด้วย Optical microscope กำลังขยายสูง ขบวนการตรวจสอบทางโลหะวิทยา (Metallographic examination) กระทำโดยนำวัสดุไปกัดกรดด้วย สารละลาย ที่ประกอบไปด้วยสาร iron (III) คลอไรด์ 1 กรัม และน้ำกลั่น (Distilled water) 1 มล. โดยใช้เวลากัดประมาณ 1 นาที [Petzow, 1999] จากนั้นโลหะผ่านการทำความสะอาดอีกครั้งเพื่อกำจัดน้ำมัน คราบน้ำมัน ด้วยอะซิโตน

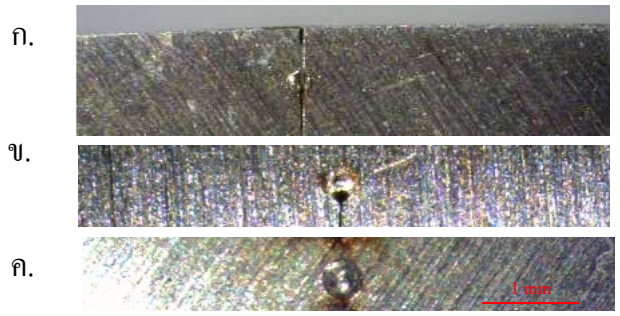
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การทดลองการเชื่อม โลหะเงิน และ สแตนเลส ได้กระทำที่ตัวแปรเลเซอร์ค่าต่างๆ เริ่มจากการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันเข้าด้วยกันโดยเลเซอร์ตกกระทบที่บริเวณรอยต่อ จากนั้นทำการเปรียบเทียบรอยเชื่อมที่ได้กับการเชื่อมของวัสดุเงินและสแตนเลส เมื่อเลเซอร์ตกกระทบที่บริเวณรอยต่อและห่างจากตรงกลางรอยต่อ ผลการทดลองแสดงโดยกล้อง Dino-lite กำลังขยาย 90 เท่า และเครื่อง SEM และเพื่อศึกษาคุณลักษณะของรอยเชื่อมโดยละเอียดและผลกระทบจากความร้อน (HAZ, Heat affected zone) ซึ่งงานถูกนำไปจัดด้วยกระดาษทรายและใช้สารเคมีกัดกร่อนและนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องกำลังขยายสูง 500 เท่า ภายหลัง

4.1.1 การเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกัน การเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันโดยใช้ กำลังเลเซอร์ 2.5 3.0 และ 3.5 กิโลวัตต์โดยขนาดเลเซอร์ 0.2 มม. และเวลาพัลส์คงที่มีค่า 2.5 มิลลิวินาที รูปรอยเชื่อมด้านบนแสดงผลดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากวัสดุเงินมีค่าการสะท้อนสูงถึง 99% แสดงดังตารางที่ 2.1 ทำให้พลังงานเลเซอร์ที่ถูกนำไปใช้ในการเชื่อมมีเพียง 1% ประกอบกับวัสดุเงินมีค่าการนำความร้อนสูง เป็นผลให้พลังงานเลเซอร์ที่ตกกระทบที่ชิ้นงาน มีการแผ่กระจายไปยังบริเวณใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว ทำให้พลังงานที่ชิ้นงานเหลือน้อยและไม่เพียงพอต่อการหลอมละลายของโลหะเงิน ดังนั้นจะเห็นว่าที่ กำลังเลเซอร์ 2.5 กิโลวัตต์ ชิ้นงานไม่เกิดการเชื่อมที่ชิ้นงาน และเมื่อกำลังเลเซอร์เพิ่มเป็น 3.0 กิโลวัตต์ โลหะเงินยังไม่เกิดรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามวัสดุ สแตนเลสใช้พลังงานเลเซอร์ที่น้อยกว่าในการเชื่อม เนื่องจากมีค่าการสะท้อนที่ต่ำกว่า ทำให้พลังงานเลเซอร์ที่ตกกระทบถูกดูดกลืนที่สแตนเลสได้มากกว่า และค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุเงิน ทำให้พลังงานความร้อนบนวัสดุสแตนเลสไม่กระจายไปยังบริเวณใกล้เคียงมากและรวดเร็วเหมือนวัสดุเงิน Thermal diffusivity มีน้อยกว่าวัสดุเงินมาก คือมีค่าประมาณ 1 ใน 40 ของค่าวัสดุเงิน ทำให้พลังงานที่ถูกดูดกลืนและนำไปใช้ในการหลอมละลายจำกัดอยู่ที่บริเวณแคบ ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานที่สแตนเลสมีค่าสูง ทำให้วัสดุสแตนเลสใช้พลังงานเลเซอร์ที่ต่ำกว่า ถึงแม้ว่าค่าอุณหภูมิการหลอมละลายของโลหะสแตนเลสสูงถึง 1400 องศาเซลเซียส ขณะที่วัสดุเงินมีค่า 900 องศาเซลเซียส ที่กำลังเลเซอร์ 2.0 กิโลวัตต์ วัสดุให้การเชื่อมที่สมบูรณ์ในโหมคคอนคักชั่น ดังรูป 4.2 ก. และเมื่อเพิ่มกำลังเลเซอร์เป็น 3.5 กิโลวัตต์ได้รอยเชื่อมที่ลึกขึ้นเป็นรูปคีย์โฮ และมีความกว้างรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย มีการกระจายของโลหะ (Spatter) หลอมละลายออกจากรอยเชื่อม เป็นการแสดงว่าบ่อหลอมละลายได้รับพลังงานในปริมาณสูงและจับปล้น เนื่องจากรูปพัลส์เป็นรูปสี่เหลี่ยม การคับบั้งหรือถ่ายทอดพลังงานจากเลเซอร์ไปยังวัสดุสแตนเลสต่อเวลา มีการเปลี่ยนแปลงสภาพจากของแข็งเป็นของเหลวเป็นไปอย่างจับปล้น จึงเกิดการกระจายของโลหะ ปรากฏเศษโลหะที่ขอบรอยเชื่อม

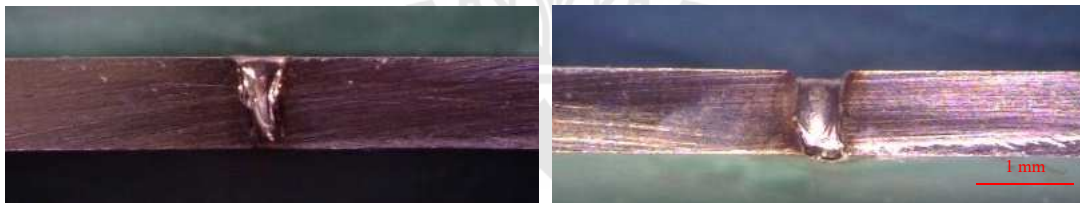


รูปที่ 4.1 แสดงผลการเชื่อมวัสดุเงินเข้าด้วยกันที่ กำลังเลเซอร์ ก. 2.5 ข. 3.0 และ ค. 3.5 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.2 แสดงรอยเชื่อมด้านบนและด้านข้างของวัสดุสแตนเลสที่กำลังเลเซอร์ ก. 2.0 และ ข. 3.5 กิโลวัตต์

เมื่อทำการเพิ่มเวลาเลเซอร์พัลส์ที่ตกกระทบโลหะสแตนเลสจาก 1.5 เป็น 3.5 มิลลิวินาที โดยกำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์และขนาดลำแสงเลเซอร์ 0.2 มม. มีขนาดเท่าเดิม เวลาพัลส์ที่มีการเพิ่มจาก 1.5 มิลลิวินาทีเป็น 3.5 มิลลิวินาทีแสดงดังรูป 4.3 การเพิ่มเวลาที่เลเซอร์ตกกระทบชิ้นงานเป็นการเพิ่มเวลาให้กับขบวนการหลอมละลาย ทำให้พลังงานงานความร้อนมีการนำไปใช้ในการหลอมละลายโลหะเป็นเวลานานขึ้น และการสะสมของพลังงานที่มีปริมาณมากขึ้น ในทางทฤษฎีรอยเชื่อมควรมีค่าลึกและกว้างขึ้น แต่เนื่องจากสแตนเลสมีค่าคุณสมบัติการนำความร้อนและค่า Thermal diffusivity ที่ต่ำ พลังงานความร้อนจากจุดกระทบถูกจำกัดในพื้นที่แคบ และไม่ได้กระจายออกไปบริเวณใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว การเพิ่มระยะเวลาของพัลส์จึงเป็นการเพิ่มขนาดรอยเชื่อมให้กว้างขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 0.5 มม.เป็น 0.6 มม. ส่วนความลึกที่มากขึ้นเป็นผลจาก เมื่อโลหะมีการหลอมละลายและมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้การดูดกลืนพลังงานมีค่ามากขึ้น การเพิ่มเวลาให้กับขบวนการหลอมละลายจึงเป็นผลให้ได้รอยเชื่อมที่รูปคีย์โฮตดังรูป 4.3 ข. เมื่อเวลาพัลส์เพิ่มเป็น 3.5 มิลลิวินาที บ่อหลอมละลายสูญเสียของเนื้อโลหะที่ส่วนบน เนื่องจากผลของความหนาแน่นของพลังงานที่สูง เมื่อกำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์และเวลาพัลส์ 2.5 มิลลิวินาทีมีค่าเท่าเดิม การลดขนาดลำแสงเลเซอร์จาก 0.6 เป็น 0.2 มม. ทำให้ความหนาแน่นพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ได้รอยเชื่อมที่ลึกขึ้น ความกว้างของรอยเชื่อมลดลงที่รอยเชื่อมมีลักษณะของคีย์โฮตที่เด่นชัดขึ้น แสดงดังรูป 4.4



ก.

ข.

รูปที่ 4.3 แสดงรอยเชื่อมด้านข้างของวัสดุสแตนเลสที่เวลาเลเซอร์พัลส์ ก. 1.5 และ ข. 3.5 มิลลิวินาที



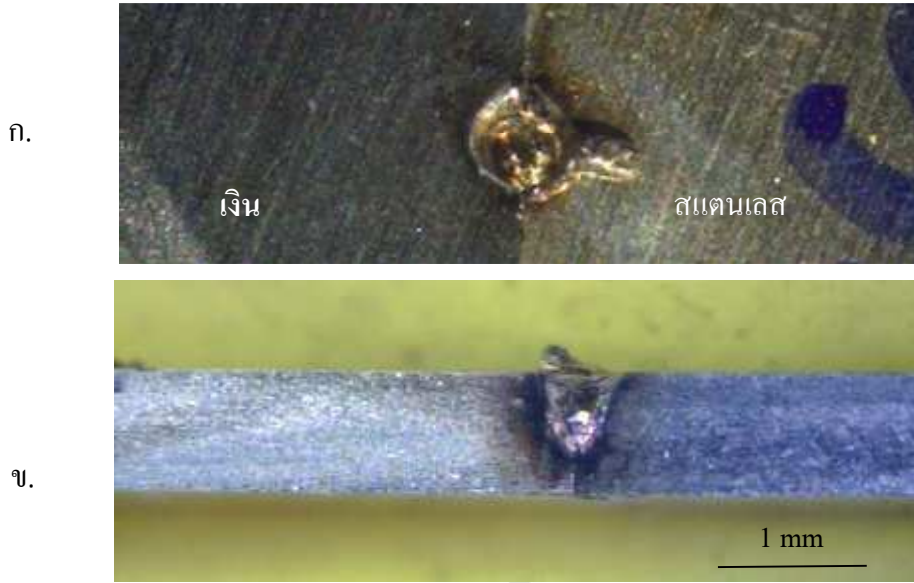
ก.

ข.

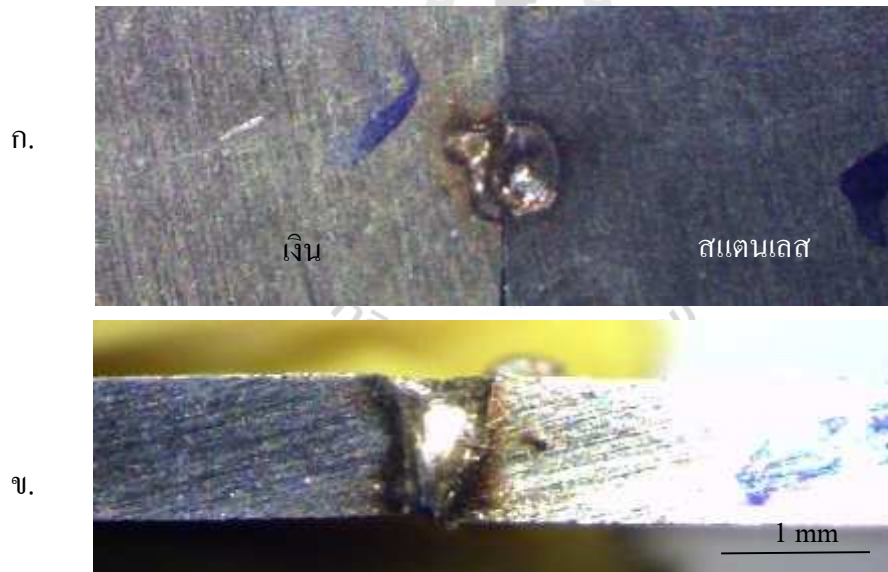
รูปที่ 4.4 แสดงรอยเชื่อมด้านข้างของวัสดุสแตนเลสที่ขนาดลำแสงเลเซอร์ ก. 0.6 มม. และ ข. 0.2 มม.

4.1.2 การเชื่อมวัสดุเงินและสแตนเลส ที่กำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์ขนาดเลเซอร์ 0.2 มม. และเวลาพัลส์ 2.5 มิลลิวินาที โลหะเงินทางด้านซ้ายมือ และสแตนเลสทางด้านขวามือ เกิดรอยเชื่อมที่วัสดุทั้งสองชนิด แสดงดังรูป 4.5 ที่ตัวแปรเลเซอร์ค่านี้ในการเชื่อมโลหะเงินเข้าด้วยกัน ไม่เกิดการหลอมละลายที่สมบูรณ์ (แสดงดังรูป 4.1) และรอยเชื่อมการเชื่อมโลหะสแตนเลสเข้าด้วยกัน ได้รอยเชื่อมในโหมดคีย์โฮ (แสดงดังรูป 4.4 ข.) เมื่อพิจารณาการเชื่อมของวัสดุและสแตนเลสเข้าด้วยกันดังรูปที่ 4.5 ข. พบว่าได้รอยเชื่อมเป็นรูปถ้วยด้านสแตนเลส ส่วนด้านวัสดุเงินมีการละลายที่จำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมระหว่างวัสดุเงินเพียงอย่างเดียวดังรูป 4.1 พบว่ารอยเชื่อมโลหะมีการเชื่อมที่ลึกกว่า ส่วนการเชื่อมวัสดุเงินและสแตนเลสสำหรับรอยเชื่อมด้านสแตนเลสที่ตื้นกว่า การเชื่อมโลหะสแตนเลสเข้าด้วยกัน เนื่องจากพลังงานเลเซอร์ในรูปแบบก๊าซเฉื่อย ได้ถูกแบ่งครึ่งให้พลังงานแก่วัสดุเงินและสแตนเลส โดยโลหะทั้งสองมีการตอบสนองต่อพลังงานเลเซอร์ที่แตกต่างกัน ประกอบกับการกระจายพลังงานและการหลอมละลายบนโลหะที่แตกต่างกัน ทำให้ได้รอยเชื่อมแตกต่างจากการเชื่อมโลหะชนิดเดียว ความหนาแน่นของพลังงานที่วัสดุสแตนเลสมีค่าลดลง ทำให้รอยเชื่อมที่ตื้นลงและโหมดการเชื่อมเปลี่ยนจากคีย์โฮเป็นคอนดักชันโหมด วัสดุด้านสแตนเลสมีระดับพลังงานที่เพียงพอในการหลอมละลาย เนื่องจากค่าพลังงานเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมีค่าน้อย พลังงานอยู่ที่บ่อหลอมละลายนานกว่า จำกัดอยู่ในบริเวณแคบ และการกระจายพลังงานความร้อนที่น้อยกว่า นอกจากนี้การหลอมละลายที่วัสดุสแตนเลสทำให้เกิดเขม่าที่ชิ้นงานเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เขม่าที่ผิวหน้าช่วยให้การดูดกลืนพลังงานที่วัสดุเงินมากขึ้น ค่าอุณหภูมิใช้ในการหลอมละลายที่ต่ำ วัสดุเงินจึงเกิดการหลอมละลายได้ ประกอบกับเวลาพัลส์ที่ยาวเพียงพอ การกระจายความร้อนจากตำแหน่งที่เลเซอร์ตกกระทบไปยังบริเวณใกล้เคียง ช่วยให้การหลอมละลายของวัสดุเงินดีขึ้น จนเกิดการกระจายของโลหะที่ขอบรอยเชื่อมดังรูป 4.5 ข.

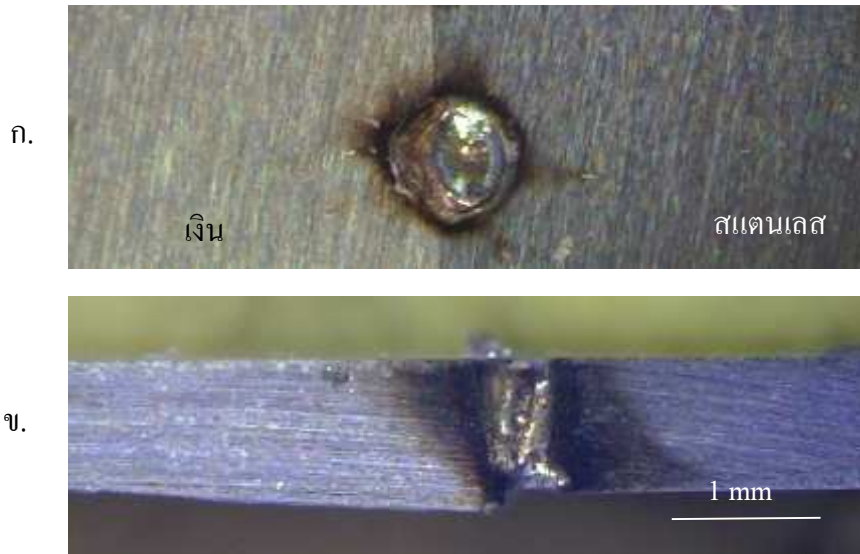
เมื่อเลื่อนตำแหน่งเลเซอร์ตกกระทบที่รอยต่อของโลหะทั้งสองไปยังฝั่งโลหะสแตนเลส (ด้านขวามือ) แสดงรูปที่ 4.6 โดยให้พลังงานงานเลเซอร์ตกกระทบที่โลหะสแตนเลส 75% โดยประมาณ และให้ตัวแปรเลเซอร์มีค่าเท่ากับให้เลเซอร์ตกกระทบที่กลางรอยต่อดังรูป 4.5 กำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์ขนาดเลเซอร์ 0.2 มม. และเวลาพัลส์ 2.5 มิลลิวินาที พบว่ารอยเชื่อมมีคุณภาพที่ดีขึ้น กล่าวคือรอยเชื่อมที่กว้างและลึกขึ้นทั้งฝั่งวัสดุสแตนเลสและวัสดุเงิน รอยเชื่อมมีการเปลี่ยนจากคอนดักชันโหมด เป็นลักษณะของคีย์โฮ เนื่องจากคุณสมบัติการดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ของสแตนเลสที่สูงกว่าวัสดุเงิน พลังงานเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนที่วัสดุสแตนเลสมีมากกว่า การกระจายความร้อนไปบริเวณใกล้เคียงที่น้อยกว่า และค่า Thermal diffusivity ต่ำ ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานที่วัสดุสแตนเลสมีค่าสูงกว่าวัสดุเงิน และการที่เลเซอร์ตกกระทบที่วัสดุสแตนเลสห่างจากรอยต่อที่ไม่เกิน 0.05 มม. หรือ 75% ของพลังงานเลเซอร์ตกกระทบที่วัสดุสแตนเลส ช่วยส่งเสริมให้พลังงานเลเซอร์ที่วัสดุสแตนเลสมากขึ้น เป็นผลให้เกิดการละลายที่วัสดุสแตนเลสมากยิ่งขึ้น เมื่อโลหะมีการหลอมละลายค่าการกระจายความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการกระจายพลังงานความร้อนไปยังวัสดุเงินมีค่าสูงขึ้น ประกอบกับพลังงานเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนที่วัสดุเงินมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเขม่าที่เกิดจากการเชื่อมของสแตนเลส เป็นผลให้เกิดการละลายของโลหะเงินที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.5 เลเซอร์ตกระทอบที่รอยต่อกำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์ รอยเชื่อม ก. ด้านบน ข. ด้านข้าง



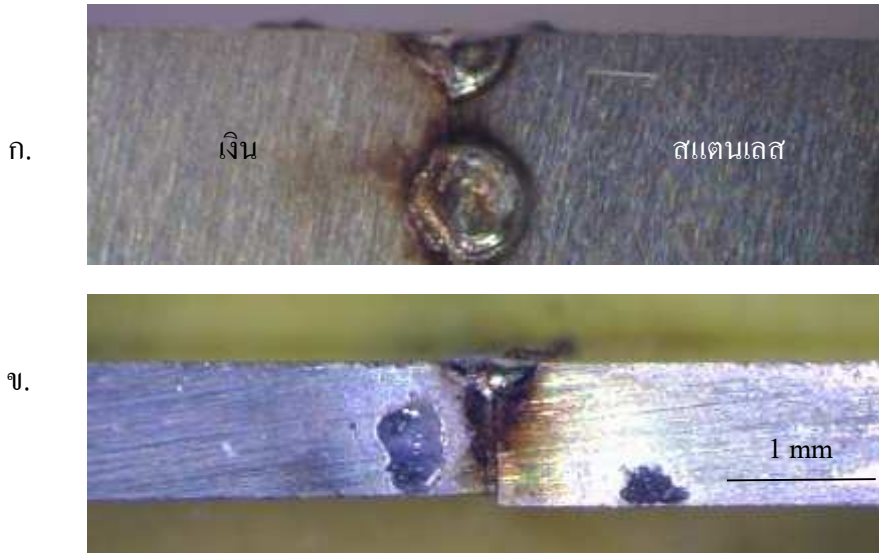
รูปที่ 4.6 เลเซอร์ตกระทอบที่ฝั่งวัสดุสแตนเลสกำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์ รอยเชื่อม ก. ด้านบน ข. ด้านข้าง



รูปที่ 4.7 เลเซอร์ตกระทอบที่ฝังวัสดุสแตนเลสกำลังเลเซอร์ 3.5 กิโลวัตต์ รอยเชื่อม ก. ด้านบน ข. ด้านข้าง

โลหะมีการกระเด็นจากบ่อหลอมละลายด้านวัสดุเงินเนื่องจากวัสดุเงินมีค่า Thermal diffusivity ที่มีค่าสูง ทำให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของพลังงานเลเซอร์ได้ดีกว่าสแตนเลส การคับปิ้งพลังงานไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวเป็นไปอย่างฉับพลัน ดังนั้นจึงเกิดการกระเด็นของโลหะออกจากบ่อหลอมละลายขึ้น ทั้งที่การเชื่อมโลหะเงินเข้าด้วยกันที่ระดับพลังงานค่า 3.0 กิโลวัตต์นี้ ไม่เกิดการกระจายของโลหะแต่อย่างใด แสดงดังรูป 4.1 และเมื่อเพิ่มกำลังเลเซอร์จาก 3.0 เป็น 3.5 กิโลวัตต์ และพลังงานประมาณ 75% ของพลังงานตกระทอบทั้งหมดตกระทอบฝังวัสดุสแตนเลส พลังงานเลเซอร์ที่ตกระทอบที่มากขึ้น ทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีขนาดลึกขึ้นทั้งฝังวัสดุเงินและสแตนเลส อีกทั้งด้านวัสดุเงินมีการกระเด็นของโลหะที่มากขึ้นกว่าเดิม แสดงดังรูป 4.7

เมื่อทำการเลื่อนตำแหน่งที่เลเซอร์ตกระทอบไปยังด้านโลหะเงิน (ด้านซ้ายมือ) ห่างจากรอยต่อไม่เกิน 0.05 มม. หรือพลังงานเลเซอร์ตกระทอบที่วัสดุเงิน 75% โดยตัวแปรเลเซอร์มีค่าเท่าเดิม คือ กำลังเลเซอร์ 3.5 กิโลวัตต์ ขนาดเลเซอร์ 0.2 มม. และเวลาพัลส์ 2.5 มิลลิวินาที แสดงดังรูป 4.8 เนื่องจากการโลหะเงินมีการสะท้อนกลับของพลังงานเลเซอร์ที่มากกว่า จึงมีการดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ที่ตกระทอบน้อยกว่าสแตนเลส การกระจายความร้อนที่มากกว่า และค่า Thermal diffusivity ที่สูง ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานที่ตำแหน่งตกระทอบของวัสดุเงินมีค่าต่ำ ถึงแม้ว่าโลหะเงินจะมีค่าอุณหภูมิหลอมละลายที่ต่ำกว่า การหลอมละลายที่น้อยกว่าของวัสดุเงิน เป็นผลให้ได้รอยเชื่อมที่ตื้นลง และการกระเด็นของโลหะที่น้อยลง ประกอบกับการลำแสงเลเซอร์ตกระทอบฝังวัสดุเงิน คิดเป็น 75% ของพลังงานเลเซอร์ที่ตกระทอบทั้งหมด พลังงานเลเซอร์ที่ตกระทอบส่วนใหญ่นำไปใช้ในการหลอมละลายที่วัสดุเงิน พลังงานเลเซอร์ส่วนน้อยตกระทอบที่ฝังโลหะสแตนเลส การหลอมละลายด้านวัสดุสแตนเลสเกิดน้อยลง จึงไม่สามารถกระจาย

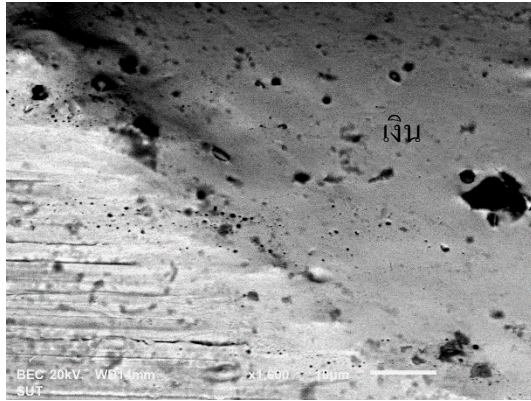


รูปที่ 4.8 เลเซอร์ตกกระทบที่ฝังวัสดุเงินกำลังเลเซอร์ 3.5 กิโลวัตต์ รอยเชื่อม ก. ด้านบน ข. ด้านข้าง

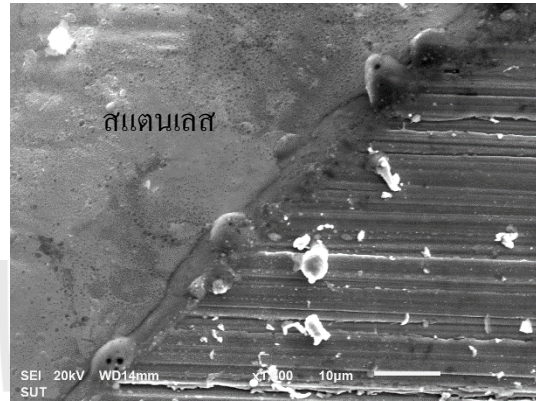
พลังงานไปยังฝังวัสดุเงิน เพื่อเพิ่มการหลอมละลายเหมือนเช่นเคย การเลือนจุดกระทบของเลเซอร์ไปยังฝังวัสดุเงินเป็นการให้การหลอมละลายที่น้อยกว่า จึงเป็นการลดคุณภาพของการเชื่อมลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อชิ้นงานนี้ไปถ่ายรูปโดยใช้เครื่อง SEM รูปที่ 4.9 ก. แสดงรอยเชื่อมฝังโลหะเงินมีฟองอากาศแทรกตัวอยู่เนื่องจากมีค่า Thermal diffusivity ที่สูง การคับบั้งพลังงานเลเซอร์ไปใช้ในการหลอมละลายของโลหะเป็นการตอบสนองที่รวดเร็ว อากาศที่แทรกตัวอยู่ที่บ่อหลอมละลายบริเวณรอยต่อของการเชื่อมไม่สามารถลอยตัวสู่ผิวรอยเชื่อมได้ทันเวลา จึงเกิดฟองอากาศภายในรอยเชื่อมดังกล่าว อีกทั้งรอยต่อของการเชื่อมวัสดุมีความเรียบกว่าวัสดุสแตนเลส เนื่องจากการกระจายความร้อนที่ดีกว่า ฝังวัสดุ สแตนเลสที่มีค่า Thermal diffusivity ต่ำ พลังงานถูกจำกัดอยู่ในบริเวณแคบ ไม่ส่งเสริมให้มีการกระจายของพลังงาน ประกอบกับค่าอุณหภูมิการหลอมละลายที่สูงของวัสดุสแตนเลส ทำให้รอยต่อของการเชื่อมระหว่างรอยเชื่อมและวัสดุสแตนเลสมีความเด่นชัดกว่า แสดงดังรูป 4.9 ข. นอกจากพลังงานเลเซอร์ที่ตกกระทบที่ฝังวัสดุเงินมากกว่า ทำให้รอยเชื่อมของวัสดุเงินและสแตนเลสมีความสมดุล

นำวัสดุไปผ่านชุดกระดาดทราย และการกักกรดเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางโลหะวิทยา อาทิ บริเวณกระทบร้อนโดยใช้กล้องถ่ายภาพกำลังขยายสูง ให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบที่วัสดุสแตนเลสห่างจากรอยต่อของวัสดุไม่เกิน 0.15 มม. พลังงานที่ตกกระทบวัสดุสแตนเลสมีค่าประมาณ 75% ตัวแปลเลเซอร์ขนาดเลเซอร์ 0.6 มม. และเวลาพัลส์ 2.5 มีค่ากำลังเลเซอร์ 2.5 กิโลวัตต์ และ 3.5 กิโลวัตต์ แสดงดังรูปที่ 4.10 เมื่อกำลังเลเซอร์มากขึ้น บริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะคอนซัน โหมดมีความลึกและกว้างมากขึ้น และการกระจายของโลหะ หรือ splatter มีค่าเพิ่มมากขึ้น ที่กำลังเลเซอร์ 3.5 กิโลวัตต์ ใช้กล้องกำลังขยายสูงดูรายละเอียดของการเชื่อมที่รอยต่อ ด้านวัสดุเงินมีฟองอากาศแทรกตัวอยู่อย่างเห็นได้ชัดบริเวณรอยต่อของวัสดุเงินและรอยเชื่อม เนื่องจากอุณหภูมิหลอมละลายที่ต่ำ และค่า Thermal diffusivity ที่สูงของวัสดุเงิน

ส่วนฝั่งวัสดุสแตนเลสไม่มีฟองอากาศ แต่แสดงรอยต่อระหว่างรอยเชื่อมและวัสดุสแตนเลสอย่างชัดเจน เนื่องจากเนื่องจากอุณหภูมิหลอมละลายที่สูง และค่า Thermal diffusivity ที่ต่ำของวัสดุสแตนเลส บริเวณโซนกระทบจากความร้อนมีขนาดเล็กจนสังเกตเห็นไม่ได้



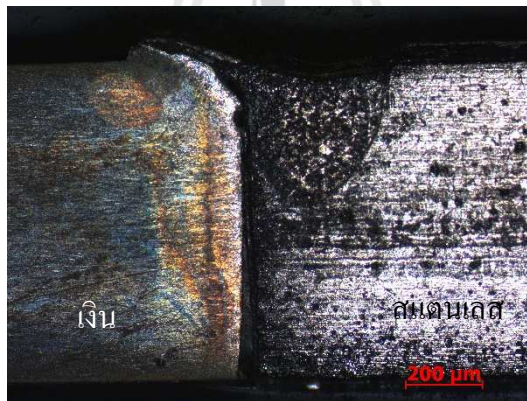
ก.



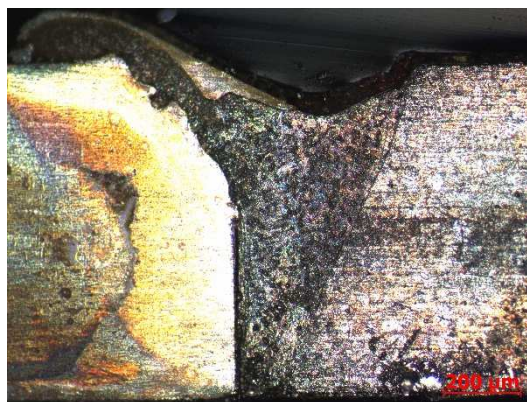
ข.

รูปที่ 4.9 กำลังเลเซอร์ 3.5 กิโลวัตต์ตัดกระทบที่ฝั่งวัสดุเงิน รอยเชื่อม ก. ด้านเงิน ข. ด้านสแตนเลส

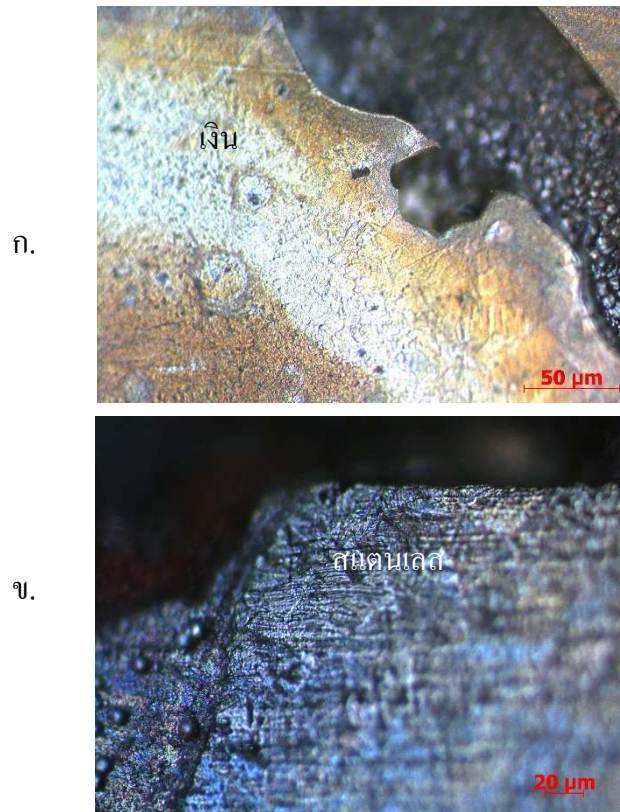
ก.



ข.



รูปที่ 4.10 เลเซอร์ตัดกระทบที่ฝั่งวัสดุสแตนเลส กำลังเลเซอร์ ก. 2.5 กิโลวัตต์ และ ข. 3.5 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายกำลังขยาย 500 เท่าแสดงรอยเชื่อม ก. ด้านเงิน ข. ด้านสแตนเลส



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยการเชื่อมวัสดุเงินและสแตนเลสเข้าด้วยกัน ซึ่งงานผ่านการเชื่อมที่ปลายด้านหนึ่ง เพื่อกำหนดช่องว่างระหว่างรอยต่อให้มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมครอน การทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อกำจัดคราบน้ำมัน หรือสิ่งสกปรกก่อนการเชื่อม เพื่อกำจัดตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้การวิเคราะห์การเชื่อมกระทำได้อย่างเป็นระบบ เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของพลังงานที่วัสดุต่างๆ การทดลองใช้เปลี่ยนตัวแปรเลเซอร์และการเปลี่ยนตำแหน่งตกกระทบของเลเซอร์ การปรับเปลี่ยนตัวแปรเลเซอร์และตำแหน่งทำให้ได้รอยเชื่อมที่แตกต่างจากการเชื่อมด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน การเลื่อนตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบชิ้นงานกระทำห่างจากรอยต่อของวัสดุทั้งสองไม่เกิน 0.05 มม. โดยส่วนใหญ่ในการทดลองใช้ลำแสงเลเซอร์ขนาด 0.2 มม. ดังนั้นพลังงาน ได้ถูกแบ่งไปยังวัสดุที่รอยต่อไม่เท่ากัน วัสดุหนึ่งได้รับพลังงานประมาณ 75% ส่วนวัสดุอีกอันหนึ่งได้รับพลังงานเลเซอร์ 25% ของพลังงานทั้งหมด หรือเมื่อเลื่อนตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบชิ้นงานกระทำห่างจากรอยต่อของวัสดุทั้งสองไม่เกิน 0.2 มม. และเพิ่มขนาดของลำแสงเป็น 0.6 มม. วัสดุหนึ่งได้รับพลังงานประมาณ 67% ส่วนวัสดุอีกอันหนึ่งได้รับพลังงานเลเซอร์ 33%

ผลของการวิจัยเบื้องต้นในการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันในเบื้องต้น พิจารณาผลของตัวแปรเลเซอร์ต่อความหนาแน่นของพลังงานตกกระทบที่ชิ้นงาน ความหนาแน่นของพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังเลเซอร์ หรือลดขนาดลำแสงของเลเซอร์ แสดงดังรูป 4.2 และ 4.4 ตามลำดับ ผลที่ได้จะได้อรอยเชื่อมที่ลึก และรุนแรงเกิดการกระจายของโลหะออกจากบ่อหลอมละลาย ส่วนการเพิ่มเวลาพัลส์ เป็นการเพิ่มระยะเวลาของการหลอมละลาย ทำให้ได้อรอยเชื่อมที่ลึกและกว้างขึ้นแสดงดังรูป 4.3 อีกทั้งการเพิ่มเวลาการหลอมละลายยังเพิ่มเวลาให้ฟองอากาศออกจากบ่อหลอมละลาย ทำให้การเกิดตามคมีจำนวนลด และยังพบอีกว่าการเชื่อมวัสดุเงินต้องการพลังงานเลเซอร์ที่สูงในการเชื่อม เนื่องจากค่าการสะท้อนพลังงานเลเซอร์ที่สูงถึง 99% ประกอบกับค่าการนำความร้อนและค่า Thermal diffusivity ที่มีค่ามาก จึงทำให้ความหนาแน่นของพลังงานเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนที่วัสดุเงินมีค่าน้อย เป็นผลให้การละลายของวัสดุมีค่าต่ำ ทั้งที่ค่าอุณหภูมิการหลอมละลายวัสดุเงินมีค่าต่ำกว่าเกือบครึ่งหนึ่งของวัสดุสแตนเลส แสดงดังรูป 4.1 ส่วนการเชื่อมวัสดุสแตนเลสให้การเชื่อมที่ง่ายกว่า ใช้พลังงานตกกระทบจากเลเซอร์ที่น้อยกว่า คุณสมบัติของวัสดุเงินมีค่าการสะท้อน (Reflectance) พลังงานเลเซอร์ที่ต่ำกว่า จึงทำให้วัสดุสแตนเลสดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ได้ดีกว่า ประกอบกับค่าการนำความร้อนและค่า Thermal diffusivity ที่ต่ำกว่าวัสดุเงินมาก แสดงดังตาราง 2.1 เป็นผลให้พลังงานที่ตกกระทบถูกจำกัดอยู่ในบริเวณแคบ ไม่กระจายไปยังพื้นที่ใกล้เคียงรวดเร็วเหมือน

วัสดุเงิน จึงทำให้วัสดุสแตนเลสใช้พลังงานตกกระทบจากเลเซอร์ที่น้อยกว่าวัสดุเงิน แสดงดังรูป 4.2 ทั้งนี้ อุณหภูมิการหลอมละลายของโลหะสแตนเลสมีค่าสูงกว่า

สำหรับการเชื่อมวัสดุเงินและสแตนเลสเข้าด้วยกัน เมื่อเลเซอร์กำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์ ตกกระทบบตรงกลางของรอยต่อของวัสดุทั้งสองดังรูป 4.5 พบว่าส่วนรอยเชื่อมฝั่งวัสดุสแตนเลสมีขนาดคืบขึ้นกว่าเดิมเป็น 0.54 มม. เนื่องจากการลดลงของพลังงานเลเซอร์ที่ตกกระทบที่วัสดุสแตนเลส เมื่อเปรียบเทียบรอยเชื่อมของวัสดุสแตนเลสเพียงอย่างเดียวที่ใช้กำลังเลเซอร์น้อยกว่า 2.0 กิโลวัตต์ รูป 4.2 ให้ความลึกการเชื่อม 0.67 มม. ส่วนฝั่งวัสดุเงิน รอยเชื่อมมีคุณภาพที่ดีขึ้น กล่าวคือโลหะมีการหลอมละลายมากขึ้น ทำให้รอยเชื่อมลึกขึ้น หรือกว้างขึ้น

ต่อมาทำการปรับเปลี่ยนพลังงานเลเซอร์ที่ตกกระทบยังวัสดุทั้งสอง โดยเปลี่ยนตำแหน่งตกกระทบลเลเซอร์ให้ห่างจากรอยต่อของวัสดุทั้งสอง ได้ผลที่แตกต่างสำหรับการตกกระทบที่ฝั่งวัสดุเงินหรือสแตนเลส เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบที่วัสดุสแตนเลส ห่างจากรอยต่อประมาณ 0.05 มม. เป็นการให้พลังงานเลเซอร์ตกกระทบด้านวัสดุสแตนเลส 75% และวัสดุเงิน 25% ผลที่ได้รับจากใช้เลเซอร์กำลังเลเซอร์ 3.0 กิโลวัตต์ ให้รอยเชื่อมที่กว้างขึ้นเป็น 0.73 มม. รอยเชื่อมเปลี่ยนจากโหมคคอนคักชันเป็นคีย์โฮดังรูป 4.6 คุณภาพรอยเชื่อมด้านวัสดุสแตนเลสที่กว้างและลึกขึ้น ส่วนรอยเชื่อมฝั่งวัสดุเงินยังคงมีลักษณะของคอนคักชันโหมค รอยเชื่อมลึกกว่ารอยเชื่อมที่ได้จากลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบตรงกลาง แต่มีการกระจายของโลหะออกจากรอยต่อระหว่างที่โลหะมีการหลอมละลายมากกว่า ผลของการละลายของโลหะเงินที่มากขึ้นทั้งที่ได้รับพลังงานจากเลเซอร์น้อยลงจาก 50% (สำหรับการลำแสงตกกระทบบที่ตรงกลางรอยต่อ) เป็น 25% (สำหรับการลำแสงตกกระทบบที่วัสดุสแตนเลส) เนื่องจากโลหะเงินสามารถดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ได้มากกว่าเดิมเนื่องจากเขม่าและการรับพลังงานความร้อนจากสแตนเลสที่หลอมละลาย เขม่าที่ขึ้นงานเกิดขึ้นเมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบสแตนเลส ผิวสแตนเลสได้รับพลังงานสูงจึงเกิดการเผาไหม้มากทำให้เกิดเขม่ามากขึ้นตามลำดับ เขม่าที่เกิดขึ้นกระจายไปปกคลุมวัสดุเงิน วัสดุจึงสามารถดูดกลืนพลังงานจากเลเซอร์ได้มากขึ้น อีกทั้งการละลายของวัสดุสแตนเลสที่มากขึ้น หมายถึงการนำความร้อนมีค่าสูงขึ้น การถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับวัสดุใกล้เคียง คือวัสดุเงินมากขึ้นตามลำดับ เป็นผลให้การละลายของวัสดุมีบริเวณ ลึก และรุนแรง จึงเกิดการกระเด็นของเนื้อโลหะ Spatter จากบ่อหลอมละลายเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนอีกกรณีที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบที่วัสดุเงินห่างจากรอยต่อประมาณ 0.05 มม. เป็นการให้พลังงานเลเซอร์ตกกระทบบด้านวัสดุเงิน 75% และวัสดุสแตนเลส 25% ทั้งที่เลเซอร์กำลังเลเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.0 กิโลวัตต์ เป็น 3.5 กิโลวัตต์ รอยเชื่อมทั้งสองฝั่งคือวัสดุเงินและวัสดุสแตนเลสมีค่าน้อยลงโหมคการเชื่อมอยู่ในรูปคอนคักชันโหมค รอยเชื่อมลึกลดลงเป็น 0.29 มม. ความกว้างของรอยเชื่อมแคบลงเป็น 0.59 มม. แสดงดังรูป 4.8 คุณภาพการเชื่อมที่ลดลงเป็นผลมาจากพลังงานส่วนใหญ่ 75% ที่ตกกระทบบด้านวัสดุเงิน ถูกวัสดุเงินสะท้อนพลังงานเลเซอร์กลับเป็นไป 99% ทำให้พลังงานเลเซอร์เหลือเพียงเล็กน้อยที่ถูกนำไปใช้ในการหลอมละลายของโลหะ ประกอบกับวัสดุมีการกระจายความร้อนที่สูง ความหนาแน่นของพลังงานที่จุดตกกระทบบมีค่าลดลง การหลอมละลายจึงเกิดขึ้นเป็นปริมาณน้อย อีกทั้งพลังงานความ

ร้อนที่แผ่ไปยังวัสดุสแตนเลสไม่เพียงพอเพียงที่จะทำการหลอมละลายวัสดุสแตนเลสได้ เนื่องจากอุณหภูมิการหลอมละลายของวัสดุสแตนเลสมีค่าสูง เหตุผลดังกล่าวเป็นผลให้รอยเชื่อมที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบที่วัสดุเงินได้คุณภาพรอยเชื่อมที่แย่ลงกว่า การที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบตรงกลาง แสดงดังรูป 4.5 ทั้งที่ใช้กำลังเลเซอร์ที่ต่ำกว่าที่ค่า 3.0 กิโลวัตต์

แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมวัสดุเงินและสแตนเลส เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบด้านวัสดุสแตนเลส 75% นำสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ คือการกระจายของโลหะที่มากขึ้น และการเกิดฟองอากาศที่ฝั่งวัสดุเงิน เมื่อมีการลดขนาดความหนาแน่นของพลังงานโดยการเพิ่มขนาดของลำแสงเลเซอร์ที่ขึ้นงานจาก 0.2 มม. เป็น 0.6 มม. และกำลังเลเซอร์ 2.5 กิโลวัตต์ แสดงดังรูป 4.10 ก. พลังงานตกกระทบที่ฝั่งวัสดุสแตนเลสมีค่า 75% เท่าเดิม ความหนาแน่นของพลังงานที่ลดลงทำให้ได้การเชื่อมรูปถ้วยในคอนดักชันโหมด คอนดักชันโหมดเป็นการบ่งชี้ว่าความหนาแน่นของพลังงานตกกระทบมีค่าลดลง การหลอมละลายของโลหะที่ทำให้เกิดรอยเชื่อม เกิดขึ้นจากการกระจายความร้อนของโลหะสแตนเลสไปยังโลหะเงิน แต่เนื่องจากวัสดุเงินมีค่า Thermal diffusivity ที่สูง จึงรับพลังงานความร้อนได้ดีและขับไล่ไป ถึงแม้ว่าความหนาแน่นของพลังงานที่วัสดุเงินต่ำ ยังทำให้เกิดฟองอากาศที่รอยต่อของการเชื่อม หรือการกระจายของเนื้อโลหะออกจากบ่อหลอมละลาย เมื่อเพิ่มกำลังเลเซอร์เป็น 3.5 กิโลวัตต์ แสดงดังรูป 4.10 ก. จะเห็นตามดที่ขอบรอยเชื่อม แสดงรูป 4.11 ก. และการกระจายโลหะที่ฝั่งวัสดุเงินอย่างชัดเจน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์การเชื่อมวัสดุเงินและสแตนเลสด้วยแสงเลเซอร์ สรุปได้ว่าการเชื่อมวัสดุสองชนิดเข้าด้วยกันให้รอยเชื่อมที่ดีขึ้น ในเรื่องความลึกหรือความกว้าง เมื่อพลังงานเลเซอร์ตกกระทบที่โลหะสแตนเลส 75% ของพลังงานทั้งหมด แต่สิ่งที่ไม่พึงประสงค์คือการกระจายของเนื้อโลหะ Splatter จากบ่อหลอมละลายและฟองอากาศที่เกิดขึ้นที่รอยต่อการเชื่อมฝั่งวัสดุเงินต้องมีการปรับปรุงผลเสียนี้เกิดจากวัสดุเงินได้รับพลังงานที่มากและขับไล่เกินไป ถึงแม้ว่าจะได้ทำการลดความหนาแน่นของพลังงานลงดังรูป 4.10 สิ่งที่ไม่พึงประสงค์ทั้งสองอย่างก็ยังคงปรากฏที่รอยเชื่อม การเชื่อมที่ต้องการลดผลเสียนี้ควรให้ความสำคัญกับ การคับปิ้งพลังงานและการเย็นตัวของโลหะอย่างช้าๆ เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่วัสดุเงินที่ช้าลง ลดการกระเด็นของเนื้อโลหะหลอมละลายที่ออกจากบ่อหลอมละลาย หรือการหยุดการให้พลังงานเลเซอร์ที่ขึ้นงานอย่างช้าๆ เพื่อช่วยให้ฟองอากาศที่ขอบบ่อหลอมละลายมีเวลาที่จะลอยไปสู่ผิวหน้าของบ่อหลอมละลาย ดังนั้นวิธีแรกจึงไม่ควรใช้สัญญาณเลเซอร์ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในการเชื่อมวัสดุเงินและสแตนเลสเข้าด้วยกัน วิธีที่สองอาจทำการเชื่อมวัสดุโดยใช้พัลส์เลเซอร์จำนวนมากกว่า 1 ลูกที่จุดตกกระทบเดิม พัลส์เลเซอร์ลูกแรกทำให้เกิดการเชื่อมโลหะที่ไม่รุนแรงโดยใช้พลังงานเลเซอร์ตกกระทบที่ไม่สูง พัลส์เลเซอร์ลูกถัดมาทำการเพิ่มการหลอมละลายของโลหะให้มากขึ้นและเปิดโอกาสให้ฟองอากาศได้หลุดจากบ่อหลอมละลาย หรือให้การผสมผสานวิธีแรกกับวิธีที่สองในการกำจัดการกระจายของเนื้อโลหะ Splatter จากบ่อหลอมละลายและฟองอากาศในรอยเชื่อม

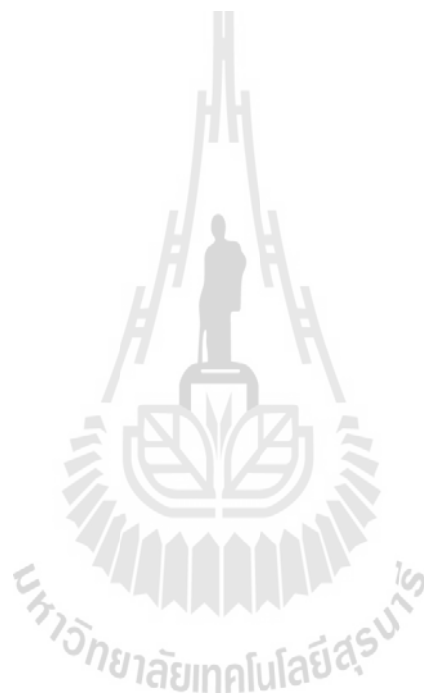
บรรณานุกรม

- Arivzhagan, N., Singh, S., Prakash, S. and Reddy, G.M. (2011). Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding. Materials and Design. vol. 32. issue 5. pp. 3036-3050.
- Berretta, J., Rossi, W., Neves M., Almeida I. and Vieira Junior N. (2007). Pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steel. Optics and Lasers in Eng. vol. 45. no. 9. pp. 960-966.
- Bernnett, J.M. and Ashley, E.J. (1965). Infrared Reflectance and Emittance of Silver and Gold Evaporated in Ultrahigh Vacuum. Applied Optics, vol. 4, no. 2, pp. 221-224.
- Brown, D. (2003). Laser Welding Basics Primary Adjustable Welding Parameters. Bench Magazine. Fall issue. vol. 3. issue 2. pp. 78-83.
- Capello, E., Chiarello, E.P., Previtali, P.B. and Vedani, M. (2003) Laser Welding and Surface Treatment of a 22Cr-5Ni-3Mo Duplex Stainless steel. Mat. Science and Eng. vol. 351. issue 1-2. pp. 334-343.
- Davis, J. R. (2003). Handbook of material for medical device. ASM International: USA.
- Duley, W. W. (1998). Laser welding. John Wiley & sons: Canada.
- Faerber, M., Danzer, W. and Hartl, J. (2003). Laser Welding Beyond Limits, Industrial Laser Solutions, vo. 18, issue 5, pp.48-52.
- Online: <http://en.wikipedia.org/wiki/Reflectivity>
- Ion, J. C. (2005) Laser Processing of Engineering Materials. Elsevier Butterworth-Heinemann: MA.
- Kaplan, A. F. H. and Power, J. (2011) Spatter in laser welding. J. Laser Appl. vol. 23. No 3. pp. 032005(1)-(7).

- Kugler, T. May 2003. Advanced Modulation for Welding. Industrial Laser Solutions Magazine.
(Online): <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-18/issue-5/features/advanced-modulation-for-welding.html>.
- Mackwood, A.P. and Crafer, R.C. (2005) Thermal modeling of laser welding and related processes: a literature review. Opt. Laser Technology. vol. 37. Issue 2. pp. 99-115.
- Messer, B., Patrick, C. and Seitz, S. (2006) Achieving Cost Saving with Innovative Welding and Examination Techniques. Int. J. of Pressure Vessels and Piping. vol. 83, issue 5. pp. 365-372.
- Messler, R. W., Jr. (1999). Principles of Welding. John Wiley & sons, Inc: Canada.
- Nawi, I. N., Saktioto, Fadhali, M., Hussain, M.S., Ali, J. and Yupapin, P.P. (2011) Nd:YAG Laser Welding of Stainless Steel 304 for Photonics Device Packaging. Procedia Engineering. vol. 8. pp. 374-379.
- Petzow, G. (1999). Metallographic Etching. ASM international: USA.
- Ping, D. and Molian, P. (2008) Q-switch Nd:YAG Laser Welding of AISI 304 Stainless Steel Foils. Mat. Science and Eng. vol. 486. issue. 1-2. pp. 680-685.
- Santos, M., Acciari, H., Vercik, L. and Guastaldi, A. (2003) Laser Weld: Microstructure and Corrosion Study of Ag-Pd-Au-Cu Alloy of the Dental Application. Material Letters, 57. issue 13-14. pp. 1888-1893.
- Steen, W. M. (2003) Laser Material Processing. Springer-Verlag: London.
- Sun, Z. and Karppi, R. (1996). The Application of Electron Beam Welding for the Joining of Dissimilar Metal: an Overview. J. of Mat. Proc Tech. vol. 59. issue. 3. pp. 257-267.
- Togaya T. and Shinosaki T. (1999). Introduction of laser welding in dentistry (1). Quintessence Dent Technol. vol. 24, no 6, pp. 740-749.
- Wang, R. and Welsch, G. E. (1995). Joining titanium materials with tungsten inert gas welding, laser welding, and infrared brazing. J. Prosthet. Dent. vol. 74. issue 5. pp 521-530.

Wright, J. (2002). Jewellery-Related Properties of Platinum. Platinum Metals Rev. vol. 46. no. 2. pp. 66-72.

Zhang, B-G., Chen, G-Q., Zhang, C-Q. and Ni J-Q. (2011). Structure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy/Ag Interlayer/Steel Non-Centered Electron Beam Welded Joints. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. vol. 21. issue 12. pp. 2592-2596.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ(ภาษาไทย) นางสาวสุกัญญา นามสกุลเตชะไทรภพ

(ภาษาอังกฤษ) Miss Sukanya Tachatriphop

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

สาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และโฟตอนิกส์

สำนักวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โทร 044-22-4643

โทรสาร 044-22-4185

E-mail: tsukanya@ccs.sut.ac.th

ประวัติการศึกษา

1992 B.S. (Physics) King Mungkut Institute of Technology Thonburi, Thailand

1995 M.S. (Physics) King Mungkut Institute of Technology Thonburi, Thailand

1997 M.S. (Electrical Engineering) University of Maryland, College Park, USA

2002 Ph.D. (Electrical Engineering) University of Maryland, College Park, USA

Major: ElectroPhysics: Laser Technology and Photonics

Minor: MicroElectronics: Semiconductor Device