



รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์ตัวแปรของเลเซอร์ กับการเชื่อมไททาเนียมด้วยเลเซอร์
Analyzing the Laser Parameters of Laser-Welded Titanium



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2556



รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์ตัวแปรของเลเซอร์ กับการเชื่อมไททาเนียมด้วยเลเซอร์ (Analyzing the Laser Parameters of Laser-Welded Titanium)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ดร. สุกัญญา เตชะไทรภาพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และโฟตอนิกส์

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงโดยเป็นเพราะรับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จึงขอขอบพระคุณมา ณ. ที่นี้ อีกทั้งนักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมที่ช่วยจัด และจัดเตรียม
ชิ้นงาน และนักศึกษาปริญญาโทสาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และฟิสิกส์ นายรัชนิกร กุรมรัมย์ ที่ได้
ช่วยเก็บตัวอย่าง อีกทั้งนางสาวอพนันตรี ข้าช่วย ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องเลเซอร์ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้
ผู้วิจัยขอแสดงความขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ. โอกาสนี้

อาจารย์ ดร. สุกัญญา เตชะไตรภพ



Abstract

Commercial pure titanium is highly reactive to the surrounding gas in the atmosphere, oxygen, hydrogen, and nitrogen, especially at a high temperature. During the welding process the gas prevents and obstructs the laser energy reaching the target metal. Less absorbed laser energy brings shallow penetration depth. Moreover, the gases intrude into the molten metal and create porosity, cracking, and brittle. In this study, butted joint titanium sheets thickness 1.0 mm were laser welded with various argon gas flow rates. With appropriate laser energy and argon gas flow rate, the penetration depth, appearance, and strength of the laser welded titanium were improved. However, when the gas flow rate and laser energy were too high, 15 L/min, and 3.5 kW, respectively, the high gas pressure pushed the molten metal out from the melting pool, called spatter. The welded strength was dropped.

บทคัดย่อ

ไททานเนียมบริสุทธิ์มีการทำปฏิกิริยากับสภาพอากาศแวดล้อม ที่ปกคลุมไปด้วยแก๊ส ออกซิเจน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจนได้ดี โดยเฉพาะที่อุณหภูมิที่สูงได้ดี ระหว่างขบวนการ เชื่อมแก๊สดังกล่าวจะทำการขัดขวางการตกกระทบของพลังงานเลเซอร์ที่ชิ้นงาน เป็นผลให้รอยเชื่อม ที่ได้คืน นอกจากนี้แก๊สที่อยู่โดยรอบยังเข้าไปทำปฏิกิริยากับ โลหะหลอมละลาย ทำให้เกิดตามด การเปราะ และหักง่าย ในงานวิจัยนี้จะทำการเชื่อมแผ่นไททานเนียมความหนา 1 มิลลิเมตร โดยใช้ เลเซอร์และแก๊สเฉื่อยอาร์กอนที่ค่าต่างๆ พลังงานเลเซอร์และอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยอาร์กอนที่ เหมาะสม ทำให้รอยเชื่อมที่สะอาด ลึกขึ้น และความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่อัตราการไหลของแก๊สที่มากเกินไปที่ 15 ลิตรต่อนาที และกำลังเลเซอร์ที่ 3.5 กิโลวัตต์ โลหะหลอมละลายได้ถูกผลักออกจากบ่อโลหะหลอมละลาย ทำให้เกิดการกระจายของเนื้อโลหะออกจากจุดเชื่อม มีผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ขบวนการเชื่อมโลหะ	7
2.2 โหมดการเชื่อม	10
2.2.1 ปฏิกริยาของแก๊สและโลหะภายในบ่อหลอมละลาย (Weld pool)	11
2.2.2 เกิดตามคหรือรูพรุน (Porosity)	12
2.2.3 แก๊สปกคลุม (Shield gas)	13
2.3 ขบวนการเกิดและกำจัดพลาสมา (Plasma) ด้วยแก๊สเฉื่อย (Inert gas)	14
2.3.1 ขบวนการเกิดของพลาสมา [Plasma formation]	14
2.3.2 ขบวนการกำจัดพลาสมาด้วยแก๊สปกคลุม [Plasma reduction with shielding gas]	15
2.4 ชนิดของแก๊สปกคลุม (Shielding gas type)	16
2.5 คุณสมบัติของไททานเนียม (Properties of titanium material)	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 การเตรียมการทดลอง	22
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	24
3.2.1 การทดลองการเชื่อมไททานเนียมด้วยเลเซอร์นีโอติเมียมแฮคเลเซอร์	24
3.2.2 การแสดงผลของการเชื่อมไททานเนียมด้วย นีโอติเมียมแฮคเลเซอร์แบบพัลส์	24

บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	27
บทที่ 5 บทสรุป	
5.1 สรุปผลวิจัย	34
5.2 ข้อเสนอแนะ	36
บรรณานุกรม	39
ประวัติผู้วิจัย	47



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่าพลังงานไอออไนซ์ ระดับที่หนึ่ง (First ionization potential) และค่า Molecular weight ของโลหะ และแก๊ส	17
2.2	แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติโดยทั่วไปของไททานเนียม	20
2.3	แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติ Commercially Pure (CP) ไททานเนียมแต่ละเกรด	21
2.4	ภาพวาดแสดงขนาดลำแสงเลเซอร์ภายใต้อิทธิพลของกลุ่มแก๊สพลาสมาเหนือเป้าโลหะกรณีที่ A. ไม่มี และ B. มีการเกิดของพลาสมาที่ชิ้นงาน	15
4.1	ภาพถ่ายด้านบนที่ได้จากการเชื่อมไททานเนียมด้วยเลเซอร์ที่ระดับพลังงานและอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่แตกต่างกัน	28
4.2	ภาพถ่ายตัดขวางที่รอยเชื่อมของไททานเนียมด้วยเลเซอร์ ที่ระดับพลังงาน 2.0kW และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่แตกต่างกัน	31



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะ หลังจากที่ใช้แสงเลเซอร์ตกกระทบ	8
2.2	ขบวนการเชื่อมซึ่ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงาน (Power) และเวลา	9
2.3	แสดงลักษณะของรอยเชื่อมในแนวตัดขวาง ก. คอนดัคชัน โหมด (Conduction mode) และ ข. คีย์โฮโหมด (Keyhole mode)	10
2.4	ภาพวาดแสดงขนาดลำแสงเลเซอร์ภายใต้อิทธิพลของกลุ่มแก๊สพลาสมาเหนือเป้าโลหะกรณีที่ A. ไม่มี และ B. มีการเกิดของพลาสมาที่ชิ้นงาน	15
2.5	แสดงความลึกของรอยเชื่อม (Penetration weld) ที่ได้จากการใช้แก๊สปกคลุมที่แตกต่างกัน	18
3.1	แสดงไททานเนียมก่อน (ขวามือ) และหลังการทำความสะอาดด้วย Kroll's reagent (ซ้ายมือ)	23
3.2	การจัดวางชิ้นงานไททานเนียมเพื่อเชื่อมในลักษณะ Butt joint โดยใช้แก๊สเฉื่อย	23
3.3	กล้องไมโครสโคปที่ใช้ตรวจสอบขนาดของช่องรอยต่อ	24
3.4	เครื่องนีโอเนียมแฮคเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลองเชื่อมไททานเนียม	25
3.5	ชิ้นงานถูกยึดด้วยเรซินและคลิป	25
4.1	แสดงการเกิดฟองอากาศ (Porosity) ภายในรอยเชื่อมไททานเนียมด้วยเลเซอร์เมื่ออัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 ลิตร	32
4.2	แสดงการกระเด็น (Splatter) ของเนื้อโลหะเมื่อภายในรอยเชื่อมไททานเนียมด้วยเลเซอร์เมื่ออัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 15 ลิตร	33

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

อุตสาหกรรมบริการด้านการรักษาพยาบาลและการแพทย์ของประเทศไทย ถือเป็นแหล่งทำรายได้ที่สำคัญของประเทศ อัตราการเติบโตอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอดในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ส่งผลให้รัฐบาลมีนโยบายผลักดันให้ไทยเป็นศูนย์กลางทางการแพทย์ของเอเชีย (Medical Hub of Asia) หนังสือพิมพ์ผู้จัดการรายสัปดาห์ (2550) รายงานว่าในปี 2550 มีชาวต่างชาติเข้ารับบริการถึง 1.54 ล้านคน ทำรายได้ให้กับประเทศถึง 41,000 ล้านบาท ปี 2551 จำนวนผู้เข้ารักษาเพิ่มเป็น 1.60 ล้านคนทำรายได้ให้กับประเทศ 80,000 ล้านบาท [นายกฤษฎา, 2555 และ ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2553] อุตสาหกรรมนี้จึงมีแนวโน้มที่จะทำรายได้ให้กับประเทศในระดับต้นๆต่อไปในอนาคต ทั้งนี้การส่งเสริมการวิจัยในด้านวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ เพื่อให้วัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์มีการพึ่งพากับต่างประเทศน้อยลง เมื่อมีการผลิตภายในประเทศได้เอง จะทำให้วัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ราคาถูกลง ผู้รับบริการภายในประเทศก็จะได้รับการบริการที่มีประสิทธิภาพ ประสิทธิผล และแพร่หลายมากขึ้น รวมทั้งเสริมสร้างศักยภาพของอุตสาหกรรมของประเทศ

อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ทำจากวัสดุไททานเนียมได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [Santos et al., 2003, Watanabe, 2006, Kelkar, 2006, Lglesia-Puig MA, 2005, และ Hart, 2006] เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน (corrosion resistance) ได้ดี จุดหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งมี biocompatibility การขยายการใช้ประโยชน์จากทำอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ทำจากไททานเนียม เกิดขึ้น ร่วมกับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของเลเซอร์ที่มีลำแสงที่ไม่บานปลาย มีคุณภาพ พลังงานจากเลเซอร์จึงอยู่ในบริเวณที่จำกัด การกระจายความร้อนอยู่ในบริเวณแคบ การใช้ ลำแสงเลเซอร์ในการเชื่อมจึงได้จุดเชื่อมที่มีขนาดเล็ก โดยไม่ทำให้หลังจากการเชื่อมวัสดุมีการบิดตัว เสียรูปเนื่องจากความร้อน [Yunlian et al., 2000] อีกทั้งเลเซอร์ยังสามารถทำการเชื่อมวัสดุที่มีความ ซับซ้อนทางโครงสร้าง ที่วิธีการเชื่อมอื่นทำไม่ได้

การวิจัยการเชื่อมวัสดุไททานเนียมด้วยเลเซอร์กับได้จำกัดการวิเคราะห์ วิจัยแต่ในเชิง วัสดุศาสตร์ [Apalak et al., 2003, Li et al., 1997, Liu, 2002, และ Du et al., 2004] ส่วนการวิเคราะห์ ตัวแปรของเลเซอร์ (Laser parameters) อาทิ กำลังของพัลส์ (Power) เวลา (Time) ขนาดของเลเซอร์ (Laser spot size) ไม่ได้รับการสนใจเท่าที่ควร ถึงแม้ว่าเลเซอร์คือต้นกำเนิดของพลังงานที่ใช้ในการ เชื่อม นอกจากนี้ปัจจัยภายนอก อาทิ การเกิดพลาสมา (Plasma formation) ยังทำให้พลังงานของเลเซอร์ ที่จุดเชื่อมมีค่าลดลง [Sibillano et al., 2005, Semark et al., 2000, Dowden et al., 1989, และ Beck et al., 1995] และทำอิทธิพลของเลเซอร์ที่จุดเชื่อมเปลี่ยนไป ดังนั้นถึงสามารถสรุปได้ว่าคุณภาพของการ

เชื่อมก็เปลี่ยนไปด้วยการควบคุมการเกิดของพลาสมาสามารถกระทำได้โดยใช้แก๊สเฉื่อยช่วย

[Watanabe, 2006 และ Li et al., 1997] การใช้แก๊สเฉื่อยเป็นการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมด้วย

เลเซอร์อีกทางหนึ่ง รวมทั้งยังเป็นเพิ่มความแข็งแรงที่จุดเชื่อมอีกด้วย

งานวิจัยนี้คาดว่าจะป็นงานวิจัยที่ให้ความรู้ การชี้แนะทางวิชาการและเทคโนโลยี

ให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ เพื่อให้เป็นการพัฒนาสินค้า

คุณภาพ และสร้างโอกาสทางการตลาด หรืออุตสาหกรรมอื่นที่ประยุกต์ใช้วัสดุไททาเนียม

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า เป้าหมายดังกล่าวครอบคลุม ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้าง

เศรษฐกิจให้สมดุลอย่างยั่งยืน ในด้าน (3.1) การปรับโครงสร้างการผลิตเพื่อเพิ่มผลิตภาพ และคุณค่า

ของสินค้าและ บริการบนฐานความรู้และความเป็นไทย และ (3.2) การสร้างภูมิคุ้มกันของระบบ

เศรษฐกิจ และ กลยุทธ์การวิจัยที่ 3 การพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตทางอุตสาหกรรมให้เอื้อต่อการ

ดำเนินธุรกิจอย่างยั่งยืน ตามแผนงานวิจัยที่ 2 การวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มศักยภาพของการเป็นฐานการ

ผลิตภาคอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัสดุไททาเนียม: เป็นที่นิยม เนื่องจากน้ำหนักเบา และทนการกัดกร่อนได้ดี

การเชื่อมไททาเนียมทางทฤษฎี: เลเซอร์ให้รอยเชื่อมที่เล็ก เรียบและไม่ทำให้เกิดการ

บิดตัวในการประกอบชิ้นงาน

การเชื่อมงานไททาเนียมในทางปฏิบัติ: การใช้ค่าพลังงานเลเซอร์และอัตราการไหล

ของแก๊สเฉื่อยที่ไม่เหมาะสม ทำให้เกิดผลที่ไม่พึงประสงค์ อาทิรอยเชื่อมที่ใหญ่ ไม่เรียบ รอยเชื่อม

ไม่แข็งแรง วัสดุมีการบิดตัว และสูญเสียความยืดหยุ่น

การเลือกที่จะศึกษาการเชื่อมไททาเนียมด้วยเลเซอร์ จุดประสงค์หลักเพื่อให้ความรู้

พื้นฐานและเพิ่มความแข็งแกร่งทางวิชาการแก่ภาคอุตสาหกรรมของประเทศ

1. เพื่อเป็นการส่งเสริมและสร้างศักยภาพทางความรู้เทคโนโลยีการเชื่อมไททาเนียมด้วยเลเซอร์ ให้กับอุตสาหกรรมของประเทศ
2. การเชื่อมไททาเนียมด้วยเลเซอร์ โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรของเลเซอร์ (Laser parameters) ต่างๆ อาทิ กำลังของพัลส์ (Power) เวลา (Time) ขนาดของเลเซอร์ (Laser spot size) โดยการใช้และไม่ใช้แก๊สเฉื่อยช่วย โดยการปรับค่าตัวแปรทีละอย่าง
3. รวมทั้งการนำเสนอตัวแปรเลเซอร์ที่เหมาะสม สำหรับการการประยุกต์ใช้งานจริง อาทิความแข็งแรงของการเชื่อม และความสวยงาม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ใช้เครื่องนีโอดีเมียมแยกต์เลเซอร์ (Nd:YAG Laser) แบบพัลส์ ในการทดลองและเก็บข้อมูลของการเชื่อมไททานเนียม ร่วมกับการใช้และไม่ใช้แก๊สเฉื่อย การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเลเซอร์ต่อการเชื่อมไททานเนียมด้วยเลเซอร์ โดยใช้ข้อมูลจาก Optical microscope และเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ช่วยวิเคราะห์ผลจากการเชื่อม

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการเผยแพร่ความรู้เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยเทคโนโลยี การบริการความรู้ ในรูปบทความ การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2008 และ 2013 และ National Conference of Optics and Applications ครั้งที่ 3 ปี 2008

บทที่ 2

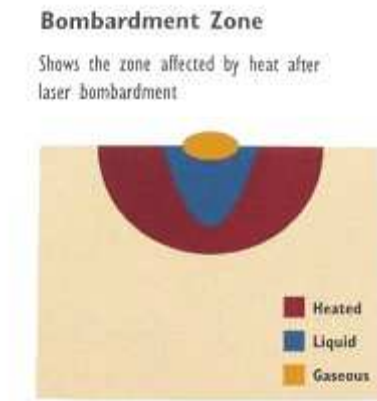
ทฤษฎี

การเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์เป็นสิ่งที่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากให้การเชื่อมที่ดีกว่าวิธีอื่น [Duley, 1998, Smith et al., 1972, Wright, 2002, Brown, 2003, และ Kugler, 2003] ด้วยลำแสงเลเซอร์มีขนาดเล็กและเป็นเส้นตรง ทำให้การเล็งเป้าหมายรอยเชื่อมมีความแม่นยำ ทำการเชื่อมที่บริเวณลึกและซับซ้อนได้ดี และง่ายกว่า ไม่มีการบิดงอของโลหะบริเวณใกล้เคียงรอยเชื่อม อีกทั้งให้พื้นที่อิทธิพลความร้อน (Heat affected zone) ที่มีขนาดเล็ก เป็นผลให้การเชื่อมมีความแข็งแรง ระหว่างที่มีการเชื่อมไททานเนียมด้วยเลเซอร์ แก๊สในบรรยากาศจะเข้าไปแทรกตัวในขณะที่โลหะที่กำลังอยู่ในสถานะของเหลวได้ดี ประกอบกับโลหะไททานเนียมสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับอากาศ เป็นให้ผลให้เกิดรูพรุนหรือฟองอากาศที่บริเวณรอยเชื่อม อีกทั้งแก๊สดังกล่าวยังไปทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโลหะ ทำให้รอยเชื่อมเปราะง่าย รอยเชื่อมมีสีฟ้า-ม่วงซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) นอกจากนี้ผลของพลังงานเลเซอร์ที่สูง ทำให้โลหะเกิดการกลายสภาพจากของแข็งเป็นไอ (Vaporize) ซึ่งเรียกกลุ่มแก๊สนี้ว่าพลาสมา (Plasma) คุณภาพของการเชื่อมลดลงเนื่องจากขบวนการเกิดพลาสมา (Plasma formation) [Sibillano et al., 2005, Semark et al., 2000, Dowden et al., 1989, และ Beck et al., 1995] ทำให้พลังงานเลเซอร์ที่ตกกระทบจุดเชื่อมโลหะเป้าหมายลดลง [Duley, 1998 และ Hanson, 1994] นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการกระเจิงของแสง

(Scattering) [Heidecker et al., 1988 และ Matsunawa, 1990] ความถี่ของรอยเชื่อมที่ได้จึงขึ้น แก๊สเฉื่อยได้ถูกใช้เพื่อให้เกิดการขัดขวางขบวนการเกิดพลาสมา [Watanabe, 2006, Li et al., 1997 และ Duley, 1998] และกำจัด พลาสมาและแก๊สในบรรยากาศให้ออกไปจากเป้าหมายรอยเชื่อม ด้วย จึงนับว่าแก๊สเฉื่อยเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อคุณภาพของการเชื่อม จึงสามารถสรุปได้ว่ารอยเชื่อมที่ได้มีลักษณะและคุณภาพที่แตกต่างกัน เป็นผลมาจากพลังงานที่โลหะ ได้รับ และปริมาณของแก๊สเฉื่อย พลังงานที่โลหะได้รับสามารถปรับเปลี่ยนจากตัวแปรของเลเซอร์ อาทิ กำลังของพัลส์ เวลาและขนาดของลำแสง

2.1 ขบวนการเชื่อมโลหะ

ขบวนการเชื่อม โลหะด้วยเลเซอร์เป็นขบวนการที่ต่อเนื่อง เริ่มจากเมื่อลำแสงเซอร์ตกกระทบยังโลหะเป้าหมาย พลังงานส่วนหนึ่งของเลเซอร์ถูกสะท้อนกลับ ลำแสงเลเซอร์เกิดการกระเจิง (Scattering) ออกจากเป้าหมาย อีกทั้งการรับพลังงานของโลหะแต่ละชนิดยังผันแปรต่อความยาวคลื่น ทำให้โลหะไม่สามารถรับพลังงานจากเลเซอร์ได้ทั้งหมด พลังของเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนที่โลหะเป้าหมาย จะถูกนำไปทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะและการฟอร์มตัวของกลุ่มแก๊ส (Gaseous) เหนือชิ้นงานที่เรียกว่าพลาสมา (Plasma) ดังรูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์นี้ไม่เป็นสิ่งที่ปรารถนาของการเชื่อม [Wang, 1995] เนื่องจากพลาสมาไปทำให้เกิดการลดขนาดของพลังงานที่ตกกระทบเป้าหมายโลหะ และอีกทั้งยังทำให้เกิดขบวนการดีโฟกัส (Defocus) ทำให้มีขนาดลำแสงใหญ่และลดขนาดของความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) ที่เป้าหมายลง อีกทั้งพลาสมาและกลุ่มแก๊สในบรรยากาศทำปฏิกิริยากับโลหะในระหว่างขบวนการเชื่อม



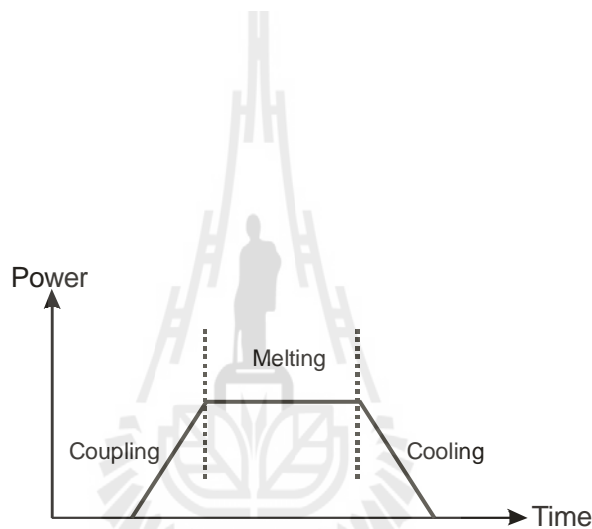
รูปที่ 2.1. รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะ หลังจากที่ถูกแสงเลเซอร์ตกกระทบ [Faerber et al., 2003]

เป็นผลให้การเชื่อมที่คุณภาพไม่ดี อาทิ การเชื่อมโลหะที่ได้ เพราะ หักง่าย รอยเชื่อมตื้นไม่ลึก รอยเชื่อมขรุขระ [Kelkar, 2006, Lglesia-Puig MA. 2005, Hart, 2006, Yunlian et al., 2000 และ Faerber et al., 2003]

อีกส่วนของพลังของเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนที่โลหะเป้าหมายจะถูกใช้ในการทำให้โลหะละลาย เพื่อเชื่อมโลหะเข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณหลอมละลาย (Liquid Zone) ส่วนพลังงานที่มีขนาดไม่สูงเพียงพอที่จะทำการละลายโลหะได้ ก็จะเปลี่ยนสภาพเป็นพลังงานความร้อน เมื่อบริเวณหลอมละลายเย็นตัวลงจะปรากฏรอยเชื่อม ซึ่งมีลักษณะที่ขึ้นกับขนาดของระดับพลังงานที่โลหะเป้าหมาย ส่วนบริเวณรอยเชื่อมที่ไม่ถูกหลอมละลาย แต่ได้รับอิทธิพลของความร้อนเรียกว่า Heated Zone

เมื่อต้องการวิเคราะห์ผลของลำแสงเลเซอร์ต่อการเชื่อมโลหะอย่างละเอียด จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงขบวนการเชื่อมที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภายหลังจากที่ลำแสงเลเซอร์ได้ตกกระทบที่เป้าหมายโลหะ โลหะจะรับพลังงานจากเลเซอร์ผ่านขบวนการคัปปีง (Coupling process) ดังรูปที่ 2.2 โลหะได้รับการ

ถ่ายเทพลังงานจากเลเซอร์ทำให้พลังงานที่โลหะสูงขึ้น จนกระทั่งนำไปสู่กระบวนการหลอมละลาย (Melting process) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวของโลหะ ส่วนพลังงานที่เหลือและไม่เพียงพอต่อการหลอม โลหะเปลี่ยนสภาพเป็นพลังงานความร้อนและถูกถ่ายเทไปยังบริเวณใกล้เคียงกับรอยเชื่อม เมื่อพลังงานของเลเซอร์ได้สิ้นสุดลง โลหะจะเกิดการเย็นตัวและเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็ง (Solidification) ผ่านกระบวนการเย็นตัว (Cooling process) ทำให้เกิดการเชื่อมของเนื้อโลหะเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.2 ขบวนการเชื่อมซึ่ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงาน (Power) และเวลา

ตัวแปรของเลเซอร์ (Laser parameters) ที่เกี่ยวเนื่องโดยตรงต่อขบวนการเชื่อม กล่าวคือ กำลังของพัลส์ (Power) และขนาดของเลเซอร์ (Laser spot size) เป็นการกำหนดระดับพลังงานที่จะกระทบโลหะเป้าหมายผ่านขบวนการคัปปีง ส่วนเวลาของพัลส์ (Time) เลเซอร์ เกี่ยวเนื่องกับขบวนการหลอมละลาย และลักษณะของพัลส์ (Pulse) เกี่ยวเนื่องกับขบวนการคัปปีงและขบวนการเย็นตัว ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัยต่อไป

2.2 โหมดการเชื่อม [Welding mode]

ผลที่ได้การขบวนการเชื่อม จะทำให้เกิดรอยเชื่อมเป็นสองลักษณะ กล่าวคือคอนดัคชั่น

โหมด (Conduction mode) และ คีย์โฮโหมด (Keyhole mode) เมื่อความหนาแน่นของพลังงานเลเซอร์มี

ระดับต่ำ รอยเชื่อมเป็นรูปเสมือนถ้วย (Bowl-shape) ความลึกของรอยเชื่อมตื้น (Shallow) ดังรูปที่ 2.3

โดยทั่วไปเลเซอร์มีการกระจายของพลังงานในรูปแบบเกาส์เซียน (Gaussian beam profile) โดยบริเวณตรง

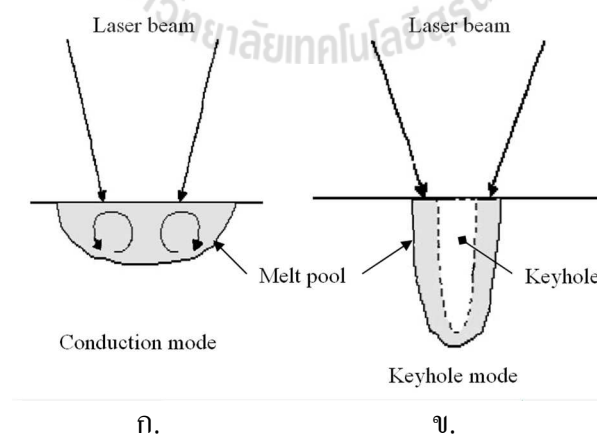
กลางของลำแสงมีระดับพลังงานสูงสุด และส่วนที่ขอบของลำแสงทั้งสองข้างมีระดับพลังงานต่ำกว่า เมื่อ

ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเป้าหมายโลหะ พลังงานตกกลางของลำแสงเมื่อถูกดูดกลืนบริเวณผิวโลหะและมี

ขนาดเพียงพอในการหลอมละลายโลหะ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจากโลหะเป็นของเหลวในบ่อหลอม

ละลาย (Melt pool) สำหรับระดับพลังงานบริเวณขอบของลำแสงที่ไม่เพียงพอต่อการหลอมละลายของ

โลหะก็จะถูกถ่ายเทไปยังด้านข้างของบ่อหลอม



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมในแนวตัดขวาง ก. คอนดัคชั่นโหมด (Conduction mode) และ ข. คีย์โฮโหมด (Keyhole mode) [Duley, 1998]

ละลายในรูปของความร้อน ผลของการกระจายของพลังงานดังกล่าวทำให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิที่

แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อทิศทางของปรากฏการณ์การละลาย (Melting dynamic) ของโลหะ

ภายในบ่อหลอมละลาย ผลของแรงตึงผิว (Surface tension) ทำให้เกิดแรงดึงออกจากบริเวณตรงกลาง

บ่อหลอมละลาย อีกทั้งมีแรงดันจากข้างล่างของบ่อหลอมละลายเนื่องจากข้างล่างมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

ด้านบนที่ได้รับพลังงานมากกว่าจากลำแสงเลเซอร์ เป็นผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม (Weld

diameter) ด้านบนที่ได้มีขนาดกว้าง และระดับความลึก (Weld penetration) ของรอยเชื่อมที่ตื้น เมื่อระดับ

ความหนาแน่นของพลังงานของลำแสงเลเซอร์มีค่าสูงขึ้น ระดับพลังงานที่สูงถึง $10^4 \text{ Watt mm}^{-2}$ ทำให้โลหะ

ที่ผิวหน้าเกิดการกลายเป็นไอ (vaporize) เรียกว่า plume และไอนี้ถูกไอออไนซ์ (Ionize) กลายเป็นกลุ่มแก๊ส

พลาสมา (Plasma formation) เป็นผลทำให้เกิดรู (Hole) ที่บ่อหลอมละลาย พลังงานของเลเซอร์จึง

สามารถถูกดูดกลืนที่ด้านล่างของผิวหน้าโลหะได้ จากนั้นพลังงานถูกสะท้อนและหักเหไปมาภายในรู

หลอมละลาย เป็นผลให้อัตราการดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ที่บ่อหลอมละลายเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และ

ทำให้ได้อัตราการความลึกของรอยเชื่อมต่อพลังงานที่สูงขึ้น [Duley, 1998 และ Messler, 1999] รอยเชื่อมที่

ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมเท่ากับขนาดของลำแสงเลเซอร์

โดยประมาณ [Ponpitak, 2009]

2.2.1 ปฏิกริยาของแก๊สและโลหะภายในบ่อหลอมละลาย (Weld pool) ถึงแม้ว่า plume

และplasma จะช่วยทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจากเลเซอร์ไปยังโลหะในบ่อหลอมละลายได้ดียิ่งขึ้น แต่ยังไม่

เป็นสาเหตุของสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาของเชื่อม ในระหว่างขบวนการคัปปีงและเย็นตัว โลหะมีการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งและของเหลว เรียกว่า Melting หรือ Fusion หรือเรียกโลหะที่กำลังละลายนี้ว่า Molten metal ขณะที่โลหะมีการเปลี่ยนสถานะนั้น แก๊สที่อยู่โดยรอบมีการแทรกตัวเข้าไปยังโลหะหลอมละลาย การทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สและของเหลวทำให้เกิดสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา อาทิ เกิดตามดหรือรูพรุน (Porosity) แตก(Cracking) หรือเปราะง่าย (Brittle) ประกอบกับแก๊สในบรรยากาศมีอยู่มากโดยทั่วไป กล่าวคือไนโตรเจน (N₂) 78% หรือ แก๊สออกซิเจน 21% โดยน้ำหนัก [Messler, Jr., 1999] ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่แก๊สในบรรยากาศจะแทรกเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามโลหะที่มีค่า อาทิ เงิน ทองหรือ แพลตินัม ไม่ทำปฏิกิริยากับแก๊สมากนักเมื่อเทียบกับ ไททาเนียม หรือ ไนโอเบียมมีการทนทานต่อการ Oxidation หรือการกัดกร่อนสูง เพื่อป้องกันผลของการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊ส-โลหะที่ไม่ปรารถนา แก๊สเฉื่อยได้ถูกนำมาใช้ในการป้องกัน (Shielding) บ่อหลอมละลายเพื่อลดผลกระทบของการเชื่อมที่ไม่พึงปรารถนา [Watanabe, 2006, Li et al., 1997 และ Faerber et al., 2003]

2.2.2 การเกิดตามดหรือรูพรุน (Porosity) ระหว่างขบวนการเย็นตัวของการเชื่อม แก๊ส

ที่แทรกตัวเข้าไปยัง Liquid metal กลายสภาพเป็นฟองอากาศ (Bubbles) ฟองอากาศพยายามลอยตัวออกจากบ่อหลอมละลาย ตามทิศทางของแรงดึง อาทิ ผลของแรงดึงผิวมีแรงดึงไปยังด้านข้างและด้านล่างของรอยเชื่อม ฟองอากาศไม่สามารถหลุดออกมาได้ทันก่อนที่เนื้อโลหะและรอยเชื่อมเกิดการประสานระหว่างขบวนการเย็นตัว ทำให้เนื้อโลหะที่รอยประสานมีจำนวนน้อยเนื่องจากผลของการแทรกตัวของ

ฟองอากาศ ซึ่งทำให้ความแข็งแรง และความคงทนที่ได้จากการเชื่อมลดลง การเกิดฟองอากาศภายในรอย
 เชื่อมนับว่าเป็นผลกระทบเนื่องจากชนิดของโลหะ ระดับพลังงาน และรูปลักษณะของพลังงานสัมพันธ์กับ
 เวลาระหว่างขบวนการคัปปีงและเย็นตัว ในระหว่างที่มีการคัปปีงของพลังงานไปยังเนื้อโลหะ และ
 พลังงานมีอัตราการเพิ่มอย่างรวดเร็วก็เป็นผลต่อการเพิ่มอัตราการถูกกักของฟองอากาศเช่นกัน

2.2.3 แก๊สปกคลุม (Shield gas) แก๊สปกคลุมที่นำมาใช้ในการระงับการเกิด

ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สในบรรยากาศ กับ Molten metal คือแก๊สเฉื่อย (Inert gas) เนื่องจากแก๊สเฉื่อยไม่ทำ
 ปฏิกิริยากับโลหะที่หลอมละลายอยู่ หน้าที่ของแก๊สปกคลุมคือทำการเป่าและขจัดแก๊สในบรรยากาศ
 ออกไปบริเวณเป้าหมายของการเชื่อมก่อนที่จะมีการเชื่อม จากนั้นเมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเป้าหมาย
 แก๊สในบรรยากาศจึงไม่สามารถแทรกตัวทำปฏิกิริยากับ โลหะหลอมละลายได้เนื่องจากแก๊สเฉื่อยได้ปกคลุม
 (Shield) บริเวณเชื่อมไว้แล้ว อีกทั้งแก๊สเฉื่อยยังทำการป้องกันการแทรกตัวของแก๊สในบรรยากาศระหว่าง
 ขบวนการเย็นตัวของโลหะ ทำให้การเกิดรูพรุนน้อยลง และลดการแตก และการเปราะจากการเชื่อมน้อยลง
 ขณะเดียวกันการใช้แก๊สเฉื่อยในปริมาณที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดรูพรุนหรือความเปราะจากการเชื่อม
 มากขึ้นด้วย นอกจากนี้แก๊สปกคลุมที่เป็นแก๊สเฉื่อยยังช่วยลดผลกระทบของพลาสมาในขบวนการเชื่อมอีก
 ด้วย

2.3 ขบวนการเกิดและกำจัดพลาสมา (Plasma) ด้วยแก๊สเฉื่อย (Inert gas)

2.3.1 ขบวนการเกิดของพลาสมา [Plasma formation]

พลาสมาเป็นสถานะที่

นอกเหนือจากของแข็ง ของเหลว และแก๊ส และเป็นกลุ่มแก๊สที่มีสถานะเป็นไอออน (Ionized gas) มาก

เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานที่มีความเข้มสูงของเลเซอร์ไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กลายเป็น

กลุ่มแก๊สที่ประกอบด้วยไอออนบวกและอิเล็กตรอนกระจายกันอยู่ห่างๆ โดยปกติพลาสมาจะมีพลังงาน

ไอออไนซ์ (Ionization energy) ที่ต่ำกว่าแก๊สเฉื่อย ทำให้แก๊สเฉื่อยสามารถลดทอนการเกิดพลาสมาที่

เกิดขึ้นได้ สำหรับขบวนการเชื่อมโลหะเมื่อพลังงานของเลเซอร์พลังงานของเลเซอร์ที่ต่ำ ทำให้เกิดมี

จำนวนไอออน (Ionization) ต่ำ การเกิดลักษณะนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ที่

ขึ้นงาน [Duley, 1998] แต่เมื่อไรที่พลังงานของเลเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น กลุ่มแก๊สที่เกิดเหนือชิ้นงานมีปริมาณ

มากขึ้นตามลำดับ ทำให้เกิดขบวนการอินเวดบีมสตาลัง (Inverse Bremsstrahlung) โดยทำให้เกิดการ

ดูดกลืนพลังงานพลังงานของเลเซอร์ที่พลาสมา สนามไฟฟ้าจากเลเซอร์ไปทำให้อิเล็กตรอนของพลาสมา

สั่น และเกิดเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนอันเกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอน และไอออน ดังนั้นขบวนการ

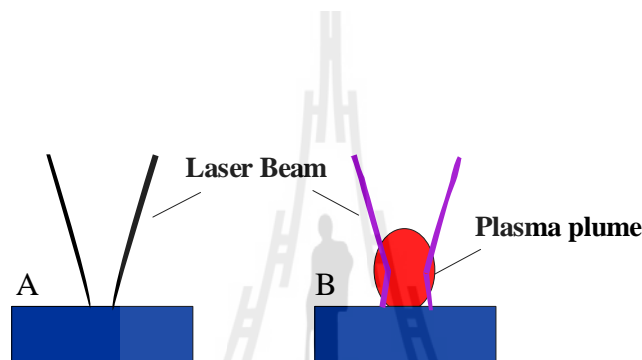
อินเวดบีมสตาลัง จึงเป็นผลให้พลังงานเลเซอร์ตกกระทบเป้าหมายมีค่าน้อยลง [Pfalzner, 2006]

นอกจากนี้กลุ่มแก๊สพลาสมาที่ร้อนจะลอยตัวขึ้นจากผิวโลหะด้วยความเร็ว $10^5 - 10^6$ cm/sec [Duley, 1998]

ผลของการกระจายของกลุ่มแก๊สที่ขึ้นกับเวลาและตำแหน่ง ทำให้พลังงานเลเซอร์ที่ตกกระทบโลหะขึ้นกับ

เวลาและตำแหน่งด้วยเช่นกัน นอกจากนี้การกระจายตัวกลุ่มแก๊สยังเป็นผลกระทบต่อการกระจายตัวของค่า

ดัชนีหักเหของพลาสมา ซึ่งดัชนีหักเหมีค่าสูงที่บริเวณขอบของกลุ่มแก๊สพลาสมา [Essien, 1995] ทำให้เกิดการโฟกัสของเลนส์เว้า (Concave lens) และทำให้เกิดการกระจายของแสง [Divergence] [Duley, 1998] หรือพลังงาน ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นระดับพลังงานของเลเซอร์ที่ตกกระทบยังโลหะเป้าหมายย่อมลดลง หรือสรุปได้ว่าพลาสมาทำให้เกิดรอยเชื่อมที่ตื้น เกิดตามคหรือรูพรุน (Porosity) และส่วนประกอบของโลหะที่เปลี่ยนไปได้



รูปที่ 2.4 ภาพวาดแสดงขนาดลำแสงเลเซอร์ภายใต้อิทธิพลของกลุ่มแก๊สพลาสมาเหนือเป้าโลหะกรณี A. ไม่มี และ B. มีการเกิดของพลาสมาที่ชิ้นงาน

2.3.2 ขบวนการกำจัดพลาสมาด้วยแก๊สปกคลุม [Plasma reduction with shielding gas]

แก๊สปกคลุมทำหน้าที่สำคัญในการเชื่อมโลหะ กล่าวคือช่วยระงับการเกิดของพลาสมา ที่อาจทำให้พลังงานของเลเซอร์เกิดการกระเจิง ถูกดูดกลืน และกระจาย เป็นผลให้พลังงานเลเซอร์ที่ชิ้นงานเป้าหมายมีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นผลให้ได้ความลึกรอยเชื่อมที่ตื้น อีกทั้งยังช่วยปกป้องบริเวณของโลหะที่กำลังหลอมเหลว (Molten metal) อยู่ไม่ให้ไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับออกซิเจนที่อยู่โดยรอบ ซึ่งเป็นผลให้เกิดรอยเชื่อมที่ได้เปราะง่าย และขรุขระ นอกจากนี้แก๊สปกคลุมที่มีแรงดัน หรืออัตราการไหลยังทำการ

เป่าออกซิเจนและพลาสมาที่อยู่โดยรอบให้ออกไปจากบริเวณการเชื่อม แต่อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของแก๊สที่มากเกินไปอาจไปทำให้เกิดการกระเด็น (Splatter) ของโลหะที่หลอมละลายอยู่ออกจากรอยเชื่อม เป็นผลให้รอยเชื่อมขรุขระและการสูญเสียของเนื้อโลหะ (Material loss)

2.4 ชนิดของแก๊สปกคลุม (Shielding gas type)

ประสิทธิภาพของการป้องกันผลของพลาสมาต่อชนิดแก๊สปกคลุม ขึ้นกับพลังงานไอออนไนซ์ ของแก๊สแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2.1 กล่าวคือระดับพลังงานที่ต้องการในการทำให้แก๊สแตกตัวและกลายเป็นพลาสมา โดยปกติพลังงานไอออนไนซ์ ของแก๊สปกคลุมมีค่ามากกว่าพลังงานไอออนไนซ์ ระดับที่หนึ่ง (First ionization potential) ของโลหะ ค่าแก๊สฮีเลียม (Helium) มีค่าพลังงานไอออนไนซ์ที่มากกว่าแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen) จึงสามารถป้องกันการผลกระทบของพลาสมาต่อคุณภาพการเชื่อมโลหะได้ดีกว่า นีออน เป็นผลให้ความลึกของการเชื่อม (Penetration depth) ที่ได้มีค่าลึกกว่า ดังรูปที่ 2.5 ส่วนแก๊สอาร์กอน (Argon) มีค่า Molecular weight ที่สูงกว่า จึงสามารถปกป้องรอยเชื่อมเป้าหมายจากการเกิด Oxidation ซึ่งเป็นสาเหตุของรอยเชื่อมที่เปราะง่าย ที่มีประสิทธิภาพดี [Dawes, 1992] แต่อย่างไรก็ตาม การที่แก๊สอาร์กอนมีน้ำหนักที่มาก อาจทำให้ถูกกักที่บริเวณ weld zone จากนั้นเกิดการทำปฏิกิริยากับพลังงานตกกระทบที่สูงมีผลทำให้เกิดพลาสมาขึ้น เป็นผลให้ระดับความลึกของการเชื่อมตื้นลงได้ แต่

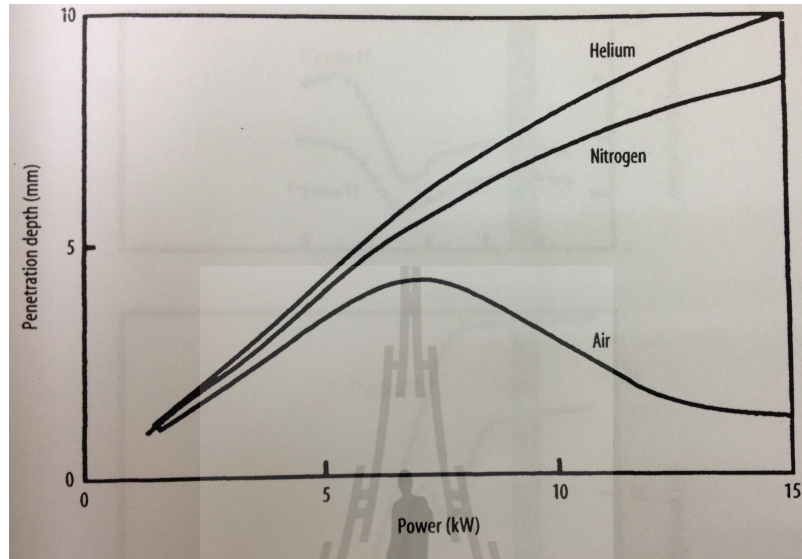
อย่างไรก็ตามแก๊สอาร์กอนนิยมใช้ สำหรับการป้องกันการเกิด Oxidation ในช่วงต้นของการคัปปีงและช่วง

ท้ายระหว่างการกลายสภาพ เป็นของแข็งและเย็นตัว เหตุผลอีกประการที่แก๊สอาร์กอนได้รับความนิยม

คือราคาที่ต่ำ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพลังงานไอออไนซ์ ระดับที่หนึ่ง (First ionization potential) และค่า Molecular weight ของโลหะ และแก๊ส [Steen, 2003, Ion, 2005, Larson, 1990, และ Israel Science and Technology, 2013]

Gas	Chemical symbol	Molecular weight	First ionization potential (eV)
Argon	Ar	39.95	15.68
Helium	He	4.00	24.46
Nitrogen	N ₂	28	15.65
Oxygen	O ₂	16	12.50
Aluminum	Al	27	5.96
Titanium	Ti	47.87	6.83



รูปที่ 2.5 แสดงความลึกของรอยเชื่อม (Penetration weld) ที่ได้จากการใช้แก๊สปกคลุมที่แตกต่างกัน [Steen, 2003]

2.6 คุณสมบัติของไททาเนียม (Properties of titanium material)

ไททาเนียมเป็นโลหะที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม อาทิ อุปกรณ์การแพทย์ เครื่องประดับ การบิน กีฬา และอื่นๆ [Klimpel et al., 2003, Kciuk et al., 2010, Klimpel, 2007, Curcio et al., 2004, และ Kurc-Lisiecka et al., 2013] เนื่องจากคุณลักษณะเด่นเรื่องความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง เทียบเท่ากับแพดตินัม ทดทานต่อความร้อน การนำความร้อน (Thermal conductivity) มีค่าต่ำ มีน้ำหนัก

เบา (โดยมีค่า 4.5 กรัมต่อตารางเซนติเมตร) แต่แข็งแรง อีกทั้งยังมีความเป็น Inert biomaterial ที่ไม่มีอันตรายต่อร่างกายของมนุษย์ จึงถูกนำการประยุกต์เป็นวัสดุทางทันตกรรมและอวัยวะเทียม [Santos et al., 2003, Watanabe, 2006, Kelkar, 2006, Lglesia-Puig MA., 2005 และ Hart, 2006] แต่การที่ไททานเนียมมีจุดหลอมละลายที่สูงประมาณ 1,668 องศาเซนเซียส ทำให้การขึ้นรูปด้วยการหล่อกระทำได้ยาก การขึ้นรูปขึ้นงานแปลกๆจึงต้องอาศัยการเชื่อม แต่การเชื่อมไททานเนียมด้วยวิธีอื่นนอกเหนือจากเลเซอร์จะได้อายุเชื่อมที่ได้บิดเบี้ยว และขรุขระไม่สวยงาม และเปลืองค่าใช้จ่าย ประกอบกับไททานเนียมสามารถดูดกลืนลำแสงนีโอไดเนียมแซ็คเลเซอร์ได้ดีเมื่อเทียบกับ ทองคำ (Au) หรือ โลหะเงิน (Ag) แสดงดังตาราง 2.2 ทำให้ไททานเนียมเป็นโลหะที่เชื่อมได้ (Weldability) แต่อย่างไรก็ตามไททานเนียมเป็นโลหะที่มีทำปฏิกิริยาได้ดีกับอากาศในบรรยากาศ [Klimpel et al., 2003, Curcio et al., 2004, Lisiecki et al., 2009, และ Klimpel et al., 2004] โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งระหว่างการเชื่อมและการเย็นตัว โลหะไททานเนียมดูดกลืนแก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจนในชั้นบรรยากาศ อีกทั้งสิ่งสกปรก (Contamination) ทั้งหลายจะเข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นผลให้ เกิดการเปราะ หักง่าย ขรุขระและฟองอากาศ ดังนั้นในการเชื่อมไททานเนียมจึงต้องใช้ควบคุมปริมาณของแก๊สเฉื่อยให้เหมาะสม และขึ้นงานต้องผ่านการทำความสะอาดก่อนการเชื่อม เพื่อให้ได้คุณภาพของการเชื่อมไททานเนียมที่ดี

Commercially Pure (CP) ไททานเนียมมีหลายเกรด แต่ละเกรดมีปริมาณ ออกซิเจน (O) และ Iron (Fe) แสดงดังตารางที่ 2.3 [William, 1998] ทำให้คุณสมบัติทางกล (Mechanical) ของไททานเนียมแต่ละเกรด

แตกต่างกัน CP ไททานเนียมเกรด 1 มีความบริสุทธิ์ของไททานเนียมสูง และมีค่า formability สูง การรีดเป็นแผ่นบางๆทำได้ง่าย การที่มีเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนต่ำ จึงมีค่าความแข็งแรงต่ำที่สุด ส่วน CP ไททานเนียมเกรด 4 ให้ค่าความแข็งแรงและการทนต่อการกัดกร่อนที่สูงที่สุด จึงถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติโดยทั่วไปของไททานเนียม [Togaya, 1999 และ Davis, 2003]

โลหะ	Density g/cm ³	Melting Temperature (degree C)	Thermal conductivity W/(m. K)	Nd:YAG laser beam absorption coefficient
เงิน Ag	10.5	880-960	397	0.03
ทอง Au	13.8	860-1060	297	0.03
ไททานเนียม อัลลอยด์ Ti	4.5	1668	17	0.40

เครื่องมือแพทย์ ส่วน CP ไททานเนียมเกรด 2 มีการใช้แพร่หลายที่สุด เนื่องจากความสามารถในการเชื่อมได้ มีการทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเท่ากับ CP ไททานเนียมเกรด 1 แต่มีความแข็งแรงกว่า ไททานเนียมเกรดนี้จึงมีให้เลือกหลากหลายลักษณะและจะถูกนำมาใช้ในการวิจัยที่จะกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 2.3 แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติ Commercially Pure (CP) ไททานเนียมแต่ละเกรด
[William, 1998]

ชนิดของ CP ไททานเนียม	O (max.)	Fe (max.)	Elongation at Break (%)	Tensile Strength, Yield (MPa)	Tensile Strength, Ultimate (MPa)
เกรด 1	0.18	0.20	24	170	240
เกรด 2	0.25	0.30	20	275	345
เกรด 3	0.35	0.30	18	380	445
เกรด 4	0.40	0.50	15	480	550

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมการทดลอง

ในการทดลองการเชื่อมไททาเนียมด้วยเลเซอร์ ได้ใช้ CP ไททาเนียมเกรด 2 โดยได้ทำการตัดชิ้นงานไททาเนียมให้มีขนาดกว้าง 6 มม. x ยาว 20 มม. x หนา 1 มม. ด้วยเครื่องวายเป็น (Wire-cut machine) จากนั้นชิ้นงานได้ถูกทำความสะอาดเพื่อลดการเปราะ หักง่าย และฟองอากาศที่จะเกิดจากการเชื่อม ด้วยสารเคมีกัดกร่อน (Chemical etching) ด้วย Kroll's reagent [Boyer, 1995] สาร Kroll's reagent ประกอบไปด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric, HF) 2 มล. กรดไนตริก (Nitric, HNO₃) 6 มล. และน้ำกลั่น (Distilled water) 92 มล. โดยใช้เวลาประมาณ 75 วินาที สำหรับในกรณีที่ใช้เวลาในการ Etch มากเกินไปผิวโลหะจะปรากฏรอยไหม้ จากนั้นโลหะผ่านการทำความสะอาดอีกครั้งเพื่อกำจัดน้ำมัน

คราบน้ำมันด้วยอะซิโตน ไททาเนียมก่อนและหลังการทำความสะอาดแสดงดังรูปที่ 3.1 จากนั้น

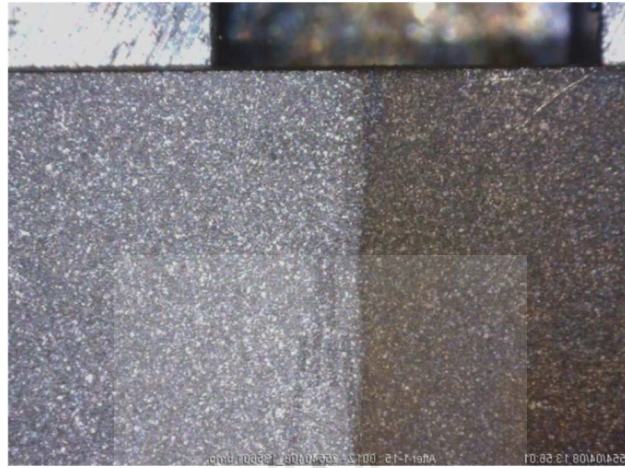
โลหะสองชนิดจะนำมาเชื่อมต่อในลักษณะของ Butt joint แสดงดังรูปที่ 3.2 แก๊สเฉื่อยที่ใช้เป็นแก๊ส

อาร์กอน คอมเมอร์เชียลเกรด มีเปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน 99.9% แก๊สอาร์กอนได้จัดให้อยู่ในตำแหน่งดัง

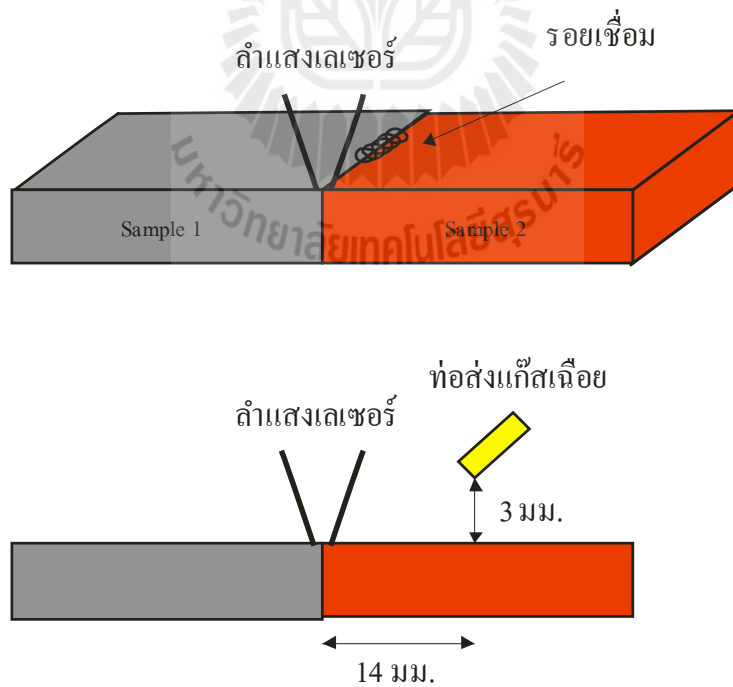
รูปที่ 3.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดวางชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ชิ้นงานไททาเนียมได้ถูก

ยึดติดที่ปลาย (บริเวณที่ไม่มีเชื่อม) ด้วยกาวกับแผ่นสไลด์ โดยช่องว่างรอยต่อระหว่างชิ้นงานไททา

เนื้ยมถูกควบคุมให้มีขนาด 30 – 50 ไมครอน โดยมีการวัดขนาดด้วยกล้อง Dino-lite microscope ให้กำลังขยายสูงสุดที่ 100 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 แสดงไททาเนียมก่อน (ขวามือ) และหลังการทำความสะอาดด้วย Kroll's reagent (ซ้ายมือ)



รูปที่ 3.2 การจัดวางชิ้นงานไททาเนียมเพื่อเชื่อมในลักษณะ Butt joint โดยใช้แก๊สเฉื่อย



รูปที่ 3.3 กล้องไมโครสโคปที่ใช้ตรวจสอบขนาดของช่องรอยต่อ

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

3.2.1 การทดลองการเชื่อมไททาเนียมด้วยเลเซอร์นีโอติเมียมแฮ็คเลเซอร์ ให้พลังงาน

แบบพัลส์รุ่น LW6V ยี่ห้อ Z-tech ผลิตที่ประเทศอเมริกา ได้ถูกนำมาใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.4 พลังงานของเลเซอร์ถูกใช้ที่ 2.0, 3.0 และ 3.5 กิโลวัตต์ ขนาดลำแสงที่ 0.6 มม. เวลาของพัลส์ที่ 2.5 มิลลิวินาที ลักษณะของพัลส์เป็นสี่เหลี่ยม ในการทดลองมีการปรับการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 0, 5, 10, และ 15 ลิตรต่อนาที

3.2.2 การแสดงผลของการเชื่อมไททาเนียมด้วยนีโอติเมียมแฮ็คเลเซอร์แบบพัลส์ ผล

การทดลองของการเชื่อมแสดงภาพทั่วไปส่วน Top View ใช้กล้อง Dino-lite microscope ส่วนกล้อง Optical microscope ที่มีกำลังขยายสูงสุด 1,000 เท่าใช้ในการดูรายละเอียดของรอยเชื่อมในเชิงลึกในส่วน ของภาพแนวตัด (Cross section) แต่ก่อนที่ชิ้นงานที่ผ่านตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยกล้องกำลังขยายสูง

ชิ้นงานจะต้องถูกนำไปติดตั้งในแนวตัดขวาง cross section โดยเรซินและคัลิป พิมพ์ดินน้ำมันและ
 กระจกด้านล่างจะทำการกักบริเวณเรซินไม่ให้ไหลออกจากพิมพ์ หลังจากเวลาประมาณ 12 ชั่วโมงเรซินจะ
 แข็งจึงสามารถแกะพิมพ์ดินน้ำมันออกได้ แสดงดังรูปที่ 3.5 จากนั้น

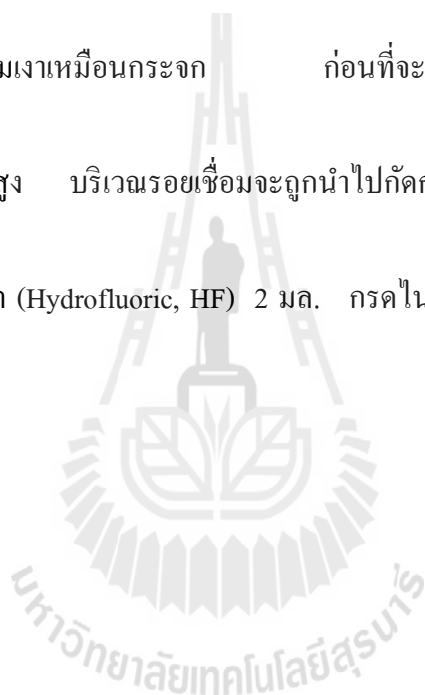


รูปที่ 3.4 เครื่องนี้ โอนิเมียมแอสเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลองเชื่อมไททาเนียม



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานถูกยึดด้วยเรซินและคัลิป

ชิ้นงานที่ถูกยึดด้วยเรซินจะถูกขัดไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม แต่ในการขัดส่วนของชิ้นงาน และรอยเชื่อมจะกระทำด้วยกระดาษทรายที่ความละเอียดต่างๆ กัน เริ่มด้วยกระดาษทรายที่มีการหยาบมากที่สุดเบอร์ 80 จะทำการกำจัดเรซิน ส่วนของรอยเชื่อมและโลหะที่ไม่ต้องการ จากนั้นก็ด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด กระทำให้รอยขัดมีความเรียบขึ้น โดยใช้เบอร์ 180, 400, 600 และ 800 ตามลำดับ จากนั้นกระดาษทรายเบอร์ 1,000 และ 12,00 จะทำให้ผิวชิ้นงานมีความเงา ขั้นตอนสุดท้ายผงอะลูมิน่าขนาด 0.05 ไมครอนทำการขัดผิวงานให้มีความเงาเหมือนกระจก ก่อนที่จะมีการสังเกตรอยเชื่อมในเชิงลึกด้วย Optical microscope กำลังขยายสูง บริเวณรอยเชื่อมจะถูกนำไปกัดกรดด้วย สาร Kroll's reagent ที่ประกอบไปด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric, HF) 2 มล. กรดไนตริก (Nitric, HNO) 6 มล. และน้ำกลั่น (Distilled water) 92 มล.



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในการทดลองมีปรับการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 0, 5, 10, และ 15 ลิตรต่อนาที โดยจะปล่อยแก๊สอาร์กอนปกคลุมบริเวณรอยเชื่อมเป้าหมายก่อนการเชื่อมและหลังการเชื่อมประมาณ 2-3 วินาทีซึ่งเพียงพอแก่ระยะเวลาการเย็นตัวจากการเชื่อม ได้ผลการทดลองที่จากการเชื่อมไททานเนียมด้วยพลังงานของเลเซอร์ที่ 2.0 และ 3.5 กิโลวัตต์ โดยปรับมีการ ใช้กล้อง Dino-lite microscope ถ่ายภาพ Top view แสดงดังตารางที่ 4.1

ผลการทดลองที่แสดงดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าอย่างชัดเจนว่า ในกรณีการเชื่อมโดยไม่ใช้แก๊สอาร์กอน โดยส่วนใหญ่เกิดการแตก cracking สาเหตุเนื่องมาจากการที่แก๊สในบรรยากาศที่มีอยู่ทั่วไป ได้แทรกตัวเข้าไประหว่างกระบวนการเปลี่ยนสภาพของโลหะที่หลอมละลาย และ solidification การทำปฏิกิริยาดังกล่าวแสดงให้เห็นสีที่รอยเชื่อมเป็นลักษณะสีฟ้า ส่วนในกรณีที่มีการป้อนแก๊สอาร์กอนรอยเชื่อมจะมีความสะอาด เงา และได้รอยเชื่อมที่ไม่ cracking หรือแตก เนื่องจากแก๊สอาร์ได้เป่าแก๊สในบรรยากาศให้ออกจากชิ้นงาน จากนั้นแก๊สอาร์กอนทำการแพร่คลุมรอยเป้าหมายการเชื่อมไว้ ตลอดขบวนการถ่ายเทพลังงาน การละลาย และเย็นตัว กล่าวคือ เมื่อพลังงานของเลเซอร์ตกกระทบไททานเนียม

เกิดการกระเจิง สะท้อนกลับของพลังงานเลเซอร์ ส่วนพลังงานเลเซอร์บางส่วนก็จะถูกถ่ายเทให้กับไททานเนียม เมื่อไททานเนียมได้รับพลังงานก็จะเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลวในบ่อหลอมละลายแก๊สในบรรยากาศ และเย็นตัวกลายเป็นของแข็ง ได้รอยเชื่อมที่สะอาด เงา ไม่แตกในที่สุด

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่ายด้านบนที่ได้จากการเชื่อมไททานเนียมด้วยเลเซอร์ที่ระดับพลังงานและอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่แตกต่างกัน

พลังงานเลเซอร์ (kW)	อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตรต่อนาที)			
	0	5	10	15
2.0				
3.5				

จากนั้นทำการตรวจสอบผลการเชื่อมในแนวภาพตัดขวางด้วย metallographic specimen วิธีนี้นำชิ้นงาน (specimen) ไปผ่านขบวนการขัดและกัดกรดทางเคมี จากนั้นถ่ายภาพรอยเชื่อมในแนวตัดขวางด้วย optical microscope ที่มีกำลังขยายสูงสุด 1,000 เท่า สาเหตุที่ได้ใช้อุปกรณ์ Scanning Electron Microscope

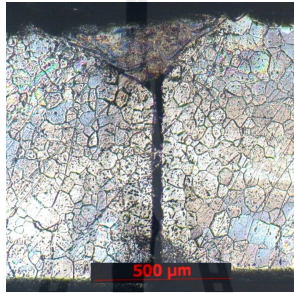
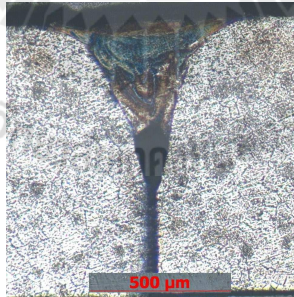
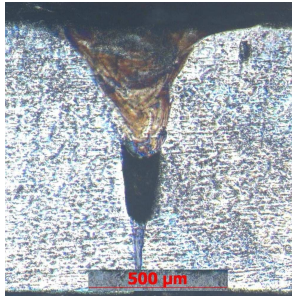
(SEM) ไม่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสังเกตรอยเชื่อมในงานวิจัยนี้ เป็นเพราะให้ผลของภาพแนวตัดขวางไม่ดีเท่าการสังเกตด้วย optical microscope อีกทั้งยังใช้เวลาในการเตรียมชิ้นงานนาน ประกอบกับเครื่อง SEM มีจำนวนจำกัด

ผลของการทดลองที่พลังงานของเลเซอร์ 2.0 kW ขนาดลำแสง 0.6 มม. เวลาของพัลส์ 2.5 มิลลิวินาที การไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5, 10, และ 15 ลิตรต่อนาที ตารางที่ 3.2 แสดงภาพตัดขวางของรอยเชื่อมที่ได้ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีแก๊สอาร์กอนเข้าไปปกคลุมบริเวณจุดเชื่อม นอกจากรอยเชื่อมจะไม่แตก เปราะ หรือหักแล้ว รอยเชื่อมที่ได้มีความลึกเพิ่มมากขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าเมื่อแก๊สอาร์กอนถูก ป้อนที่ 5 ลิตรต่อ นาที รอยเชื่อมจะมีลักษณะ Conduction mode เป็นรูปถ้วย แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สที่ 10 และ 15 ลิตรต่อนาที รอยเชื่อมที่ได้เป็นลักษณะของ keyhole ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าความลึกของรอยเชื่อมที่มีการเพิ่มด้วยอัตราที่รวดเร็ว จากความลึก 270 ไมโครเมตร เพิ่มเป็น 625 และ 716 ไมโครเมตร เมื่อแก๊สเพิ่มจาก 5 ลิตรต่อนาที เป็น 10 และ 15 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ผลการทดลองทำให้สรุปได้ว่า แก๊สอาร์กอนทำหน้าที่ได้อย่างดีในการปรับปรุงคุณภาพของการเชื่อมไททานเนียม โดยรอยเชื่อมที่ได้ไม่แตกหัก และรอยเชื่อมมีความลึกมากยิ่งขึ้น อัตราการไหลของแก๊สที่ 5 ลิตรต่อนาที ช่วยป้องกันบ่อหลอมละลายของไททานเนียมจากการทำปฏิกิริยากับบรรยากาศโดยรอบได้ดี (ผลการทดลอง ตามตาราง 3.1) แต่การดูดกลืนพลังงานเลเซอร์ที่ไททานเนียมเข้า-หมายกับน้อยกว่าอัตราการไหลของแก๊สที่ 10 และ 15 ลิตรต่อนาที จะเห็นได้จากความแตกต่างของความลึกของรอยเชื่อมที่ได้ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าเมื่ออัตราการไหล

ของแก๊สอาร์กอนที่ 5 ลิตรต่อนาที ไม่สามารถกำจัดพลาสมาที่เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นผลให้ความเข้มข้นของพลังงานของเลเซอร์ที่ไททานเนียมน้อยกว่ากรณีที่มีการป้อนแก๊สอาร์กอนที่ 10 และ 15 ลิตรต่อ นาที และผลการทดลองให้ค่าความลึกของรอยเชื่อมมากที่สุดเมื่อป้อนแก๊สอาร์กอนที่ 15 ลิตรต่อ นาที

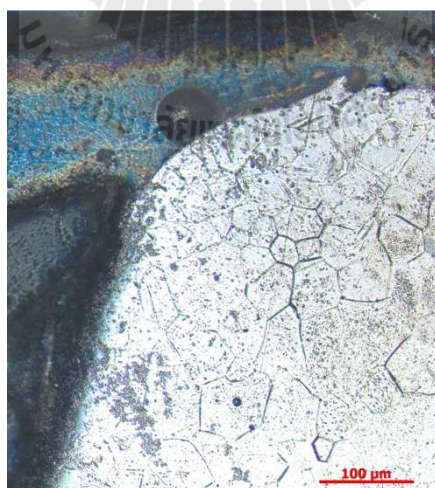
เมื่อทำการเพิ่มค่าพลังงานของเลเซอร์เป็น 3.5 kW โดยมีค่าขนาดลำแสง 0.6 มม. เวลาของพัลส์ 2.5 มิลลิวินาทีและพัลส์ในรูปแบบ square เหมือนเดิม ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 ลิตรต่อ นาที พบว่ามีฟองอากาศถูกกักอยู่ในรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.1 การเกิด porosity หรือฟองอากาศวิเคราะห์ได้ว่า เนื่องด้วยไททานเนียมได้รับการถ่ายเทพลังงานจากเลเซอร์ ด้วยค่าความเข้มของพลังงานที่สูงถึง 3.5 kw ประกอบกับภายในบ่อหลอมละลาย ไททานเนียมสามารถเกิดดูดกลืนพลังงานของเลเซอร์ได้มากขึ้นผ่านทางกรรท่อนแสง และการหักเหไปมา ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเชื่อมของ keyhole ฟองอากาศที่แทรกตัวเข้าไปยัง molten metal พยายามดันตัวออกมา ฟองอากาศถูกกักอยู่ระหว่างรอยเชื่อมและเนื้อโลหะ ไททานเนียมตามทิศทางของแรงดึงระหว่างที่โลหะเกิดขบวนการเย็นตัว ประกอบกับพัลส์ของเลเซอร์ในรูปแบบ square ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเลเซอร์

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายตัดขวางที่รอยเชื่อมของไททานเนียมด้วยเลเซอร์ ที่ระดับพลังงาน 2.0kW และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่แตกต่างกัน

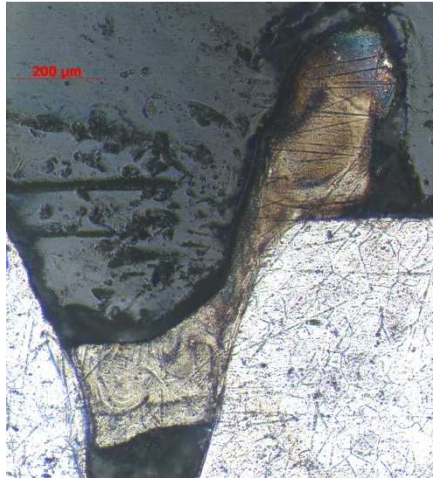
อัตราการไหลของ แก๊สอาร์กอน ลิตรต่อนาที	พลังงานเลเซอร์ 2.0 kW	
	รูปภาพตัดขวางของรอยเชื่อม	ความลึก (Penetration depth) ไมโครเมตร
5		270
10		625
15		716

ในเวลาอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ขบวนการดูดกลืนพลังงานและการเย็นตัวของไททาเนียมเป็นไปอย่างรวดเร็ว ด้วย ดังนั้นโอกาสที่ฟองอากาศจะถูกกักอยู่ภายในรอยเชื่อมจึงมีสูง

รูปที่ 4.2 เป็นการเพิ่มการป้อนแก๊สอาร์กอนเป็น 15 ลิตรต่อนาที โดยพลังงานของเลเซอร์ และเลเซอร์พารามิเตอร์ดั้งเดิมคือ 3.5 kW ขนาดลำแสง 0.6 มม. เวลาของพัลส์ 2.5 มิลลิวินาทีและพัลส์ใน รูปแบบสี่เหลี่ยม square พบว่าเนื้อไททาเนียมที่ปากรอยเชื่อมดังรูป สาเหตุเนื่องมาจากอัตราการไหลของ แก๊สที่มากและไม่เหมาะสม แก๊สอาร์กอนไม่ได้ทำหน้าที่เพียงแต่เป่าแก๊สในบรรยากาศและพลาสมาให้ ออกไปจากบริเวณรอยเชื่อมเป้าหมาย แต่ยังเป่าโลหะเหลว molten metal ให้กระเด็น splatter ออกไปจากบ่อ หลอมละลาย เมื่อพลังงานของเลเซอร์ได้สิ้นสุดลง molten metal เกิดการเย็นตัว เป็นผลให้เกิด splatter ของ เนื้อโลหะที่ปากรอยเชื่อมดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงการเกิดฟองอากาศ (Porosity) ภายในรอยเชื่อมไททาเนียมด้วยเลเซอร์ เมื่ออัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 ลิตร



รูปที่ 4.2 แสดงการกระเด็น (Splatter) ของเนื้อโลหะเมื่อภายในรอยเชื่อมไททานเนียมด้วยเลเซอร์เมื่ออัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 15 ลิตร



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยการเชื่อมด้วยไททาเนียมด้วยเลเซอร์โดยการใช้แก๊สอาร์กอนช่วยนั้น พบว่าโลหะไททาเนียมเป็นโลหะมีการปฏิกิริยาได้อย่างดีกับอากาศ การเกิด oxidation กับอากาศโดยรอบนำมาซึ่งผิวที่คล้ำหมอง ดังนั้นก่อนที่จะทำการเชื่อมด้วยเลเซอร์เลเซอร์ต้องผ่านขบวนการทำความสะอาดด้วยสารเคมีเพื่อกำจัด oxidation layer อีกทั้งต้องมีการกำจัดคราบน้ำมัน หรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ก่อนการเชื่อมเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพที่ดีคือ รอยเชื่อมที่ลึก เงาม ไม่แตก หรือขรุขระ ในการวิจัยได้วิเคราะห์ผลกระทบของพลังงานเลเซอร์และอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนในการเชื่อม การศึกษาพบว่าแก๊สอาร์กอนเป็นสิ่งที่จำเป็นในการเชื่อมไททาเนียม เพราะช่วยทำให้ป้องกันการเกิด oxidation ที่ผิวหน้ารอยเชื่อม เนื่องจากแก๊สในบรรยากาศถูกเป่าออกจากบริเวณรอยเชื่อมเป้าหมาย ระหว่างขบวนการถ่ายเทพลังงาน การหลอมละลาย และการเย็นตัว ทำให้รอยเชื่อมไม่มีการแตกร้าวที่ผิวหน้าดังแสดงที่ตาราง 4.1 อีกทั้งปริมาณแก๊สอาร์กอนมากขึ้นช่วยให้อัตราการดูดกลืนพลังงานของเลเซอร์ที่โลหะไททาเนียมมีค่ามากขึ้น การเกิดพลาสมาถูกกำจัดมากขึ้น รวดเร็วขึ้น ผลที่ได้รับคือรอยเชื่อมมีคุณภาพดีขึ้น กล่าวคือ รอยเชื่อมเปลี่ยนจาก conduction เป็น keyhole ความลึกของรอยเชื่อมมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.1

อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สอาร์กอนที่เหมาะสมขึ้นกับพลังงานของเลเซอร์ที่ถูกป้อนที่รอยเชื่อม

เป้าหมาย ในกรณีของการเชื่อมที่พลังงานเลเซอร์ 2.0 kW และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 10 และ 15 ลิตรต่อนาที ให้รอยเชื่อมที่ได้มีความลึกเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สที่มากขึ้น แต่สำหรับพลังงานเลเซอร์ 3.5 kW และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 15 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.2 ที่รอยเชื่อมเกิดการกระเด็น splatter ของเนื้อโลหะ เนื่องจากความเข้มของพลังงานเลเซอร์ที่สูงเกิน ทำให้โลหะมีการหลอมละลายอย่างรวดเร็วและรุนแรง แรงดันจากแก๊สอาร์กอนจึงสามารถเป่าเนื้อโลหะที่กำลังหลอมละลายอยู่ให้ออกไปจากบ่อเชื่อม เนื้อโลหะเกิดการสูญเสีย รอยเชื่อมไม่แข็งแรง การกระเด็นของโลหะออกจากรอยเชื่อมนอกจากจะมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมแล้ว เศษเนื้อโลหะที่กระเด็น spatter ออกไปอาจไปติดกับอุปกรณ์อื่นที่อยู่ใกล้เคียง ทำให้อุปกรณ์ใกล้เคียงเกิดความเสียหาย รอยเชื่อมที่ขรุขระทำให้รอยเชื่อมที่ได้ไม่สวยงาม ดังนั้นเมื่อที่รอยเชื่อมมี splatter เกิดขึ้น จึงเป็นการระบุว่าแก๊สเฉื่อยที่ป้อนให้กับระบบมีปริมาณมากเกินไป

การเกิดฟองอากาศ porosity ทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง เนื่องจากฟองอากาศได้เข้าไปแทนที่เนื้อโลหะที่รอยเชื่อม เมื่อมีการวิเคราะห์ถึงแหล่งกำเนิด porosity สามารถจำแนกได้เป็นสองแหล่ง คือ gas porosity เกิดจากแก๊สในบรรยากาศ คือ แก๊สไฮโดรเจน ออกซิเจน หรือ ไนโตรเจน และ plasma porosity เกิดระหว่างขบวนการเชื่อม แก๊สได้แทรก solubility เข้าไปภายในโลหะหลอมละลาย molten metal เมื่อเข้าสู่ขบวนการเย็นตัวแก๊สจะถูกขับออกมาในรูปฟองอากาศและพยายามที่จะลอยตัวออกจากบ่อ

หลอมละลาย แต่ขณะเดียวกัน molten metal ได้เย็นตัวและกลายเป็นของแข็งทำให้ฟองอากาศถูกกัก
 อยู่ภายในรอยเชื่อม การเกิด porosity เป็นการบ่งบอกถึงปริมาณแก๊สเฉื่อยที่ปกคลุมบริเวณรอยเชื่อมไม่
 เหมาะสม จะเห็นได้จากรูปที่ 4.2 พลังงานเลเซอร์ 3.5 kW และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 5 ลิตรต่อ
 นาที ดังนั้นเพื่อให้ได้รอยเชื่อมไททานเนียมที่สมบูรณ์ปราศจาก porosity รอยเชื่อมที่ลึก (penetration depth)
 ไม่แตก (cracking) ไม่เปราะ (brittle) ไม่ขรุขระ หรือ ไม่มีการกระจายของโลหะ (splatter) ระดับพลังงาน
 ของเลเซอร์ ต้องมีความสอดคล้องกับอัตราไหลของแก๊สอาร์กอน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์การเชื่อมไททานเนียมด้วยแก๊สอาร์กอน สรุปได้ว่าการ
 เชื่อมไททานเนียมโดยปราศจากแก๊สเฉื่อยย่อมการันตร้อยเชื่อมที่เปราะ หักง่าย และสั้น และปริมาณการ
 ป้อนของแก๊สเฉื่อยที่เหมาะสม กับระดับพลังงานของเลเซอร์ และ ตัวแปรของเลเซอร์ย่อมทำให้เกิดรอย
 เชื่อมที่มีคุณภาพ ในกรณีที่ต้องการสร้างรอยเชื่อมคุณภาพสูง (โดยไม่คำนึงถึงค่าใช้จ่าย) จากการเชื่อมไท
 ทานเนียมด้วยเลเซอร์ควรให้ความสำคัญเพิ่มองค์ประกอบของเครื่องมือและวิธีปฏิบัติการดังต่อไปนี้

1. ควร monitor คุณภาพรอยเชื่อมที่ได้เป็นระยะ

เพื่อจะได้ปรับเปลี่ยนตัวแปรในการเชื่อมที่เหมาะสม อาทิ ปริมาณแก๊สเฉื่อย ความเข้มแสง เวลาของ
 สัญญาณพัลส์

2. ตรวจสอบและ calibrate ขนาดความเข้มแสงของนีโอคิเมียมแฮ็คเลเซอร์อย่าง

สม่ำเสมอ เนื่องจากคุณภาพรอยเชื่อมเป็นผลมาจากค่าความเข้มของพลังงานแสงเลเซอร์ อีกทั้งค่าพลังงานมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณแก๊สเฉื่อยที่เหมาะสม ค่าพลังงานที่แท้จริงและค่าตัวเลขแสดงผลอาจมีค่าคลาดเคลื่อนตามระยะเวลา

3. ตรวจสอบสภาพและบำรุงรักษาระบบเลเซอร์อย่างสม่ำเสมอ

พลังงานของเลเซอร์ลดลงเนื่องจากสาเหตุหลายประการ อาทิ อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนที่มากเกินไป ทำให้ กระจกและอุปกรณ์ทางแสงที่แสงเลเซอร์ส่งผ่านสกปรก วัสดุในการกำเนิดแสงเลเซอร์เสื่อมสภาพ อุปกรณ์ปรับขนาดลำแสงและเวลามีค่าคลาดเคลื่อนจากเดิม เป็นต้น

4. ออกแบบและใช้ลักษณะสัญญาณพัลส์ของเลเซอร์ที่หลากหลาย

เพื่อลดการเกิด porosity และการเปราะ หักง่าย ที่เป็นผลมาจากการค้ำบั้งและการเย็นตัวของโลหะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับของพลังงานเลเซอร์

5. ควรปรับค่าเวลาของเลเซอร์ให้เหมาะสม

6. การเชื่อมไททานเนียมใน chamber

เนื่องจากโลหะไททานเนียมมีคุณสมบัติ gas-metal reaction ที่สูงควรกำจัดเชื่อมใน chamber ที่ป้องกันโลหะไททานเนียมไปสัมผัสกับแก๊สในบรรยากาศ

7. จัดวางและออกแบบหัวจ่ายแก๊สเฉื่อยให้เหมาะสมกับลักษณะ และขนาดของรอยเชื่อม

8.อาจมีการใช้แก๊สเฉื่อยหลายชนิดในการเชื่อมงาน

9.การ monitor ปริมาณของ plasma ในลักษณะ real time

ปริมาณ plasma เกิดจากปริมาณความเข้มของพลังงานเลเซอร์ และปริมาณแก๊สเฉื่อยที่กลายสภาพ ดังนั้น

ควรมีการ monitor ปริมาณและตำแหน่งของ plasma เพื่อใช้ในการปรับปริมาณและตำแหน่งของแก๊สเฉื่อย

ให้เหมาะสม



บรรณานุกรม

หนังสือพิมพ์ผู้จัดการรายสัปดาห์, 13 ตุลาคม 2550. รพ.เอกชนแผลงฤทธิ์...เปิดเกมรุกแตกไลน์

ธุรกิจประเทศไทย. ข่าว (Online). <http://www.manager.co.th/iBizchannel/>

[ViewNews.aspx?NewsID=9500000121445](http://www.manager.co.th/iBizchannel/ViewNews.aspx?NewsID=9500000121445).

นายกฤษฎา พรหมเวท, 17 ธันวาคม 2555. จับตา:หลากรมตางมองเมคคัลฮับ. ศูนย์ข้อมูล&ข่าว

สืบสวนเพื่อสิทธิพลเมือง. สำนักงานส่งเสริมสวัสดิภาพและพิทักษ์เด็ก เยาวชน ผู้ด้อยโอกาส

และผู้สูงอายุ, บทความ (Online). [http://central.opp.go.th/center/index.php/component/](http://central.opp.go.th/center/index.php/component/content/article/10-blog/64-article10)

[content/article/10-blog/64-article10](http://central.opp.go.th/center/index.php/component/content/article/10-blog/64-article10).

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 28 เมษายน 2553, ฮับสุขภาพแห่งเอเชีย-สร้างโอกาสทองธุรกิจการแพทย์ไทย,

บทความ (Online) <http://www.ksmcare.com/Article/82/24738/ฮับสุขภาพแห่งเอเชีย-สร้าง>

โอกาสทองธุรกิจการแพทย์ไทย.

Apalak, M. K., Aldas, K. and Sen, F. (2003). Thermal non-linear stresses in an adhesively boned

and laser-spot welded single-lap joint during laser-metal interaction. J. of Mater. Process.

Technol. vol. 142. pp. 1-19.

Beck, M., Berger, P. and Hugel, H. (1995). The Effect of Plasma Formation on Beam Focusing

in Deep Penetration Welding with CO₂ laser. J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 28. no. 12. pp.

2430-2442.

Boyer, R. (1995). Titanium and Titanium alloys. In Kieppura, R and Sanders, B (eds.).

ASM Handbook. Volume 9 Metallography and Microstructures. (6th ed.). ASM International:

USA.

Brown, D. (2003). Laser Welding Basics Primary Adjustable Welding Parameters. Bench

Magazine. Fall issue. vol. 3. issue 2. pp. 78-83.

Curcio, F., Memola, F., Klimpel, A. and Lisiecki, A. (2004). A basic study on the high power

diode laser welding of titanium alloy. Proceedings of the 23rd International Congress on

Applications of Lasers & Electro-Optics. San Francisco, USA. pp. 25-32.

Davis, J. R. (2003). Handbook of material for medical device. ASM International: USA.

Dawes, C. (1992). Laser Welding. Woodhead Publishing Ltd: England.

Dowden, J., Kapadia, P. and Postacioglu, N. (1989). An Analysis of the Laser-Plasma Interaction

in Laser Keyhole Welding. J. Phys. D: Appl. Phys. vol. 22. no. 6. pp. 741-749.

Du, H., Hu, L., and Liu, J. (2004). A study on the metal flow in full penetration laser beam welding for titanium alloy. vol. 29. pp. 419-427.

Duley, W. W. (1998). Laser welding. John Wiley & sons, Inc: Canada.

Essien, M., Keicher, D. M. and Jellison, J. L. (1995) Observation of Refractive Index in a Laser-Generated Plume Using Laser Schlieren Imaging, Conference: International congress on applications of lasers and electro-optics, San Diego, CA, Nov 13-16 1995.

Faerber, M., Danzer, W., Hartl, J. May 2003. Laser Welding Beyond Limits. Industrial Laser Solutions Magazine. (Online): <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-18/issue-5/features/laser-welding-beyond-limits.html>.

Hanson, F. and Duley, W. (1994). Attenuation of laser radiation by particles during laser material processing. J. Laser Appl. vol. 6. issue 3. p 137.

Hart, C. N. and Wilson, P. R. (2006). Evaluation of welding titanium joint used with cantilevered implant-supported prostheses. J. of Prosthodontics. vol. 97. no.1, pp. 25-32.

Heidecker, E., Schäfer, J. H., Uhlenbusch, J. and Viöl, W. (1988). Time-resolved

study of a laser-induced surface plasma by means of a beam-deflection technique.

J. Appl. Phys. vol. 64. issue 5. p. 2291.

Ion, J. C. (2005) Laser Processing of Engineering Materials. Elsevier Butterworth-Heinemann:

MA.

Israel Science and Technology. 2013. List of Periodic Table Elements Sorted by Atomic Number.

(Online): <http://www.science.co.il/ptelements.asp>.

Kciuk, M., Kurc, A. and Szewczenko, J. (2010). Structure and corrosion resistance of aluminium

AlMg2.5; AlMg5Mn and AlZn5Mg1 alloys. J. of Achievements in Materials and

Manufacturing Engineering. vol. 41. issue. ½. p.74-81.

Kelkar, G. June, 2006. Resistance and Laser Welding for Medical Devices. Medical Device and

Diagnostics Industry (MDDI). (Online). [http://www.welding-](http://www.welding-consultant.com/ResistanceAndLaserWeldingForMedicalDevices.pdf)

[consultant.com/ResistanceAndLaserWeldingForMedicalDevices.pdf](http://www.welding-consultant.com/ResistanceAndLaserWeldingForMedicalDevices.pdf).

Klimpel, A., Lisiecki, A., Szymaski, A. and Hoult, A. (2003). Numerical and experimental

determination of weld pool shape during high power diode laser welding. Proc. SPIE, Laser

Technology VII Applications of Lasers, vol 5229. p.247.

Klimpel, A. and Lisiecki, A. (2007). Laser welding of butt joints of austenitic stainless steel AISI

321. J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. vol. 25. Issue 1.

pp.63-66.

Klimpel, A., Lisiecki, A. and Janicki, D. (2004) Study of titanium sheets HPDL welding

phenomenon. Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers &

Electro-Optics. USA.

Kugler, T. May 2003. Advanced Modulation for Welding. Industrial Laser Solutions Magazine.

(Online): [http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-18/issue-](http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-18/issue-5/features/advanced-modulation-for-welding.html)

[5/features/advanced-modulation-for-welding.html](http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-18/issue-5/features/advanced-modulation-for-welding.html).

Kurc-Lisiecka, A., Ozgowicz, W., Ratuszek, W. and Kowalska, J. (2013). Analysis of

deformation texture in AISI 304 steel sheets. Solid State Phenomena. vol. 203-204. pp. 105-

110.

Larson, N. E. and Meredith, W. F. (1990). Shielding gas selection manual, Union

Carbide Industry Gases Technology Corp.: Texas.

Lglesia-Puig MA. (2005). Custom-made laser-welded titanium implant prosthetic abutment. J. of

Prosthodontics. vol. 94. no. 4. pp. 401-403.

Li, Z., Gobbi, S. L. and Norris, I. (1997). Laser welding techniques for titanium alloy sheet. J. of

Mater. Process. Technol. vol. 65. pp. 203-208.

Lisiecki, A., et al. (2009) Fibre laser welding of titanium alloy. 9th Symposium on Laser

Technology, Swinoujscie, Poland.

Liu, J., Watanabe, I., and Yoshida, K. (2002). Joint strength of laser-welded titanium. J. of Mater.

Process. Technol. vol. 18, pp. 143-148.

Matsunawa, A. (1990). Physical Phenomena and their interpretation in laser material

processing. Proceeding ICALEO 90, SPIE 1601; p.313.

Messler, R. W. , Jr. (1999). Principles of Welding. John Wiley & sons, Inc: Canada.

Ponpitak, R. and Tachatraiphop, S. (2009) Effect of Laser Pulse Shapes in Laser Welded Silver.

Proceedings of the 4th National Conference of Optics and Applications.

Pfalzner, S. (2006) An Introduction to Inertial Confinement Fusion, . CRC PressTaylor & Francis

Group: FL.

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. pp.

1888-1893.

Semark, V. V., Steel, R. J., Fuerschbach, P. W. and Damkroger, B. K. (2000). Role of Beam

Absorption in Plasma During Laser Welding. J. Phys. D: Appl. Phys. vol. 33, no. 10. pp.

1179-1185.

Sibillano, T., Ancona, A., Berardi, V. and Lugara, P. M. (2005). Correlation Analysis in Laser

Welding Plasma. Optics Comm. vol. 251, issues. 1-3. pp 139-148.

Smith, D., Burnett, A. and Gordon, T. (1972). Laser Welding of Gold Alloy. J. Dent. Res., vol.

51, no. 1, pp. 161-167.

Steen, W. M. (2003) Laser Material Processing. Springer-Verlag: London.

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.

Watanabe,I., Topham, D. (2006). Laser Welding of Cast Titanium and Dental Alloys Using

Argon Shielding. J. of Prosthodontics. vol. 15. no. 2. pp. 102-107.

William, D. F. (1998). Titanium and titanium alloys. Boca Raton: CRC Press: USA.

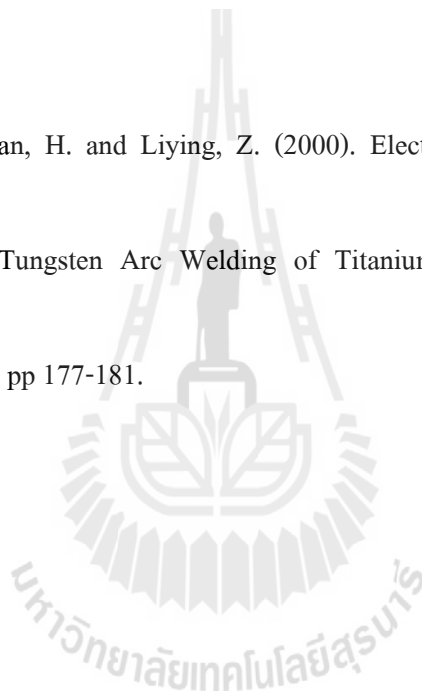
Wright, J. (2002). Jewellery-Related Properties of Platinum. Platinum Metals Rev. vol. 46. no. 2.

pp.66-72.

Yunlian, Q., Ju, D., Quan, H. and Liying, Z. (2000). Electron Beam Welding, Laser Beam

Welding and Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Sheet. Material Science and

Engineering. A280. pp 177-181.



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