

ภาคผนวก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

จنگล ศรีธร, เกษมสันต์ แสงสาร การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมโดยการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ด้วยกระบวนการเชื่อมไนโอติเมียมแย็กเลเซอร์. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2566, ชลบุรี, 11-12 พฤษภาคม 2566.

Saengsan, K., Srithorn, J., (2024). EFFECT OF PARAMETERS IN REPAIR WELDING OF PLASTIC MOLD STEEL WITH ND: YAG LASER WELDING PROCESS. Suranaree Journal of Science and Technology.

**การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมโดยการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน
เกรด SS400 ด้วยกระบวนการเชื่อมชนิดเลเซอร์ Nd:YAG**
**The study of parameters affecting weld bead by welding SS400 grade carbon steel materials
with Nd:YAG laser welding process.**

จงกล ศรีธร¹, กษมสันต์ แสงสาร^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

E-mail: kasemsan3631@gmail.com*

Jongkol Srithorn¹, Kasemsan Saengsan^{1*}

¹School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

E-mail: kasemsan3631@gmail.com*

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการเชื่อมเลเซอร์ถูกนำมาใช้หลายลักษณะงาน เช่น การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อากาศยาน ตลอดจนการเชื่อมอัญมณี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเชื่อมซ่อมแซมพิมพ์ในอุตสาหกรรม เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ก่อนที่จะมีการชำรุดเสียหาย โดยการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อม ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ความถี่ของพัลส์ และระยะเวลาของพัลส์ 2) ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม โดยการศึกษาที่ใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ด้วยชนิดเลเซอร์ Nd:YAG กับลวดเชื่อมสเตนเลส เกรด 316 ผลจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ยความสูงของแนวเชื่อม เท่ากับ $332.01 \pm 36.06 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าการเชื่อมประเภทอื่น ๆ ผลจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่า บริเวณโลหะฐานของการเชื่อมมีโครงสร้างเป็นแบบเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ซึ่งไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง และพบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีลักษณะประกอบด้วยโครงสร้างที่หลากหลาย โดยที่บริเวณของแนวเชื่อมมีลักษณะของเกรนแบบแท่ง (Columnar grain) และ Dendritic ferrite มีขนาดที่เท่า ๆ กันกระจายในโครงสร้าง Austenite ซึ่งโครงสร้างของ Dendritic มีลักษณะที่เป็นเกรนละเอียดที่บริเวณแนวเชื่อม (Weld zone) และเกรนของ Dendritic มีการเติบโตในทิศทางแบบสุ่ม (Random direction) ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างนี้เมื่อให้ความร้อนให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและสามารถต้านทานการสึกหรอได้ และผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อม พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์ต่ำ จะส่งผลให้แนวเชื่อมมีขนาดเล็ก แต่ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์สูง จะส่งผลให้แนวเชื่อมมีขนาดกว้างขึ้น สามารถใช้เป็นแนวทางในการเชื่อมซ่อมแซมพิมพ์ในอุตสาหกรรมในการศึกษาวิจัยในอนาคตในระยะถัดไป

คำสำคัญ: ชนิดเลเซอร์ Nd:YAG, โครงสร้างจุลภาค, โครงสร้างมหัพภาค, เหล็กกล้าคาร์บอน

Abstract

Nowadays, laser welding is used in a wide variety of applications, including the production of automotive parts, aircraft, and jewelry. Especially in advanced manufacturing mold repair welding, for close sufficient for the mold to be effective before it is damaged. The objectives of this study were 1) to study the parameters affecting the weld bead, such as the arc current, pulse frequency, pulse duration. 2) to study the macrostructure and the microstructure of the weld bead. In this study, SS400 grade carbon steel was used with a Nd:YAG laser and stainless-steel welding wire grade 316. The results from the study of the macrostructure of the weld bead are small at the micrometer level. The average height of the weld bead was $332.01 \pm 36.06 \mu\text{m}$, which is smaller than other types of welding. The base metal area of the weld consisted of a ferrite and pearlite structure, which was unaffected by the welding heat, according to the results of the microstructure study. As a result, the microstructure of carbon steel of the SS400 grade is unchanged. It was found that the microstructure of the weld bead consisted of a variety of structures, where the weld region is characterized by columnar grains and dendritic ferrites are evenly distributed in the austenite structure. The dendritic structure is fine grain at the weld zone and the dendritic grain grows in a random direction. According to research on this type of structure, the hardness and wear resistance of the weld line tends to increase, and the results of the study of parameters affecting the welding line found that if the welding current, Pulse Duration, and pulse frequency are low it will result in a smaller tendency of the weld line. But on the other hand, if the welding current, Pulse Duration, and pulse frequency are higher, the larger the tendency of the weld line will be. This can be used as a guideline for repairing the welding of industrial molds in future research studies.

Keywords: Nd:YAG laser process, Microstructure, Macrostructure, Carbon steel

1. บทนำ

ปัจจุบันการเชื่อมเลเซอร์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีคือลำแสงเลเซอร์มีขนาดเล็ก และเป็นเส้นตรง ทำให้การเชื่อมบริเวณที่ลึกและซับซ้อนได้ดี ไม่เกิดการบิดงอของชิ้นงานในบริเวณใกล้เคียงของแนวเชื่อม อีกทั้งพื้นที่ที่อิทธิพลความร้อน (Heat affected zone) มีขนาดเล็กเป็นผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรง แคบและเล็ก [1,2] สำหรับประเทศไทยการเชื่อมเลเซอร์ถูกนำมาใช้หลายลักษณะงาน เช่น การเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ (Mold) การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อากาศยาน ตลอดจนอัญมณีหรือเครื่องประดับ โดยเฉพาวัสดุทองคำและเงินที่มีราคาสูง เป็นต้น การเชื่อมเลเซอร์ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถเชื่อมอัตโนมัติได้ มีความเร็วในการเชื่อมสูง บริเวณผลกระทบมีขนาดเล็ก อันตราส่วนการเชื่อมลึกต่อความกว้างของแนวเชื่อมสูง และการเสียรูปจากความร้อนของชิ้นงานต่ำ [3,4,5] ในประเทศไทยกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ถูกนำมาใช้หลายชนิด โดยแบ่งเป็นตามชนิดของตัวกลาง ตัวกลางที่เป็นก๊าซ เช่น อาร์กอนเลเซอร์ (Ar Laser) คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ (CO_2 laser) ชนิดที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลว เช่น Rhodamin 6G Lasera เป็นต้น ชนิดตัวกลางที่ใช้เป็นของแข็ง ได้แก่ Nd:YAG Laser, Ruby Laser เป็นต้น สำหรับในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์มักใช้ชนิดไอต์ติเมียมแอกเลเซอร์ (Nd:YAG) ซึ่งมีผลึกของแข็งเป็นแบบ Yttrium-aluminium garnet ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) สามารถให้แสงได้ทั้งแบบพัลส์ (Pulse) และแบบต่อเนื่อง (continuous) ในการเชื่อมแม่พิมพ์ เพราะมีข้อดีหลายประการเนื่องจากสามารถควบคุมพารามิเตอร์ของเลเซอร์อย่างแม่นยำ รวมถึงสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ได้อย่างชัดเจน เช่น สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam) ได้ ประกอบด้วยระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) พลังเลเซอร์ (Laser power) [6,7,8] สำหรับการเชื่อมด้วยเลเซอร์นี้จะมีโครงสร้างจุลภาคในบริเวณที่มีการหลอมละลายและบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (Heat affected zone: HAZ) จะมีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากเนื้อโลหะเดิม (Base Metal) [2,9] ซึ่งมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อม ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ความถี่ของพัลส์ และระยะเวลาของพัลส์ ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม โดยใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ด้วยชนิดไอต์ติเมียมแอกเลเซอร์ กับหลอดเชื่อมสแตนเลส เกรด 316 เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ในการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรม ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ก่อนที่จะมีการชำรุดเสียหาย ทำให้มีการใช้งานที่ยาวนานขึ้น และมีต้นทุนในการซ่อมบำรุงที่ต่ำ รวมถึงการศึกษาที่สามารถใช้ในการต่อยอดงานวิจัยในอนาคตต่อไป

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อลักษณะของแนวเชื่อมและโครงสร้างทางโลหะวิทยา ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิดไอต์ติเมียมแอกเลเซอร์ (Nd:YAG) โดยใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์ EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL ดังแสดงได้ในรูปที่ 1 โดยเครื่องเชื่อมมีสลับประกอบ ดังนี้ ส่วนที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนย่อย

ได้แก่ 1) ส่วนวัสดุตัวกลาง (Laser medium) โดยวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมาในครั้งนี้อคือ ตัวกลางที่เป็นผลึกของแข็งเป็นแบบ Yttrium-aluminium garnet ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) 2) ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical resonator) เป็นส่วนที่ทำให้เครื่องกำเนิดเลเซอร์เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีก ซึ่งประกอบด้วยกระจก 2 แผ่น วางหันหน้าเข้าหากัน โดยมีตัวกลางชนิดในส่วนที่ 1 คือ YAG อยู่ และ 3) ส่วนที่กำเนิดพลังงาน (Energy source) เพื่อกระตุ้นให้เกิดอะตอม ส่วนที่ 2 คือ ระบบส่งเลเซอร์เชื่อม (Dual system CCD & Micro scope welding pattern recognition) มีทั้ง CCD จอสี และกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ปรับระยะโฟกัสได้ ส่วนที่ 3 ระบบทัชสกรีน (Touchscreen & Graphical user interface) สำหรับสั่งงาน ควบคุมรูปร่าง และคุณภาพเลเซอร์ และส่วนที่ 4 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน และระบบตรวจค่าอุณหภูมิ อัตราการไหล และค่าความนำไฟฟ้า (External air water heat exchanger)



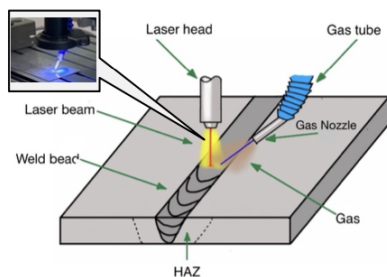
รูปที่ 1 EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL

การศึกษาส่วนที่ 1 การศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อแนวเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมด้วยชนิดไอต์ติเมียมแอกเลเซอร์ (Nd:YAG) โดยเลือกพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อแนวเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์ [6,7,8] ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษานำร่อง (pilot study) เพื่อคัดเลือกระดับพารามิเตอร์ ผลจากการศึกษานำร่องพบว่าค่าของพารามิเตอร์ต่ำกว่าค่าที่กำหนด จะส่งผลให้ลดเชื่อมหลอมได้ไม่ดี และมากกว่าพารามิเตอร์ที่กำหนด จะเกิด spatter เยอะ ซึ่งมีผลต่อการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่อแนวเชื่อม ผู้วิจัยจึงมีการกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเลเซอร์ตามการศึกษานำร่อง (pilot study) ได้แก่ กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) ซึ่งเป็นพลังงานเลเซอร์ (Laser power) ทั้งหมด 3 ค่าคือ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ (A) โดยเพิ่มทีละ 20 แอมแปร์ ระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) ได้แก่ 3, 4 และ 5 มิลลิวินาที (ms) โดยเพิ่มทีละ 1 มิลลิวินาที ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) เป็น 5,7 และ 9 เฮิร์ต (Hz) โดยเพิ่มทีละ 2 เฮิร์ต ซึ่งสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาได้ตามตารางที่ 1 โดยใช้การเชื่อมเลเซอร์ชนิดไอต์ติเมียมแอกเลเซอร์ (Nd:YAG) ที่ใช้ผลึกของแข็งเป็นแบบ Yttrium-aluminium garnet ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) ลักษณะการเชื่อมตามรูปที่ 2 และใช้แก๊สอาร์กอนสำหรับปกคลุมแนวเชื่อมและเพื่อลดการเกิดออกไซด์ขึ้น [10,11] ด้วยอัตราการไหลของแก๊ส (Gas Flow rate) เท่ากับ 8 ลิตรต่อนาที (L/min) ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) รวมไปถึงการใช้วัสดุในการทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น หรือ Japanese Industrial Standard เกรด SS400

และใช้ลวดเชื่อมสแตนเลส เกรด 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร (mm) มีส่วนผสมทางเคมีตามตารางที่ 2 และใช้วิธีการเชื่อมแบบเดินแนวบนชิ้นงาน (Bead-on-Plate)

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับการเชื่อมเลเซอร์

การศึกษา	พารามิเตอร์	ค่า
ผลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม	กระแสไฟฟ้า(A)	120, 140 และ 160
	ระยะเวลาของพัลส์ (ms)	3
	ความถี่ของพัลส์(Hz)	7
ผลกระทบของความถี่ของพัลส์	กระแสไฟฟ้า(A)	140
	ระยะเวลาของพัลส์ (ms)	3
	ความถี่ของพัลส์(Hz)	5, 7 และ 9
ผลกระทบของระยะเวลาของพัลส์	กระแสไฟฟ้า(A)	140
	ระยะเวลาของพัลส์ (ms)	3, 4 และ 5
	ความถี่ของพัลส์(Hz)	7



รูปที่ 2 ลักษณะการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมสแตนเลสเกรด 316

ธาตุ	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Mn
ร้อยละ	68.06	0.02	16.20	11.00	2.18	1.71
ธาตุ	Si	P	S	N	Cu	
ร้อยละ	0.50	0.03	0.02	0.07	0.35	

ในการศึกษาส่วนแรก เป็นการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ 3 ค่าพารามิเตอร์ คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ความถี่ของพัลส์ และระยะเวลาของพัลส์ที่มีต่อแนวเชื่อม ทั้งนี้ในการศึกษาได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่คงที่ (Fixed Parameters) ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊ส 8 ลิตรต่อนาที (L/min) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ซึ่งเป็นค่าที่ทำการทดลองแล้วว่าลวดเชื่อมสามารถหลอมละลายได้อย่างเหมาะสม และนำไปวิเคราะห์แบบไม่ทำลายโดยการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อดูลักษณะและความกว้างของแนวเชื่อม

การศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) ต่อแนวเชื่อม โดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ประกอบด้วย 120, 140 และ 160 หน่วยแอมแปร์ (A) โดยกำหนดค่าระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) เท่ากันทั้งหมดคือ 3 มิลลิวินาที

(ms) และกำหนดค่าความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) เท่ากันทั้งหมดเป็น 7 เฮิร์ต (Hz)

การศึกษาผลกระทบของความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency)

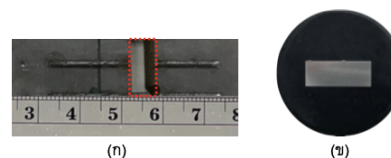
ต่อแนวเชื่อม โดยกำหนดค่าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ประกอบด้วย 5, 7 และ 9 หน่วยเป็นเฮิร์ต (Hz) โดยกำหนดค่าระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) เท่ากันทั้งหมดคือ 3 มิลลิวินาที (ms) และกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า (Welding Current) เท่ากันทั้งหมดเป็น 140 แอมแปร์ (A)

การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration)

ต่อแนวเชื่อม โดยกำหนดระยะเวลาของพัลส์ที่แตกต่างกัน 3 ค่า ประกอบด้วย 3, 4 และ 5 หน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า (Welding Current) เท่ากันทั้งหมดเป็น 140 แอมแปร์ (A) และกำหนดค่าความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) เท่ากันทั้งหมดเป็น 7 เฮิร์ต (Hz)

การศึกษาส่วนที่ 2 การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา

เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของแนวเชื่อมและโลหะฐาน เมื่อเตรียมชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในส่วนที่ 1 เรียบร้อยแล้ว เลือกชิ้นงานที่มีความเหมาะสมที่สุดของแต่ละพารามิเตอร์ไปตัดตามขวางของแนวเชื่อม (Cross-sectional) ด้วยเครื่อง EDM Wire cut รุ่น Mitsubishi MV1200R Wire EDM ตั้งแสดงได้ใน รูปที่ 3(ก) จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปขึ้นเรือน (Mounting) ตามรูปที่ 3(ข) และนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นเรือนแล้วไปขัดหยาบ (Grinding process) ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1,200 หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานขัดเงา (Polishing process) ด้วยผ้าสักหลาดและผงอะลูมินา ขนาด 0.3 ไมครอน และทำการกัดผิว (Etching) ด้วย กรด 5% Nitral โดยกัดเป็นเวลา 10 วินาที แล้วล้างออกด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ และเป่าลมให้แห้งจึงนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope Mat เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของแนวเชื่อมและโลหะฐาน



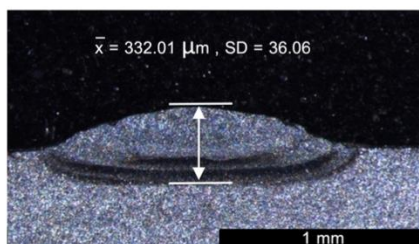
รูปที่ 3 (ก) ชิ้นงานที่ตัดด้วยเครื่อง EDM wire cut
(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นเรือน (Mounting)

3. ผลการศึกษา

3.1. การศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

จากการศึกษาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานที่ได้ไปผ่านกระบวนการทดสอบตามขั้นตอนต่าง ๆ แล้ว และนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ของแนวเชื่อม จะได้ภาพโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม ค่าเฉลี่ยความสูงทุกแนวเชื่อม ทุกพารามิเตอร์คือ 332.01 μm ค่าต่ำสุดเท่ากับ 259.68 μm ในส่วนของ

ค่าที่สูงที่สุดคือ 412.84 μm และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 36.06 μm ดังแสดงในรูปที่ 4



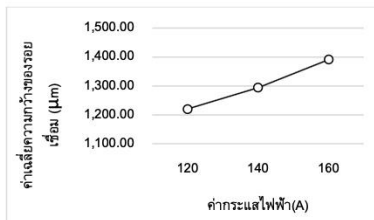
รูปที่ 4 โครงสร้างมหภาคที่ผ่านการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

3.1.1 การศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) ต่อแนวเชื่อม

ผลการศึกษาโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่มีความแตกต่างกัน คือ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ (A) และกำหนดค่าระยะเวลาของพัลส์ เท่ากับ 3 มิลลิวินาที (ms) และค่าความถี่ของพัลส์ เท่ากับ 7 เฮิร์ต (Hz) ด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Gas Flow rate) เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที (L/min) ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ดังแสดงในรูปที่ 5 และลักษณะแนวเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะแนวเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคจากการศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม

กระแส ในการ เชื่อม (A)	Bead on plate	โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)
120		
140		
160		

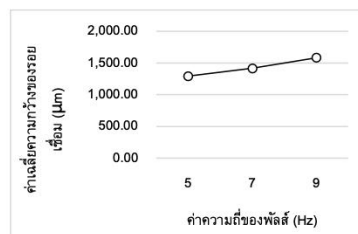


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแนวเชื่อมกับค่ากระแสไฟฟ้า

จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,220.14 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 140 จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 160 A จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,390.84 μm

3.1.2 การศึกษาผลกระทบของความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) ต่อแนวเชื่อม

ผลการศึกษาโดยใช้ค่าความถี่ของพัลส์ที่มีความแตกต่างกัน คือ 5, 7 และ 9 เฮิร์ต (Hz) และกำหนดค่าระยะเวลาของพัลส์ เท่ากับ 3 มิลลิวินาที (ms) และค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) เท่ากันทั้งหมดเป็น 140 แอมแปร์ (A) ด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Gas Flow rate) เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที (L/min) ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ดังแสดงในรูปที่ 6

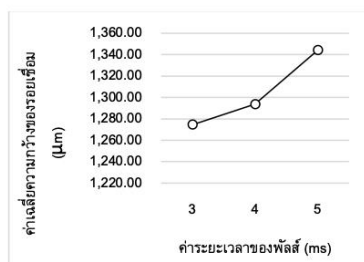


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแนวเชื่อมกับค่าความถี่ของพัลส์

จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเพิ่มความถี่ของพัลส์ ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อความถี่ของพัลส์เพิ่มขึ้น โดยที่ความถี่ของพัลส์ 5 Hz ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มความถี่ของพัลส์เป็น 7 Hz จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,417.15 μm และเมื่อเพิ่มความถี่ของพัลส์เป็น 9 Hz จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,582.06 μm

3.1.3 การศึกษาที่ 3 การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) ต่อแนวเชื่อม

ผลการศึกษาโดยใช้ค่าระยะเวลาของพัลส์ที่มีความแตกต่างกัน คือ 3, 4 และ 5 มิลลิวินาที (ms) ค่าความถี่ของพัลส์ เท่ากับ 7 เฮิร์ต ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) เท่ากันทั้งหมดเป็น 140 แอมแปร์ (A) ด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Gas Flow rate) เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที (L/min) ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ดังแสดงในรูปที่ 7

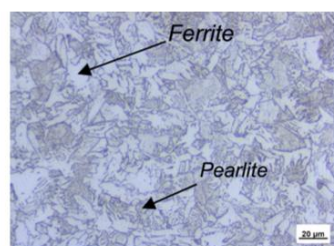


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแนวเชื่อมกับระยะเวลาของพัลส์

การศึกษพบว่า เมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาของพัลส์ ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อระยะเวลาของพัลส์เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาของพัลส์ 3 ms ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,274.50 μm และเมื่อเพิ่มระยะเวลาของพัลส์ 4 ms จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มระยะเวลาของพัลส์เป็น 5 ms จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,344.12 μm

3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

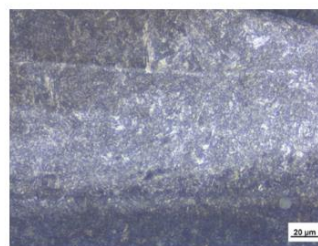
จากการทดลองในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานที่ได้ไปผ่านกระบวนการทดสอบขั้นตอนต่างๆ แล้ว และนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของแนวเชื่อมและโลหะฐาน จะได้ภาพโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 8) เป็นโครงสร้างของโลหะฐาน (Base Metal) เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะฐาน (Base Metal)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะฐาน (Base Metal) เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.13 - 0.18% ซึ่งมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.8% จึงเป็นเหล็กกล้าประเภทเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypo eutectoid) [12] โดยบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง [13]

และจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวเชื่อม เพื่อดูลักษณะของเกรน (Grain) ของโลหะเชื่อม ผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่มีกำลังขยาย 20 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมสเตนเลสเกรด 316 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีลักษณะประกอบด้วยโครงสร้างที่หลากหลาย โดยที่บริเวณของแนวเชื่อมมีลักษณะของเกรนแบบแท่ง (Columnar grain) และ Dendritic ferrite มีขนาดที่เท่า ๆ กันกระจายในโครงสร้าง Austenite ซึ่งโครงสร้างของ Dendritic มีลักษณะที่เป็นเกรนละเอียดที่บริเวณแนวเชื่อม (Weld zone) และเกรนของ Dendritic มีการเติบโตในทิศทางแบบสุ่ม (Random direction) ซึ่งจากการศึกษา โครงสร้างนี้มีแนวโน้มให้แนวเชื่อมมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นและสามารถต้านทานการสึกหรอได้ [14,15]

4. สรุปผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมโดยการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยไดโอดเลเซอร์ (Nd:YAG Laser) โดยใช้โลหะฐาน SS400 กับลวดเชื่อมสเตนเลสเกรด 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตรโดยผ่านกรรมวิธีในการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของชิ้นงาน ซึ่งเป็นการศึกษาเบื้องต้น โดยพิจารณาแยกแต่ละพารามิเตอร์ สรุปผล ดังนี้

การศึกษามลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) ต่อแนวเชื่อม จากการศึกษพบว่า เมื่อมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120A ขนาดความกว้างแนวเชื่อมเท่ากับ 1,220.14 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 140 A จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 160 A จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,390.84 μm

การศึกษาผลกระทบของความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) ต่อแนวเชื่อม จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเพิ่มความถี่ของพัลส์ในการเชื่อม ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อความถี่ของพัลส์ในการเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่ความถี่ของพัลส์ในการเชื่อม 5 Hz ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มความถี่ของพัลส์ในการเชื่อมเป็น 7 Hz จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,417.15 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 9 Hz จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,390.84 μm ซึ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) ต่อแนวเชื่อม จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาของพัลส์ในการเชื่อม ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อระยะเวลาของพัลส์ในการเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาของพัลส์ ในการเชื่อม 3 ms ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,274.50 μm และเมื่อเพิ่มระยะเวลาของพัลส์ในการเชื่อมเป็น 4 ms จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 9 ms จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,344.12 μm ซึ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาดังกล่าวสรุปได้ว่าถ้ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อมระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์ต่ำ จะส่งผลให้แนวโน้มของแนวเชื่อมมีขนาดเล็ก แต่ถ้ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์สูง จะส่งผลให้แนวโน้มของแนวเชื่อมมีขนาดกว้างขึ้น ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิจัยด้านการเชื่อมเชื่อมแม่พิมพ์ในอนาคตต่อไป

ในการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคพบว่า โครงสร้างของโลหะฐาน SS400 เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ซึ่งมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.8% โดยบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากการทดสอบด้วยการเชื่อมเลเซอร์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีลักษณะประกอบด้วยโครงสร้างที่หลากหลาย โดยที่บริเวณของแนวเชื่อมมีลักษณะของเกรนแบบแท่ง (Columnar grain) และ Dendritic ferrite มีขนาดที่เท่า ๆ กันกระจายในโครงสร้าง Austenite ซึ่งโครงสร้างของ Dendritic มีลักษณะที่เป็นเกรนละเอียดที่บริเวณแนวเชื่อม (Weld zone) และเกรนของ Dendritic มีการเติบโตในทิศทางแบบสุ่ม (Random direction) ซึ่งจากการศึกษา โครงสร้างนี้มีแนวโน้มให้แนวเชื่อมมีความต้านทานการแตกร้าวเพิ่มขึ้นและสามารถต้านทานการสึกหรอได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Adams, John T., and Joseph J. Kwiatkowski. Nd-YAG laser welding of the fiber optic connector to the header shell on the 2SL actuator. No. MLM-3790. EG and G Mound Applied Technologies, Miamisburg, OH (United States), 1994.
- [2] F. Behzad, F. W. Steven, L. Gladius and A. Ebrahim, A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals, Adv. Mater. Sci. Eng., 2018, 1-18.
- [3] Sharma R S & Molian P (2011) Weldability of advanced high strength steels using an Yb: YAG disk laser. Journal of

Materials Processing Technology, 211(11), 1888–1897. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.06.009

- [4] Yuce C, Tutar M, Karpat F, Yavuz N & Tekin G (2017). The effect of process parameters on the microstructure and mechanical performance of fiber laser-welded AA5182 aluminium alloys. Strojinski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, 63, 510–518.
- [5] Mohammadpour M, Yazdian N, Yang G, Wang H P, Carlson B & Kovacevic, R (2018). Effect of dual laser beam on dissimilar welding-brazing of aluminum to galvanized steel. Optics and Laser Technology, 98, 214–228. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.07.035
- [6] Hekmatjou H & Naffakh-Moosavy H (2018). Hot cracking in pulsed Nd:YAG laser welding of AA5456. Optics and Laser Technology, 103, 22–32. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.01.020
- [7] B. Alex, D. Matt, S. David, D. John, N. Samih, Laser Welding of Titanium and its Alloys for Medical Applications: Current Knowledge and Future Direction, Mater. Sci. Forum, 618-619, 2009, 291- 294.
- [8] J. Dezhil, S.A. Ali, A. Mohammad, A. Masoud, A.A. Abdulrahman, Numerical and Experimental Studies on the Effect of Varied Beam Diameter, Average Power and Pulse Energy in Nd: YAG Laser Welding of Ti6Al4V, Infrared Phys. Technol., 101, 2019, 180-18
- [9] S. Katayama, in S. Katayama (Ed), Introduction: Fundamentals of Laser Welding, Handbook of Laser Welding Technologies, Woodhead Publishing Limited, India, 2013, 3-16.
- [10] C. Fabrizio, A. Alessandra, Investigation of Laser Welding of Ti Alloys for Cognitive Process Parameters Selection, Mater., 11, 632, 2018, 1-11.
- [11] K. Tomáš, M. Ivan, K. Pavel, The Laser Beam Welding of Titanium Grade 2 Alloy, Grant J., 2012, 77-79.
- [12] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. โลหะวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2560.
- [13] เอกราช ชื่นสัน. การศึกษาการเชื่อมพอกผิวด้วยลวดเชื่อม Alloy C276 โดยกระบวนการเชื่อมพลาสมา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. 2562. 69-74
- [14] Alali, M., Todd, I., & Wynne, B. P. (2017). Through-thickness microstructure and mechanical properties of electron beam welded 20 mm thick AISI 316L austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 130, 488-500.
- [15] Wu, D., Liang, X., Li, Q., & Jiang, L. (2010). Laser rapid manufacturing of stainless steel 316L/Inconel718 functionally graded materials: Microstructure evolution and mechanical properties. *International Journal of Optics*, 2010

EFFECT OF PARAMETERS IN REPAIR WELDING OF PLASTIC MOLD STEEL WITH ND: YAG LASER WELDING PROCESS

Kasemsan Saengsan¹, and Jongkol Srithorn^{1*}

Received:; Revised:; Accepted:

Abstract

Laser welding is widely used across various industries, including automotive, aerospace, and jewelry manufacturing. Mold repair welding, in particular, has become a critical focus, aiming to efficiently restore molds to their original state before any damage occurs. This study investigates the parameters that influence weld integrity, specifically pulse frequency and pulse duration, while examining the macro and microstructural aspects of the welds and evaluating their hardness values. By employing a combination of plastic injection mold steel (AISI P20) and Nd: YAG laser welding, the research reveals that increasing these parameters expanded the weld bead, with optimal settings identified as a pulse frequency of 7 Hz and a pulse duration of 5, 6, and 7 ms, ensuring comprehensive welds while minimizing incomplete fusion defects. The heat input ranged from 116 to 468.3 J/mm, directly correlating with pulse duration and pulse frequency. The welds exhibited acicular martensitic structures, with coarse grains in the weld metal (WM) and fine grains in the heat-affected zone (HAZ) due to rapid cooling, resulting in increased hardness. The hardness values ranged from 320.4 to 413 HV.

Keywords: Nd: YAG laser welding process; Plastic mold steel; AISI P20; Repair welding

Introduction

The mold industry is a crucial supporting sector that caters to almost every type of manufacturing industry, as various manufacturing processes rely on molds to shape and define the quality and size of products. A well-made mold enables manufacturing industries to produce parts rapidly and in large quantities with standardized shapes and sizes, reducing losses incurred during manufacturing and enhancing competitiveness (Poli., 2001; Altan *et al.*, 2001; Swift and Booker., 2003). Among the different materials used for molds, P20 steel is widely employed for making plastic injection molds due to its desirable properties, including rapid resistance to temperature changes, high strength at elevated temperatures, toughness, and wear resistance. However, prolonged usage of P20 steel molds

can lead to deterioration, resulting in cracking, chipping, or surface damage, rendering the mold unusable.

Repair welding of molds using the same material (P20) via laser welding is an effective method to restore molds to near-original condition. Laser welding offers several advantages, including the capability for automated welding, high welding speeds, minimal heat-affected zones, and the ability to weld in deep and intricate areas without distorting nearby workpieces (Adams *et al.*, 1994; Fotovvati *et al.*, 2018; Katayama., 2013; Dawes., 1992; Steen and Mazumder., 2010). In Thailand, laser welding is extensively used in mold repair, automotive component

manufacturing, and even jewelry or accessory production (Bridgum., 2008; Huda., 2016).

Despite its widespread use, there is a need for detailed studies on the specific parameters that influence weld integrity in the laser welding process, particularly for repair welding of plastic injection molds made of P20 steel. Previous research has primarily focused on the general advantages of laser welding and its applications in various industries. However, there is limited information on the optimal welding parameters, such as pulse frequency and pulse duration, their effects on the weld's macrostructural and microstructural characteristics, and the resulting hardness values.

This study aims to address this research gap by investigating the effects of pulse frequency and pulse duration on weld integrity using Nd: YAG laser welding of AISI P20 steel. By examining both macrostructural and microstructural aspects of the welds and evaluating their hardness values, this research seeks to identify the optimal welding parameters that ensure comprehensive and defect-free welds. The findings of this study will provide valuable insights and guidelines for effectively utilizing these parameters in repairing plastic injection molds, ensuring operational efficiency comparable to or close to the original condition before the damage occurred. Additionally, this research builds on previous work by providing a detailed analysis of the influence of specific laser welding parameters, thus contributing to the broader body of knowledge in the field of laser welding technology.

Materials and Methods

Experimental Setup

The Nd: YAG laser welding process was utilized to repair plastic injection mold steel (AISI P20). The experimental setup is depicted in Figure 1. The Nd: YAG laser emits pulsed light using the generated heat to melt the material. The laser operates in a square pulsed wave mode, with a nominal output power of 200 W and a peak power of 9 kW. The pulse duration range is 0.5-20 ms, and the pulse frequency range is 1-50 Hz. Argon gas was used as a shielding gas to reduce oxidation with a flow rate of 8 L/min. The welding speed was set to 50 mm/min (as shown in Table 1).

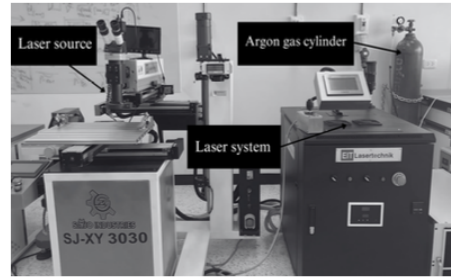


Figure 1. Experimental setup of Nd: YAG laser welding

Table 1. Experimental condition of the laser Welding

Specification	Value
Laser mode	Square pulsed wave
Nominal output Power (W)	200
Peak power (kW)	9
Pulse duration range (ms)	0.5-20
Pulse frequency range (Hz)	1-50 Hz
Shielding gas	Argon
Gas flow rate (L/min)	8
Welding speed (mm/min)	50

Materials

The base material used was plastic mold steel (AISI P20) with workpiece dimensions of 100 x 200 mm and 10 mm thickness. The chemical compositions were analyzed by an Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (ED-XRF) and are listed in Table 2. P20-grade steel welding wire with a diameter of 0.6 mm was used for welding. ED-XRF also analyzed the chemical composition of the welding wire

Table 2. Chemical Composition of Plastic Injection Mold Steel (AISI P20)

Plastic Injection Mold Steel AISI P20 (%mass)	
Aluminum (Al)	0.84
Vanadium(V)	0.03
Chromium (Cr)	1.37
Manganese (Mn)	1.13
Iron (Fe)	96.2
Nickel (Ni)	0.30
Copper (Cu)	0.09
Molybdenum (Mo)	0.20
Welding wire grade P20 (%mass)	
Aluminum (Al)	1.29
Vanadium(V)	0.04
Silicon (Si)	1.18
Manganese (Mn)	1.43
Iron (Fe)	89.27
Nickel (Ni)	0.59

Copper (Cu)

6.20

Furthermore, the research methodology was divided into several parts according to the research objectives as follows: 2.1 Parameter value investigation affecting welds, 2.2 Study of the metallurgical structure of welds 2.3 Heat input Calculation 2.4 Testing the hardness of the weld, and 2.5 Analysis of the effects of parameters on welds using statistical methods.

2.1 Study of parameters affecting welds

Pulse duration (PD) and pulse frequency (PF) were varied. Preliminary experiments indicated that parameter values below the specified range did not melt the welding wire while exceeding the range was limited by machine constraints. Based on these findings, the study was conducted with PD values of 5, 6, and 7 ms and PF values of 5, 7, and 9 Hz (Srithorn and Saengsan., 2023).

Bead-on-Plate Welding: The bead-on-plate welding method was used, as depicted in Figure 2. An appropriate laser welding machine current of 160 A was set for effective melting. Argon gas was used as a shielding gas with a flow rate of 8 L/min, and the welding speed was 50 mm/min.

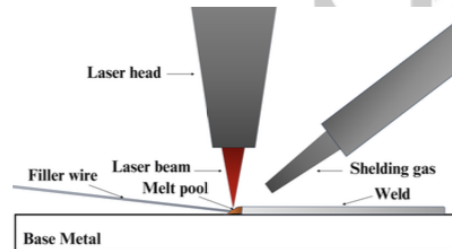


Figure 2. Bead-on-plate welding with P20 steel

2.2 Study of the metallurgical structure of the welding

Welded specimens were prepared, cut along the cross-section using an EDM wire cut machine, mounted, and polished. Polishing was done using alumina powder with a particle size of 0.3 microns, followed by etching with 2% Nital acid solution (Silva et al., 2008). The macrostructure and microstructure of the welds were examined using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM).

For the % dilution, which indicates the extent to which the original metal area mixes with the welding wire, increasing dilution alters the properties of the welded metal area. Dilution

is calculated using Equation (1) and shown in Figure 3

$$\% \text{ dilution} = \frac{B}{(A+B)} (100) \quad (1)$$

Where: A represents the area of the molten parent plate, and B represents the area enclosed by the bottom line.

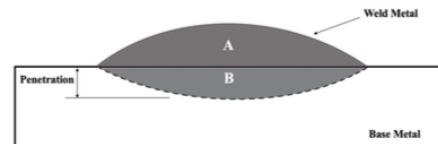


Figure 3. The dilution of the metal

2.3 Heat Input Calculation

The heat input calculation in this research, which involves welding with Nd: YAG laser welding process, is represented by Equation (2) (Kumar and Sinha, 2019). The current value is measured using a clamp meter, in units of amperes (A).

$$HI = \left(\frac{P \times T \times f}{V} \right) \times \eta \quad (2)$$

Where: HI is the heat input into the workpiece (J/mm), P is the peak power (kW), T is the pulse duration (ms), f is the pulse frequency (Hz), V is the scanning speed (mm/s), and η is the welding efficiency, assumed to be 1 (or 100%) for practical purposes and to simplify calculations.

2.4 Testing the hardness of the weld.

Vickers hardness tests were conducted using an FM-800 Vickers hardness tester. A pyramidal diamond-shaped indenter with an angle of 136° was used to apply a test load of 1000 gf with a dwell time of 10 seconds. Indentations were made at six points along the weld seam to create a microhardness profile, starting from the HAZ, moving to the WM, and descending to the BM, with 100 μ m between points (Figure 4).

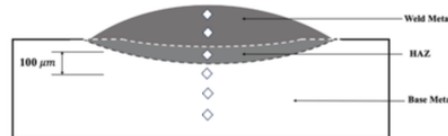


Figure 4. The position of the hardness test points.

The micro vickers hardness test aims to compare the hardness of the weld metal (WM), heat-affected zone (HAZ), and base metal (BM) using different experimental parameters.

2.5 Statistical analysis of parameter effects on welding characteristics

Statistical parameter analysis using Minitab software to analyze statistical data, demonstrating the relationship between each variable in welding. It analyzes the 27 factorial experiments at a confidence level of 95% ($P\text{-Value} < .05$), considering pulse duration factors of 5, 6, and 7 ms and frequency factors of 5, 7, and 9. The analysis is conducted based on Pareto Chart graphs showing whether Factor A (pulse duration) influences Factor B (pulse frequency), along with an examination of Normal Probability Plot graphs for data distribution. Versus Fits graphs examine data dispersion from the mean, indicating data variability as a measure of data deviation. Histogram and versus-order graphs also observe continuous distribution patterns, assessing data independence, as shown in Figure 5.

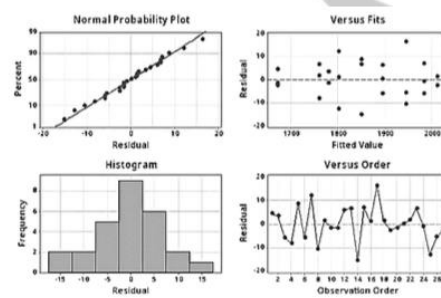


Figure 5. Residual Plots Analysis Graph

By following this detailed methodology, the study aimed to investigate the optimal welding parameters for repairing plastic injection molds made of AISI P20 steel using the Nd: YAG laser welding process. The experimental setup and procedures were designed to ensure reproducibility and accuracy in the results.

Results and Discussion

3.1 Impact of parameters on weld profile

Figure 6 displays weld beads obtained with different pulse durations (PD) and pulse frequencies (PF) using an Nd: YAG laser welding process. Each sample demonstrates the

impact of varying these parameters on the weld characteristics.

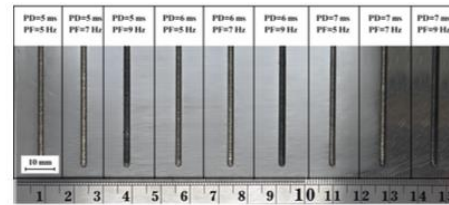


Figure 6. Shows the welding characteristics obtained from pulse duration (PD) and pulse frequency (PF)

The effect of welding parameters on the weld was determined by setting parameters and calculating the average weld width, as shown in Figure 7. The average weld height was 437 μm , while the average weld width was determined to be 1,855 μm , and the average % dilution of the metal was calculated to be 32.43% according to Equation (1).

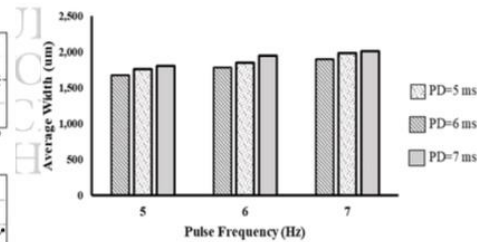


Figure 7. The average width of the weld for each parameter

Table 3. Bead-on-plate welding and macrostructure of complete welds

Parameters	Bead-on plate	Macrostructure
PD=5 ms PF=7 Hz		
PD=6 ms PF=7 Hz		
PD=7 ms PF=7 Hz		

The average width of the weld for each parameter is observed. It is found that increasing the pulse duration (PD) and pulse frequency (PF) leads to a corresponding increase in the weld width (Srithorn and Saengsan, 2023), as shown in Figure 7. An example of the bead-on-plate weld characteristics using laser welding and similar macrostructure features is shown in Table 3. Moreover, there is a close similarity in the average %dilution, with an average of 32.43 and a standard deviation of 2.79.

Increasing Pulse Duration (PD) leads to wider weld beads due to the higher amount of energy delivered per pulse, resulting in more material melting. Similarly, increasing Pulse Frequency (PF) also results in wider weld beads as the number of pulses per second increases, thus increasing the overall heat input. The combined effect of higher pulse duration and higher pulse frequency maximizes the energy input, resulting in the widest weld beads. The image shows that both pulse duration and frequency significantly influence the weld characteristics, and their effects are cumulative.

Macrostructure analysis of the welds was conducted using a microscope, providing magnified images of the weld structure produced by various welding parameters, as shown in Figure 8, magnified 50X. This image reveals the regions of the Weld Metal (WM), Heat-Affected Zone (HAZ), and Base Metal (BM). The HAZ appears narrower and smaller than the weld metal region (Adams *et al.*, 1994; Fotovvati *et al.*, 2018; Katayama *et al.*, 2013).

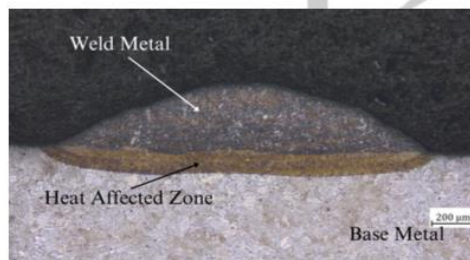


Figure 8. Macrostructure of the workpiece with a pulse duration of 7 ms and pulse frequency of 7 Hz, examined under a microscope.

While examining the macrostructure under a microscope, researchers observed welds. They found that these complete welds occurred when the pulse duration (PD) was set between 5 and 7 ms and the pulse frequency (PF) was 7 Hz. Furthermore, defective welds were observed to occur at parameters where the pulse frequency was set at 5 and 9 Hz, indicating incomplete fusion defects. (Silva *et al.*, 2008;

Vedani.,2004), as shown in Figure 9. These parameters are inappropriate and will not be considered in the weld hardness testing.

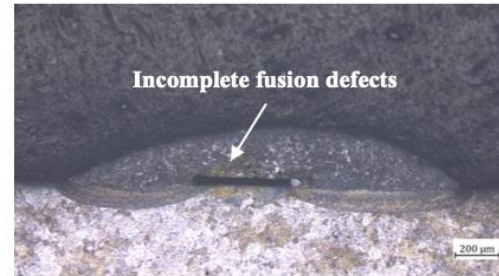


Figure 9. The characteristics of welds with incomplete fusion defects.

3.2 Effects of heat input on welded workpieces

When calculating the heat input into the welded workpieces, with parameters related in Table 4, it is found that the heat input for all nine experiments ranges between 116.0 – 468.3 J/mm. It is observed that there is a direct correlation with both pulse duration and pulse frequency, where an increase in these parameters increases heat input. Therefore, the parameters affecting laser welding are pulse duration and pulse frequency. In this experiment, the optimal welding conditions yield a heat input of 204.8 J/mm (PD=5, PF=7), 262.5 J/mm (PD=6, PF=7), and 329.1 J/mm (PD=7, PF=9), respectively.

Table 4. Heat input values corresponding to various parameters

No	Peak power (kW)	Scanning speed (mm/s)	PD (ms)	PF (Hz)	Heat input (J/mm)
1	5.3	1.2	5	5	116
2	6.7	1.2	5	7	204.8
3	7.5	1.2	5	9	295.9
4	5.7	1.2	6	5	150.0
5	7.2	1.2	6	7	262.5
6	8.2	1.2	6	9	387.5
7	6.2	1.2	7	5	187.8
8	7.7	1.2	7	7	329.1
9	8.8	1.2	7	9	468.3

3.3 Metallographic microstructure analysis

Metallographic examination at the microscopic level of the workpiece, conducted after various testing processes and using scanning electron microscopy (SEM), yields microstructure images, as shown in Figure 10. The weld metal (WM) microstructure and the

heat-affected zone (HAZ) are depicted. The weld metal (WM) exhibits an acicular martensitic structure characterized by coarse grains (Li *et al.*, 2017), while the heat-affected zone (HAZ) shows an acicular martensitic structure with fine grains, primarily due to rapid cooling.

Figure 11 shows the heat-affected zone (HAZ) microstructure and the base metal (BM) of AISI P20 plastic mold steel magnified 1,000 times. It reveals a tempered martensite structure (Silva *et al.*, 2008). The HAZ shows a transition from the coarse-grained structure of the WM to fine grains. This fine-grained structure results from the thermal gradient experienced in the HAZ, where the metal is heated to temperatures below the melting point but high enough to cause recrystallization and grain refinement upon cooling. The rapid cooling in this zone leads to the formation of fine acicular martensite. The base metal (BM) appears unaffected by the welding heat, resulting in minimal to no alteration in the microstructure of the AISI P20 plastic mold steel.

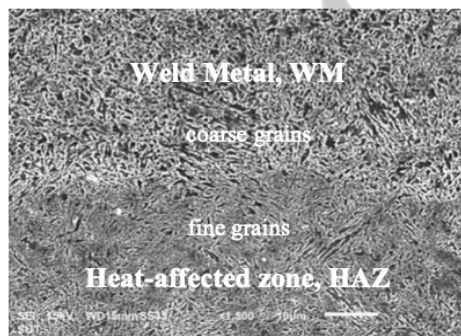


Figure 10. The weld metal (WM) microstructure and the heat-affected zone (HAZ).

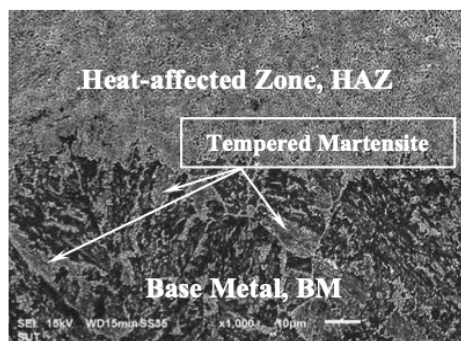


Figure 11. Shows the microstructure of the base metal (BM) and the heat-affected Zone (HAZ).

3.4 Hardness testing results of the welds

Hardness testing results of the welds were obtained using a Micro Vickers hardness test to compare the hardness of the weld metal (WM), heat-affected zone (HAZ), and base metal (BM). The tests were conducted with pulse durations (PD) set at 5, 6, and 7 ms and a pulse frequency (PF) set at 7 Hz, with measurements taken at six points along the weld. The average hardness values of the welds, as shown in Figure 12, are consistent with those in Table 5. The HAZ with PD = 5 ms and PF = 7 Hz exhibited the highest hardness, with the weld metal being harder than the base metal. However, hardness testing was not performed for welds with pulse frequencies set at 5 and 9 Hz due to incomplete fusion, rendering these parameters unsuitable, as shown in Figure 9.

Table 5. Results of the average hardness testing of the welds

Parameters	Average hardness (HV1.0)		
	WM	HAZ	BM
PD=5 ms PF=7 Hz	337.2	413.8	320.4
PD=6 ms PF=7 Hz	328.9	408.7	311.0
PD=7 ms PF=7 Hz	322.4	403.8	306.0

Table 5 and Figure 12 show that as the pulse duration increases, it leads to a corresponding increase in heat input. Higher heat input values result in lower cooling rates, affecting the hardness. This is evidenced by the fact that the hardness at a pulse duration of 7 ms is lower than at pulse durations of 6 and 5 ms, respectively. All hardness values exhibit a base metal (BM) tempered martensite microstructure. The heat-affected zone (HAZ) displays a microstructure of fine-grained acicular martensite, while the weld metal (WM) exhibits a microstructure of coarse-grained acicular martensite, as illustrated in Figures 10 and 11.

The highest hardness values in the HAZ are consistent with the rapid cooling effect, which increases the hardness due to the formation of fine martensitic structures (Vedani, 2004). The observed decrease in hardness with increased pulse duration is due to lower cooling rates from higher heat input, leading to softer microstructures, as also reported by Silva *et al.* (2008).

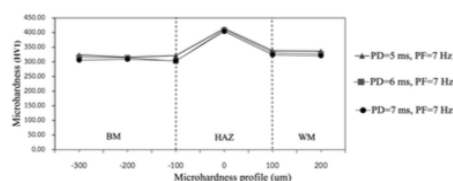


Figure 12. Microhardness profile of the welds under different parameters

The appropriate hardness values for both WM and HAZ are within the range of 30 – 34 HRC (302 – 336 HV 1.0 kgf) (Silva et al., 2008). Table 5 and Figure 12 show that the parameters recommended for all three welding adaptations have suitable hardness values, making them applicable for repairing plastic injection molds.

3.5 Statistical analysis results of parameters impact on welds

The analysis of weld width was conducted by considering two factors: pulse duration and pulse frequency. Weld width was measured according to the experimental design conditions, totaling nine experiments, with each experiment repeated three times to determine the main factors significantly affecting weld width. Statistical analysis of factors A (pulse duration) and B (pulse frequency) at a 95% confidence level revealed that the main factors affecting the experimental response or weld width were factors A (pulse duration) and B (pulse frequency), as they had P-values less than 0.05. Furthermore, the combined effects of these factors were analyzed, and it was found that the interaction factor A*B (pulse duration * pulse frequency) also had a P-value less than 0.05, indicating that these combined factors influenced the weld width in the experiment. Statistical values of weld width were analyzed using Minitab 19 software. The decision-making coefficients were analyzed for variance concerning the experimental response. The decision-making coefficient during the experiment was 99.54%, and after adjustment, it was 99.33%, as shown in Table 7. This high coefficient indicates the reliability of the response values resulting from the experimental factors. A decision-making coefficient approaching 100% signifies greater reliability.

Table 6. The value obtained from the analysis using MINITAB software

Source	DF	F-Value	P-Value
Model	8	485.92	0.000
Linear	4	959.47	0.000
Pulse	2	543.28	0.000
Frequency	2	1375.67	0.000
2-Way	4	12.37	0.000
Interactions			
Pulse*Frequency	4	12.37	0.000

Model Summary

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (prwd)
8.85515	99.54%	99.33%	98.96%

This analysis demonstrates the significant impact of pulse duration and pulse frequency on weld width and their interaction, thereby ensuring the reliability and validity of the experimental results.

Conclusions

This research investigated the influence of various welding parameters on the weld profile of plastic injection mold steel (AISI P20) using an Nd: YAG laser and P20 grade steel wire (0.6 mm diameter). Both macrostructural and microstructural examinations were conducted on the workpieces.

The metallographic analysis of the macrostructure revealed that the heat-affected zone (HAZ) was narrower and smaller in dimension than the weld metal (WM) area, indicating a localized thermal impact from the laser welding process.

At the microstructural level, the base metal (AISI P20 steel) maintained a tempered martensite structure with negligible changes in hardness, suggesting minimal microstructural alterations. In contrast, the weld metal (WM) exhibited acicular martensitic structures with coarse grains, while the HAZ featured fine grains due to rapid cooling, resulting in higher hardness in the HAZ compared to the WM.

The heat input to the welded workpieces, ranging from 116.0 to 468.3 J/mm, was directly proportional to pulse duration and pulse frequency. Increased pulse duration and frequency led to higher heat input, thereby affecting the weld profile and characteristics.

The study found that increasing the pulse duration and frequency resulted in a wider weld profile. These two parameters had a combined effect on the weld profile.

Optimal welding parameters were identified as a pulse frequency of 7 Hz and pulse durations between 5 to 7 ms, which achieved complete welds without incomplete fusion defects. These settings produced welds that closely matched the standard hardness values for P20 plastic injection molds.

In conclusion, the optimal welding parameters for Nd: YAG laser welding of AISI P20 steel are a pulse frequency of 7 Hz and pulse durations between 5 and 7 ms. These parameters ensure complete, defect-free welds with appropriate hardness for repairing plastic injection molds. The findings underscore the significance of controlling pulse duration and frequency to achieve desired weld characteristics and structural integrity. This conclusion is supported by Adams and Kwiatkowski's investigation, which demonstrated the critical impact of laser welding parameters on weld quality, and Fotovvati et al.'s review, which detailed the influence of process parameters on melt-pool dynamics and microstructure formation.

Acknowledgment

The researchers would like to express their sincere gratitude to everyone involved and to Suranaree University of Technology for their support, which contributed to the successful completion of the research.

References

- Adams, J. T., & Kwiatkowski, J. J. (1994). Nd-YAG laser welding of the fiber optic connector to the header shell on the 2SL actuator (No. MLM-3790). EG and G Mound Applied Technologies, Miamisburg, OH (United States). DOI: <https://doi.org/10.2172/10122837>
- Altan, T., Lilly, B., & Yen, Y. C. (2001). Manufacturing of dies and molds. *CiRP Annals*, 50(2), 404-422. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62988-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62988-6)
- Bridgman, T. (2008). How to weld. Motorbooks.
- Buddery, A., Dargusch, M. S., StJohn, D. H., Drennan, J., & Nabulsi, S. (2009, August). Laser welding of titanium and its alloys for medical applications: Current knowledge and future direction. In *Materials Science Forum* (Vol. 618, pp. 291-294). Trans Tech Publications Ltd. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.618-619.291>
- Caiazza, F., & Caggiano, A. (2018). Investigation of laser welding of Ti alloys for cognitive process parameters selection. *Materials*, 11(4), 632. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11040632>
- Dawes, C. (1992). *Laser Welding*. Abington Publishing.
- Fotovvati, B., Wayne, S. F., Lewis, G., & Asadi, E. (2018). A review on melt-pool characteristics in laser welding of metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4920718>
- Hekmatjou, H., and Naffakh-Moosavy, H. (2018). Hot cracking in pulsed Nd: YAG laser welding of AA5456. *Optics & Laser Technology*, 103, 22-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.020>
- Huda, Z. (2016). *Welding and Joining Processes*. Mater. Process. Eng. Manuf, 159.
- Jiang, D., Alsagri, A. S., Akbari, M., Afrand, M., & Alrobaian, A. A. (2019). Numerical and experimental studies on the effect of varied beam diameter, average power and pulse energy in Nd: YAG laser welding of Ti6Al4V. *Infrared Physics & Technology*, 101, 180-188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.06.006>
- Junkes, R., Howarth, J. L. L., Becker, D., & Bond, D. (2020). Properties evaluation of semi-crystalline and amorphous polymers injected in AISI P20 molds repaired by welding. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 25, e-12786.
- Kapil, S., Legesse, F., Negi, S., Karunakaran, K. P., & Bag, S. (2020). Hybrid layered manufacturing of a bimetallic injection mold of P20 tool steel and mild steel with conformal cooling channels. *Progress in Additive Manufacturing*, 5, 183-198.
- Katayama, S. (2013). Introduction: fundamentals of laser welding. In *Handbook of laser welding technologies* (pp. 3-16). Woodhead Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.1.3>
- Kramár, T., Michalec, I., & Kovacoc, P. (2012). The laser beam welding of titanium grade 2 alloy. *GRANT J*, 1, 77-79.
- Kumar, P., & Sinha, A. N. (2019). Effect of heat input in pulsed Nd: YAG laser welding of titanium alloy (Ti6Al4V) on microstructure and mechanical properties. *Welding in the World*, 63, 673-689. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-018-00694-w>
- Kumar, U., Chattopadhyaya, S., Das, A. K., Seikh, A. H., Sharma, S., Dwivedi, S. P., ... & Singh, S. (2023, March). Effect of pulsation in microstructure and mechanical properties of titanium alloy-annealed welded joints at different temperatures. In *Photonics* (Vol. 10, No. 4, p. 372). MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics1004037>
- Li, H. X., Qi, H. L., Song, C. H., Li, Y. L., & Yan, M. J. P. M. (2018). Selective laser melting of P20 mould steel: investigation on the resultant microstructure, high-temperature hardness and corrosion resistance. *Powder Metallurgy*, 61(1), 21-27. DOI: <https://doi.org/10.1080/00325899.2017.1368965>
- Poli, C. (2001). *Design for manufacturing: a structured approach*. Butterworth-Heinemann.
- Preciado, W. T., & Bohorquez, C. E. N. (2006). Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3), 244-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.101>
- Silva, B., Pires, I., & Quintino, L. (2008, September). Welding technologies for repairing plastic injection moulds. In *Materials Science Forum* (Vol. 587, pp. 936-940). Trans Tech Publications Ltd. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.587-936-940>
- Silva, B., Pires, I., Quintino, L., & Miranda, R. (2008). New welding procedures for repairing H13 and P20 tool steels. In *5th Luso-Mozambican International Engineering Congress*.
- Srithorn, J., Saengsan, K., (2023). The Study of Parameters Affecting Weld Bead by Welding SS400 Grade Carbon Steel Materials with Nd: YAG Laser Welding Process.
- Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing*. Springer.
- Swift, K. G., & Booker, J. D. (2003). *Process selection: from design to manufacture*. Elsevier.

Vedani, M. (2004). Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding. *Journal of Materials Science*, 39, 241-249.

Worldwide Guide to Equivalent Irons and Steels, 4th Ed., ASM Material Data Series, ASM International, Materials Park, OH, (2000)

