



تأثیر زمان ضربان جوشکاری لیزری Nd:YAG بر رفتار خوردگی فولاد 316L در اسیدسولفوریک

حسن خدک، سید علی اصغر اکبری موسوی*

دانشکده متالورژی و مواد، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: akbarimusavi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۴
پذیرش: ۲۲ مرداد ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

جوشکاری لیزر Nd:YAG
فولاد 316L
ریزساختار
خوردگی

چکیده

فولاد زنگ نزن 316L یکی از انواع فولادهای زنگ نزن آستنیتی است که به دلیل وجود عناصر آلیاژی مانند کروم، نیکل و مولیبدن و تشکیل یک لایه غیرفعال بر روی سطح آن‌ها مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی دارد. این ویژگی در کنار جوش پذیری بالا، آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای مختلف صنعتی از جمله نفت، گاز، پتروشیمی و پزشکی تبدیل کرده است. در این تحقیق از فرایند جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG برای اتصال دو قطعه فولاد زنگ نزن 316L استفاده شد و تأثیر زمان ضربان بر کیفیت و سختی جوش و مقاومت به خوردگی در محیط اسید سولفوریک بررسی شد. نتایج تجزیه و تحلیل خوردگی در این مطالعه نشان داد که کاهش زمان ضربان در فرایند جوشکاری لیزر به دلیل تشکیل دانه‌های هم محور در ناحیه جوش تأثیر بسزایی در کاهش نرخ خوردگی فلز جوش دارد. هنگامی که زمان ضربان از ۸ میلی ثانیه به ۴ میلی ثانیه کاهش می‌یابد، گرمای ورودی از ۱۰۰ به ۱۲۴ ژول بر میلی‌متر افزایش می‌یابد و نرخ انجماد R و گرادیان حرارتی G و نسبت‌های G/R و G×R کاهش می‌یابد، که باعث می‌شود دانه‌ها به صورت هم محور و یکنواخت در ناحیه جوش شکل بگیرند. این نوع ساختار به دلیل چینش منظم و متراکم دانه‌ها، خواص مکانیکی بهتر و مقاومت بیشتری در برابر عوامل خوردنده مانند اسیدها و نمک‌ها ایجاد می‌کند و باعث کاهش جریان خوردگی از ۵۲۰ nA/(cm²) به ۹۰ nA/(cm²) می‌شود.

The effect of Nd:YAG laser welding pulse duration on the corrosion behavior of 316L steel in sulfuric acid

Hasan Khadak, Seyed Ali Asghar Akbari Mousavi*

School of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: akbarimusavi@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 12 May 2025

Accepted: 13 August 2025

Keywords:

Nd:YAG Laser Welding

316L Steel

Microstructure

Corrosion

Abstract

316L stainless steel is one of the types of austenitic stainless steels that have very good corrosion resistance due to the presence of alloying elements such as chromium, nickel and molybdenum and the formation of a passive layer on their surface. This feature, together with high weldability, has made them a suitable option for various industrial applications such as oil, gas, petrochemical and medical. In this study, the Nd:YAG pulsed laser welding process was used to join two pieces of 316L stainless steel, and the effect of pulse time on the quality and hardness of the weld and corrosion resistance in a sulfuric acid environment was investigated. The results of corrosion analyses in this study showed that reducing the pulse time in the laser welding process has a significant effect on reducing the corrosion rate of the weld metal due to formation of equiaxed grains in the weld zone. When the pulse time is reduced from 8 ms to 4 ms, the heat input increases from 100 to 124 J/mm and solidification rate R and thermal gradient G and the G/R and G×R ratios decrease, which causes the grains to form more equiaxed and uniformly in the weld zone. This type of structure, due to the regular and dense arrangement of the grains, provides better mechanical properties and greater resistance to corrosive agents such as acids and salts. It causes the corrosion current to decrease from 520 nA/(cm²) to 90 nA/(cm²).

Please cite this article using:

Khadak H, Akbari Mousavi SAA. The effect of Nd: YAG laser welding pulse duration on the corrosion behavior of 316L steel in sulfuric acid. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Jul 23;12(5):11-19. doi: 10.22034/ijme.2025.522457.2080 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، از جمله فولاد 316L، به دلیل حضور عناصر آلیاژی نظیر کروم، نیکل و مولیبدن و تشکیل یک لایه غیرفعال بر سطح خود، مقاومت بسیار مطلوبی در برابر خوردگی دارند که این ویژگی، همراه با قابلیت جوش‌پذیری بالا، آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای مختلف صنعتی مانند نفت، گاز، پتروشیمی و پزشکی تبدیل کرده است [۱]. در این میان، جوشکاری لیزری به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون حرارت ورودی پایین، اعوجاج کم، دقت و سرعت بالا و نسبت مطلوب عرض به عمق حوضچه جوش، به عنوان یک فرایند کارآمد برای اتصال قطعات فلزی مطرح شده است. این فرایند امکان دستیابی به جوش‌هایی با کیفیت بالا و عاری از عیوبی مانند ترک در جوش را فراهم می‌آورد و به همین دلیل در صنایع هوافضا، خودروسازی و پردازش مواد به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱، ۲]. علاوه بر این، استفاده از جوشکاری ضربانی در مقایسه با جوشکاری پیوسته به دلیل کاهش حرارت ورودی به فلز پایه و افزایش نرخ سرمایه‌گذاری در حین انجام، منجر به ریزدانه‌گی ساختار می‌شود. این پدیده در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، که دارای رسانایی حرارتی پایین هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و می‌تواند موجب بهبود خواص مکانیکی و کاهش تنش‌های پسماند در ناحیه جوش شود [۳].

مطالعات متعددی به بررسی رفتار جوشکاری لیزر و تأثیر متغیرهای آن بر خواص مکانیکی و ریزساختاری و خوردگی فولادهای زنگ‌نزن پرداخته‌اند. راجا و همکاران [۴] جوشکاری لیزر Nd:YAG و TIG فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L را مقایسه کردند و دریافتند که اگرچه استحکام مکانیکی در جوش‌های TIG بیشتر است، ولی جوشکاری لیزری کیفیت بالاتری را بدون عیوبی مانند ترک سرد ارائه می‌دهد. همچنین، ریزسختی ناحیه جوش در روش لیزر حدود ۴۷ درصد افزایش یافت و یک ناحیه نرم باریک در HAZ مشاهده شد. سخن پرداز [۵]، ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر هم‌جنس فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ به ۳۱۶ توسط جوشکاری قوسی تنگستن گاز با جریان ضربانی پرداخته است. از سه نوع فلز پرکننده ER309L، ER310 و ER316L و دو نوع گاز محافظ شامل آرگون خالص و مخلوط آرگون با ۱۰ درصد CO₂ استفاده شده است. نتایج نشان داد که تمامی اتصالات دارای ریزساختار از نوع انجامد FA (فریت-آستنیت) با فریت اسکلتی در زمینه آستنیتی هستند. تفاوت اصلی بین نمونه‌ها در مورفولوژی فریت مشهود بود؛ به‌طوری‌که فلز پرکننده ER316 منجر به شکل‌گیری فریت اسکلتی ستونی و سایر فلزات پرکننده موجب ایجاد فریت اسکلتی هم‌محور شدند. همچنین، استفاده از گاز محافظ مخلوط (Ar + 10% CO₂) باعث افزایش حرارت ورودی و درشت شدن فاز فریتی شده و به‌طور هم‌زمان کاهش در انرژی ضربه را به دنبال داشته است. از منظر خواص مکانیکی، نتایج آزمون کشش حاکی از آن است که شکست اغلب نمونه‌ها در ناحیه فلز پایه یا منطقه HAZ رخ داده و این موضوع دلالت بر استحکام مناسب ناحیه جوش دارد. با مقایسه ترکیبات مختلف، مشخص شد که فلز پرکننده ER309L همراه با گاز محافظ مخلوط عملکرد بهتری از نظر تعادل خواص مکانیکی و ریزساختاری داشته است.

نیک روان و همکاران [۶] بر روی تحلیل تجربی و آماری فرایند جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی برای بهینه‌سازی ابعاد اتصال در لوله جدار نازک فولاد زنگ‌نزن 316L پرداخته‌اند. پارامترهای مورد بررسی شامل شدت جریان، پهنای ضربان، فرکانس، سرعت دورانی و نیروی فشاری وارد به درز تماس دو لوله‌ی تحت جوشکاری است. مطالعه‌ای با استفاده از طرح آزمایش مرکب مرکزی نشان داده است که دو پارامتر پهنای ضربان و شدت جریان بیش از ۸۰٪ از تغییرات در مشخصه‌های ابعادی جوش را تبیین می‌کنند. همچنین افزایش این دو پارامتر به همراه فرکانس منجر به افزایش عمق و نسبت عمق به عرض مقطع جوش می‌شود. در حالی که افزایش سرعت چرخش لوله باعث کاهش عمق نفوذ شده، اما تأثیر معناداری بر نسبت عمق به عرض نداشته است. علاوه بر این، تأثیر نیروی فشاری وارد بر درز نیز در بهبود نسبی این ویژگی‌ها مشهود بوده و بیشترین اثر آن در افزایش استحکام مکانیکی اتصال مشاهده شده است. همچنین با انجام فرایند جوشکاری در محیط پرشده با گاز آرگون، نه تنها مشخصه‌های ابعادی مقطع جوش (با ۱۴٪ افزایش در نسبت عمق به عرض) بهبود یافتند، بلکه استحکام کششی و کرنش شکست نمونه‌ها نیز به ترتیب ۷٪ و ۳۷٪ نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط معمول ارتقا پیدا کرد. تأثیر هم‌زمان نیروی فشاری و جوشکاری در محیط محافظت‌شده با گاز خنثی، موجب کاهش تنش‌های پسماند و بهبود ساختار متالورژیکی جوش شده است. دلیل افزایش استحکام در نمونه‌های بهینه‌ای که درون محفظه پرشده با آرگون جوشکاری شده‌اند، به احتمال زیاد ناشی از اثر ترکیبی نیروی فشاری اعمال‌شده به درز (به میزان ۱۱/۴ کیلوگرم نیرو) و حضور

گاز محافظ آرگون در محیط جوشکاری است. این هم‌افزایی موجب کاهش تنش‌های پسماند و تشکیل ساختاری یکنواخت و همگن در ناحیه جوش شده است.

ماریسیو و همکاران [۷] اتصال غیر هم‌جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به آلیاژ اینکونل ۶۰۰ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که مورفولوژی ناحیه جوش در حین انجماد عموماً متأثر از عواملی چون گرادیان دمایی، سرعت انجماد و ترکیب شیمیایی، به صورت دندریتی است. باغجری و همکاران [۸] نیز اثر متغیرهای جوشکاری لیزر Nd:YAG را بر فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۲۰ مطالعه کرده و گزارش کردند که سختی در ناحیه جوش و HAZ افزایش یافته و با افزایش ولتاژ و کاهش سرعت جوشکاری، عمق و پهنای ناحیه جوش افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مارتینز و همکاران [۹] تأثیر حرارت ورودی بر مقاومت به خوردگی ورق‌های جوش داده شده فولاد 316L در محلول اسیدسولفوریک ۱۵ درصد را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش انرژی ورودی منجر به افزایش قابل توجه کاهش جرم و نرخ خوردگی می‌شود، به طوری که در انرژی ورودی ۷۰ J/mm نرخ خوردگی بیش از ده برابر افزایش یافت و ماده در این محیط خورنده مقاومت پایینی نشان داد. این مطالعات نشان می‌دهند که متغیرهای جوشکاری و نوع فرایند می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی جوش در فولادهای زنگ‌نزن داشته باشند.

با توجه به اینکه یکی از متغیرهای کلیدی در جوشکاری لیزر ضربانی فولادهای زنگ‌نزن، زمان ضربان جوشکاری است، این مطالعه به تحلیل تأثیر زمان ضربان بر تغییرات ریزساختار و خواص خوردگی فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L پرداخته است. در این پژوهش، به طور خاص، تلاش شده است تا ارتباط میان مدت زمان ضربان و بهبود ساختار میکروسکوپی جوش، از جمله تشکیل دانه‌های هم‌محور، بررسی و تأثیر آن بر مقاومت به خوردگی جوش در محیط اسیدسولفوریک، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. همچنین این تحقیق نشان می‌دهد که با تنظیم دقیق زمان ضربان در جوشکاری لیزر، می‌توان کیفیت جوش را بهبود بخشید و مقاومت به خوردگی جوش را در محیط‌های خورنده افزایش داد.

۲- روش تحقیق

در این مطالعه، به بررسی ریزساختار و مقایسه کیفیت فلز جوش و مقاومت به خوردگی حاصل از جوشکاری لیزری در فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L پرداخته شد. ابتدا ورق‌های فولاد زنگ‌نزن با ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر برش داده شدند. ترکیب شیمیایی فلز پایه با استفاده از آزمون کوانتومتری در جدول ۱ ارائه شده است. برای حذف آلودگی‌های سطحی، نمونه‌ها به ترتیب با سمباده ۴۰۰ و محلول استون تمیز شدند. سپس عملیات جوشکاری به صورت لب‌به‌لب و با استفاده از دستگاه جوش لیزر Nd:YAG با بیشینه توان ۱۲۰ وات انجام گرفت. در فرایند جوشکاری، گاز محافظ با دبی ۱۰ مترمکعب بر ثانیه و جوشکاری با سرعت ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه اعمال شد. همچنین، متغیرهایی نظیر بسامد ۲ هرتز، ولتاژ ۴۵۰ ولت و زمان ضربان‌های مختلف برای جوشکاری در نظر گرفته شدند. جزئیات کامل متغیرهای جوشکاری در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ 316L

Co	Cu	Si	C	Mn	Mn	Ni	Cr	Fe	عنصر
0.19	0.38	0.53	0.013	2.06	1.53	10.3	17.1	فلز پایه	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)

جدول ۲ متغیرهای اعمالی جوشکاری لیزر

شماره نمونه	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/s)	حرارت ورودی (J/mm)	بسامد (Hz)	پهنای زمانی ضربان (ms)
1	450	0.5	100	2	8
2	450	0.5	114	2	6
3	450	0.5	124	2	4

به منظور ارزیابی‌های ریزساختاری، میزان حرارت ورودی برای هر نمونه با استفاده از روابط روزنتال محاسبه شد. مقاطع عرضی جوش‌ها جهت آماده‌سازی متالوگرافی، ابتدا با سمباده‌های شماره ۲۴۰ تا ۳۰۰۰ صیقل داده شدند و سپس با استفاده از پودر آلومینا

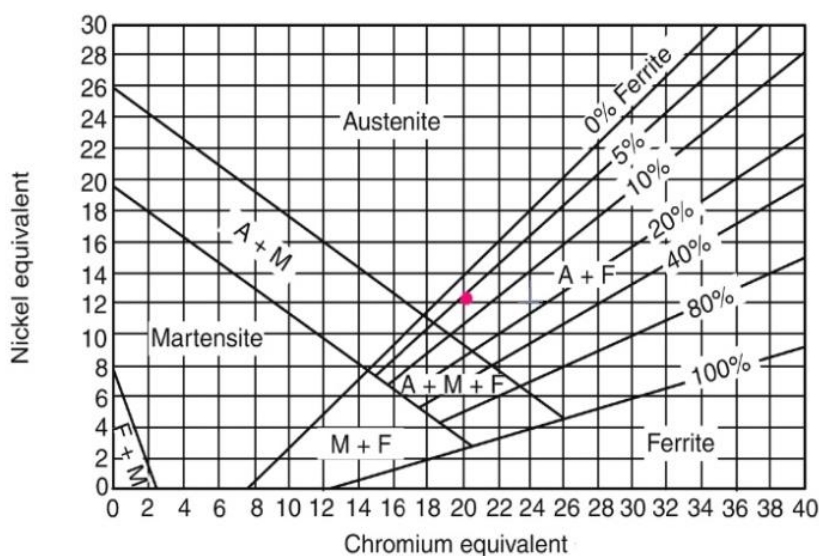
پولیش شدند. برای حکاکی شیمیایی از استاندارد ASTM E407-23 استفاده شده است. طبق استاندارد نمونه‌ها در محلول حاوی آب مقطر، هیدروکلریک اسید و نیتریک اسید به نسبت ۱:۱:۱ به مدت ۱۲۰ ثانیه غوطه‌ور شدند. بررسی ریزساختار به کمک میکروسکوپ نوری انجام گرفت.

برای بررسی رفتار خوردگی نمونه‌ها، آزمون پتانسیودینامیک انجام گرفت. در این آزمون از الکتروود کالومل اشباع (SCE) به عنوان الکتروود مرجع و از الکتروود پلاتینی به عنوان الکتروود کمکی استفاده شد. نرخ روبش در این آزمایش ۴ میلی‌ولت بر ثانیه در نظر گرفته شد. و چگالی جریان خوردگی با استفاده از روش برون‌یابی تافل تعیین شد. از محلول اسیدسولفوریک ۹۸٪ با $\text{pH}=3$ به‌عنوان محیط خورنده استفاده گردید. آزمون ریزسختی‌سنجی ویکرز نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسختی‌سنجی اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار و حوضچه جوش

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی دارای ۴ حالت انجمادی حین جوشکاری هستند. که به مقدار کروم معادل به نیکل معادل ($\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$) وابسته است. پس از محاسبه این نسبت می‌توان به کمک نمودار شفلر که در شکل ۱ آورده شده است، ساختار نهایی جوش را تخمین زد. حالت انجمادی برای نمونه جوشکاری شده با فلز پایه 316L با توجه به روابط ارائه شده (روابط ۵ و ۶) و نسبت میزان $\left(\frac{\text{Cr}_{\text{eq}}}{\text{Ni}_{\text{eq}}}=1.73\right)$ به صورت فریتی آستنیتی (FA) پیش‌بینی می‌گردد. در حالت انجماد (FA) مطابق با رابطه ۴ ابتدا دندریت‌های فریت دلتا از مذاب در ناحیه ذوبی منجمد شده و سپس فاز آستنیت در نواحی بین دندریتی به وجود می‌آید. لکن، به علت سرعت انجمادی بالا در جوشکاری لیزر و عدم وجود زمان کافی برای استحاله کامل فریت دلتا به فاز آستنیت، چون فاز اولیه انجماد فریت است، استحاله فریت به‌طور کامل انجام نشده و مقداری فاز فریت دلتا در ریزساختار باقی می‌ماند. مقدار فاز فریت با افزایش سرعت انجماد افزایش می‌یابد [۱۰].



شکل ۱ جایگاه نمونه جوشکاری در نمودار شافلر [۱۱]

در تحلیل ریزساختاری جوش، بررسی متغیرهای انجمادی نظیر شیب دمایی (G) و سرعت حرکت جبهه انجماد (R) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه، شکل ۲ تغییرات سرعت انجماد در حوضچه جوش را به‌طور دقیق نشان می‌دهد، که در آن سرعت حرکت جبهه انجماد (R) در خط مرکزی جوش با سرعت جوشکاری برابر است. این شکل همچنین تأثیر شیب حرارتی و سرعت انجماد بر نوع و اندازه ریزساختار انجمادی را به خوبی به تصویر می‌کشد. با فرض یکسان بودن سرعت انجماد و سرعت جوشکاری، از معادله روزنتال برای محاسبه شیب دمایی در مرکز جوش استفاده شده است. در این راستا، معادله ۱ برای محاسبه شیب دمایی، معادله ۲ برای تعیین نسبت G/R و معادله ۳ برای به دست آوردن حاصل ضرب $G \times R$ به کار گرفته شده‌اند.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_t = -2\pi k \quad (1)$$

$$\frac{G}{R} = \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_t}{\left(\frac{\partial X}{\partial t}\right)_T} = -\frac{2\pi k (T_l - T_0)^2}{V Q} \quad (2)$$

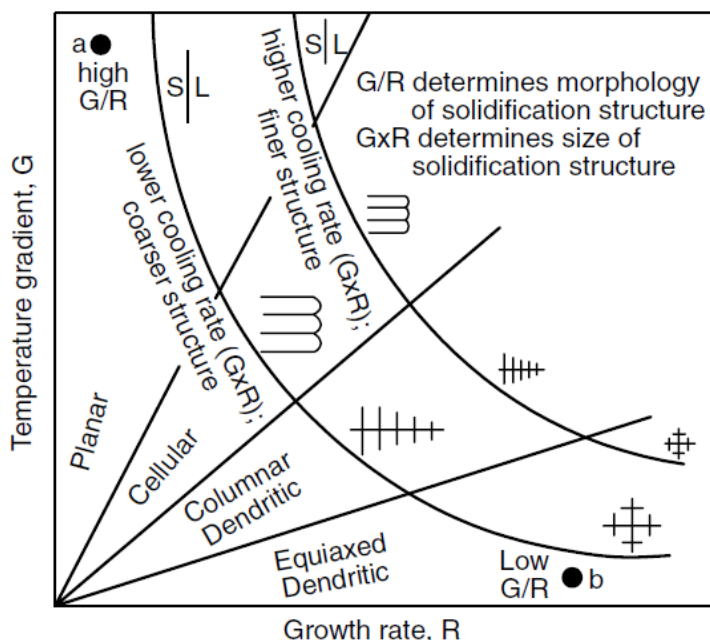
$$G \times R = \left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_t \cdot \left(\frac{\partial X}{\partial t}\right)_T = -2\pi k V \frac{(T_l - T_0)^2}{Q} \quad (3)$$

$$L \rightarrow (L + \delta) \rightarrow (L + \delta + \gamma) \rightarrow (\delta + \gamma) \quad 1.95 > \frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}} > 1.48 \quad (4)$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 2\%Ti + 0.5\%Nb \quad (5)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn \quad (6)$$

که در آن V سرعت جوشکاری (mm/s)، T_l دمای حوضچه مذاب ($^{\circ}\text{C}$)، T_0 دمای اولیه قبل از جوشکاری ($^{\circ}\text{C}$)، K ضریب انتقال حرارت ($\text{Watt/mm}^{\circ}\text{C}$) و Q حرارت ورودی (J/s) است. با توجه به معادلات بالا [۱۱]، با افزایش حرارت ورودی شیب حرارتی (G) کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه نسبت G/R کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند منطقه دندریتهای هم‌محور را در امتداد خط مرکزی جوش تشکیل داده و رشد دندریتهای ستونی را متوقف کند [۱۰].



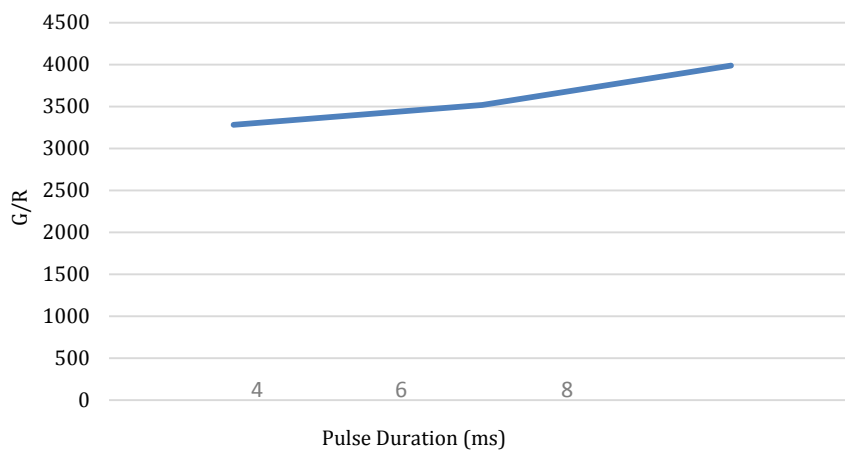
شکل ۲ الف) تغییرات سرعت انجماد در حوضچه جوش (ب) تأثیر شیب دمایی و سرعت انجماد بر شکل و اندازه ریزساختار حوضچه جوش [۳]

شکل ۳ و شکل ۴ با استفاده از معادلات ۲ و ۳ به ترتیب مقادیر G/R و $G \times R$ نمونه‌ها ۱ تا ۳ را با تغییرات زمان ضربان نشان داده است. که مطابق شکل ۲ با مقادیر کمتر G/R ، ریزساختار به سمت هم‌محورتر شدن دندریتهای متمایل می‌گردد. بنابراین با کاهش زمان ضربان، به علت افزایش حرارت ورودی و کاهش گرادیان حرارتی، نسبت G/R کاهش یافته و در نتیجه ریزساختار به سمت حالت هم‌محور متمایل می‌شود.

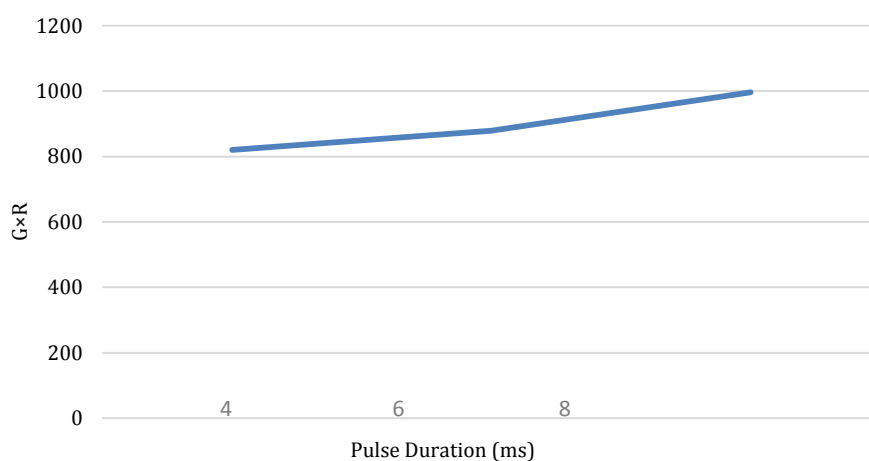
در طول انجماد فلز جوش، دندریتهای تمایل دارند در جهت عمود بر مرز حوضچه جوش رشد کنند، زیرا این جهت حداکثر شیب حرارتی را داراست و منجر به رشد ستونی دانه‌ها عمود بر مرز حوضچه جوش می‌گردد.

شکل ۵ نیز مطلب بیان شده در مورد G/R را نشان می‌دهد به ترتیب زمان ضربان در نمونه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ برابر با ۸، ۶ و ۴ میلی‌ثانیه است. که نشان می‌دهد که هر چه زمان ضربان کاهش می‌یابد، نسبت G/R کاهش یافته و ریزساختار هم‌محورتر می‌گردد. در نتیجه زمان ضربان کم و گرمای ورودی زیاد منجر به کاهش ناحیه ستونی و افزایش ناحیه دانه‌های هم‌محور و سبب افزایش ساختار

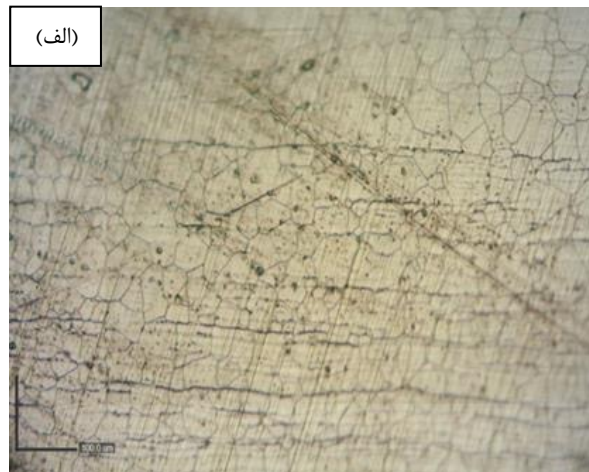
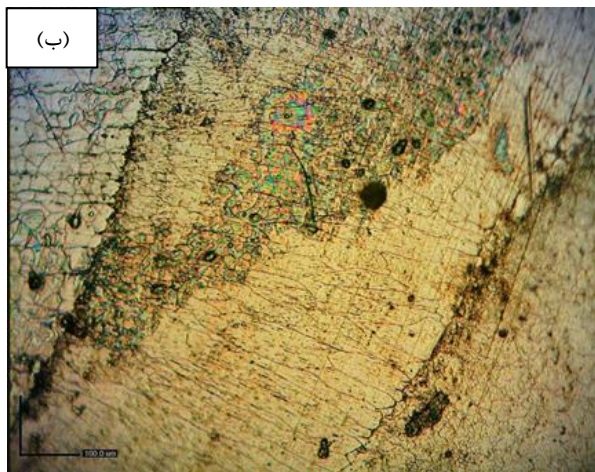
دندریت هم‌محور و کاهش دندریت ستونی در منطقه جوش می‌گردد (نمونه‌های ۱ تا ۳ و شکل ۵-ب تا شکل ۵-د)؛ اما طبق شکل ۴ با کاهش زمان ضریان و کاهش حاصل ضرب $G \times R$ ، اندازه ریزساختار تا حدودی افزایش می‌یابد. طبق اندازه‌گیری‌های صورت گرفته به کمک نرم‌افزار Image z اندازه دانه‌ها برای فلز پایه ۲۲ میکرومتر، نمونه ۳ حدود ۲۶/۳ میکرومتر، نمونه ۲ در حدود ۱۹/۵ میکرومتر و نمونه ۱ حدود ۱۵/۵ میکرومتر است. لازم به ذکر است که با تغییر زمان ضریان، اندازه ریزساختار بهینه تعیین گردد.

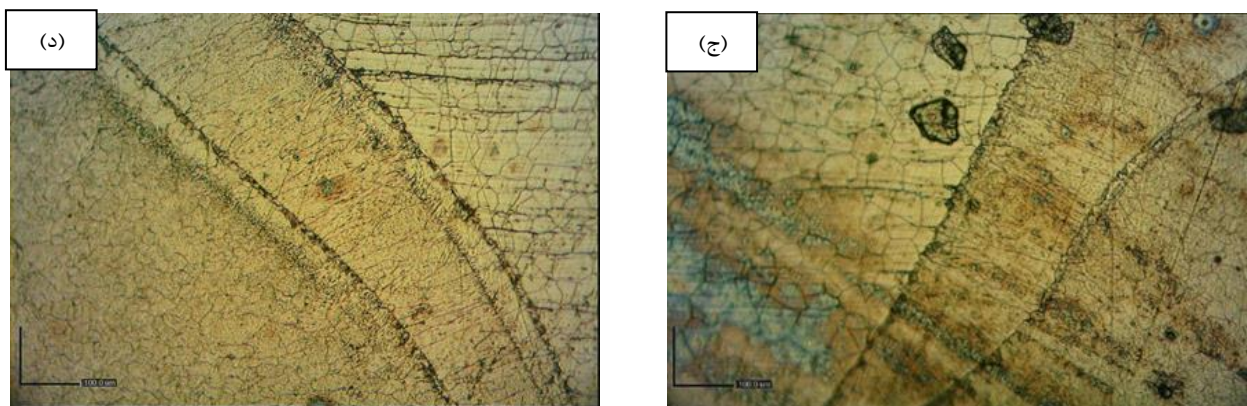


شکل ۳ نمودار تأثیر تغییرات زمان ضریان بر نسبت G/R



شکل ۴ نمودار تأثیر تغییرات زمان ضریان بر نسبت $G \times R$

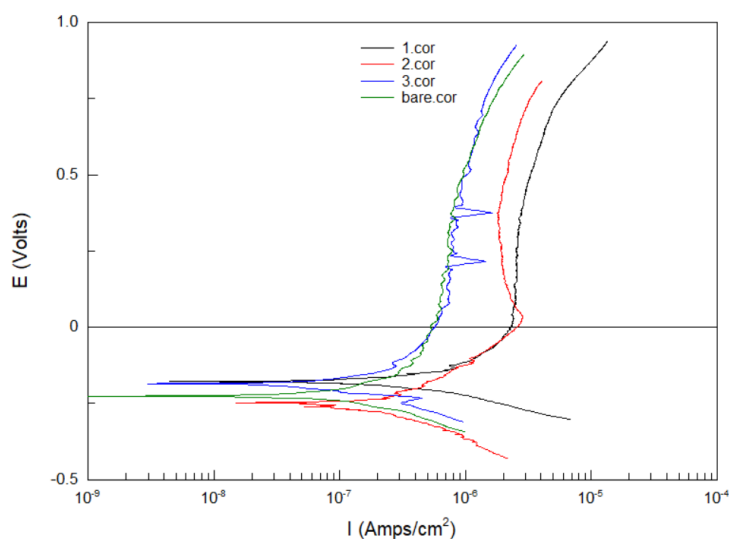




شکل ۵ ریزساختار نمونه‌ها الف) فلز پایه ب) نمونه ۱ ج) نمونه ۲ د) نمونه ۳

۳-۲- خوردگی حوضچه جوش

نتایج تحلیل‌های خوردگی در این مطالعه نشان می‌دهد که کاهش زمان ضربان در فرایند جوشکاری لیزری تأثیر قابل توجهی در کاهش میزان خوردگی فلز جوش دارد. همان‌طور که از شکل ۶ و جدول ۳ مشاهده می‌شود. با کاهش مقدار زمان ضربان از نمونه ۱، ۲ و ۳ با مقادیر ۸، ۶ و ۴ به ترتیب، میزان جریان خوردگی کاهش یافته و مقاومت به خوردگی افزایش می‌یابد. به شکلی که نمونه ۳ کمترین میزان جریان خوردگی و بیشترین مقاومت به خوردگی را دارا است. و حتی نسبت به فلز پایه مقاومت بالاتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین، چگالی جریان غیرفعال نیز با کاهش زمان ضربان با جریان‌های کمتری تشکیل می‌گردد که این نیز نشان‌گر حضور عیوب بیشتر در نمونه‌های با زمان ضربان بیشتر است.



شکل ۶ نمودار پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فلز پایه، نمونه ۱، نمونه ۲ نمونه ۳

جدول ۳ داده‌های استخراج شده از نمودار پلاریزاسیون از مناطق جوش و فلز پایه

نمونه	پتانسیل خوردگی (mm/s)	جریان خوردگی (nA/cm ²)	دانسیته جریان غیرفعال (mA/cm ²)
فلز پایه	-230	70	470
نمونه ۱	-243	520	1100
نمونه ۲	-253	210	1050
نمونه ۳	-241	90	500

این پدیده به دلیل تغییرات ریزساختاری ایجاد شده و تشکیل دانه‌های هم‌محور در ناحیه جوش است. زمانی که زمان ضربان کاهش می‌یابد، بر اثر افزایش حرارت ورودی، گرادیان حرارتی کاهش می‌یابد که این امر باعث می‌شود دانه‌ها به صورت هم‌محور و یکنواخت‌تر در ناحیه جوش تشکیل شوند. و بر این نوع ساختار، به دلیل چیدمان منظم و متراکم دانه‌ها، خواص مکانیکی بهتر و مقاومت بیشتری در برابر عوامل خوردنده مانند اسیدها و نمک‌ها ایجاد می‌کند. همچنین با افزایش گرادیان حرارتی و کاهش زمان ضربان نسبت $G \times R$ نیز افزایش می‌یابد که منجر به افزایش اندازه دانه می‌گردد. و اندازه دانه‌های بزرگ‌تر منجر به کاهش سطح مرز دانه‌ها می‌گردد، که مکان‌های با انرژی بالاتری و مستعد به خوردگی هستند و در نتیجه مقاومت کلی خوردگی را افزایش می‌دهد. در نتیجه با کاهش زمان ضربان به ریزساختاری دارای هم‌محوری بیشتر و انداز دانه بزرگ‌تر و دارای مقاومت به خوردگی بالاتری می‌توان دست یافت.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی متغیر زمان ضربان جوشکاری لیزر فولاد زنگ‌نزن 316L بر ریزساختار و خوردگی منطقه جوش پرداخته است. نتایج زیر از پژوهش حاضر حاصل می‌شود:

- در جوشکاری لیزر، با کاهش زمان ضربان از ۸ میلی‌ثانیه به ۴ میلی‌ثانیه باعث کاهش حرارت ورودی از مقدار ۱۲۴ تا ۱۰۰ ژول بر میلی‌متر و کاهش گرادیان حرارتی شده که می‌تواند باعث بهبود ریزساختار و ایجاد ریزساختار هم‌محور گردد.
- کاهش زمان ضربان از ۸ میلی‌ثانیه به ۴ میلی‌ثانیه در اثر افزایش اندازه دانه و کاهش مرزها که مناطق مستعد خوردگی می‌باشند و همچنین با ایجاد ساختاری هم‌محور، به دلیل چیدمان منظم دانه‌ها، منجر به بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت به خوردگی حتی بیشتر از فلز پایه در منطقه جوش در محیط‌های خوردنده می‌گردد. و باعث می‌شود جریان خوردگی از ۵۲۰ نانوامپر بر سانتی‌متر مربع به ۹۰ نانوامپر بر سانتی‌متر مربع کاهش یابد.

پس در اثر کاهش زمان ضربان می‌توان به ساختاری هم‌محور تر با اندازه دانه ریزتر به همراه مقاومت به خوردگی بیشتر دست یافت.

فهرست علائم

G	شیب دمایی ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)
K	ضریب انتقال حرارت ($\text{Watt}/\text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
Q	حرارت ورودی (J/mm)
Q	حرارت ورودی (J/mm)
T_L	دمای حوضچه مذاب ($^{\circ}\text{C}$)
T_0	دمای اولیه قبل از جوشکاری ($^{\circ}\text{C}$)
v	سرعت (mms^{-1})

References

- [1] Kiani P, Ghoreishi M. Comparative Metallurgical and Mechanical of Nd: YAG laser welding of Austenitic stainless steels. Journal of Mechanical Engineering. 2020;50(1):187-98. doi: 10.22034/jmeut.2020 [In Persian]
- [2] Rezaei MA, Naffakh-moosavy H. Comparison of the effect of pulsed Nd: YAG and continuous wave fiber laser on the microstructure, weld geometry and weldability of inconel 718 superalloy. Journal of Advanced Materials and Technologies. 2019 Feb 20;7(4):37-49. doi: 10.30501/jamt.2019.84346 [In Persian]
- [3] Pakari S, Shamanian M. The Effect of GTAW Pulsed Welding on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 310S. In: Proceedings of the 14th Conference on Materials and Metallurgical Engineering; 2017 Oct 3; Shahrekord University, Shahrekord, Iran. 2018. [In Persian]
- [4] Raja KS, Prem JJ, Sathiyaseelan P, Hemanandh J, Ganesan S, Arunkumar T. Investigation of microstructure and mechanical properties of laser and TIG welded stainless steel alloy. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;44:3578-82. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.456

- [5] Sokhanpardaz M. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of dissimilar welds between AISI310 and AISI316 austenitic stainless steels by pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW). *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Apr 20;11(2):1-9. doi: [10.22034/IJME.2024.441060.1927](https://doi.org/10.22034/IJME.2024.441060.1927) [In Persian]
- [6] Nikravan A, Kolahan F, Shariati M. Experimental and statistical analysis of pulsed Nd: YAG laser welding process for dimension optimization of connection in the AISI 316L stainless steel thin-walled tube. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jun 21;11(4):56-71. doi: [10.22034/IJME.2024.455648.1954](https://doi.org/10.22034/IJME.2024.455648.1954) [In Persian]
- [7] das Neves MD, Lotto A, Berretta JR, Rossi WD, Júnior ND. Microstructure development in Nd: YAG laser welding of AISI 304 and Inconel 600. *Welding International*. 2010 Oct 1;24(10):739-48. doi: [10.1080/09507110903568877](https://doi.org/10.1080/09507110903568877)
- [8] Baghjari SH, Mousavi SA. Effects of pulsed Nd: YAG laser welding parameters and subsequent post-weld heat treatment on microstructure and hardness of AISI 420 stainless steel. *Materials & Design*. 2013 Jan 1;43:1-9. doi: [10.1016/j.matdes.2012.06.027](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.027)
- [9] Martins GS, Da Silva RP, Beckedorff L, Monteiro AS, de Paiva KV, Oliveira JL. Fatigue performance evaluation of plate and shell heat exchangers. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2020 Dec 1;188:104237. doi: [10.1016/j.ijvpv.2020.104237](https://doi.org/10.1016/j.ijvpv.2020.104237)
- [10] Haupt W, Borges LG, Israel CL, Riffel KC. Effects of laser welding on the mechanical properties and microstructure of AISI 304 stainless steel. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2024 Dec;11(4):887-904. doi: [10.1007/s40516-024-00268-3](https://doi.org/10.1007/s40516-024-00268-3)
- [11] Kou S. *Welding Metallurgy*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2003.