

## بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG بر روی ساختار انجمادی و ابعاد حوضچه مذاب در ورق نازک آلیاژ مس-برلیوم

سید تیرداد نیک‌نژاد\* و سید علی اصغر اکبری موسوی

دانشگاه تهران، پردیس دانشکده فنی، گروه مواد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۴/۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۷/۵/۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۷/۵/۲۴

**چکیده** در این تحقیق، ساختار جوش لیزر پالسی Nd:YAG آلیاژ مس برلیوم  $17200^{\circ}\text{C}$ ، تحت تأثیر متغیرهای مختلف شامل انرژی پالس‌های لیزر، قطر کانونی اشعه، پهنای پالس و فرکانس در عمق و پهنای جوش بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به دلیل تفاوت در تحت تبرید ترکیبی در مناطق مختلف فلز مذاب، ساختار انجمادی شامل مورفولوژی‌های متعددی است. ساختار ستونی عمدتاً در منطقه مجاور مرز ذوب تشکیل می‌شود؛ درحالی که ساختار دندریتی و هم‌محور، ساختار غالب در نزدیکی خط مرکزی جوش به شمار می‌آید. تصویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که ذوب جزئی مرزدانه در منطقه تحت تأثیر حرارت روی داده است. تصاویر متالوگرافی نشان می‌دهد که افزایش بیش از اندازه ولتاژ پالس به تبخیر لایه سطحی آلیاژ و تقعر گرده جوش منجر می‌شود. برای ایجاد جوش با حداکثر عمق نفوذ و حداقل پهنای، کاهش قطر کانونی اشعه به جای افزایش انرژی پالس توصیه می‌شود. همچنین پهنای پالس، اثر دوگانه‌ای بر ابعاد حوضچه مذاب ایجاد شده دارد.

**کلمات کلیدی** جوشکاری لیزر پالسی، آلیاژ مس-برلیوم، تحت تبرید ترکیبی، ساختار انجمادی.

## Effects of Nd:YAG Pulsed Laser Beam Parameters on Microstructure and Dimensions of Weld Pool for a Copper-Beryllium Plate

S. T. Niknejad\* and S. A. A. Akbari Mousavi

Department of Material Science and Engineering, Campus of Engineering Faculties, Tehran University

**Abstract** The Nd:YAG pulsed laser welded structure of Copper-Beryllium alloy were studied by varying laser parameters such as pulse energy, spot diameter, duration and frequency. The metallographic results showed that the pulse energy should be kept as low as possible in order to obtain the weld pool with the highest values of penetration and the least width. Low pulse energy decreases the time for segregation of impurities. The impurities are the main cause of hot cracking. In addition, the laser spot diameter should be kept as low as possible. Moreover, the microscopic investigations demonstrate that the dendrite structure prevails in weld pool near the weld centerline and the cellular structure forms in weld pool near the base meal.

**Keywords** Laser Beam Welding, Copper-Beryllium Alloy, Pulsed Laser Parameters.

\*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: دانشگاه تهران، پردیس دانشکده فنی، گروه مواد.

تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۱۴۰۹۶، دورنگار: ۰۲۱-۸۸۰۶۰۷۶، پیام‌نگار: niknejadtir@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

جوشکاری با اشعه لیزر یکی از روش های نوین اتصال مواد است. ایجاد حوضچه مذاب با حداکثر نفوذ و حداقل پهنای از جمله مهم ترین ویژگی های این روش است. به طور کلی دو حالت برای جوشکاری لیزر وجود دارد [۱]:

۱. جوشکاری هدایتی (Conductive Welding).

۲. جوشکاری نفوذی یا سوراخ کلیدی (Keyholewelding).

تفاوت اساسی در دو روش فوق آن است که در حالت اول، سطح مقطع مورد اصابت اشعه شکافته نمی شود، در حالی که در حالت دوم سطح فلز باز می شود و باریکه لیزر به درون ناحیه مذاب نفوذ می کند. سوراخ کلید عمده در لیزرهای حالت گازی با دانسیته توان بالاتر از  $10 \text{Kw/mm}^2$  اتفاق می افتد. لیزرهای کم توان عمده لیزرهای حالت جامدند (Nd:YAG) که مکانیزم هدایتی عامل ذوب است. لیزرهای حالت جامد معمولاً در حالت پالسی عمل می کنند.

اولین مرحله تحقیق در جوشکاری مواد با لیزر پالسی، تعیین پارامترهای بهینه لیزر است. مهم ترین این پارامترها عبارت اند از: ولتاژ لیزر، پهنای پالس، قطر کانونی اشعه و فرکانس پالس ها [۲]. تغییر هر یک از این پارامترها تأثیر زیادی در شکل حوضچه مذاب ایجاد شده و ابعاد آن خواهد داشت. Watanabe و همکارانش تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر

Nd:YAG را بر عمق نفوذ مواد مختلف با هدایت حرارتی متفاوت آزمایش کردند [۳، ۴]. آنها دریافتند که حداکثر استحکام موضعی اتصال زمانی به دست می آید که حوضچه مذاب با حداکثر عمق نفوذ و با حداقل پهنای ایجاد شود. این شرایط زمانی حاصل می شود که دانسیته توان پالس های لیزر در حداکثر میزان ممکن باشد. این پارامتر از حاصل تقسیم توان متوسط لیزر بر سطح مقطع اشعه در هنگام تمرکز به دست می آید [۵، ۶]. جوشکاری لیزر فلزاتی نظیر مس و طلا به دلیل هدایت حرارتی بالا مشکل است. برای اتصال این فلزات قطر اشعه در حالت تمرکز باید بسیار کوچک باشد. در غیر این صورت پهنای حوضچه مذاب به شدت افزایش می یابد. افزایش پهنای پالس و فرکانس لیزر از دیگر عوامل افزایش دهنده پهنای حوضچه مذاب در آلیاژهای با هدایت حرارتی بالاست. تحقیق حاضر به تعیین پارامترهای بهینه برای جوشکاری لیزر پالسی در آلیاژ مس-برلیوم پرداخته است. لازم به ذکر است که پارامترهای بهینه براساس ظاهر حوضچه مذاب و نسبت عمق نفوذ به پهنای جوش مناسب تعیین شده است.

## ۲- روش آزمایش

جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG با طول موج  $1064 \text{nm}$  میکرون بر روی ورق های مس-برلیوم  $1720^\circ\text{C}$  با ضخامت  $0.25 \text{mm}$  میلیمتر انجام شد. در جدول ۱ آنالیز شیمیایی این آلیاژ

جدول ۱. ترکیب شیمیایی C17200

عنصر	برلیوم	نیکل	کبالت	مس
درصد وزنی	۱/۹	۰/۲	۰/۴	باقیمانده

است. به دلیل توان متوسط اعمالی، نسبت عمق به پهنای جوش پایینی به دست آمد. همچنین دستگاه، مجهز به استریو میکروسکوپ ۱۰ برابرکننده جهت مشاهده دقیق محل جوش، سامانه تغییر قطر لکه لیزر در نقطه کانونی (۰/۱mm) جهت جوش انواع مواد و سیستم کنترل و هدایت گاز آرگون محافظ جوش است. در جدول ۲ پارامترهای عملی جوش لیزر

ارائه شده است. آنالیز عنصری با آنالیز EDS میکروسکوپ الکترونی انجام شد. به دلیل عدم توانایی آنالیز برلیوم با سیستم EDS، آزمایش شیمی تر برای تعیین درصد وزنی این عنصر انجام شد.

برای جوشکاری از دستگاه میکرولیزر مدل Cosmolaser-SW-1 با توان متوسط ۸۰ وات استفاده شده

جدول ۲. پارامترهای جوش لیزر انجام شده.

نمونه <sup>۱،۲</sup>	ولتاژ پالس (V)	عرض پالس (ms)	فرکانس پالس (Hz)	قطر کانونی اشعه (mm)
۱	۴۱۰	۴	۱۰	۰/۱۵
۲	۴۳۰	۴	۱۰	۰/۱۵
۳	۴۵۰	۴	۱۰	۰/۱۵
۴	۵۰۰	۴	۱۰	۰/۱۵
۵	۵۲۰	۴	۱۰	۰/۱۵
۶	۴۲۰	۴	۱۰	۰/۱
۷	۴۲۰	۴	۱۰	۰/۱۵
۸	۴۲۰	۴	۱۰	۰/۲
۹	۴۲۰	۴	۱۰	۰/۳
۱۰	۴۲۰	۴	۱۰	۰/۴
۱۱	۴۲۰	۴	۱۰	۰/۵
۱۲	۴۲۰	۲	۱۰	۰/۱۵
۱۳	۴۲۰	۳/۵	۱۰	۰/۱۵
۱۴	۴۲۰	۵	۱۰	۰/۱۵
۱۵	۴۲۰	۶	۱۰	۰/۱۵
۱۶	۴۲۰	۴	۸	۰/۱۵
۱۷	۴۲۰	۴	۱۲	۰/۱۵

۱. آزمایش‌ها بر روی ورق آنیل انحلالی شده انجام شده است.

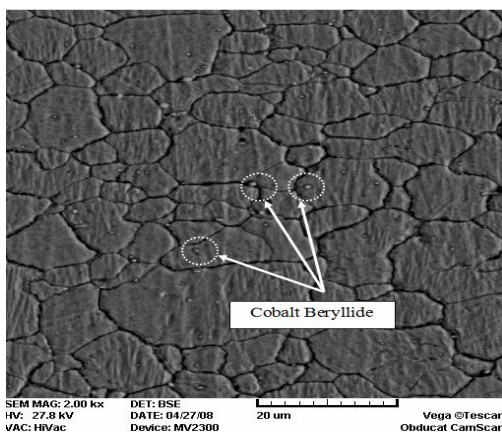
۱-۳- میکروساختار فلز پایه

مشاهده می شود.

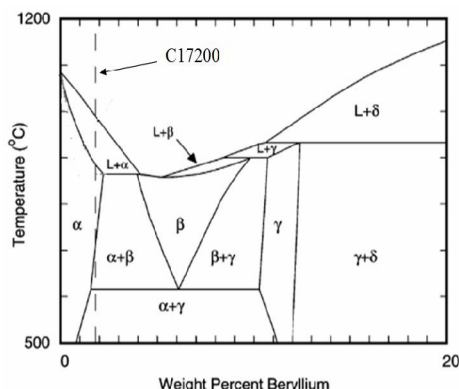
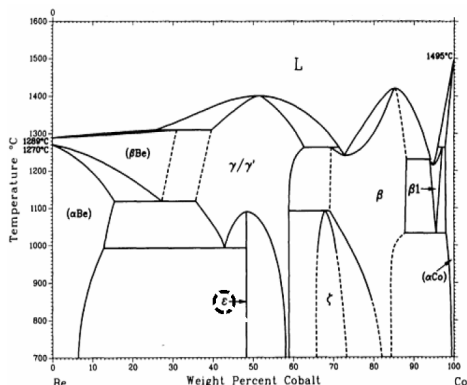
شکل ۱، میکروساختار آلیاژ مس-برلیوم در شرایط آنیل انحلالی شده را نشان می دهد. در شکل ۱ دانه های هم محور فاز  $\alpha$  که حاوی برلیوم محلول در جامدند نمایان است. ذرات ریز سفیدرنگ پراکنده در داخل دانه ها، فاز بین فلزی  $\epsilon$  با ترکیب شیمیایی  $47wt\%Co-53wt\%Be$  است که برلید کبالت (Cobalt Beryllide) نامیده می شود. باتوجه به دیاگرام تعادلی Co-Be (شکل ۲-الف)، نقطه ذوب تقریبی فاز  $\epsilon$  برابر  $1090^{\circ}C$  و بالاتر از نقطه ذوب تعادلی آلیاژ ( $990^{\circ}C$ ) است (شکل ۲-ب).

پس از جوشکاری، نمونه ها از مقطع عرضی برش خوردند و پس از سنباده زنی و پولیش با محلول رقیق هیدروکسید آمونیوم حکاکی شدند. از میکروسکوپ نوری Olympus-LH50A برای بررسی شکل ظاهری گرده جوش و از میکروسکوپ الکترونی روبشی CAMSCAN-MV2300 برای آشکارسازی ساختار جوش و ناحیه تحت تأثیر حرارت استفاده شد.

۳- نتیجه گیری



شکل ۱. ساختار متالوگرافی آلیاژ آنیل شده در دمای  $790^{\circ}C$ .



شکل ۲. الف) دیاگرام تعادلی Co-Be و ب) دیاگرام تعادلی Cu-Be و ترکیب شیمیایی آلیاژ C17200 [۷].

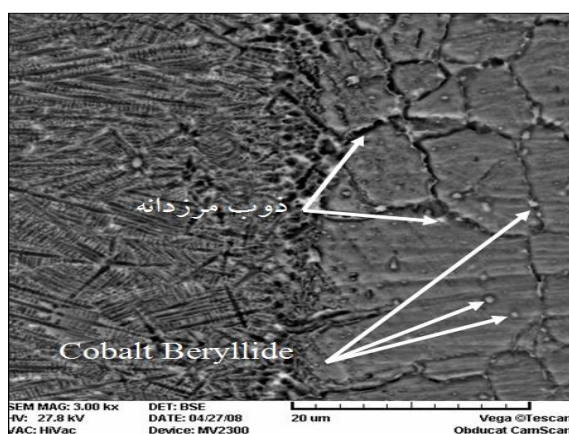
حرارتی است. استفاده از لیزر کم توان، نرخ سرد شدن را بالا می برد و در نتیجه سرعت انجمادی افزوده می شود. در منطقه نزدیک خط مرکز جوش به دلیل شیب حرارتی نسبتاً پایین انتظار ایجاد ساختار دندریتی و یا حتی هم محور می رود. درحالی که در مجاورت فلز پایه شیب حرارتی افزایش یافته و در نتیجه نسبت کمی شیب حرارتی به سرعت انجماد (G:R) افزایش می یابد که کاهش تحت تبرید ترکیبی و احتمال غالب شدن ساختار سلولی نسبت به ساختار دندریتی را به دنبال دارد. منطقه تحت تأثیر حرارت در شکل ۴ کاملاً مشخص است که به

### ۲-۳. میکروساختار ناحیه ذوب و منطقه تحت تأثیر حرارت

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری ساختار جوش و منطقه تحت تأثیر حرارت را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود ساختار جوش بسته به فاصله از مرز ذوب مورفولوژی های متفاوتی دارد. در مجاورت خط مرکز جوش ساختار ستونی تشکیل شده است که بازوهای دندریتی ثانویه در عرض ستون ها مشخص شده اند. درحالی که در نواحی نزدیک خط مرکزی جوش مورفولوژی غالب، ساختار دندریتی و هم محور غالب است. علت تفاوت ساختار، تفاوت در شیب



شکل ۳. ساختار فلز جوش لیزر در آلیاژ مس برلیوم برای نمونه ۲.



شکل ۴. ساختار منطقه تحت تأثیر حرارت در آلیاژ مس برلیوم برای نمونه ۲.

محلول جامد به سمت مرزدانه‌ها حرکت کرده و در آنجا رسوبات بین فلزی مس-برلیوم به صورت لایه‌ای تشکیل شده‌اند. با توجه به قطور شدن بیش از حد مرزدانه‌ها و تفاوت آشکار ساختار در این ناحیه و ساختار رسوب سخت‌شده، احتمال ذوب مرزدانه‌ها در ناحیه تحت تأثیر حرارت بالاتر است.

### ۳-۳- اثر پارامترهای جوش بر شکل و ابعاد حوضچه جوش

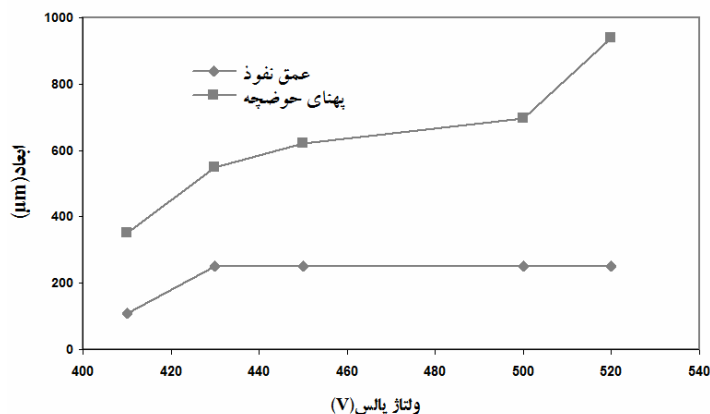
#### ۱-۳-۳- اثر ولتاژ

شکل ۵ تغییرات ابعادی حوضچه مذاب را با افزایش ولتاژ پالس‌های لیزر نشان می‌دهد. همانطور در شکل ۶ نیز

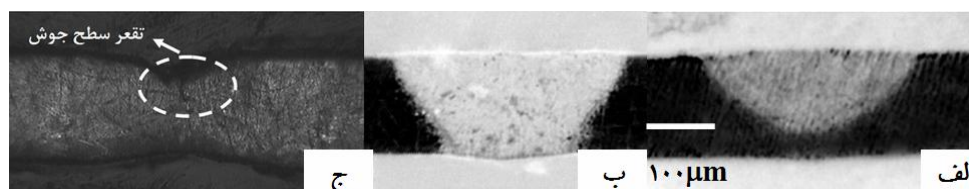
صورت ساختار دانه‌درشت و خشن دیده می‌شود.

در بررسی تصاویر الکترونی مشخص شد که ذرات برلید کبالت به دلیل نقطه ذوب بالاتر از نقطه ذوب تعادلی آلیاژ، پایداری خود را در برابر اعمال سیکل حرارتی شدید حفظ می‌کنند و همچنان در ساختار وجود دارند (شکل ۴). همچنین مشاهده می‌شود که مرزدانه‌های ناحیه تحت تأثیر حرارت نسبت به ساختار فلز پایه درشت شده‌اند. وجود دو عامل در ایجاد این پدیده محتمل است؛ اول اینکه سیکل حرارتی بالا در این منطقه و تجمع عناصر آلیاژی متفاوت به خصوص برلیوم و کبالت در مرزدانه‌ها باعث نزدیک شدن به ترکیب یوتکتیکی و ذوب مرزدانه‌ای شده است [۸].

احتمال دیگر این است که عنصر برلیوم به صورت



شکل ۵. تغییرات ابعادی حوضچه مذاب نسبت به تغییرات ولتاژ پالس.



شکل ۶. مقطع عرضی حوضچه مذاب برای نمونه‌های ۱ (الف)، ۲ (ب) و ۵ (ج).

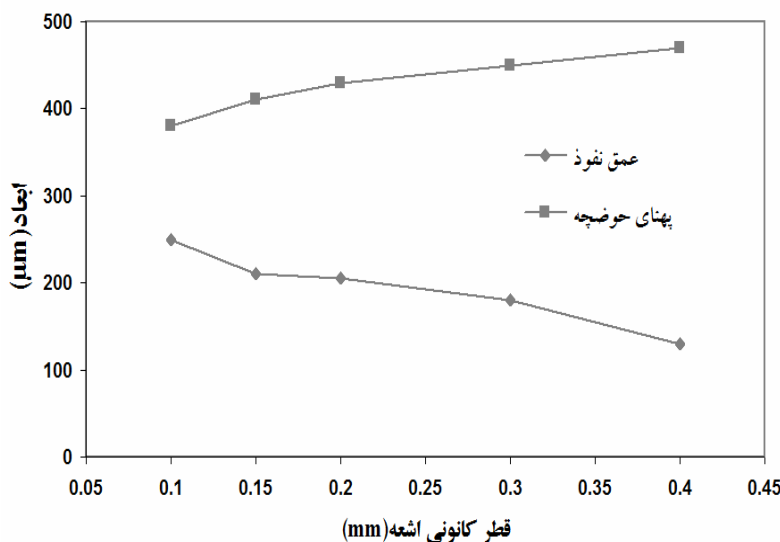
مذاب بالا رفته و به دلیل کمبود مذاب در مرحله انجماد شکل حوضچه ذوب مقعر می شود (شکل ۶ ج).

### ۳-۲- اثر قطر کانونی اشعه

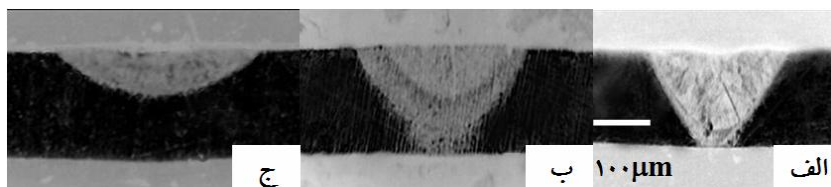
همان طور که در شکل های ۷ و ۸ دیده می شود کاهش قطر اشعه در ولتاژ ثابت (۴۲۰ ولت) به میزان مطلوبی عمق نفوذ را افزایش می دهد، بدون آنکه به افزایش پهنای حوضچه مذاب منجر شود. این پدیده به دلیل افزایش دانسیته توان اشعه بر واحد سطح ایجاد می شود. دانسیته توان اشعه ( $P_D$ ) از این رابطه به دست می آید [۵]:

ملاحظه می شود که با افزایش اندک ولتاژ، ابعاد حوضچه مذاب با نرخ بالایی افزایش می یابد. به طوری که با افزایش ۴ درصدی ولتاژ، عمق نفوذ دو برابر می شود. افزایش ولتاژ به افزایش انرژی ورودی پالس های لیزر منجر می شود و لذا توانایی پالس های لیزر برای ذوب کردن فلز به شدت افزایش می یابد. باتوجه به اینکه افزایش ابعاد حوضچه جوش به افت خواص مکانیکی فلز منجر می شود؛ لذا استفاده از ولتاژهای بالاتر از ۴۳۰ ولت برای جوشکاری ورق با ضخامت ۰/۲۵ میلیمتر توصیه نمی شود.

در ولتاژهای بالاتر از ۴۵۰ ولت احتمال بخارشدن جزئی



شکل ۷. تغییرات ابعادی حوضچه مذاب نسبت به تغییرات قطر کانونی اشعه.



شکل ۸. مقطع عرضی حوضچه مذاب برای نمونه های ۱۰ (الف)، ۸ (ب) و ۶ (ج).

$$P_D = \frac{4P_E}{t\pi d^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

درواقع می توان گفت که عامل افزایش دهنده عمق نفوذ در جوشکاری لیزر پالسی، دانسیته توان اشعه است؛ نه انرژی آن. کاهش بیش از حد قطر اشعه نیازمند درز اتصال بسیار کوچک می باشد و لذا آماده سازی موضع جوش، اهمیت بیشتری می یابد.

### ۳-۳-۳ اثر پهنای پالس

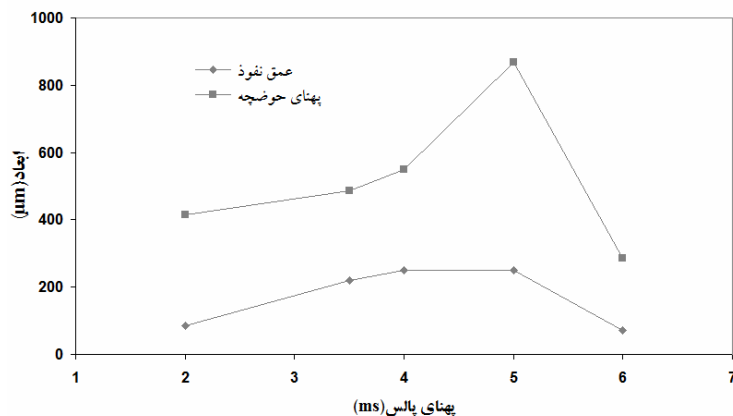
مطابق نمودار شکل ۹، تغییرات پهنای پالس لیزر (در

$$P_D = \frac{4P}{\pi d^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

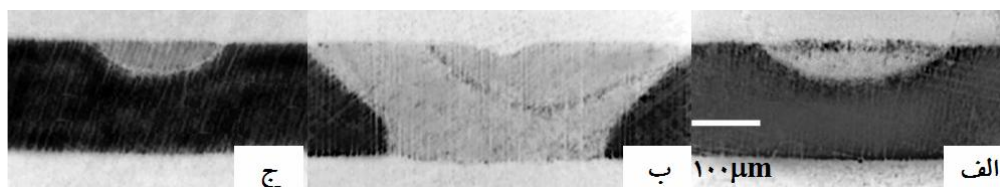
P توان متوسط اشعه است و از رابطه ۲ قابل محاسبه است [۵]:

$$P = \frac{P_E}{t} \quad \text{رابطه (۲)}$$

T معرف پهنای پالس و  $P_E$  انرژی هر پالس لیزر است که تنها به ولتاژ اعمالی وابسته است. در نتیجه دانسیته توان اشعه از این رابطه به دست می آید [۵]:



شکل ۹. تغییرات ابعادی حوضچه مذاب نسبت به تغییرات پهنای پالس.



شکل ۱۰. مقطع عرضی حوضچه مذاب برای نمونه های ۱۲ (الف)، ۱۴ (ب) و ۱۵ (ج).



افزایش می‌یابد.

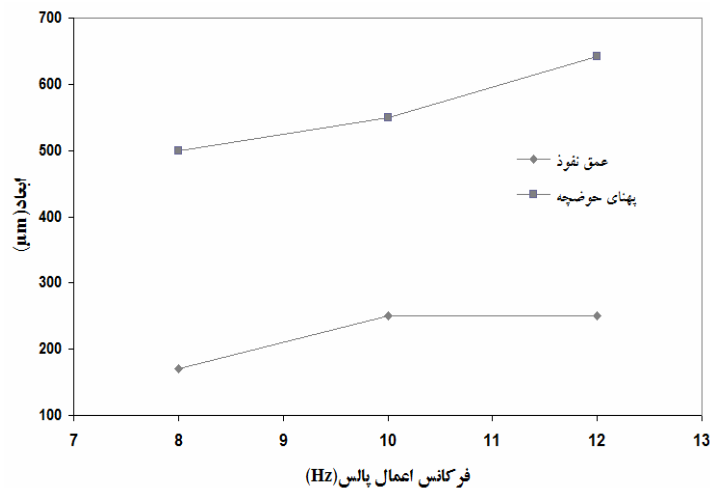
### ۳-۴- اثر فرکانس پالس

با افزایش فرکانس پالس‌های لیزر میزان هم‌پوشانی پالس‌ها بیشتر می‌شود. افزایش هم‌پوشانی موجب پیشگرم پالس قبلی برای پالس بعدی می‌شود. همچنین توان متوسط لیزر در پهنای پالس ثابت وابستگی مستقیم به فرکانس دارد [۲]:

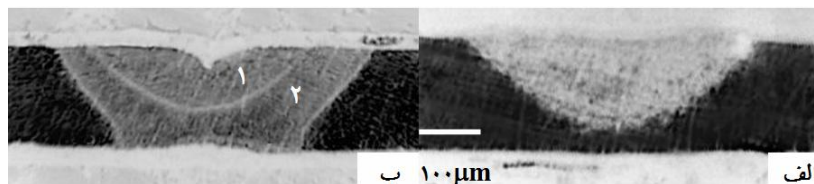
$$P_{av} = P_E \times f(\text{Hz}) \quad \text{رابطه (۴)}$$

مجموع دو عامل فوق (افزایش اثر پیشگرم پالس قبلی و افزایش توان متوسط پالس) موجب افزایش ابعاد حوضچه

ولتاژ ثابت) اثر دوگانه‌ای بر ابعاد حوضچه مذاب دارد. در محدوده پهنای پالس کم، با افزایش پهنای حوضچه مذاب با نرخ نسبتاً بالایی افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). با افزایش پهنای پالس به ۵ میلی‌ثانیه، حوضچه مذاب با نرخ بالایی کوچک می‌شود. مطابق رابطه ۲ با افزایش پهنای پالس در انرژی ثابت پالس، توان متوسط لیزر کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان افت ابعادی حوضچه در نتیجه افزایش پهنای پالس را توجیه کرد. هدایت حرارتی بالای آلیاژ مس نیز در عدم ذوب دخیل است. در محدوده پهنای پالس کم، زمان اعمال پالس برای ایجاد ذوب عامل مهم‌تری نسبت به توان متوسط پالس محسوب می‌شود؛ لذا با افزایش زمان پالس در این محدوده میزان ذوب فلز



شکل ۱۱. تغییرات ابعادی حوضچه مذاب نسبت به فرکانس اعمالی پالس‌ها.



شکل ۱۲. مقطع عرضی حوضچه مذاب برای نمونه‌های ۱۶ (الف)، ۱۷ (ب).

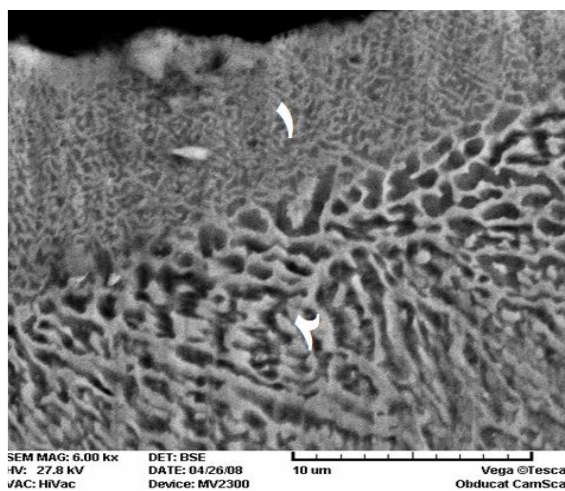
تعیین شد. ساختار انجمادی جوش لیزر در منطقه نزدیک به خط وسط جوش دندریتی و در مجاورت فلز پایه به صورت سلولی است. عامل تعیین کننده عمق نفوذ در جوشکاری لیزر پالسی، دانسیته توان لیزر است. برای افزایش دانسیته توان، کاهش قطر کانونی اشعه مناسب تر از افزایش انرژی (ولتاژ) پالس هاست؛ زیرا افزایش انرژی ورودی به شدت حجم مذاب ایجاد شده را افزایش می دهد. افزایش بیش از حد پهنای پالس در ولتاژ ثابت به کاهش قابل توجه توان متوسط و در نتیجه ذوب ناقص منجر می شود.

## مراجع

- Roy, G. G., Elmer, J. W. and Debroy, T., "Mathematical Modeling of Heat Transfer, Fluid Flow and Solidification during Linear Welding with a Pulsed Laser Beam", *J. Appl. Phys.* Vol. 100 (2001) 805-903.
- Tzeng, Y. F., "Effect of Operating Parameters on Surface Quality for the Pulsed Laser Welding of Zinc Coated Steel", *J. Mat Pro Tec.* Vol. 100 (2003) 163-170.
- Baba, N. and Watanabe, I., "Penetration depth into dental casting alloys by Nd:YAG laser", Wiley Period. (2004) 64-68.
- Perret, O., Bizouard, M., Naudy, P. G. and Nore, D., "Characterization of the Keyhole Formed during Pulsed Nd-YAG Laser Interaction with a Ti-6Al-4V Metallic Target", *J., Appl. Phys.* (2001) 27-30.
- Tzeng, Y. F., "Parametric Analysis of the Pulsed Laser Nd:YAG Laser Seam-Welding Process", *Materials Processing Technology*, (1998) 40-47.
- Malek Ghaini, F., Hamed, M. J., "Weld Metal Micro Structural Characteristics in Pulsed Nd:YAG Laser Welding", *Script Materials*, (2007) 955-958.
- Harkness, J. C. and A. Guha., "Copper Beryllium and Nickel Beryllium alloys-Metallugraphy and microstructures-ASM handbook", *ASM Internationals*, (2004), 752-761.
- Zalkind, S. and Moreno, D., "Fracture Characterization of Welded Copper-Beryllium Alloy", *J. Material Science Letters*, (1999) 849-85.

مذاب با افزایش فرکانس می شود (شکل های ۱۱ و ۱۲). روی هم افتادگی پالس ها در شکل ۱۲ مشاهده می شود. نیم دایره خارجی اثر ناشی از پالس حاضر و نیم دایره داخلی ناشی از اثر پالس قبلی است. ساختار انجمادی ایجاد شده در شکل ۱۳ نمایان است. مشاهده می شود که ساختار انجمادی در نیم دایره داخلی به مراتب ریزتر از ساختار انجمادی در خارج آن است. علت این موضوع آن است که ساختار دندریتی تشکیل شده از انجماد پالس قبلی توسط پالس بعدی شکسته می شود و ساختار ریزتری در وسط حوضچه به وجود می آورد.

تأثیر پارامترهای جوشکاری با لیزر پالسی Nd:YAG بر روی صفحات نازک مس-برلیوم بررسی شد که پارامترهای مربوط به نمونه ۱۰ از لحاظ شکل مناسب حوضچه جوش و حداقل عیوب موجود، به عنوان پارامترهای بهینه جوشکاری



شکل ۱۳. ساختار انجمادی در نمونه ۱۷ (مناطق ۱ و ۲ در شکل ۱۲ مشخص شده اند).