نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، پاییز و زمستان 1399، صفحه 12-1

روش ساخت دستگاه کوبش هماهنگ با لیزر پالسی و تاثیر آن بر جوش آلیاژ آلومینیوم 6061

حسین ابراهیم زاده، حسن فرهنگی *

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: 1398/08/10 ؛ پذیرش مقاله: 1399/06/15)

چکیده

غیر ممتد بودن پرتو لیزر در لیزرهای پالسی این امکان را فراهم می‌کند که بتوان در فاصله دو پرتو متوالی کوبش مکانیکی را روی مهره‌ای از جوش که هنوز داغ است انجام داد. در فاصله زمانی بسیار کم (20، 150 و 300 میلی‌ثانیه) بعد از اعمال پالس لیزر، کوبش مکانیکی روی مهره جوش انجام شد. جهت دستیابی به این زمان‌های کوبش، سنسور نور پالس nام را تشخیص داد و بازوی مکانیکی شروع به حرکت نمود. پس از رسیدن نوک سنبه به نزدیکی قطعه‌کار، پالس n+1ام به سطح قطعه کار تابانده شد و بنابراین سنبه پس از پیمودن فاصله‌ای کوتاه به جوش برخورد کرد. خواص مکانیکی مطلوب در بالاترین زمان (300 میلی‌ثانیه) و فشار کوبش (6 بار) به دست آمد. علت این امر عدم شکست جوش در اثر نیروهای خمشی کوبش بود.

کلمات کلیدی: جوشکاری لیزر پالسی، کوبش هماهنگ، آلیاژ آلومینیوم 6061، فشار پنوماتیک، زمان تاخیر، خواص مکانیکی.

Fabrication of synchronized hammer peening with pulsed laser welding and its effect on 6061 aluminum alloy weld

H. Ebrahimzadeh, H. Farhangi*

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

(Received 1 November 2019 ; Accepted 5 September 2020)

Abstract

The non-continuous laser beam in pulsed lasers allows the mechanical peening between two consecutive beams on a still hot weld bead. At a very short time (20, 150 and 300 ms) after laser pulse application, mechanical peening was performed on the welding bead. To achieve these short times, the light sensor detects the nth laser pulse and the mechanical arm starts moving. Upon reaching the tip of the pin near the workpiece, the n + 1th pulse was irradiated to the workpiece surface, and so the pin impact to the weld bead after traveling a short distance. Desirable mechanical

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hfarhangi@ut.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

properties were obtained at the highest time (300 ms) and highest pressure (6 bars). In this time and pressure the weld beads were not broken due to bending forces of peening.

Keywords: Pulsed laser welding, Synchronized hammer peening, 6061 aluminum alloy, Delay time; Pneumatic pressure, Mechanical properties.

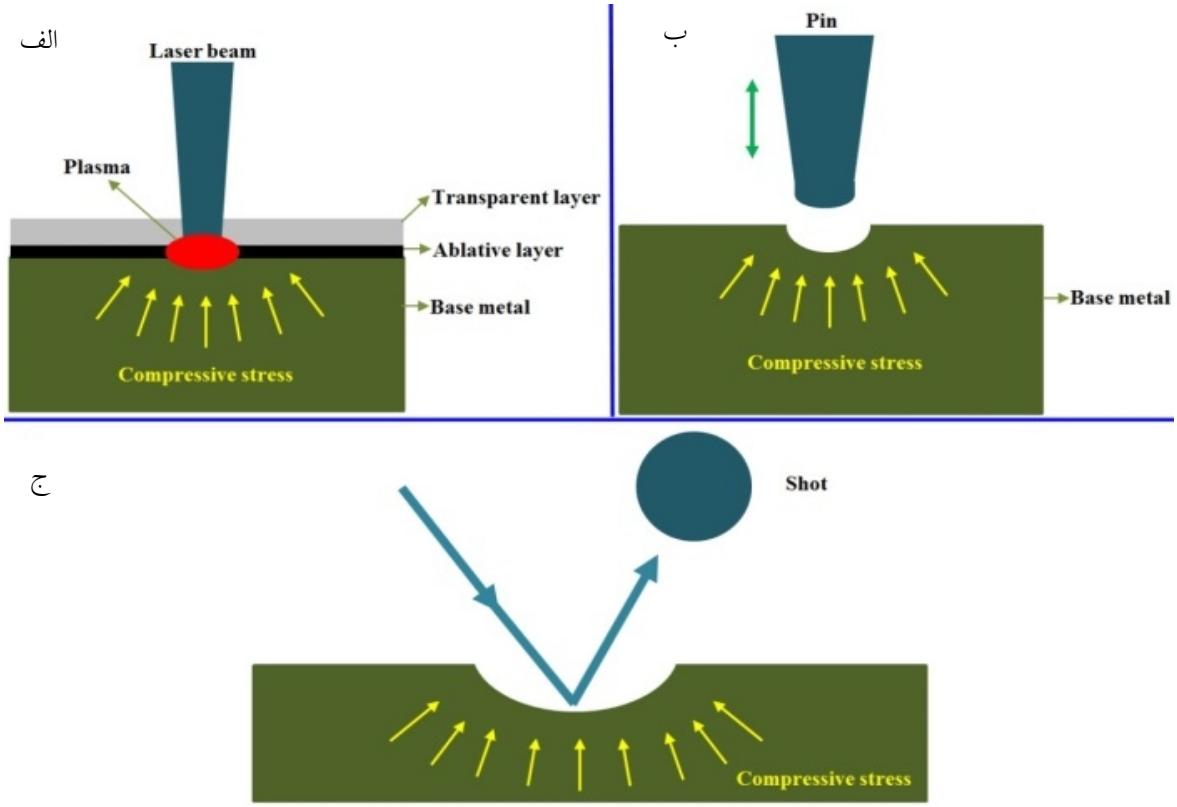
1- مقدمه

جهت ایجاد تنش‌های پسماند فشاری و بهبود پروفیل جوش از کوبش استفاده می‌شود. در این فرآیند تغییر شکل پلاستیک موضعی به سطح ماده اعمال می‌شود و در نتیجه تنش پسماند فشاری بسیار بالایی در ماده ایجاد خواهد شد. از روش‌های مختلف کوبش می‌توان به کوبش با چکش، کوبش با لیزر، کوبش به وسیله ذرات اشاره کرد (شکل (1)) [1-5]. در کوبش با چکش یا کوبش مکانیکی از سیلندرهای پنوماتیک یا هیدرولیک، سلونوییدهای مغناطیسی یا هر روشی که به وسیله آن بتوان حرکت رفت و برگشتی ایجاد کرد، جهت کوبیدن یک سنبه روی سطح ماده استفاده می‌شود.

در حال حاضر از کوبش مکانیکی بعد از اتمام جوشکاری یا به فاصله کمی از مشعل جوشکاری (Trail Peening) استفاده می‌شود. اما مشکل عمده جوشکاری آلیاژهای سری 6XXX ایجاد ترک گرم است [7و6]. ترک گرم حین انجماد ماده ایجاد می‌شود و در نتیجه کوبش بعد از جوشکاری نمی‌تواند در بسته شدن این ترک‌ها و به خصوص ترک‌های ماکرو چندان موثر باشد. جهت جلوگیری از ایجا ترک‌های گرم در جوشکاری ذوبی در آلیاژهای سری 6XXX از فیلر غیر هم‌جنس از آلیاژهای سری 4XXX و 5XXX و جوشکاری مقاومتی استفاده می شود [8-10]. استفاده از فیلر غیر همجنس باعث خوردگی گالوانیک اتصال در محیط‌های خورنده می‌شود [11-13]. در سال‌های اخیر به منظور کاهش ترک گرم بدون استفاده از فیلر غیر همجنس تحقیقات زیادی در زمینه جوشکاری با منابع با دانسیته انرژی بالا و حرارت ورودی پایین مانند پرتو لیزر انجام شده است. کاهش حرارت ورودی در این گونه فرآیندها باعث کاهش ترک‌های گرم می‌شود [14-16]. یکی از لیزرهای مورد استفاده در جوشکاری فلزات لیزر Nd:YAG پالسی است. ذوب و انجماد در جوشکاری پالسی با فرکانس پایین یک فرایند غیرپیوسته است بدین معنی که بعد از اعمال هر پالس ماده ذوب و منجمد می‌شود و پالس بعدی روی ناحیه منجمد شده اصابت می‌کند. بنابراین در این نوع فرآیند اشاعه ترک از یک پالس به پالس بعدی و همچنین ترمیم ترک در یک پالس به وسیله پالس بعدی با فرآیندهای ذوب و انجماد پیوسته متفاوت است [17-20].

مقدار تنش های حاصل از جوشکاری با افزایش طول جوش افزایش پیدا می‌کنند. یعنی مقدار تنش کششی در انتهای خط جوش (Weld Seam) بیشتر از ابتدای آن است [21]. این امر باعث می‌شود که در بسیاری از مواقع ترک در ابتدای جوشکاری به وجود نیاید، بلکه با افزایش طول جوش و رسیدن به مقدار بحرانی تنش، ترک گرم ایجاد شود. بدیهی است خنثی کردن تنش‌های کششی در مراحل اولیه مانع از بزرگ شدن آن‌ها و رسیدن به حد آستانه‌ای برای ایجاد ترک‌های گرم طولی خواهد شد. انجماد غیر پیوسته و آگاهی از این موضوع که تنش با افزایش طول جوش افزایش پیدا می‌کند، موجب خلق روشی ابتکاری در جوش لیزر پالسی شد. بدین صورت که پس از اعمال هر پالس لیزر، در زمانی مناسب کوبش روی سطح همان پالس صورت گیرد و بعد از آزاد سازی تنش‌های کششی ناشی از ذوب و انجماد پالس بعدی اعمال شود. در این پژوهش تاثیر روش ابتکاری کوبش مکانیکی سنکرون شده با پالس لیزر بر خنثی سازی تنش‌های کششی ناشی از جوشکاری و همچنین ترمیم ترک‌های گرم یک پالس به وسیله پالس بعدی در فرآیند جوشکاری لیزر پالسی با شکل پالس مربعی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین اثر کوبش مکانیکی حین جوشکاری روی خواص مکانیکی و ریزساختار جوش و منطقه متاثر از حرارت بررسی می‌شود.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل1- طرح واره‌ای از الف) کوبش لیزری، ب) کوبش مکانیکی و ج) کوبش با ذرات

2- شرح دستگاه

2-1- دستگاه لیزر

در این تحقیق از روش جوشکاری از دستگاه میکرولیزر Nd:YAG پالسی مدل SW-1 استفاده شده است (شکل (2)). به دلیل کم بودن توان متوسط دستگاه لیزر مورد استفاده که حدود80 وات است، عمق جوش‌ها در مقایسه با پهنای آن‌ها کمتر است.



شکل 2- دستگاه جوش لیزر پالسی

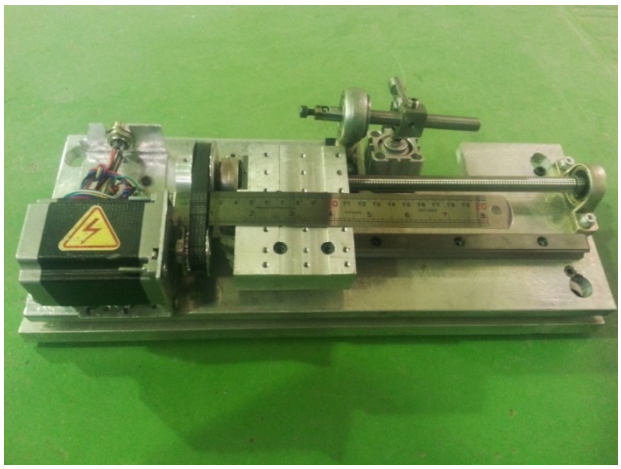
2-2- قید و بند متحرک

بخش مکانیکی از اجزایی شامل ریل، واگن، بال اسکرو، چرخ‌دنده و متعلقات، تسمه تایم و موتور استپر با گشتاور 13 kg×cm تشکیل شده است. حرکت دورانی از طریق تسمه تایم و دو عدد چرخدنده به بال اسکرو منتقل شده و بال اسکرو حرکت دورانی را به حرکت طولی تبدیل می‌کند. این مجموعه روی ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم 6061 سوار شده‌اند. برای تنظیم ارتفاع فیکسچر زیر محل تابش پرتو لیزر از یک سیستم پیچ، مهره، بلبرینگ و میله‌های راهنما استفاده شده است. شکل(3) بخش مکانیکی قید و بند را نشان می‌دهد.

بخش کنترلی دستگاه، از منبع تغذیه، درایور موتور استپر، مدار میکرو AVR، صفحه نمایش و کلیدهای کنترلی تشکیل شده است. مدار میکرو از طریق خروجی دیجیتال، بسامدهای مورد نظر را ایجاد و با ارسال آن‌ها به درایور سرعت مورد نظر را برای موتور استپر تعیین می‌کند. قسمت کنترلی قید و بند در شکل (4) نشان داده شده است. به کمک بخش مکانیکی و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

مدارهای کنترلی فیکسچر ساخته شده قادر به حرکت با سرعت حداقل 0/125 mm/s بدون لرزش است. همان‌گونه که در بخش‌های بعدی اشاره خواهد شد، کنترل سرعت به صورت دقیق و در مقیاس کوچک جهت هماهنگی با دستگاه کوبش مکانیکی، مورد نیاز خواهد بود.



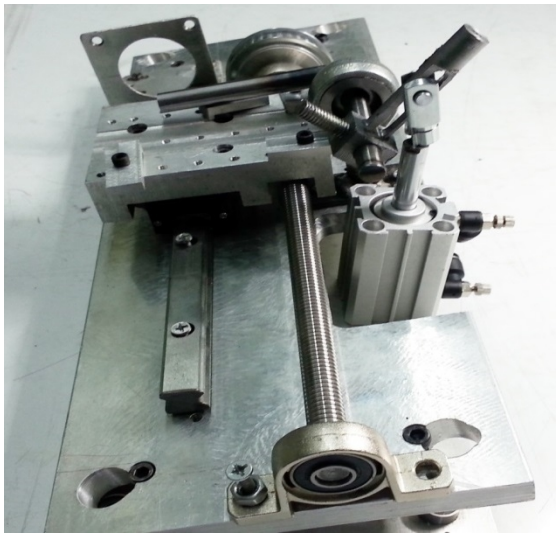
شکل3- بخش مکانیکی قید و بند جابجایی نمونه زیر پرتو لیزر



شکل4- بخش کنترلی قید و بند جابجایی نمونه زیر پرتو لیزر

2-3- دستگاه کوبش مکانیکی

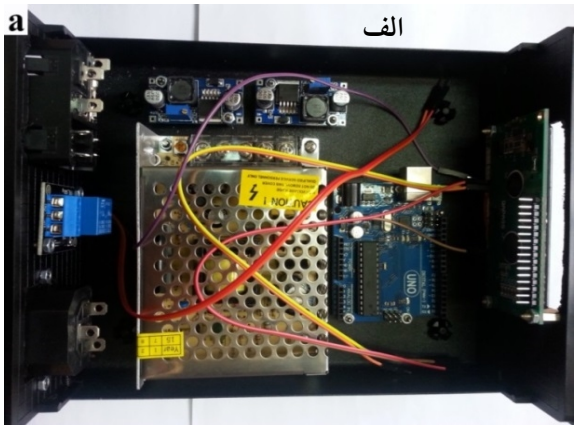
جهت اعمال کوبش از سیلندر پنوماتیک بهره گرفته شد. این سیلندر با قطر 25 mm می‌تواند در فشار 8 bar نیرویی معادل 392/5N تولید کند. بدیهی است با کاهش فشار سیلندر نیرو نیز کاهش پیدا می‌کند. به وسیله دو عدد بلبرینگ و یک سیستم الاکلنگی بدون لرزش حرکت سیلندر به سنبه منتقل می‌شود. سیستم طوری طراحی شده است که بتوان سنبه‌ها و سیلندرهای متفاوت روی دستگاه نصب کرد. شکل (5) سیلندر پنوماتیک نصب شده روی قید و بند و سیستم الاکلنگی جهت اعمال کوبش را نشان می‌دهد.



شکل 5- بخش پنوماتیکی دستگاه کوبش مکانیکی

بخش کنترلی از یک منبع تغذیه، یک مدار AVR، سنسور نور برای تشخیص پالس لیزر، صفحه نمایش، کلیدهای کنترلی، رله SSR و شیر پنوماتیک الکتریکی تشکیل شده است. سنسور تشخیص پالس لیزر از طریق ورودی آنالوگ مدار AVR، وقوع پالس لیزر را به مدار اطلاع می‌دهد. مدار با اعمال تاخیر زمانی بعد از پالس لیزر که قابل تنظیم است از طریق خروجی دیجیتال به رله SSR دستور وصل جریان برق 220 V شیر پنوماتیکی را صادر می‌کند. زمان باز بودن شیر پنوماتیکی نیز قابل تنظیم است. شکل (6) مدار الکترونیکی و شیر پنوماتیک الکتریکی مربوطه را نشان می‌دهد. برنامه نویسی مدار مربوطه در محیط ARDUINO انجام شد. بخش مکانیکی دستگاه کوبش، چابکی کافی جهت شروع حرکت و رسیدن سنبه به سطح قطعه کار در زمان‌های بسیار کم را نخواهد داشت. در نتیجه برای رفع این مشکل پالس قبلی مبنای کار قرار می‌گرفت. بدین صورت که سنسور مربوطه، پالس n را تشخیص می‌دهد و محاسبات به گونه ای انجام می‌شود که با اعمال زمان تاخیر مناسب در لحظه اعمال پالس n+1 سنبه به نزدیک قطعه کار رسیده باشد. در این لحظه پس از اعمال پالس با فاصله بسیار اندکی کوبش انجام خواهد شد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل 6- الف) بخش کنترلی دستگاه کوبش مکانیکی و ب) شیر پنوماتیک الکتریکی

3- مواد و روش تحقیق

ورقی از جنس آلیاژ آلومینیوم 6061-O با ترکیب شیمیایی جدول (1) به ضخامت 0/8 mm به وسیله لیزر پالسی Nd:YAG به صورت Bead on Plate مورد جوشکاری قرار گرفت. شکل پالس لیزر به صورت مربعی بود. قطر اشعه در ناحیه تمرکز برای کلیه نمونه‌ها 0/5 mm است. پس از اعمال هر پالس لیزر یک ضربه به وسیله سنبه‌ای به قطر یک میلی متر روی سطح جوش ایجاد شده اعمال می‌شود. متغیر اساسی کوبش در این مرحله زمان کوبش پس از اعمال پالس لیزر و فشار کوبش است. در شکل (7) توالی لیزر و کوبش نشان داده شده است. در شکل (8) چگونگی حرکت نمونه و انجام کوبش مکانیکی روی قید و بند مربوطه نشان داده شده است. متغیرهای جوشکاری در جدول (2) ذکر شده‌اند.

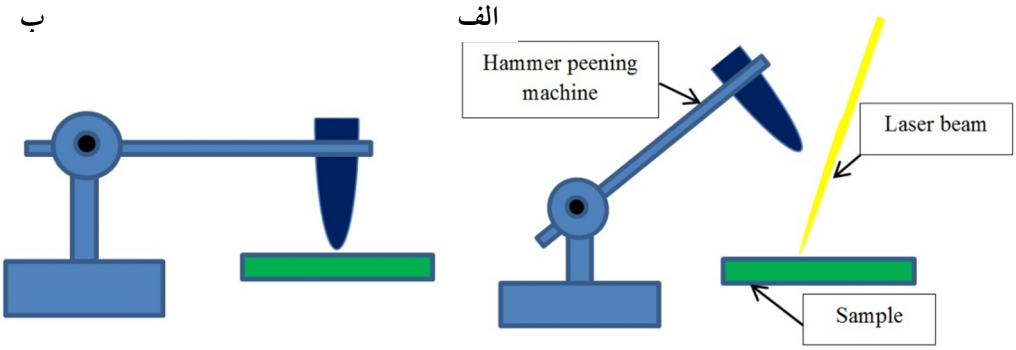
در این جدول نمونه‌های کوبش هم‌زمان شده با حرف P مشخص شده‌اند که در آن عدد سمت چپ فشار کوبش و عدد سمت راست زمان تاخیر را نشان می‌دهد. ریزساختار و ایجاد ترک‌های گرم به وسیله میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. محلول مورد استفاده برای حکاکی کلر می‌باشد

سختی سنجی موضع جوش و ناحیه متاثر از حرارت توسط دستگاه سختی سنجی میکرو ویکرز با بار 25 gr و زمان 15 ثانیه و بر اساس استاندارد ASTM E92 انجام شده است. شکل (9) محل ریزسختی سنجی را نشان می‌دهد.

جهت تعیین استحکام کششی، آزمایش کشش روی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM E8 انجام شد. ابعاد نمونه آزمون کشش بر اساس نمونه اندازه کوچک انتخاب شد. شکل (10)

جدول1- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 6061

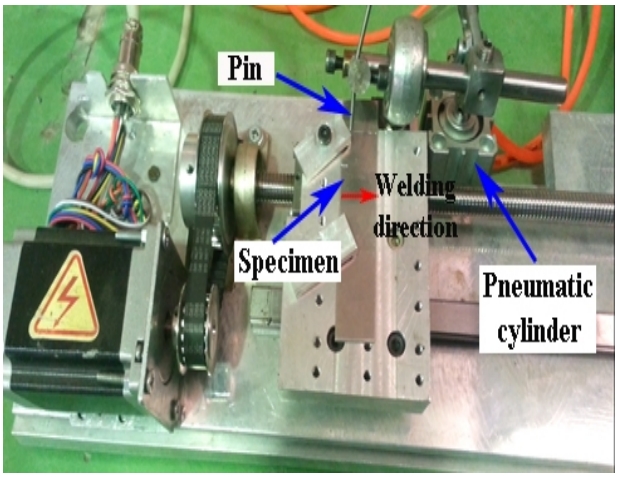
Al Wt. %	Mg Wt. %	Si Wt. %	Cu Wt. %	Zn Wt. %	Mn Wt. %	Cr Wt. %	Fe Wt. %	Ti Wt. %	Ni Wt. %
Balance	0.91	0.69	0.22	0.06	0.05	0.16	0.43	0.05	0.01



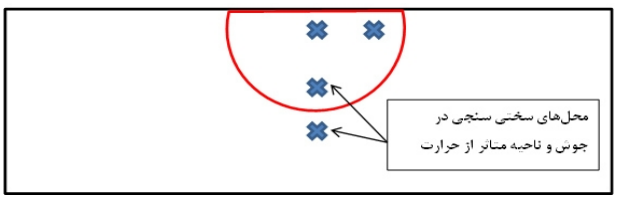
شکل7- توالی لیزر و کوبش. الف) پرتو لیزر به سطح قطعه کار تابانده شده است و ب) کوبش در ناحیه اعمال پرتو لیزر انجام شده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

ابعاد نمونه‌های کشش و محل استخراج آن‌ها از نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد. برشکاری نمونه‌ها به وسیله دستگاه وایرکات انجام شد. آزمون کشش با سرعت 1 mm/min انجام شد. جهت همگن سازی استحکام جوش با فلز پایه قبل از انجام آزمون کشش عملیات حرارتی انحلال‌سازی و پیرسازی طبق استاندارد ASTM B918-09 انجام شد. برای حل کردن عناصر در زمینه آلومینیومی فرآیند محلول سازی در دمای 530 ˚C به مدت 35 min انجام شد. بلافاصله پس از اتمام فرایند محلول سازی، نمونه‌ها در آب با دمای محیط، کوئنچ شدند. نمونه‌ها به مدت 18 hr در دمای 160 ˚C قرار گرفتند. عملیات حرارتی پیرسازی باعث رسوب ذرات Mg_2Si در زمینه آلومینیومی می‌شود.



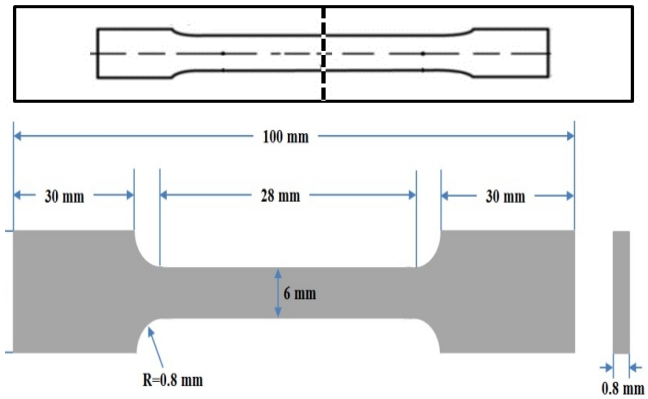
شکل8- چگونگی حرکت نمونه و انجام کوبش مکانیکی



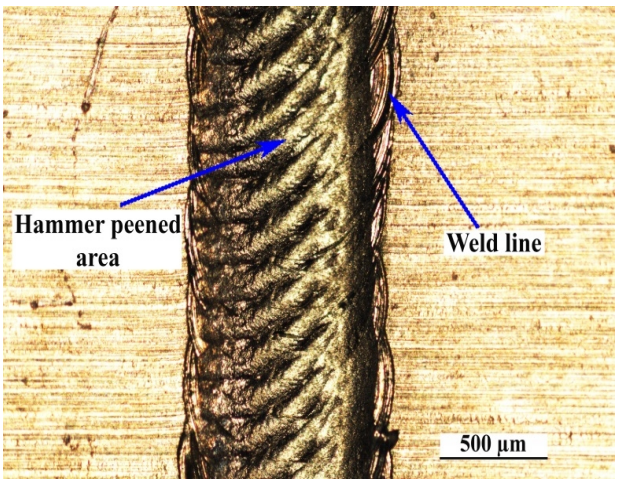
شکل9- محل ریز سختی سنجی از نقاط مختلف جوش

4- نتایج و بحث

در شکل (11)، تصویری از سطح بالای خط جوش لیزر پالسی هماهنگ شده با کوبش مکانیکی نشان داده شده است. با توجه به تغییر شکل پلاستیک سطح جوش، علایم جوشکاری پالسی از بین رفته‌اند. بنابراین، بررسی‌های مربوطه در مقطع جوش انجام خواهد شد.



شکل10- ابعاد و چگونگی برش نمونه کشش



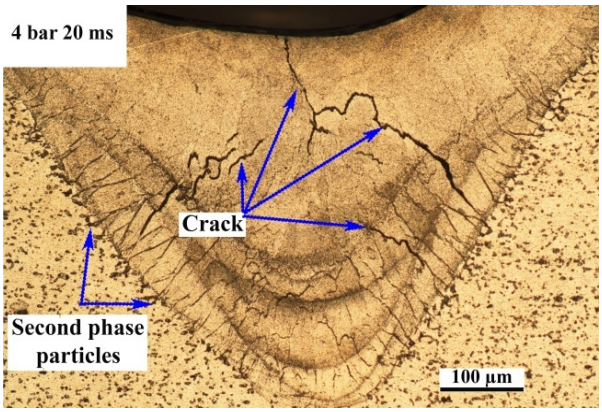
شکل 11- سطح بالایی نمونه جوشکاری شده با کوبش مکانیکی هم زمان

در شکل (12)، تصاویر مقطع نمونه 4P20 نشان داده شده است. در این نمونه کوبش مکانیکی در کوتاه‌ترین زمان پس از اعمال هر پالس لیزر انجام شد. شواهدی از ایجاد ترک‌های درون جوش به لبه‌های حوضچه جوش قابل مشاهده است. ترک‌ها بین دانه‌ای و در امتداد مرزهای دانه قرار دارند. کوبش مکانیکی باعث شده است که ترک‌های گرم وارد ناحیه متاثر از حرارت نشوند. تنش فشاری ایجاد شده در اثر کوبش مکانیکی و تنش‌های پسماند فشاری ناشی از کوبش پالس‌های قبلی، دانه‌های ناحیه متاثر از حرارت را به یکدیگر فشار می‌دهد و قسمت‌های ذوب شده از مرزهای دانه در مناطق نزدیک خط جوش ناپدید می‌شوند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول 2- متغیرهای جوشکاری لیزر پالسی

شماره نمونه	فشار کوبش (Bar)	زمان تاخیر بعد از اعمال پالس (ms)	انرژی پالس (J)	سرعت جوشکاری (mm/s)	بسامد (Hz)	پهنای زمانی پالس (ms)	قطر پرتو در ناحیه تمرکز (mm)
4P20	4	20	5.9	0.125	1	10	0.5
4P150	4	150	5.9	0.125	1	10	0.5
4P300	4	300	5.9	0.125	1	10	0.5
5P20	5	20	5.9	0.125	1	10	0.5
5P150	5	150	5.9	0.125	1	10	0.5
5P300	5	300	5.9	0.125	1	10	0.5
6P20	6	20	5.9	0.125	1	10	0.5
6P150	6	150	5.9	0.125	1	10	0.5
6P300	6	300	5.9	0.125	1	10	0.5



شکل12- سطح مقطع نمونه 4P20

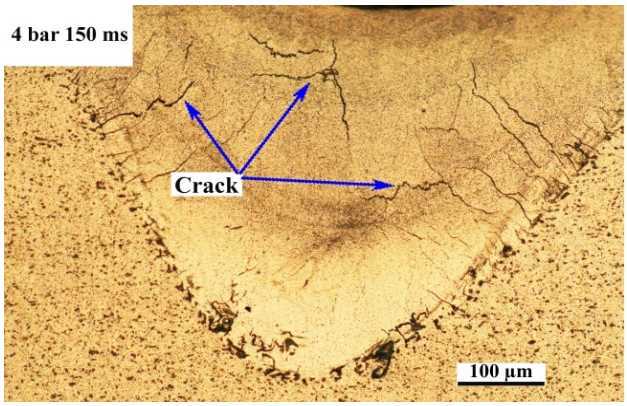
با استفاده از کوبش مکانیکی، تنش‌های کششی جوش تا حد زیادی حذف می‌شود. کوبش مکانیکی باعث می‌شود که ماده توسط تغییر شکل پلاستیک فشرده، تنش‌های کششی ناشی از جوشکاری آزاد و تنش‌های پسماند فشاری در آن ایجاد شود [4و22-24]. کوبش مکانیکی رژیم تنش در خط جوش را تغییر می‌دهد. در نتیجه ترک‌های طولی که ممکن است در جوش‌های لیزر پالسی ایجاد شوند، حذف می‌گردد و تنش فشاری موجود در ناحیه متاثر از حرارت باعث توقف ترک در لبه حوضچه جوش می‌شود. در منابع اشاره شده است یکی از راه‌های کاهش ترک‌های گرم نورد خط جوش بلافاصله بعد از عبور مشعل جوشکاری است. با این روش تنش‌های جوش کاهش پیدا می‌کند و مانع از ایجاد ترک گرم می‌شود [25]. در روش کوبش مکانیکی همزمان با لیزر پالسی نیز به وسیله کاهش تنش‌های جوش از ایجاد ترک طولی جلوگیری می‌شود. شکل (13) تصاویر سطح مقطع نمونه 4P150 را نشان می‌دهد.

در این نمونه، زمان کوبش مکانیکی 150 ms پس از تاباندن پالس لیزر است. در این نمونه زمان اعمال کوبش مکانیکی نسبت به نمونه 4P20 افزایش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طول ترک در این نمونه کاهش یافته است. ترک‌ها در بالای حوضچه جوش و ناحیه متاثر از حرارت وجود ندارد و به لبه‌های جانبی حوضچه جوش محدود شده‌اند. نکته جالب در مورد این ترک‌ها عمق بسیار کم آن‌هاست. این ترک‌ها در طول خط جوش سرتاسری نیستند و بعد از کمی سنباده زنی و پولیش محو می‌شوند. شکل(14) سطح مقطع نمونه 4P300 را نشان می‌دهد. زمان کوبش مکانیکی در این نمونه حدود 300 ms پس از اعمال پالس لیزر است. در این نمونه هیچ ترکی دیده نمی‌شود. افزایش زمان تاخیر پس از اعمال پالس لیزر باعث کاهش تعداد ترک‌ها می‌شود. مرزهای دانه در لحظات اولیه پس از انجماد بسیار ضعیف هستند. بنابراین نیروهای خمشی حاصل از کوبش مکانیکی به راحتی آن‌ها را می‌شکنند. همان‌طور که در شکل (15) نشان داده شده است اگرچه کوبش مکانیکی باعث کاهش تنش‌های کششی ناشی از جوش می‌شود، اما به دلیل شکل مخروطی حوضچه جوش، نیروهای خمشی در بالای جوش در اثر کوبش مکانیکی به وجود می‌آیند.

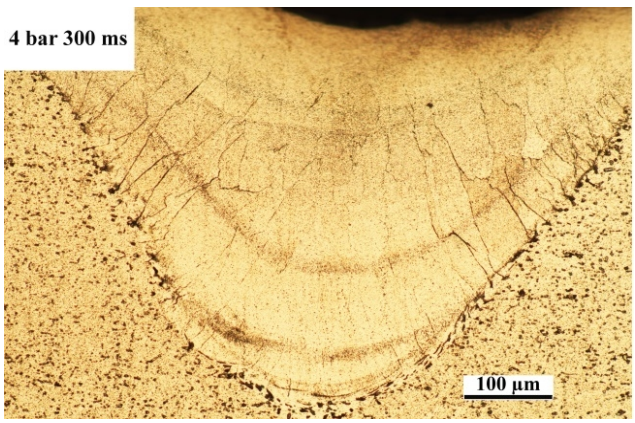
در شکل (16)، تصاویر نمونه‌های کوبش شده در فشار 6 bar در هر دو حالت پولیش شده و حکاکی شده نشان داده شده‌اند. در هیچ کدام از زمان‌های کوبش مکانیکی هیچ ترکی در جوش وجود ندارد. حتی در زمان کوبش مکانیکی 20 ms بعد از پالس لیزر هیچ ترکی مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

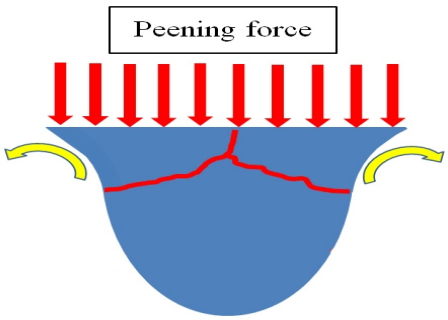
این خطوط تنها در اثر حکاکی ایجاد شده‌اند و هیچ عمقی ندارند. همچنین روی خطوط مشکوک به ترک سختی سنجی انجام شد. همان‌طور که مشخص است ترک مقاومت چندانی در برابر نفوذ سنبه سختی سنجی ندارد و زیر یک فضای تو خالی است؛ در نتیجه در صورت سختی سنجی مقدار سختی افت پیدا می‌کند و نقطه اثر سنبه بزرگ‌تر می‌شود.



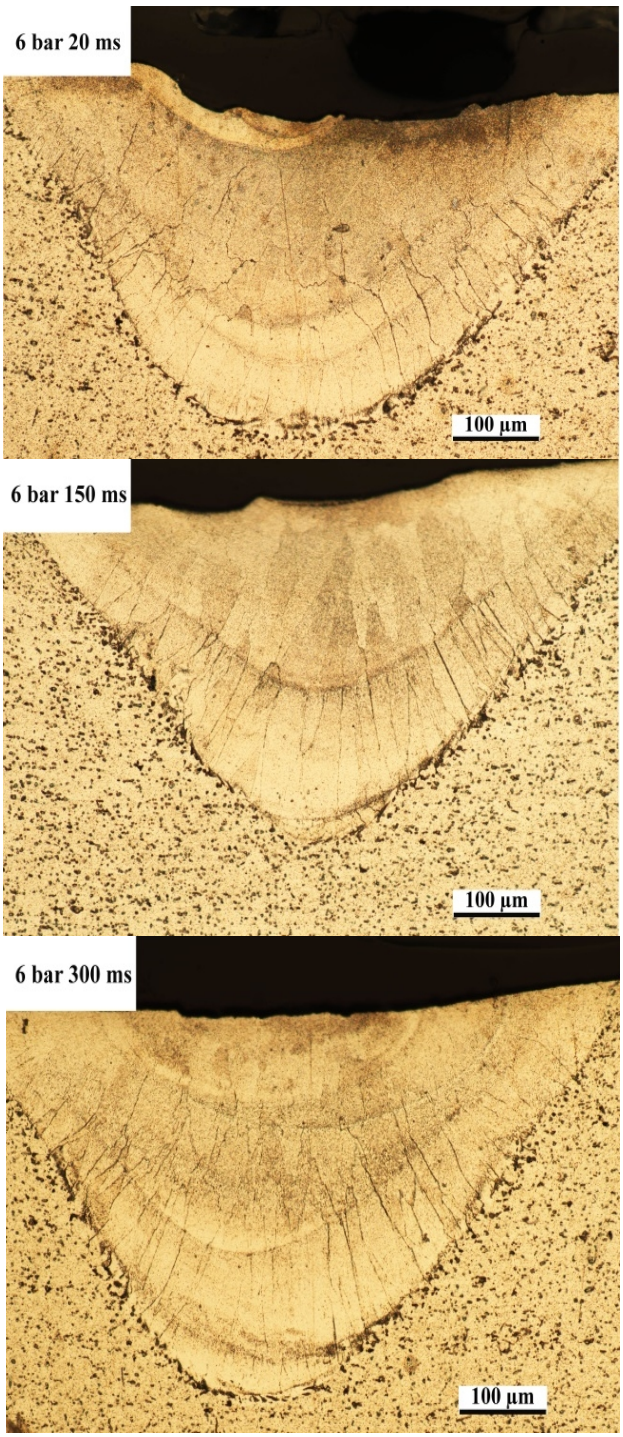
شکل13- سطح مقطع نمونه 4P150. ترک‌ها نسبت به نمونه 4P20 کمتر هستند.



شکل 14- سطح مقطع نمونه 4P300. با افزایش زمان ترک‌های گرم حذف شده‌اند.



شکل 15- تصویر شماتیک از نیروهای خمشی ناشی از کوبش مکانیکی

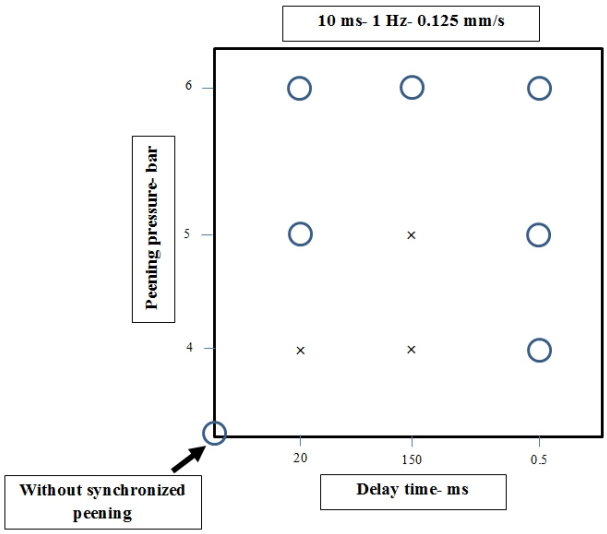


شکل16- سطح مقطع نمونه‌های کوبش شده در فشار 6 bar زمان های 20 ms ، 150 ms و 300 ms بعد از اعمال پالس. کوبش در فشار 6 bar باعث حذف کامل ترک ها شده است.

در شکل(17) تاثیر کوبش هم‌زمان مکانیکی بر ایجاد ترک‌های جوش در نمونه‌های مورد آزمایش نشان داده شده است. کلیه نمونه‌ها در متغیرهای جوشکاری لیزر یکسان جوشکاری

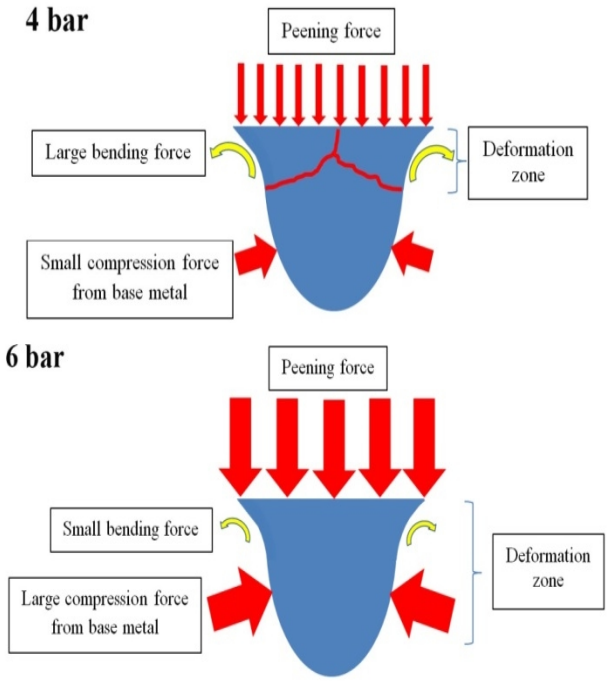
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

شده‌اند. محور عمودی این نمودار فشار کوبش و محور افقی زمان تاخیر انجام کوبش بعد از تابش لیزر را نشان می‌دهد. در این نمودار نمونه‌های دارای ترک با علامت ضربدر (×) و نمونه‌های بدون ترک با علامت دایره تو خالی نشان داده شده‌اند. در فشارهای کوبش و زمان پایین در نمونه‌های جوشکاری ترک ایجاد می‌شود. با افزایش فشار و زمان تاخیر ترک مجددا حذف خواهد شد. لازم به ذکر است در شرایط بدون کوبش هم‌زمان با متغیرهای جوشکاری یکسان نمونه مورد نظر بدون ترک خواهد بود.



شکل 17- تاثیر کوبش هم زمان بر ایجاد ترک. کلیه نمونه‌ها در متغیرهای جوشکاری لیزر یکسان جوشکاری شده‌اند. محور عمودی این نمودار فشار کوبش و محور افقی زمان تاخیر انجام کوبش بعد از تابش لیزر را نشان می‌دهد. در فشارها و زمان های تاخیر پایین در نمونه ها ترک ایجاد خواهد شد. با افزایش فشار به bar 6 مجددا ترک ها حذف خواهند شد.

دلیل ایجاد ترک در نمونه‌هایی که در فشار bar 4 کوبش شده‌اند، در شکل (18) نشان داده شده است. فشار اعمالی روی سطح با استفاده از کوبش مکانیکی، موجب تغییر شکل بیشتر قسمت‌های بالایی جوش در مقایسه با قسمت‌های پایین‌تر آن می‌شود. با توجه به هندسه جوش که مخروطی است نیروهای خمشی به قسمت‌های بالای حوضچه جوش اعمال می‌شوند. این نیروهای خمشی سبب شکسته شدن مرزدانه‌های تازه انجماد یافته می‌شوند. با افزایش زمان کوبش پس از پالس لیزر، ترک‌ها کاهش می‌یابند. دلیل این امر افزایش استحکام مرزدانه‌ها در اثر گذشت زمان است. با افزایش فشار کوبش احتمال شکسته شدن مرزدانه‌ها در زمان‌های اولیه پس از انجماد کاهش پیدا می‌کند. در اثر افزایش عمق تغییر شکل ماده، نیروهای خمشی کوچکتری به قسمت‌های بالای حوضچه جوش اعمال می‌شود. بنابراین، جوش مخروطی شکل به داخل فلز پایه نفوذ می‌کند و در نتیجه تنش‌های فشاری از طرف فلز پایه به حوضچه جوش اعمال می‌شود.



شکل18- شماتیکی که علت ترک خوردن نمونه های کوبش شده در فشار 4 bar را نشان می دهد. نیروهای خمشی در نمونه های کوبش شده در فشار 6 bar در مقایسه با نیروهای فشاری وارد آمده به حوضچه جوش ناچیز هستند.

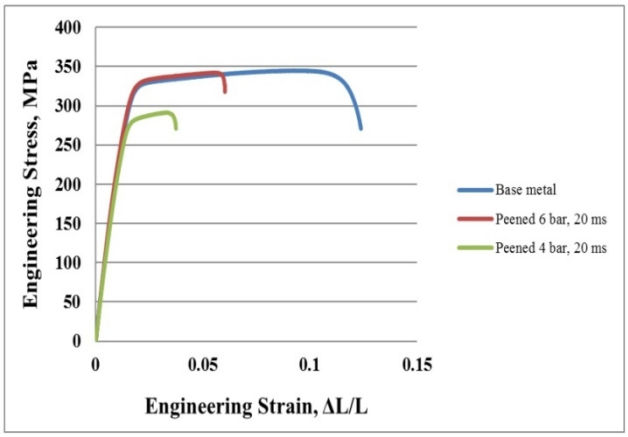
ریزسختی جوش کوبش نشده 77 HV است. مقادیر ریزسختی جوش، HAZ و فلز پایه نمونه کوبش شده در فشار 4 bar، به ترتیب 83 HV، 54 HV و 41 HV است. ریزسختی فلز جوش بالاتر از ناحیه متاثر از حرارت و فلز پایه است. از آن‌جایی که ناحیه متاثر از حرارت تحت کار مکانیکی قرار می‌گیرد و کار سخت شده است، سختی آن نسبت به فلز پایه بالاتر است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

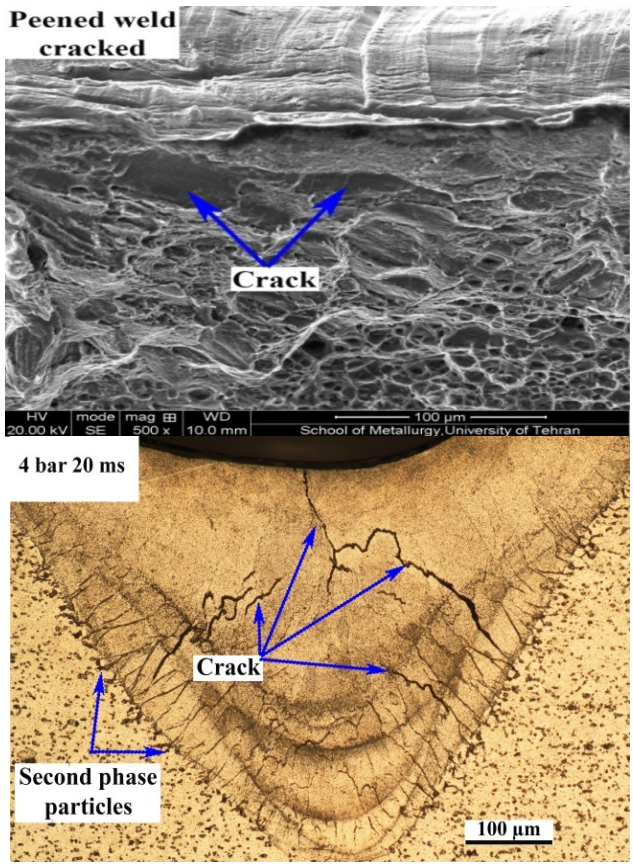
همچنین، از آن‌جایی که ریزسختی جوش بیشتر از فلز پایه است، در هنگام انجام کوبش مکانیکی تغییر شکل شدید در نزدیکی مرز جوش و فلز پایه رخ داده است. این تغییر شکل موجب شده است که ذرات فاز ثانویه به یکدیگر نزدیک شوند و در کنار مرز جوش انباشته شوند. لازم به ذکر است که آزمون ریزسختی‌سنجی بر روی تمام مناطق مشکوک به ترک انجام شده است. در تمام ترک‌های عمیق، سختی نسبت به جاهای دیگر جوش بسیار پایین‌تر بود، زیرا فضای خالی در داخل ترک نمی‌تواند در برابر نفوذ سنبه سختی سنجی مقاومت کند.

همان‌طور که می‌دانیم نمونه آزمون کشش از ضعیف‌ترین قسمت می‌شکند. حضور هر نوع ترک باعث می‌شود که نمونه از محل جوش بشکند. در نتیجه آزمون کشش برای بررسی وجود ترک در تمام خط جوش انجام شد. اما نتایج اندازه گیری ریزسختی نشان داد که سختی جوش بیشتر از فلز پایه است. برای همگن سازی استحکام کل نمونه، قبل از انجام آزمون کشش نمونه‌های مربوطه تحت عملیات حرارتی پیرسازی (T6) قرار گرفتند.

شکل (19) نتایج آزمون کشش را نشان می‌دهد. استحکام کششی فلز جوش بدون ترک، مشابه با فلز پایه است، اما درصد ازدیاد طول آن کمتر از فلز پایه است. فلز پایه شامل یک ساختار کار شده با دانه‌های هم‌محور ریز است. بنابراین، درصد ازدیاد طول آن بیشتر از فلز جوش با ساختار انجمادی است [28-26]. با این حال، با توجه به این‌که مکانیزم استحکام دهی در آلیاژهای Al-Mg-Si پیرسختی است، اگر در جوش عیوبی مانند ترک وجود نداشته باشد، می‌توان انتظار داشت که استحکام فلز جوش مشابه با فلز پایه باشد. ذکر این نکته ضروری است که جوش نفوذ کامل ندارد و بنابراین این نتایج برای فلز جوش قابل ارائه نیست. در این مطالعه، این نتایج فقط برای مقایسه کیفی و اطمینان از عدم وجود عیوب در ساختار آورده شده است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش در شکل (20) نشان داده شده است. ترک‌های موجود در سطح شکست با ترک‌های موجود در نمونه‌های متالوگرافی قابل مقایسه است. هر دوی این ترک‌ها نسبت به خط جوش مورب هستند. این ترک‌ها باعث کاهش استحکام و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کشش شده‌اند.



شکل 19- نتایج آزمون کشش. نمونه کوبش شده در فشار 4 bar دارای استحکام کمتر از نمونه کوبش شده در فشار 6 bar است. درصد ازدیاد طول نمونه های کوبش شده کمتر از فلز پایه است.



شکل 20- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های کشش. جهت گیری ترک ها در سطح مقطع نمونه متالوگرافی شده و نمونه کشش قابل مقایسه است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

5- نتیجه گیری

منقطع بودن تابش پرتو لیزر در لیزرهای پالسی فرصتی ایجاد می‌کند که بتوان در فاصله دو پالس متوالی کار مکانیکی رو مهره جوش اعمال کرد. بر این اساس نتایج زیر قابل ارائه است:

- در زمان‌های کوتاه بعد از تابیدن پرتو لیزر استحکام فلز منجمد شده پایین است و در نتیجه در اثر کوبش مکانیکی در فلز جوش ترک‌هایی ایجاد می‌شود.

- با افزایش فشار کوبش به دلیل تغییر رژیم تنش‌های خمشی، شکست فلز جوش حتی در زمان‌های اندک بعد از تابش پرتو لیزر اتفاق نمی‌افتد.

- سختی فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت در اثر کوبش مکانیکی بالا می‌رود. دلیل این امر کار سختی نواحی کوبش شده است.

- در سطح شکست نمونه‌های کشش دارای ترک، نشانه‌هایی از ترک‌های مورب که در سطح مقطع نمونه‌های متالوگرافی نیز قابل مشاهده هستند، وجود دارد. این ترک‌ها عامل اصلی کاهش استحکام و درصد ازدیاد طول نسبت به فلز پایه هستند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از آقای دکتر ویتزندورف به خاطر راهنمایی‌هایشان و از آزمایشگاه متالوگرافی دانشکده متالورژی و مواد دانشگاه تهران و شرکت پرتو پردازش مواد تهران به خاطر همکاری صمیمانه‌شان تشکر کنند.

منابع

[1] J. Liu, W. X. Gou, W. Liu, and Z. F. Yue, "Effect of hammer peening on fatigue life of aluminum alloy 2A12-T4," Materials & Design, vol. 30, no. 6, pp. 1944-1949, 2009/06/01/ 2009.

[2] S.-H. Han, J. W. Han, Y. Y. Nam, and I. Cho, "Fatigue life improvement for cruciform welded joint by mechanical surface treatment using hammer peening and ultrasonic nanocrystal surface modification," Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, vol. 32, no. 7, pp. 573-579, 2009.

[3] K. Takahashi, H. Osedo ,T. Suzuki, and S. Fukuda, "Fatigue strength improvement of an aluminum alloy with a crack-like surface defect using shot peening and cavitation peening," Engineering Fracture Mechanics, vol. 193, pp. 151-161, 2018/04/15/ 2018.

[4] B. Dhakal and S. Swaroop, "Review: Laser shock peening as post welding treatment technique," Journal of Manufacturing Processes, vol. 32, pp. 721-733, 2018/04/01/ 2018.

[5] R. Mannens, D. Trauth, P. Mattfeld, and F. Klocke, "Influence of Impact Force, Impact Angle, and Stroke Length in Machine Hammer Peening on the Surface Integrity of the Stainless Steel X3CrNiMo13-4," Procedia CIRP, vol. 71, pp. 166-171, 2018/01/01/ 2018.

[6] R.R. Ambriz, G. Mesmacque, A. Ruiz, A. Amrouche, and V.H. López, "Effect of the welding profile generated by the modified indirect electric arc technique on the fatigue behavior of 6061-T6 aluminum alloy," Materials Science and Engineering A, vol. 527, 2010.

[7] A. M. Handbook, Welding Brazing and Soldering. USA: ASM International, 1992.

[8] A. W. Society, "Structural Welding Code Aluminum," ed: AWS Structural Welding Comittee, 1997.

[9] R. S. Florea, K. N. Solanki, D. J. Bammann, J. C. Baird, J. B. Jordon, and M. P. Castanier, "Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation ",Materials and Design, vol. 34, 2012.

[10] K. C. Viveros, R. R. Ambriz, A. Amrouche, A. Talha, C. Garc´ıa, and D. Jaramillo, "Cold hole expansion effect on the fatigue crack growth in welds of a 6061-T6 aluminum alloy," Journal of Materials Processing Technology, 2014.

[11] A.B.M. Mujibur Rahman, S. Kumar, and A.R. Gerson, "Galvanic corrosion of laser weldments of AA6061 aluminium alloy," Corrosion Science, vol. 49, 2007.

[12] D. Q. Zhang, J. Li, H. G. Joo, and K. Y. Lee, "Corrosion properties of Nd:YAG laser–GMA hybrid welded AA6061 Al alloy and its microstructure," Corrosion Science, vol. 51, 2009.

[13] A.B.M. M. Rahman, S. Kumar, and A. R. Gerson, "The role of silicon in the corrosion of AA6061 aluminium alloy laser weldments," Corrosion Science, vol.٢٠١٠ ,٥٢ .

[14] D. Y. KIM and Y. W. PARK, "Weldability evaluation and tensile strength estimation model for aluminum alloy lap joint welding using hybrid system with laser and scanner head," Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 22, 2012.

[15] A. Schneider, V. Avilov, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, "Laser beam welding of aluminum alloys under the influence of an electromagnetic field," Physics Procedia, vol. 41, 2013.

[16] J. P. Bergmann, M. Bielenin, M. Stambke, T. Feustel, P. v. Witzendorff, and J. Hermsdorf, "Effects of diode laser superposition on pulsed laser welding of aluminum," Physics Procedia, vol. 41, 2013.

[17] H. Yamamoto, S. Harada, T. Ueyama, and S. Ogawa, "Study of low-frequency pulsed MIG welding," Welding International ,vol. 7, no. 1, pp. 21-26, 1993/01/01 1993.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

stir welded 6061 aluminum alloy joints ",Materials Characterization, vol. 126, pp. 64-73, 2017/04/01/ 2017.
[23] V. Schulze, F. Bleicher, P. Groche, Y. B. Guo, and Y. S. Pyun, "Surface modification by machine hammer peening and burnishing," CIRP Annals, vol. 65, no. 2, pp. 809-832, 2016/01/01/۲۰۱٦ /.
[24] L. Suominen, M. Khurshid, and J. Parantainen, "Residual Stresses in Welded Components Following Post-weld Treatment Methods," Procedia Engineering, vol. 66, pp. 181-191, 2013/01/01/ 2013.
[25] Y. P. Yang, P. Dong, X. Tian, and Z. Zhang, Prevention of Welding Hot Cracking of High Strength Aluminum Alloys by Mechanical Rolling. 1998, pp. 700-705.
[26] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd ed. ed. New York: Mc Graw-Hill Book Co., 1986, p. 751.
[27] H. Zhu, F. Qin, and H. Chen, "Effect of ultrasonic temperature and output power on microstructure and mechanical properties of as-cast 6063 aluminum alloy," Journal of Alloys and Compounds, 2018/10/25/ 2018.
[28] S. Chen, X. Li, X. Jiang, T. Yuan, and Y. Hu, "The effect of microstructure on the mechanical properties of friction stir welded 5A06 Al Alloy," Materials Science and Engineering: A, vol. 735, pp. 382-393, 2018/09/26/ 2018.
[18] P. von Witzendorff, S. Kaierle, O. Suttmann, and L. Overmeyer, "Monitoring of solidification crack propagation mechanism in pulsed laser welding of 6082 aluminum," in SPIE LASE, 2016, pp. 97410H-97410H-14 :International Society for Optics and Photonics.
[19] M. Sheikhi, F. Malek Ghaini, and H. Assadi, "Solidification crack initiation and propagation in pulsed laser welding of wrought heat treatable aluminium alloy," Science and Technology of Welding and Joining, vol. 19, no. 3, pp. 250-255, 2014/04/01 2014.
[20] C. A. Biffi, J. Fiocchi, P. Bassani, and A. Tuissi, "Continuous wave vs pulsed wave laser emission in selective laser melting of AlSi10Mg parts with industrial optimized process parameters: Microstructure and mechanical behaviour," Additive Manufacturing, vol. 24, pp. 639-646, 2018/12/01/ 2018.
[21] G. A. Moraitis and G. N. Labeas, "Residual stress and distortion calculation of laser beam welding for aluminum lap joints," Journal of Materials Processing Technology, vol. 198, no. 1, pp. 260-269, 2008/03/03/ 2008.
[22] M. A. Abdulstaar, K. J. Al-Fadhalah, and L. Wagner, "Microstructural variation through weld thickness and mechanical properties of peened friction

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]