ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

مطالعه نظرى و تجربي فرآيند ليزركوبي آلياژ آلومينيم T6 -6061

آرمان سليميان¹، احسان فروزمهر^{2*}، محسن بدرسمای

1- كارشناسىارشد، مهندسى مكانيك، دانشگاه صنعتى اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی eforoozmehr@cc.iut.ac.ir،8415683111

چکیدہ	اطلاعات مقاله
ایجاد تنش پسماند فشاری یکی از راههای بهبود عمر خستگی قطعات فلزی است. روشهای متعدد و گوناگونی برای ایجاد این تنش پسمان فشاری وجود دارد، روشهایی مانند ساچمه کوبی و یا نوردکاری عمیق. یکی از جدیدترین و پیشرفتهترین روشهای ایجاد تنش پسماند فشاری در قطعات صنعتی لیزرکوبی است. فرآیند لیزر کوبی، فرآیند جدید و به نسبت پیچیدهای است؛ بنابراین لازم است تا آزمایشها متعددی روی آر	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 18 بهمن 1393 پذیرش: 23 فروردین 1394 ارائه در سایت: 03 خرداد 1394
انجام شده تا فرآیند بهتر شناخته شود. بدینمنظور در این پژوهش از یک لیزر ان دی یاگ با انرژی پالس لا1200m استفاده شده تا فرآیند لیز	کلید واژگان:
کوبی بهصورت تجربی روی آلیاژ آلومینیم T6 -606۱ انجام شود. تأثیر فرآیند بر سختی در عمق قطعه، ریزساختار و زبری سطح مورد ارزیام تباری	لیزر کوبی
فرار گرفت. همچنین برای مطالعه اثر فرایند بر شکاف روی سطح نیز یک سطح شکاف از فراوری شده و نتایج ان ارزیابی کردید. نتایج نشار دادند که فرآیند لیزر کوبی میتواند سختی ماده را تا عمق 1000 میکرون زیر سطح افزایش دهد. همچنین نتایج نشان داد که این فرآیند میتوان	لیزر آن دی یا د تنش پسماند فشاری نیری سطح
زبری سطح را کمی افزایش دهد که این افزایش با انتخاب پارامترهای مناسب میتواند محدود شود. لیزر کوبی یک قطعه دارای شکاف نشان دا که این فرآیند میتواند موجب رشد ترک در انتهای شکاف شود.	ربری سندع سختی ویکرز

Laser Shock Peening of Al 6061- T6 Alloy, **a** theoretical and experimental study

Arman Salimian, Ehsan Foroozmehr*, Mohsen Badrossamay

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran * P.O.B. 8415683111, Isfahan, Iran, eforoozmehr@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 07 February 2015 Accepted 12 April 2015 Available Online 24 May 2015	Inducing compressive residual stress is one of the methods of improving fatigue life in metallic components. There are numerous and varied methods for inducing compressive residual stress, such as shot peening and deep rolling. One of the most recent and most advanced methods for inducing compressive residual stress in industrial components is Laser Shock Peening (LSP). LSP
Keywords: Laser Shock Peening Nd: YAG Laser Compressive Residual Stress Surface Roughness and Vickers Hardness	is a relatively new and complex process, therefore, vast experimental investigations are needed to better understand the process. For this purpose in the present work, an Nd: YAG Laser with 1200mJ of energy per pulse was used to investigate the LSP process experimentally on AI 6061-T6 alloy. The effect of process on the hardness beneath the surface, the microstructure, and the surface roughness was studied. In addition, in order to investigate the effect of the LSP process on a notch, a notched sample was treated using the LSP process. The results showed that the process could increase the hardness of the material up to 1000µm below the surface. Furthermore, results also showed that the surface roughness would slightly increase, but this increase could be limited by properly selecting the process parameters. The LSP process of the notched sample indicated that this process could lead to the growth of cracks in such samples.

1- مقدمه

ایجادشده، تخریب کیفیت سطح قطعات و محدودیت در دسترسی به نقاط خاص قطعات و عمق تنش پسماند کم و در حدود mm 20/25کاربرد آن را محدود کرده است [1]. فرآیند دیگری که برای ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعات فلزی استفاده میشود فرآیند لیزرکوبی¹ است که اثری مشابه فرآیند ساچمه کوبی دارد، با این تفاوت که تنش پسماند ایجادشده با آن عمیقتر و دامنه تنش پسماند آن بیشتر است. علاوهبر آن، تأثیر کمی بر

بهبود عمر قطعات فلزی یکی از مهم ترین چالشهای صنعتی است که مهندسان مکانیک با آن روبهرو هستند. یکی از مهم ترین روشهای بهبود عمر قطعات صنعتی ایجاد تنش پسماند فشاری بر سطح قطعات فلزی است. برای رسیدن به این منظور، روشهای گوناگونی وجود دارد که از جمله مهم ترین این روشها، روش ساچمه کوبی است. این روش اگرچه روش بسیار متداول و پرکاربردی است، ولی مشکلات و معایبی چون نایکنواختی تنش پسماند

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-30]



¹⁻ Laser Shock Peening (LSP)

كيفيت سطح نهايي قطعات داشته [1] و ايجاد تنش پسماند توسط آن محدود به نواحی خاص قطعات و یا هندسههای خاص نیست. فرآیند ليزركوبي موجب افزايش 48٪ عمر خستگي در تيتانيوم [2] افزايش 28٪ عمر خستگی در آلومینیم ۲۵ -6061 [3] و افزایش66درصد عمر خستگی در فولاد فنر [4] می شود. بهبود رفتار سایشی سطوح [5]، ریز شدن دانهبندی [6] و همچنین بهبود خواص مکانیکی قطعات مانند افزایش تنش تسلیم و سختی [7] از دیگر اثرات فرآیند محسوب می شوند. کاربر اصلی فرآیند لیزر کوبی صنایع هوافضا بهویژه موتورهای جت و پره توربین و کمپرسور این موتورها هستند [8] که برای بهبود عمر خستگی و مقابله با خطر تخریب ناشی از برخورد اشیا پرنده¹از این فرآیند استفاده می کنند [9].

این فرآیند با انتشار امواج ضربه ناشی از پلاسمای ایجادشده توسط یک لیزر با عرض پالس بسیار کوتاه و انرژی پالس زیاد سبب ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعات فلزی میشود. شماتیک فرآیند لیزرکوبی در شکل 1 نشان دادهشده است. برای انجام فرآیند با استفاده از یک لیزر با طول موج مشخص، سطح قطعات موردنظر با استفاده از یک لایه جاذب طول موج (λ) لیزر مورد استفاده مانند رنگ سیاه تجاری پوشانده می شود. بر این لایه نیز یک لایه شفاف نسبت به طول موج لیزر مورد استفاده (لایه محدودکننده) مانند آب قرار می گیرد. وقتی یک پالس لیزر با عرض پالس بسیار کوتاه (1 تا 100 نانوثانیه) و چگالی توان بیشتر از GW/cm² 1 [9]، بر لایه جاذب تابانده می شود، لایه جاذب تبخیر شده و سپس به حالت پلاسما میرسد. این پلاسما میان سطح قطعه کار و لایه محدود کننده قرار گرفته و فشار آن افزایش یافته و سبب انتشار امواج ضربه در ماده کار می شود. اگر فشار پلاسما از حد تسلیم ضربهای ماده کار² بیشتر باشد، سطح قطعه دچار تغییر شکل پلاستیک شده و تنش پسماند فشاری در آن ایجاد میشود [10]. با تکرار ضربههای لیزر بر یک سطح، و پوشش دادن آن توسط ضربات لیزر می توان روی آن سطح ایجاد یک میدان تنش پسماند فشاری کرد.

با داشتن ضریب پواسون (۷) و تنش تسلیم دینامیکی ماده (σ_y^{dyn}) که یکی از خواص ماده بوده و به صورت تجربی قابل اندازه گیری است، می توان حد تسليم ضربهاي را از رابطه (1) محاسبه كرد [11].

$$\sigma_y^{dyn} = HEL \frac{1-2\nu}{1-\nu} \tag{1}$$

برای محاسبه فشار پلاسمای ایجادشده توسط لیزر در این فرآیند می توان از رابطه (2) یا رابطه فابرو استفاده کرد[10].

$$P(\mathbf{GPa}) = \mathbf{0.01} \sqrt{\frac{\alpha}{\mathbf{2}\alpha + \mathbf{3}} Z I_0}$$
(2)

در رابطه (2)، α ضریبی است که تعیین کننده مقدار انرژی درونی پلاسما نسبت به انرژی گرمایی آن (با فرض پلاسما بهعنوان یک گاز کامل) است. همچنین Z نیز عبارت است از مقاومت ضربه ای ماده کار و Io عبارت است از



¹⁻ Flying Object Damage 2- Hugoniot Elastic Limit (HEL)

چگالی توان لیزر که از رابطه (3) محاسبه میشود.

$$I_0 = \frac{E_p}{w_p A} \tag{3}$$

در رابطه **(3)،** Ep انرژی پالس لیزر، ۷۷p عرض پالس لیزر و A م مقطع پرتو ليزر است.

استفاده از امواج ليزر ايجادشده توسط ليزر براى ايجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعات برای نخستین بار در سال 1960 توسط اسکریون و مورز معرفی شد [12]. این همان روشی بود که با نام فرآیند لیزرکوبی شناخته شد. بعدها آندر هولم در سال 1970 استفاده از یک لایه محدودکننده برای بهبود عملکرد فرآیند و افزایش دامنه تنش پسماند ایجادشده را پیشنهاد داد [13]. در سال 1995 فابرو مدل دقیقی برای محاسبه فشار پلاسمای ناشي از ليزر ارائه داد [10]. اين مدل كه به نام مدل فابرو شناختهشده است كاملترين مدل استفادهشده براى پيشبينى رفتار فرآيند ليزر كوبى است. پس از آن پژوهشهای فراوانی برای بررسی اثر فرآیند روی مواد مختلف ازجمله آلومينيم T6 -6061 انجام شد. گونزالز و همكاران اثر فرآيند ليزركوبي را روی رشد ترک خستگی در آلیاژ آلومینیم T6 -6061 بررسی کردند. آنها نشان دادند که می توان با انرژی پالس ل1/2 و عرض پالس 8 ns و قطر پر تو 1/5 mm در سطح نمونه ها ایجاد تنش پسماند فشاری بادامنه حدود MPa 260 كرد [14]. گومز و همكاران نيز با استفاده ليزر با انرژی ل 1/2، عرض پالس 8 ns و قطر پرتو mm 1/5 سوانستند در سطح نمونههایی از جنس آلومینم T6 -6061 تنش پسماند فشاری بسیار بالای MPa I480 ایجاد کنند. آنها تنش پسماند بهدستآمده از این روش را بسیار بالاتر از تنش پسماند بهدست آمد از هر روش دیگر معرفی کردند [5]. گونزالس و همکاران با استفاده از همان ليزر روى آلومينيمT6 -6061 فرآيند ليزركوبي انجام دادند. آنها به تنش پسماند فشاری MPa در سطح نمونهها رسیدند. عمق تنش پسماند ایجادشده توسط آنها بیشتر از 2mm بود [15]. ساتیاجیث و همكاران آلیاژ آلومینیم۲۵ -6061 را لیزركوبی كرده و سختی ناشی از فرآیند را مطالعه کردند. لیزر مورداستفاده آنها عبارت بود از یک لیزر ان دی یاگ³ با طولموج 1064nm و انرژی پالس 300 میلیژول و عرض پالس 10ns [16]. گنکالپ و همکاران با استفاده از لیزر ان دی یاگ با انرژی mJ و با قطر پرتو 1 و mm 2 آلياژ آلومينيم 6061-T6 را ليزركوبي كردند و توانستند. به تنش پسماند فشاری **186** MPa در سطح برسند و سختی نمونهها را تا عمق 0/9 mm افزايش دهند [17].

پژوهشهای گذشته همگی اثر فرآیند روی تنش پسماند، سختی و همچنین ریزساختار ناشی از این فرآیند را روی آلیاژهای گوناگون مورد مطالعه قرار دادهاند. در این پژوهش، فرآیند لیزرکوبی بهصورت تجربی بر نمونههایی از جنس آلیاژ آلومینیم T6 -6061 که یکی از آلیاژهای پرکاربرد در بدنهها و سازههای هوافضایی است انجامشده. سپس تغییرات سختی نمونهها با استفاده از روش سختی سنجی میکرو ویکرز اندازه گیری شده است. از آنجایی که تاکنون مطالعات جدی و دقیقی روی زبری سطح حاصل از فرآیند با پارامترهای گوناگون انجام نگرفته است، زبری سطح و ناهمواریهای ناشی از فرآیند با استفاده از روش زبری سنجی مورد مطالعه قرارگرفته است. علاوهبر این ها با توجه به تأثیر شدید نواحی مانند شکاف روی بر عمر خستگی لازم است تا تأثیر فرآیند روی این نواحی نیز مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به این که تاکنون این نکته مورد تحقیق قرار نگرفته است تأثیر فرآیند روی یک شکاف بهعنوان یک محیط بسته با هندسهی ویژه بهصورت تجربی

³⁻ Nd: YAG

مطالعه شده است.

2- آزمایشهای تجربی 2-1- فرآیند لیزرکوبی

در این پژوهش نمونهها با ابعاد 6×20×20 میلیمتر از جنس آلومینیم ۲۵ -۵۵۵۱ هستند. سطح این نمونهها پس از برشکاری با استفاده از کاغذ سمباده با دانهبندیهای گوناگون بهطور کامل پرداختشده، در اتانول کاملاً شسته شده و در انتها یک لایه رنگ سیاه تجاری بهصورت افشانهای روی آنها پاشیده شده است تا نقش لایه جاذب را ایفا کند. در شکل 2-الف تصویر نمونهها پس از پرداختکاری و پیش از پاشش رنگ نمایش دادهشده است.

برای انجام فرآیند لیزر کوبی از یک لیزر پالسی حالت جامد از نوع ان دی یاگ با طول موج 1064 استفاده شده است. مشخصات لیزر در جدول 1 آورده شده است. در دستگاه لیزر استفاده شده در این پژوهش پرتو لیزر بهصورت افقی با قطر 10mm از دستگاه خارج میشود که برای انجام فرآیند مناسب نیست. برای انجام فرآیند لازم است تا پرتو بهصورت عمودی به سطح کار تابانده شود. به همین منظور یک طراحی اپتیکی انجام شده تا جهت پرتو را بهصورت عمودی درآورده و قطر آن را کاهش داده و به حدی برساند تا چگالی توان کافی را ایجاد کند. در این طراحی از یک منشور و یک عدسی متمرکزکننده بافاصله کانونی 180mm استفادهشده است، به گونهای که پرتو خارج شده از خروجی دستگاه پس از عبور از منشور بهصورت عمودی تغییر راستا داده و سپس با عبور از عدسی قطر آن کاهش یافته و در فاصله کانونی گفته شده به قطر 1/5mm میرسد که برای انجام فرآیند چگالی توان کافی و مناسب را ایجاد میکند. شماتیک این طراحی اپتیکی در شکل 3 دیده مناسب را ایجاد میکند. شماتیک این طراحی اپتیکی در شکل 3 دیده

با توجه به این که برای رسیدن به فشار پلاسمای کافی لازم است تا انرژی لیزر و عرض پالس آن به گونهای باشند تا چگالی توان ایجاد شده به یک مقدار کمینه مناسب برسد. به زبان دیگر میتوان گفت باید انرژی پالس بیشترین مقدار ممکن انتخاب شود تا بتوان برای رسیدن به چگالی توان مورد نیاز از بیشترین قطر پرتو استفاده کرده و در نهایت بتوان با هر ضربه لیزر مساحت بیشتری را فرآوری کرد. در این پژوهش از انرژی پالس mJ **1200** که بیشترین مقدار در دسترس بوده استفاده شده و عرض پالس لیزر نیز ثابت و غیرقابل تغییر بوده است؛ بنابراین چگالی توان بهدست آمده با قطر 1/5 mm برای فرآوری این آلیاژ مناسب بوده است. برای ایجاد حرکت نسبی بین پرتو ليزر و سطح نمونه ها از يک ميز دومحوره دستي استفاده شده که مقدار حرکت هر محور در هر مرحله، با استفاده از دو عدد ساعت اندازه گیری مورد کنترل قرارگرفته است. برای تأمین لایه محدودکننده روی سطح، نمونهها درون یک مخزن آب قرار گرفته به گونهای که ضخامت لایه محدود کننده روی سطح بین یک تا دومیلیمتر بوده. مسیر حرکت پرتو بر نمونهها مطابق شکل 2- ب بوده و هم پوشانی بین ضربات لیزر 20، 30 و 50 درصد درنظر گرفته شده است. آزمایشات ابتدایی نشان داد که همپوشانی بیشتر از 50درصد سبب می شود تا بر اثر برخود ضربات نخستین لیزر روی سطح، لایه جاذب بر سطح کار (لایه

1 مشخصات ليزر استفادهشده	جدول
--------------------------	------

قطر پرتو روی سطح نمونه (mm)	قطر پرتو(mm)	عرض پالس(ns)	انرژی پالس(mJ)
1/5	10	8	1200

بهندسی مکانیک مدرس، مهر 1394، دوره 15، شماره 7

رنگ) از بین رفته و ادامه فرآیند مختل شود. از سوی دیگر نتایج آزمایشات نخستین نشان داد که همپوشانی کمتر از 20درصد نیز قادر به ایجاد تغییرشکل پلاستیک در سطح کار و در نتیجه تغییرات در خواص مکانیکی نمونه مانند سختی، نخواهد بود از این رو مقادیر همپوشانی بین ضربات لیزر،20.30 و 50 درصد درنظر گرفته شده و یک ناحیه 10×10 میلیمتر رفتار فرآیند روی یک شکاف (بهعنوان محیط بسته)، فرآیند بر یک نمونه شکافدار نیز اجرا شده است. برای ایجاد شکاف یادشده بر یک نمونه آلومینیمی، از یک لیزر آن دی یاک با توان محیط بسته)، فرآیند بر یک نمونه شکاف دار نیز اجرا شده است. برای ایجاد شکاف یادشده بر یک نمونه شکاف دار نیز به اینگونه بوده است که با حرکت دادن پرتو لیزر در راستای یک شکاف نیز به اینگونه بوده است که با حرکت دادن پرتو لیزر در راستای یک نمکاف نیز به اینگونه بوده است که با حرکت دادن پرتو لیزر در راستای یک نموسرت یک شکاف باقی مانده است. با تکرار حرکت لیزر روی سطح (به تعداد 150 مرتبه) شکاف به عمق مطلوب ایجاد شده است.

شکاف ایجاد شده در کل طول یک نمونه بوده و دارای عرض μπ 22 و عمق μπ 200 بوده است. این نمونه پس از اعمال لایه رنگ بهعنوان لایه محدودکننده، از بالا با هم پوشانی 50درصد، تحت فرآوری قرار گرفته است. در شکل 4، شماتیک شکاف و نحوه فرآوری آن نشان داده شده است.

2-2- ارزيابي نمونهها

پس از آمادهسازی نمونهها با پارامترهای گفتهشده، سطح نمونهها بهدقت



شکل 2 نمونه الف- خام قبل از اعمال لایه محدودکننده و ب- مسیر حرکت پرتو لیزر



شکل 3 شماتیک چیدمان آزمایشگاهی





شكل 4 نحوه ليزركوبي شكاف روى نمونه

مورد بازرسی چشمی قرار گرفته تا سطوح از لحاظ وجود عیوب ظاهری مانند ترک، فرورفتگی و یا سوختگی ارزیابی شوند، زیرا درصورتی که قطعات تولیدشده به این روش دارای عیوب ظاهری باشند، مناسب برای کاربرد بهعنوان قطعات صنعتی نخواهند بود. در مرحله پسین زبری سطوح نمونهها با استفاده از دستگاه زبری سنج مدل پرتومتر ام دو¹ساخت شرکت مهر² آلمان اندازه گیری شده. برای اندازه گیری از طول نمونه mm 8/8و طول کل اندازه گیری mm 5/6 و سرعت حرکت 0/5 mm/s استفاده شد. اندازه گیری در دو راستای طولی (X) و عرضی (Y) نمونه ها (مطابق شکل 2-ب) انجام شده است. پس از زبریسنجی، نمونهها در راستای ۲ مقطع زده شده، مانت سرد شده و پس از پالیش کردن و اچ کردن به مدت 600s با استفاده از محلول کلر³، از مقاطع و ساختار متالوگرافی آنها توسط یک میکروسکوپ نوری تصویربرداری شده است [18]. در انتها با استفاده از دستگاه سختیسنج ویکرز با بار gr و مدتزمان 10s سختی سنجی از سطح تا عمق نمونهها در نقاطی با فواصل 0/125 mm انجامشده است. هر اندازه گیری سختی سه بار تکرار شده و میانگین آنها بهعنوان عدد سختی هر نقطه در نظر گرفتهشده است. بهاینترتیب پروفایل تغییرات سختی از سطح تا عمق نمونهها بهدست آمده است.

3- نتايج و بحث

3-1 بازرسی چشمی نمونهها

در شكل 5 سطح نمونههاى ليزركوبى شده با درصد هم پوشانى 50، 20 و 30 درصد نشان دادهشده است. دیده می شود که بر اثر فرآیند، در سطح نمونه ناهمواری به وجود آمده است. این ناهمواری به دلیل تغییر شکل پلاستیکی است که در اثر فشار بالای پلاسما ایجاد شده و در واقع دلیل اصلی ایجاد تنش پسماند فشاری است. این ناهمواریها سبب ایجاد نوعی بافت در سطح شدهاند و مقدار آنها در هر یک از راستاهای X و Y متفاوت است، به این گونه که مقدار ناهمواری در راستای Y بیشتر از راستای X است. این رفتار در همه نمونهها بهطور يكسان مشاهده شده، ولى با افزايش هم يوشاني، اين بافت بیشتر و واضحتر دیده می شود. به غیراز ایجاد بافت، فرآیند هیچ عیب ظاهری مانند ترک، فرورفتگی، سوختگی و ... در سطح نمونه ها ایجاد نکرده است.

در شکل 6-الف تصویر مقطع یک شکاف پیش از فرآوری با فرآیند لیزرکوبی نمایش داده شده است. در این تصویر می توان دید که شکاف ایجاد شده با استفاده از لیزر ان دی یاگ کاملاً سالم بوده و هیچگونه ترک یا عیب ظاهری در انتها یا دیوارههای آن وجود ندارد و اگرچه شکاف بسیارتیزی است،

انتهای آن کاملا بسته است. در شکل 6-ب مقطع شکاف لیزرکوبی شده نشان داده شده است. همان گونه که در شکل به خوبی نشان داده شده، انتهای شکاف ایجاد شده با لیزر دچار گسیختگی شده و یک ترک در آن ایجاد شده است. دلیل ایجاد این ترک در انتهای شکاف لیزرکوبی شده خود فشار پلاسماست. این فشار پلاسما با وارد کردن تنش به دیوارههای شکاف سبب بازشدن آن شده و شکاف را به یک ترک تبدیل کرده است. از آنجایی که ترک منجر به شکست کامل نمونه نشده است، می توان با معادل قرار دادن چقرمگی شکست ماده کار با ضریب تمرکز تنش مود نخست شکست (۲۱) تنش لازم برای ایجاد چنین ترکی را با استفاده از رابطه (4) محاسبه کرد .[19]

$K_{\rm I} = 1.12\sqrt{\sigma a}$

در رابطه (4)، a طول شکاف و σ تنش وارد شده به دیوارههای شکاف است. از آنجایی که طول شکاف **200**μm بوده و چقرمگی شکست آلیاژ آلومينيم 6061-T6، **29/1 MPa√m** (6061-T6 است، تنش لازم براى بروز چنين تركى 720MPa محاسبه می شود که بسیار کمتر از فشار پلاسمای ایجادشده (MPa 2900) توسط ليزر پرانرژى است.

(4)

واضح است که وجود چنین ترکی به خودی خود سبب کاهش عمر خستگی قطعه خواهد شد؛ بنابراین می توان این گونه نتیجه گرفت که فرآیند لیزرکوبی در چنین نواحی از قطعات می تواند اثر عکس داشته و موجب کاهش عمر خستگی آنها شود. از سوی دیگر باتوجه به این که فشار پلاسمای





شكل 5 سطح نمونهها پس از فرآورى الف- با 20درصد هم پوشانى، ب- با 30درصد هم پوشانى، پ- با 50درصد هم پوشانى



شکل 6 مقطع شکاف الف- پیش از فرآوری ب- پس از فرآوری

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-30]

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.12.0

¹⁻ Porthometer M2

²⁻ Maher 3- Keller's Reagent

ایجاد شده اغلب دارای دامنهای در حدود چندین گیگاپاسکال است، لازم است تا پیش از این که قطعاتی با نواحی بسته مانند شکاف، گوشه، سوراخهای ریز و یا حتی قطعاتی که در روی سطح آنها ترکهایی وجود دارد از ایمن بودن آنها در برابر این فرآیند اطمینان حاصل شود. در سال 2007 لیو و همکاران، گزارش مشابهی را برای آلومینیم 2050 ارایه دادند. ایشان گزارش کردند که درصورتی که فشار پلاسما بیش از حد زیاد باشد، فرآیند می تواند میکروترکهایی در زیر سطوح تخت لیزرکوبی شده ایجاد کند و سبب کاهش عمر خستگی آنها شود و برای مواد ترد، احتمال بروز این ترکها بیشتر خواهد بود [20].

3 -2 - متالوگرافی

پس از اچ کردن نمونهها ریزساختار آنها بهخوبی ظاهر گشت. در شکل 7-الف ریزساختار نمونه فرآوری نشده و در شکل 7-ب ریزساختار نمونه فرآورىشده با همپوشانى 50درصد ديده مىشود. در پژوهشهايى پيشين، گزارش شده است که ریزدانگی ایجاد شده توسط این فرآیند روی آلومینیم 6061- T6 با میکرسکوپ نوری قابل مشاهده است [21]، اما در این پژوهش برخلاف آنچه از پیش گزارش شده تصاویر متالوگرافی با بزرگنمایی 200 برابر اثری از ریزدانگی در نزدیکی سطح را نشان نداد. اگرچه در شکل -7ب ناهمواری های ناشی از تغییر شکل پلاستیک ایجادشده توسط فشار پلاسما بهخوبی دیده میشوند، ولی هیچ اثری از ریزدانگی بر اثر این فرآیند دیده نشده است. به دلیل این که مقدار تغییر شکل پلاستیک ایجادشده روی سطح بسیار ناچیز است (فرورفتگی کمتر از μm)؛ بنابراین مقدار ریزدانگی بسیار محدود بوده و با توجه به این که عمق لایه ای از سطح که دچار ریزدانگی قابل مشاهده می شود در حدود چند ده میکرون (40μm برای فولاد ضدزنگ ANSI 304)گزارش شده است [22]. برای مشاهده آن نیاز به تصویربرداری با بزرگنمایی بسیار زیاد و استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری¹ وجود دارد .[23]

3-3- سختىسنجى

در شکل 8 نمودار تغییرات سختی از سطح تا عمق برای نمونهها نشان داده شده است. در نمودار نشان داده شده در این شکل، سختی روی محور عمودی و عمق (فاصله از سطح) روی محور افقی نمایش داده شده است. بزرگترین انحراف معیار سختیسنجیها HV است. همان گونه که در شکل 8 نشان داده شده است، سختی ماده کار خام H22HV اندازه گیری شده است. با انجام فرآیند لیزرکوبی روی نمونهها سختی در سطح همه نمونهها افزایش داشته است. کمترین سختی به مقدار H23/3Hvروی سطح برای نمونه با 20درصد هم پوشانی و بیشترین سختی به مقدار H39/7HV برای نمونه یا 30درصد هم پوشانی و بیشترین سختی به مقدار S40/7HV برای نمونه یا 30درصد



شکل 7 تصویر متالوگرافی نمونهها الف- نمونه خام و ب- نمونه لیزرکوبیشده

بیشتر از سختی سایر نمونههاست. مقدار عمقی که سختی نمونهها تا آنجا دچار افزایش می شود، عمق تغییر شکل پلاستیک نامیده می شود و نمایانگر این است که امواج ناشی از پلاسما تا چه عمقی توانسته ماده کار را دچار تغییر شکل پلاستیک کند. همان گونه که در شکل دیده می شود، عمق تغییر شکل پلاستیک برای نمونه با همپوشانی 20درصد معادل µm 875، برای نمونه با 30درصد، 900μm و برای نمونه با همپوشانی 50درصد کمی کمتر از μm 1000 اندازه گیری شده است. پس از این عمق گزارش شده، ممکن است عدد سختی کمی افزایش یا کاهش (نسبت به سختی پایه) داشته باشد که میتوان آن را به خطاهای اندازه گیری نسبت داد. این رفتار توسط سایر پژوهشگران نیز دقیقاً به همین صورت مشاهده شدهاست. سختی آلومینیم در پژوهش گونزالز و همکاران تا پس از رسیدن به عمق تغییر شکل پلاستیک نیز تغییراتی داشته و دلیل آن خطاهای اندازه گیری اعلام شده است [14]. ساتیاجیت نیز در تحقیق خود به همین رفتار برخورکرده و در سختی پس از عمق تحت تأثير تغيير شكل پلاستيک تغييراتي در مقدارسختي مشاهده كرده است [21]. بەطوركلى مىتوان گفت، سختى نمونەھاى ليزركوبى شده نسبت به سختی نمونه خام افزایش پیداکرده و با افزایش درصد همپوشانی این سختی بیشتر شده است که دلیل آن شدیدتر شدن تغیر شکل پلاستیک و درنتیجه بیشتر شدن تعداد نابهجاییها و افزایش احتمال قفلشدگی آنهاست [22]. کارسختی نیز یکی دیگر از دلایل افزایش سختی در اثر فرآيند ليزركوبي معرفي ميشود و با افزايش درصد هم پوشاني (شديدتر شدن شرایط تغییر شکل پلاستیک) عمق کارسختی بیشتر شده و به همین دلیل عمق تغيير شكل پلاستيك نيز بيشتر مى شود [16].

3-4-زبرىسنجى

زبریسنجی مطابق آنچه در قسمت 2-2 گفته شد در دو جهت روی سطح نمونهها انجام شد تا تأثیر فرآیند روی زبری که یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار خستگی قطعات است، مورد مطالعه قرار گیرد. در شکل 9 نمودار تغییرات زبری سطح در مقیاس Ra برای نمونهها نشان دادهشده است. سطح نمونه خام که با استفاده از کاغذ سمباده پرداختشده است، زبری معادل mm 0/356 در راستای X و 0/389 در راستای Y دارد. با اعمال ضربات لیزر با هم پوشانی 20درصد، زبری افزایش یافته و به مقدار 0/593μm و 0/993 μm بهترتیب برای جهتهای X و Y میرسد. با افزایش درصد هم پوشانی به 30درصد کیفیت سطح باز هم افت کرده، ولی با مقدار کمتر و به مقادیر ۲ m µ 0/771m و 0/857 برای جهتهای X و Y رسیده است. درنهایت با رسیدن درصد همپوشانی به 50 درصد کمترین تغییرات زبری بر سطح ایجاد شده و زبری سطح به مقادیر 0/48µm و 0/507µm رسیده است. به زبان دیگر میتوان این گونه نتیجه گرفت که با افزایش درصد هم پوشانی، زبری سطح افزایش کمتری نسبت به زبری نخستین خواهد داشت. این رفتار را می توان با استفاده از مدلی که در شکل 10 ارائه داده شده است، توجیه کرد. اعمال هر ضربه لیزر، سبب ایجاد مقداری فرورفتگی بر سطح می شود. با کنارهم قرار گرفتن این فرورفتگیها زبری سطح زیاد میشود (لبه نمونه در شكل 6 ب). مطابق شكل 10-الف، اگر هم يوشاني ضربات صفر باشد، اين فرورفتگیها تأثیر زیادی روی کیفیت سطح خواهند داشت و به دلیل این که تغییرات ارتفاع این فرورفتگیها زیاد است، عدد زبری زیاد خواهد بود، ولی اگر ضربات لیزر با یکدیگر همپوشانی داشته باشند، براساس آنچه در شکل 10-ب نمایش داده شده است، این فرورفتگیها یکدیگر را تحت تأثیر قرار داده و برجستگیهای باقیمانده را هموارترکرده و اثر کمتری بر کیفیت سطح

¹⁻ Transmission Electron Microscope

خواهند داشت. به همین ترتیب با افزایش همپوشانی، زبری سطح تأثیر کمتری خواهد گرفت.

4- نتيجەگىرى

در این مقاله، فرآیند لیزر کوبی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته و آزمایشهای تجربی برای شناخت فرآیند و تأثیر آن بر زبری، ریزساختار و كيفيت سطح آلياژ آلومينيم 6061-T6 بررسي شدهاست. آزمايشها با استفاده از یک لیزر با انرژی پالس 1200m و عرض پالس8 ns صورت گرفتهاند که نسبت به انرژی که در بیشتر پژوهشها مورد استفاده قرار گرفته، انرژی اندکی است، اما این انرژی پالس کم با استفاده از قطر پرتو لیزر کم جبران شده تا چگالی توان لیزر ثابت باقی بماند. نتایج آزمایشها نشان داد که با استفاده از لیزر گفته شده و با کمک چیدمانی که شرح آن بیان شده است، میتوان فرآیند لیزرکوبی را روی آلیاژ آلومینیم T6 -6061 انجام داد. انجام این فرآیند تأثیر منفی بر سطح نمونهها ایجاد نکرده و هیچ عیب ظاهری مانند فرورفتگی بر اثر این فرآیند ایجاد نخواهد شد، اما انجام این فرآیند بر شکافها می تواند سبب ایجاد ترک در آنها شود. همچنین تصاویر متالوگرافی بهدستآمده از نمونههای لیزرکوبی شده، حاکی از آن است که برخلاف انتظار، ریزدانگی ناشی از این فرآیند که در مقالات گوناگون به آن اشاره شده است بسیار کم بوده و مشاهده آن نیاز به تجهیزات بسیار پیشرفتهتر مانند میکروسکوپ الكتروني عبوري دارد.

همچنین نتایج نشان داد که در اثر این فرآیند سختی سطح نمونهها تا عمق 1000μm افزایش خواهد یافت. این افزایش سختی برای قطعات صنعتی





شکل 9 زبری سطح بەدستآمدە برای هم پوشانی های گوناگون



شکل 10 نحوه تأثیر درصد هم پوشانی بر کیفیت سطح

مانند قالبهای فلزی و یا یره توربین موتورهای جت و برای مقابله با خطر تخريب اشياء پرنده بسيار اهميت دارد. علاوهبر آن زبري سنجي ها نشان داد كه اگرچه فرآیند سبب کاهش کیفیت سطح آلیاژ آلومینیم می شود، اما این کاهش کیفیت سطح بسیار کم است و درصورتی که از درصد هم پوشانی 50درصد استفاده شود، علاوهبر این که کیفیت سطح تغییر چندانی نخواهد داشت سختی نیز به بیشترین مقدار میرسد. برای جمعبندی از این آزمایشها نیز می توان گفت که بهترین پارامتر برای فرآوری قطعات به روش لیزرکوبی استفاده از همپوشانی 50درصد است که هم بیشترین سختی را ایجاد کرده و هم کمترین تأثیر منفی بر کیفیت سطح را بههمراه خواهد داشت.

5- مراجع

- [1] P. K. Sharp, Q. Liu, S. A. Barter, B. P, and G. Clark, Fatigue life recovery in aluminium alloy aircraft structure, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., vol. 25, no. 2, pp. 99–110, 2002.
- [2] S. Bhamare, G. Ramakrishnan, S. R. Mannava, K. Langer, V. K. Vasudevan, and D. Qian, Simulation-basedOptimization of Laser Shock Peening Process for Improved Bending Fatigue Life of Ti-6AI-2Sn-4Zr-2MoAlloy, Surf. Coat. Technol., 2013.
- [3] D. Lin, C. Ye, Y. Liao, S. Suslov, R. Liu, and G. J. Cheng, Mechanism of fatigue performance enhancement in a laser sintered superhard nanoparticles reinforced nanocomposite followed by laser shock eening, J. Appl. Phys., vol. 113, no. 13, p. 133509, 2013.
- [4] P. Ganesh, R. Sundar, H. Kumar, R. Kaul, K. Ranganathan, P. Hedaoo, G. Raghavendra, S. A. Kumar, P. Tiwari, D. C. Nagpure, K. S. Bindra, L. M. Kukreja, and S. M. Oak, Studies on fatigue life enhancement of prefatigued spring steel specimens using laser shock peening, Mater. Des., vol. 54. pp. 734–741. 2014.
- [5] G. Gomez-Rosas, C. Rubio-Gonzalez, J. Ocaña, C. Molpeceres, J. a. Porro, W. Chi-Moreno, and M. Morales, High level compressive residual stresses produced in aluminum alloys by laser shock processing, Appl. Surf. Sci., vol. 252, no. 4, pp. 883–887, Nov. 2005.
- [6] R. Z. Valiev, M. Yu. Murashkin, E. V. Bobruk, and G. I. Raab, Grain Refinement and Mechanical Behavior of the Al Alloy, Subjected to the New SPD Technique, Mater. Trans., vol. 50, no. 1, pp. 87-91, 2009.
- [7] S. Gencalp Irizalp, N. Saklakoglu, E. Akman, and A. Demir, Pulsed Nd:YAG laser shock processing effects on mechanical properties of 6061-T6 alloy, Opt. Laser Technol., vol. 56, pp. 273-277, Mar. 2014.
- [8] R. a. Brockman, W. R. Braisted, S. E. Olson, R. D. Tenaglia, A. H. Clauer, K. Langer, and M. J. Shepard, Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening, Int. J. Fatigue, vol. 36, no. 1, pp. 96-108. Mar. 2012.
- [9] C. Yang, P. Damian, Q. Liu, and L. Ye, Geometrical effects on residual stresses in 7050-T7451 aluminum alloy rods subject to laser shock peening, vol. 1, pp. 303-309, 2007.
- [10] P. Peyer and R. Fabbro, Laser shock processing: a review of the physics and applications, Opt. Quantum Electron., vol. 27, pp. 1213–1229, 1995.
- [11] M. Morales, C. Molpeceres, and J. Torres, Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments, Appl. Surf. Sci., vol. 238, pp. 242-248, 2004.
- [12] G. Askaryon and E. M. Morez, Use of Laser Generated Shocks to Improve Metals & Alloys, JETP LETT, vol. 16, p. 1638, 1963.
- [13] N. Anderholm, Laser Generated Stress Waves, Appl. Phys. Lett, vol. 16, no. 2, pp. 113- 5, 1970. [14] C. Rubio-González, J. L. Ocaña, G. Gomez-Rosas, C. Molpeceres, M.
- Paredes, a. Banderas, J. Porro, and M. Morales, Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy, Mater. Sci. Eng. A, vol. 386, no. 1-2, pp. 291-295, Nov. 2004.

Academic Press, 1995.

- [20] Q. Liu, C. H. Yang, K. Ding, S. A. Barter, and L. Ye, The effect of laser power density on the fatigue life of laser-shock-peened 7050 aluminium alloy, *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, vol. 30.11, pp. 1110–1124, 2007.
- [21] S. Sathyajith, S. Kalainathan, and S. Swaroop, Laser peening without coating on aluminum alloy Al-6061-T6 using low energy Nd:YAG laser, *Opt. Laser Technol.*, vol. 45, pp. 389–394, Feb. 2013.
- [22] J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang, G. F. Sun, Y. Y. Gu, J. Z. Zhou, X. D. Ren, X. C. Zhang, L. F. Zhang, K. M. Chen, C. Y. Cui, Y. F. Jiang, A. X. Feng, and L. Zhang, Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel, *Acta Mater.*, vol. 58, pp. 5354–5362, 2010.
- [2010. [23] J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang, C. Y. Cui, G. F. Sun, J. Z. Zhou, L. Zhang, J. You, K. M. Chen, and J. W. Zhong, Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts, *Acta Mater.*, vol. 58, pp. 3984–3994, 2010.
- [15] C. Rubio-González, G. Gomez-Rosas, J. L. Ocaña, C. Molpeceres, a. Banderas, J. Porro, and M. Morales, Effect of an absorbent overlay on the residual stress field induced by laser shock processing on aluminum samples, *Appl. Surf. Sci.*, vol. 252, no. 18, pp. 6201–6205, Jul. 2006.
- [16] S. Sathyajith and S. Kalainathan, Effect of laser shot peening on precipitation hardened aluminum alloy 6061-T6 using low energy laser, *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, no. 3, pp. 345–348, Mar. 2012.
- [17] S. Gencalp Irizalp, N. Saklakoglu, and B. S. Yilbas, Characterization of microplastic deformation produced in 6061-T6 by using laser shock processing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 71, no. 1–4, pp. 109–115, Nov. 2013.
- [18] M. R. M. D. Ghahremani Moghadam, Kh. Farhang Doost, A. Rastegar, Tool Speed effect on hardness and residual stress in friction stir welded AI 2024- T351: Experimental method and Numerical simulation, *Modares Mech. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 61–71.
- [19] David J. Unger, analytical Fracture Mechanics, pp.42, San Diego: