



## مطالعه نظری و تجربی فرآیند لیزر کوبی آلیاژ آلومینیم 6061-T6

آرمان سلیمیان<sup>1</sup>، احسان فروزمهر<sup>2\*</sup>، محسن بدرسمای

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

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

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

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 بهمن 1393

پذیرش: 23 فروردین 1394

ارائه در سایت: 03 خرداد 1394

کلید واژگان:

لیزر کوبی

لیزر ان دی یاک

تنش پسماند فشاری

زبری سطح

سختی ویکرز

## چکیده

ایجاد تنش پسماند فشاری یکی از راه‌های بهبود عمر خستگی قطعات فلزی است. روش‌های متعدد و گوناگونی برای ایجاد این تنش پسماند فشاری وجود دارد، روش‌هایی مانند ساچمه کوبی و یا نوردکاری عمیق. یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین روش‌های ایجاد تنش پسماند فشاری در قطعات صنعتی لیزر کوبی است. فرآیند لیزر کوبی، فرآیند جدید و به نسبت پیچیده‌ای است؛ بنابراین لازم است تا آزمایش‌ها متعددی روی آن انجام شده تا فرآیند بهتر شناخته شود. بدین منظور در این پژوهش از یک لیزر ان دی یاک با انرژی پالس 1200mJ استفاده شده تا فرآیند لیزر کوبی به صورت تجربی روی آلیاژ آلومینیم 6061-T6 انجام شود. تأثیر فرآیند بر سختی در عمق قطعه، ریزساختار و زبری سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای مطالعه اثر فرآیند بر شکاف روی سطح نیز یک سطح شکاف‌دار فرآوری شده و نتایج آن ارزیابی گردید. نتایج نشان دادند که فرآیند لیزر کوبی می‌تواند سختی ماده را تا عمق 1000 میکرون زیر سطح افزایش دهد. همچنین نتایج نشان داد که این فرآیند می‌تواند زبری سطح را کمی افزایش دهد که این افزایش با انتخاب پارامترهای مناسب می‌تواند محدود شود. لیزر کوبی یک قطعه دارای شکاف نشان داد که این فرآیند می‌تواند موجب رشد ترک در انتهای شکاف شود.

## 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

Original Research Paper  
Received 07 February 2015  
Accepted 12 April 2015  
Available Online 24 May 2015

## Keywords:

Laser Shock Peening  
Nd: YAG Laser  
Compressive Residual Stress  
Surface Roughness  
and Vickers Hardness

## ABSTRACT

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 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 Al 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

ایجاد شده، تخریب کیفیت سطح قطعات و محدودیت در دسترسی به نقاط خاص قطعات و عمق تنش پسماند کم و در حدود 0/25 mm کاربرد آن را محدود کرده است [1]. فرآیند دیگری که برای ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعات فلزی استفاده می‌شود فرآیند لیزر کوبی<sup>1</sup> است که اثری مشابه فرآیند ساچمه کوبی دارد، با این تفاوت که تنش پسماند ایجاد شده با آن عمیق‌تر و دامنه تنش پسماند آن بیشتر است. علاوه بر آن، تأثیر کمی بر

بهبود عمر قطعات فلزی یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعتی است که مهندسان مکانیک با آن روبه‌رو هستند. یکی از مهم‌ترین 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 مهم‌ترین این روش‌ها، روش ساچمه کوبی است. این روش اگرچه روش بسیار متداول و پرکاربردی است، ولی مشکلات و معایبی چون نایکنواختی تنش پسماند

1- Laser Shock Peening (LSP)

Please cite this article using:

A. Salimian, E. Foroozmehr, M. Badrossamay, Laser Shock Peening of Al 6061-T6 Alloy, a theoretical and experimental study, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 73-79, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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

$$I_0 = \frac{E_p}{w_p A} \quad (3)$$

در رابطه (3)،  $E_p$  انرژی پالس لیزر،  $w_p$  عرض پالس لیزر و  $A$  مساحت مقطع پرتو لیزر است.

استفاده از امواج لیزر ایجاد شده توسط لیزر برای ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعات برای نخستین بار در سال 1960 توسط اسکریبون و مورز معرفی شد [12]. این همان روشی بود که با نام فرآیند لیزرکوبی شناخته شد. بعدها آندرهولم در سال 1970 استفاده از یک لایه محدودکننده برای بهبود عملکرد فرآیند و افزایش دامنه تنش پسماند ایجاد شده را پیشنهاد داد [13]. در سال 1995 فابرو مدل دقیقی برای محاسبه فشار پلاسمای ناشی از لیزر ارائه داد [10]. این مدل که به نام مدل فابرو شناخته شده است. کامل‌ترین مدل استفاده شده برای پیش‌بینی رفتار فرآیند لیزر کوبی است. پس از آن پژوهش‌های فراوانی برای بررسی اثر فرآیند روی مواد مختلف از جمله آلومینیم T6-6061 انجام شد. گونزالز و همکاران اثر فرآیند لیزرکوبی را روی رشد ترک خستگی در آلیاژ آلومینیم T6-6061 بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که می‌توان با انرژی پالس 1/2 J و عرض پالس 8 ns قطر پرتو 1/5 mm در سطح نمونه‌ها ایجاد تنش پسماند فشاری بادامه حدود 1480 MPa کرد [14]. گومز و همکاران نیز با استفاده لیزر با انرژی 1/2 J، عرض پالس 8 ns و قطر پرتو 1/5 mm توانستند در سطح نمونه‌هایی از جنس آلومینیم T6-6061 تنش پسماند فشاری بسیار بالای 1480 MPa ایجاد کنند. آن‌ها تنش پسماند به دست آمده از این روش را بسیار بالاتر از تنش پسماند به دست آمد از هر روش دیگر معرفی کردند [5]. گونزالز و همکاران با استفاده از همان لیزر روی آلومینیم T6-6061 فرآیند لیزرکوبی انجام دادند. آن‌ها به تنش پسماند فشاری 320 MPa در سطح نمونه‌ها رسیدند. عمق تنش پسماند ایجاد شده توسط آن‌ها بیشتر از 2mm بود [15]. ساتیاجیت و همکاران آلیاژ آلومینیم T6-6061 را لیزرکوبی کرده و سختی ناشی از فرآیند را مطالعه کردند. لیزر مورد استفاده آن‌ها عبارت بود از یک لیزر ان دی یو با طول موج 1064nm و انرژی پالس 300 میلی‌ژول و عرض پالس 10ns [16]. گنکالپ و همکاران با استفاده از لیزر ان دی یو با انرژی 750 mJ و قطر پرتو 1 و 2 mm آلیاژ آلومینیم T6-6061 را لیزرکوبی کردند و توانستند به تنش پسماند فشاری 186 MPa در سطح برسند و سختی نمونه‌ها را تا عمق 0/9 mm افزایش 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 به صورت تجربی بر نمونه‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیم T6-6061 که یکی از آلیاژهای پر کاربرد در بدنه‌ها و سازه‌های هوافضایی است انجام شده. سپس تغییرات سختی نمونه‌ها با استفاده از روش سختی سنجی میکرو ویکرز اندازه‌گیری 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 قرار گرفته است. علاوه بر این‌ها 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 به صورت تجربی

کیفیت سطح نهایی قطعات داشته [1] و ایجاد تنش پسماند توسط آن محدود به نواحی خاص قطعات و یا هندسه‌های خاص نیست. فرآیند لیزرکوبی موجب افزایش 48٪ عمر خستگی در تیتانیوم [2] افزایش 28٪ عمر خستگی در آلومینیم T6-6061 [3] و افزایش 66 درصد عمر خستگی در فولاد فنر [4] می‌شود. بهبود رفتار سایشی سطوح [5]، ریزشیدن دانه‌بندی [6] و همچنین بهبود خواص مکانیکی قطعات مانند افزایش تنش تسلیم و سختی [7] از دیگر اثرات فرآیند محسوب می‌شوند. کاربرد اصلی فرآیند لیزرکوبی 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 پرنده<sup>1</sup> از این فرآیند استفاده می‌کنند [9].

این فرآیند با انتشار امواج ضربه ناشی از پلاسمای ایجاد شده 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 داده شده است. برای انجام فرآیند با استفاده از یک لیزر با طول موج ( $\lambda$ ) مشخص، سطح قطعات مورد نظر با استفاده از یک لایه جاذب طول موج لیزر مورد استفاده مانند رنگ سیاه تجاری پوشانده می‌شود. بر این لایه نیز یک لایه شفاف نسبت به طول موج لیزر مورد استفاده (لایه محدودکننده) مانند آب قرار می‌گیرد. وقتی یک پالس لیزر با عرض پالس بسیار کوتاه (1 تا 100 نانوثانیه) و چگالی توان بیشتر از  $1 \text{ GW/cm}^2$  [9]، بر لایه جاذب تابانده می‌شود، لایه جاذب تبخیر شده و سپس به حالت پلاسمای می‌رسد. این پلاسمای میان سطح قطعه کار و لایه محدودکننده قرار گرفته و فشار آن افزایش یافته و سبب انتشار امواج ضربه در ماده کار می‌شود. اگر فشار پلاسمای از حد تسلیم ضربه‌ای ماده کار<sup>2</sup> 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 می‌توان روی آن سطح ایجاد یک میدان تنش پسماند فشاری کرد.

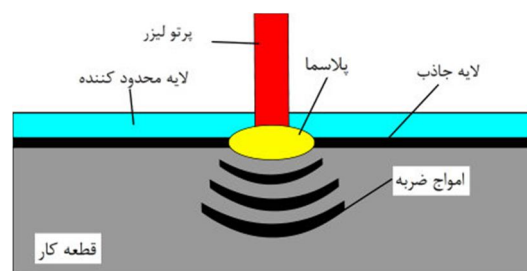
با داشتن ضریب پواسون ( $\nu$ ) و تنش تسلیم دینامیکی ماده ( $\sigma_y^{dyn}$ ) که یکی از خواص ماده بوده و به صورت تجربی قابل اندازه‌گیری است، می‌توان حد تسلیم ضربه‌ای را از رابطه (1) محاسبه کرد [11].

$$\sigma_y^{dyn} = HEL \frac{1-2\nu}{1-\nu} \quad (1)$$

برای محاسبه فشار پلاسمای ایجاد شده توسط لیزر در این فرآیند می‌توان از رابطه (2) یا رابطه فابرو استفاده کرد [10].

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

در رابطه (2)،  $\alpha$  ضریبی است که تعیین کننده مقدار انرژی درونی پلاسمای نسبت به انرژی گرمایی آن (با فرض پلاسمای به‌عنوان یک گاز کامل) است. همچنین  $Z$  نیز عبارت است از مقاومت ضربه‌ای ماده کار و  $I_0$  عبارت است از



شکل 1 شماتیک فرآیند لیزرکوبی

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

مطالعه شده است.

## 2- آزمایش‌های تجربی

### 1- فرآیند لیزرکوبی

در این پژوهش نمونه‌ها با ابعاد  $20 \times 20 \times 6$  میلی‌متر از جنس آلومینیم 6061-T6 هستند. سطح این نمونه‌ها پس از برش کاری با استفاده از کاغذ سمباده با دانه‌بندی‌های گوناگون به‌طور کامل پرداخت شده، 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 پرداخت کاری و پیش از پاشش رنگ نمایش داده شده است.

برای انجام فرآیند لیزرکوبی از یک لیزر پالسی حالت جامد از نوع ان دی یاگ با طول موج  $1064 \text{ nm}$  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  $10 \text{ mm}$  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  $180 \text{ mm}$  استفاده شده است، به‌گونه‌ای 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  $1/5 \text{ mm}$  می‌رسد که برای انجام فرآیند چگالی توان کافی و مناسب را ایجاد می‌کند. شماتیک این طراحی اپتیکی در شکل 3 دیده می‌شود.

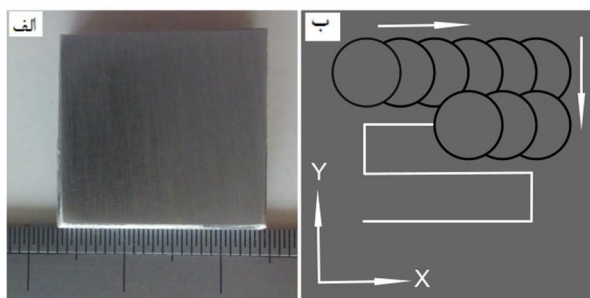
با توجه به این که برای رسیدن به فشار پلاسمای کافی لازم است تا انرژی لیزر و عرض پالس آن به‌گونه‌ای باشند تا چگالی توان ایجاد شده به یک مقدار کمینه مناسب برسد. به زبان دیگر می‌توان گفت باید انرژی پالس بیشترین مقدار ممکن انتخاب شود تا بتوان برای رسیدن به چگالی توان مورد نیاز از بیشترین قطر پرتو استفاده کرده و در نهایت بتوان با هر ضربه لیزر مساحت بیشتری را فرآوری کرد. در این پژوهش از انرژی پالس  $1200 \text{ mJ}$  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  $1/5 \text{ mm}$  برای فرآوری این آلیاژ مناسب بوده است. برای ایجاد حرکت نسبی بین پرتو لیزر و سطح نمونه‌ها از یک میز دوماحوره دستی استفاده شده که مقدار حرکت هر محور در هر مرحله، با استفاده از دو عدد ساعت اندازه‌گیری مورد کنترل قرار گرفته است. برای تأمین لایه محدودکننده روی سطح، نمونه‌ها درون یک مخزن آب قرار گرفته به‌گونه‌ای که ضخامت لایه محدودکننده روی سطح بین یک تا دو میلی‌متر بوده. مسیر حرکت پرتو بر نمونه‌ها مطابق شکل 2-ب بوده و هم‌پوشانی بین ضربات لیزر 20، 30 و 50 درصد در نظر گرفته شده است. آزمایشات ابتدایی نشان داد که هم‌پوشانی بیشتر از 50 درصد سبب می‌شود تا بر اثر برخورد ضربات نخستین لیزر روی سطح، لایه جاذب بر سطح کار (لایه

رنگ) از بین رفته و ادامه فرآیند مختل شود. از سوی دیگر نتایج آزمایشات نخستین نشان داد که هم‌پوشانی کمتر از 20 درصد نیز قادر به ایجاد تغییر شکل 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 در نظر گرفته شده و یک ناحیه  $10 \times 10$  میلی‌متر وسط نمونه‌ها مورد فرآوری قرار گرفته است. علاوه بر این نمونه‌ها برای مطالعه 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 ان دی یاگ با توان متوسط  $100 \text{ W}$  و قطر پرتو  $0/5 \text{ mm}$  استفاده شده و یک شکاف روی نمونه ایجاد شده است. روش ایجاد شکاف نیز به این گونه بوده است که با حرکت دادن پرتو لیزر در راستای یک خط مستقیم روی سطح کار تبخیر موضعی ماده کار صورت گرفته و اثر آن به‌صورت یک شکاف باقی مانده است. با تکرار حرکت لیزر روی سطح (به تعداد 150 مرتبه) شکاف به عمق مطلوب ایجاد شده است.

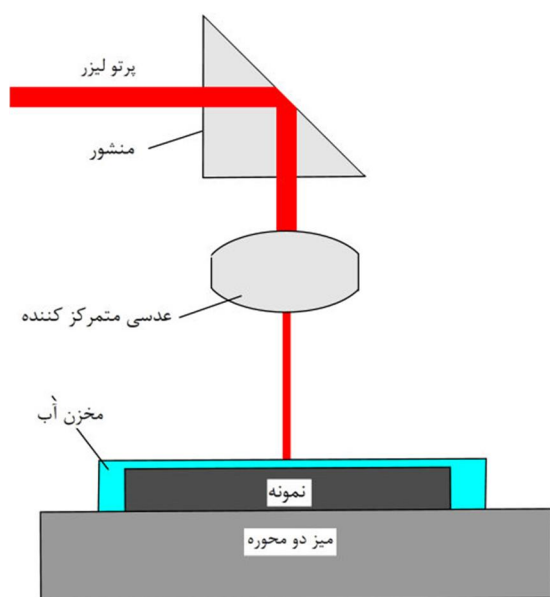
شکاف ایجاد شده در کل طول یک نمونه بوده و دارای عرض  $22 \mu\text{m}$  و عمق  $200 \mu\text{m}$  بوده است. این نمونه پس از اعمال لایه رنگ به‌عنوان لایه محدودکننده، از بالا با هم‌پوشانی 50 درصد، تحت فرآوری قرار گرفته است. در شکل 4، شماتیک شکاف و نحوه فرآوری آن نشان داده شده است.

### 2-2- ارزیابی 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 روی سطح



شکل 3 شماتیک چیدمان آزمایشگاهی

جدول 1 مشخصات لیزر استفاده‌شده

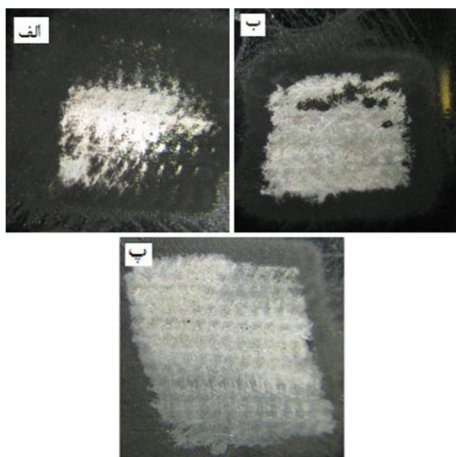
انرژی پالس (mJ)	عرض پالس (ns)	قطر پرتو (mm)	قطر پرتو روی سطح نمونه (mm)
1200	8	10	1/5

انتهای آن کاملاً بسته است. در شکل 6-ب مقطع شکاف لیزرکوبی شده نشان داده شده است. همان‌گونه 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 پلازما با وارد کردن تنش به دیواره‌های شکاف سبب باز شدن آن شده و شکاف را به یک ترک تبدیل کرده است. از آنجایی که ترک منجر به شکست کامل نمونه نشده است، می‌توان با معادل قرار دادن چقرمگی شکست ماده کار با ضریب تمرکز تنش مود نخست شکست ( $K_I$ ) تنش لازم برای ایجاد چنین ترکی را با استفاده از رابطه (4) محاسبه کرد [19].

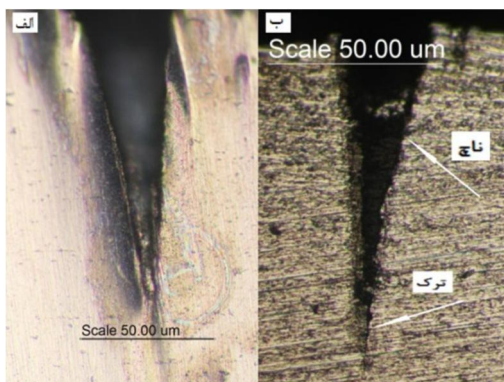
$$K_I = 1.12\sqrt{\sigma a} \quad (4)$$

در رابطه (4)،  $a$  طول شکاف و  $\sigma$  تنش وارد شده به دیواره‌های شکاف است. از آنجایی که طول شکاف  $200\mu\text{m}$  بوده و چقرمگی شکست آلیاژ آلومینیم 6061-T6،  $29/1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  است، تنش لازم برای بروز چنین ترکی  $720 \text{ MPa}$  محاسبه می‌شود که بسیار کمتر از فشار پلاسمای ایجاد شده ( $2900 \text{ MPa}$ ) توسط لیزر پرنرژی است.

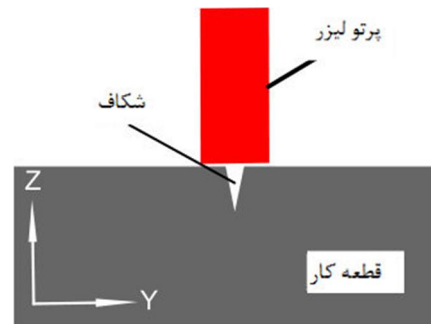
واضح است که وجود چنین ترکی به خودی خود سبب کاهش عمر خستگی قطعه خواهد شد؛ بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که فرآیند لیزرکوبی در چنین نواحی از قطعات می‌تواند اثر عکس داشته و موجب کاهش عمر خستگی آن‌ها شود. از سوی دیگر باتوجه به این‌که فشار پلاسمای



شکل 5 سطح نمونه‌ها پس از فرآوری الف- با 20 درصد هم‌پوشانی، ب- با 30 درصد هم‌پوشانی، پ- با 50 درصد هم‌پوشانی



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



شکل 4 نحوه لیزرکوبی شکاف روی نمونه

مورد بازرسی چشمی قرار گرفته تا سطوح از لحاظ وجود عیوب ظاهری مانند ترک، فرورفتگی و یا سوختگی ارزیابی شوند، زیرا در صورتی 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 دو 1 ساخت شرکت مهر<sup>2</sup> آلمان اندازه‌گیری شده. برای اندازه‌گیری از طول نمونه  $0/8 \text{ mm}$  و طول کل اندازه‌گیری  $5/6 \text{ mm}$  و سرعت حرکت  $0/5 \text{ mm/s}$  استفاده شد. اندازه‌گیری در دو راستای طولی (X) و عرضی (Y) نمونه‌ها (مطابق شکل 2-ب) انجام شده است. پس از زبری‌سنجی، نمونه‌ها در راستای Y مقطع زده شده، مانت سرد شده و پس از پالایش کردن و اچ کردن به مدت  $600 \text{ s}$  با استفاده از محلول کلر<sup>3</sup>، از مقاطع و ساختار متالوگرافی آن‌ها توسط یک میکروسکوپ نوری تصویربرداری شده است [18]. در انتها با استفاده از دستگاه سختی‌سنج ویکرز با بار  $50 \text{ gf}$  و مدت‌زمان  $10 \text{ s}$  سختی‌سنجی از سطح تا عمق نمونه‌ها در نقاطی با فواصل  $0/125 \text{ mm}$  انجام شده است. هر اندازه‌گیری سختی سه بار تکرار شده و میانگین آن‌ها به‌عنوان عدد سختی هر نقطه در نظر گرفته شده است. به‌این‌ترتیب پروفایل تغییرات سختی از سطح تا عمق نمونه‌ها به‌دست آمده است.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بازرسی چشمی نمونه‌ها

در شکل 5 سطح نمونه‌های لیزرکوبی شده با درصد هم‌پوشانی 20، 50 و 30 درصد نشان داده شده است. دیده می‌شود که بر اثر فرآیند، در سطح نمونه ناهمواری به‌وجود آمده است. این ناهمواری به دلیل تغییر شکل پلاستیکی است که در اثر فشار بالای پلازما 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 این‌گونه که مقدار ناهمواری در راستای Y بیشتر از راستای X است. این رفتار در همه نمونه‌ها به‌طور یکسان مشاهده شده، ولی با افزایش هم‌پوشانی، این بافت بیشتر و واضح‌تر دیده می‌شود. به‌غیراز ایجاد بافت، فرآیند هیچ عیب ظاهری مانند ترک، فرورفتگی، سوختگی و... در سطح نمونه‌ها ایجاد نکرده است.

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

1- Porthometer M2  
2- Maher  
3- Keller's Reagent

بیشتر از سختی سایر نمونه‌هاست. مقدار عمقی که سختی نمونه‌ها تا آنجا دچار افزایش می‌شود، عمق تغییر شکل پلاستیک نامیده می‌شود و نمایانگر این است که امواج ناشی از پلازما تا چه عمقی توانسته ماده کار را دچار تغییر شکل پلاستیک کند. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، عمق تغییر شکل پلاستیک برای نمونه با هم‌پوشانی 20 درصد معادل  $875 \mu\text{m}$ ، برای نمونه با 30 درصد،  $900 \mu\text{m}$  و برای نمونه با هم‌پوشانی 50 درصد کمی کمتر از  $1000 \mu\text{m}$  اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری نسبت داد. این رفتار توسط سایر پژوهشگران نیز دقیقاً به همین صورت مشاهده شده است. سختی آلومینیم در پژوهش گونزالز و همکاران تا پس از رسیدن به عمق تغییر شکل پلاستیک نیز تغییراتی داشته و دلیل آن خطاهای اندازه‌گیری اعلام شده است [14]. ساتیجیت نیز در تحقیق خود به همین رفتار برخورد کرده و در سختی پس از عمق تحت تأثیر تغییر شکل پلاستیک تغییراتی در مقدار سختی مشاهده کرده است [21]. به‌طور کلی می‌توان گفت، سختی نمونه‌های لیزرکوبی شده نسبت به سختی نمونه خام افزایش پیدا کرده و با افزایش درصد هم‌پوشانی این سختی بیشتر شده است که دلیل آن شدیدتر شدن تغییر شکل پلاستیک و در نتیجه بیشتر شدن تعداد ناهنجاری‌ها و افزایش احتمال قفل‌شدگی آن‌هاست [22]. کارسختی نیز یکی دیگر از دلایل افزایش سختی در اثر فرآیند لیزرکوبی معرفی می‌شود و با افزایش درصد هم‌پوشانی (شدیدتر شدن شرایط تغییر شکل پلاستیک) عمق کارسختی بیشتر شده و به همین دلیل عمق تغییر شکل پلاستیک نیز بیشتر می‌شود [16].

#### 4-3- زبری‌سنجی

زبری‌سنجی مطابق آنچه در قسمت 2-2 گفته شد در دو جهت روی سطح نمونه‌ها انجام شد تا تأثیر فرآیند زبری روی 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 داده شده است. سطح نمونه خام که با استفاده از کاغذ سمباده پرداخت شده است، زبری معادل  $0/356 \mu\text{m}$  در راستای X و  $0/389 \mu\text{m}$  در راستای Y دارد. با اعمال ضربات لیزر با هم‌پوشانی 20 درصد، زبری افزایش یافته و به مقدار  $0/593 \mu\text{m}$  و  $0/993 \mu\text{m}$  به ترتیب برای جهت‌های X و Y می‌رسد. با افزایش درصد هم‌پوشانی به 30 درصد کیفیت سطح باز هم افت کرده، ولی با مقدار کمتر و به مقادیر  $0/771 \mu\text{m}$  و  $0/857 \mu\text{m}$  برای جهت‌های X و Y رسیده است. در نهایت با رسیدن درصد هم‌پوشانی به 50 درصد کمترین تغییرات زبری بر سطح ایجاد شده و زبری سطح به مقادیر  $0/48 \mu\text{m}$  و  $0/507 \mu\text{m}$  رسیده است. به زبان دیگر می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که با افزایش درصد هم‌پوشانی، زبری سطح افزایش کمتری نسبت به زبری نخستین خواهد داشت. این رفتار را می‌توان با استفاده از مدلی که در شکل 10 ارائه داده شده است، توجیه کرد. اعمال هر ضربه لیزر، سبب ایجاد مقداری فرورفتگی بر سطح می‌شود. با کنارهم قرار گرفتن این فرورفتگی‌ها زبری سطح زیاد می‌شود (لبه نمونه در شکل 6 ب). مطابق شکل 10-الف، اگر هم‌پوشانی ضربات صفر باشد، این فرورفتگی‌ها تأثیر زیادی روی کیفیت سطح خواهند داشت و به دلیل این‌که 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 هموارتر کرده و اثر کمتری بر کیفیت سطح

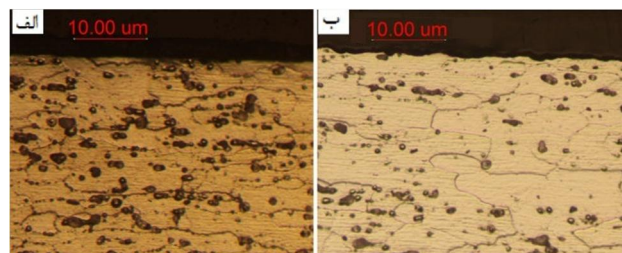
ایجاد شده اغلب دارای دامنه‌ای در حدود چندین گیگاپاسکال است، لازم است تا پیش از این‌که قطعاتی با نواحی بسته مانند شکاف، گوشه، سوراخ‌های ریز و یا حتی قطعاتی که در روی سطح آن‌ها ترک‌هایی وجود دارد از ایمن بودن آن‌ها در برابر این فرآیند اطمینان حاصل شود. در سال 2007 لیو و همکاران، گزارش مشابهی را برای آلومینیم 7050 ارائه دادند. ایشان گزارش کردند که در صورتی که فشار پلازما بیش از حد زیاد باشد، فرآیند می‌تواند میکروتورک‌هایی 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 فرآوری شده با هم‌پوشانی 50 درصد دیده می‌شود. در پژوهش‌هایی پیشین، گزارش شده است که ریزدانگی ایجاد شده توسط این فرآیند روی آلومینیم T6-6061 با میکروسکوپ 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 7-ب ناهمواری‌های ناشی از تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده توسط فشار پلازما به‌خوبی دیده می‌شوند، ولی هیچ اثری از ریزدانگی بر اثر این فرآیند دیده نشده است. به دلیل این‌که مقدار تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده روی سطح بسیار ناچیز است (فرورفتگی کمتر از  $0/5 \mu\text{m}$ )، بنابراین مقدار ریزدانگی بسیار محدود بوده و با توجه به این‌که عمق لایه‌ای از سطح که دچار ریزدانگی قابل مشاهده می‌شود در حدود چند ده میکرون ( $40 \mu\text{m}$ ) برای فولاد ضدزنگ ANSI 304 گزارش شده است [22]. برای مشاهده آن نیاز به تصویربرداری با بزرگ‌نمایی بسیار زیاد و استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>1</sup> وجود دارد [23].

#### 3-3- سختی‌سنجی

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 3HV است. همان‌گونه که در شکل 8 نشان داده شده است، سختی ماده کار خام 122HV اندازه‌گیری شده است. با انجام فرآیند لیزرکوبی روی نمونه‌ها سختی در سطح همه نمونه‌ها افزایش داشته است. کمترین سختی به مقدار 123/3HV روی سطح برای نمونه با 20 درصد هم‌پوشانی و بیشترین سختی به مقدار 139/7HV برای نمونه‌ی با 30 درصد هم‌پوشانی دیده شده است. در عمق سختی نمونه با هم‌پوشانی 50 درصد



شکل 7 تصویر متالوگرافی نمونه‌ها الف- نمونه خام و ب- نمونه لیزرکوبی شده



شکل 10 نحوه تأثیر درصد هم پوشانی بر کیفیت سطح

مانند قالب‌های فلزی و یا پره توربین موتورهای جت و برای مقابله با خطر تخریب اشیاء پرنده بسیار اهمیت دارد. علاوه بر آن زبری سنجی‌ها نشان داد که اگرچه فرآیند سبب کاهش کیفیت سطح آلیاژ آلومینیم می‌شود، اما این کاهش کیفیت سطح بسیار کم است و در صورتی که از درصد هم پوشانی 50 درصد استفاده شود، علاوه بر این که کیفیت سطح تغییر چندانی نخواهد داشت سختی نیز به بیشترین مقدار می‌رسد. برای جمع‌بندی از این آزمایش‌ها نیز می‌توان گفت که بهترین پارامتر برای فرآوری قطعات به روش لیزرکوبی استفاده از هم پوشانی 50 درصد است که هم بیشترین سختی را ایجاد کرده و هم کمترین تأثیر منفی بر کیفیت سطح را به همراه خواهد داشت.

#### 5- مراجع

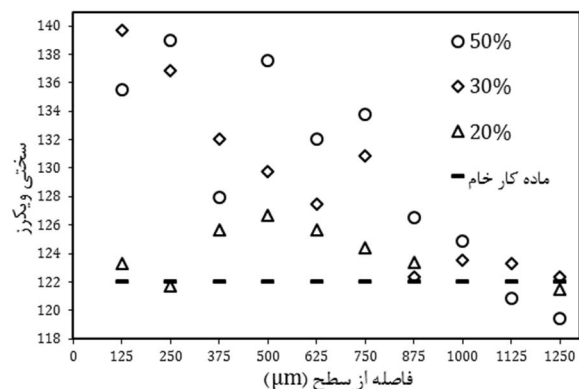
- [1] P. K. Sharp, Q. Liu, S. A. Barter, B. P. and G. Clark, Fatigue life recovery in aluminium alloy aircraft structure, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 25, no. 2, pp. 99–110, 2002.
- [2] S. Bhamare, G. Ramakrishnan, S. R. Mannava, K. Langer, V. K. Vasudevan, and D. Qian, Simulation-based Optimization of Laser Shock Peening Process for Improved Bending Fatigue Life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo Alloy, *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 peening, *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. Naggure, K. S. Bindra, L. M. Kukreja, and S. M. Oak, Studies on fatigue life enhancement of pre-fatigued 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. Mores, 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.

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

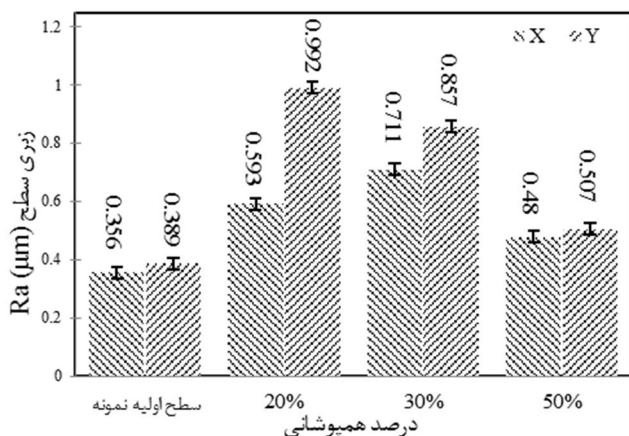
#### 4- نتیجه گیری

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 کیفیت سطح آلیاژ آلومینیم 6061-T6 بررسی شده است. آزمایش‌ها با استفاده از یک لیزر با انرژی پالس 1200mJ و عرض پالس 8 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، می‌تواند فرآیند لیزرکوبی را روی آلیاژ آلومینیم 6061-T6 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 می‌تواند سبب ایجاد ترک در آن‌ها شود. همچنین تصاویر متالوگرافی به دست آمده از نمونه‌های لیزرکوبی شده، حاکی از آن است که برخلاف انتظار، ریزدانه‌گی 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 الکترونی عبوری 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 8 سختی حاصل از هم پوشانی‌های گوناگون



شکل 9 زبری سطح به دست آمده برای هم پوشانی‌های گوناگون

- 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.
- [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 Al 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: