



## بررسی تأثیر شوک‌دهی لیزری چندباره بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2014-T6

امین شفیعی نژاد بجنیدی<sup>۱</sup>، علیرضا فیاضی خانگی<sup>۲</sup>، مسعود قرمزی<sup>۳\*</sup>، محمدرضا بیات<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۴- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۵۱۵/۷۷۵، Masoudgh1969@ssau.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۸ اسفند ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۱۳ خرداد ۱۴۰۲

پذیرش: ۹ تیر ۱۴۰۲

## کلیدواژگان:

شوک‌دهی لیزری چندباره

تنش پسماند

عمر خستگی

آلومینیوم 2014-T6

عملیات شوک‌دهی لیزری، یک عملیات بهینه‌سازی سطح است که منجر به بهبود خواص مکانیکی از جمله افزایش استحکام خستگی، سختی سطح و استحکام کششی می‌گردد. این بهبود خواص را می‌توان به ایجاد تنش پسماند و کارسرد انجام شده بر روی سطح قطعه نسبت داد. در این روش نوین که به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های ساچمه کوبی و کوبش با امواج ماورای صوت به شمار می‌رود، عوامل متعددی از جمله چگالی توان، درصد هم‌پوشانی، نوع لایه محافظ و تعداد دفعات شوک‌دهی و ... تأثیرگذار است. در این پژوهش آلیاژ آلومینیوم Al2014-T6 که کاربرد وسیعی در صنایع هوایی از جمله چرخ هواپیما دارد، با هدف افزایش استحکام و عمر خستگی تحت شوک‌دهی قرار گرفته است. فرایند شوک‌دهی به ترتیب یک بار، سه بار و پنج بار بر روی این آلیاژ اعمال شد تا اثر حالت‌های مختلف شوک‌دهی بررسی شود. در ادامه مقدار تنش پسماند به کمک آزمون پراش اشعه ایکس و تغییرات زبری سطح توسط میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی و سپس آزمون خستگی، کشش و ریز سختی‌سنجی بر روی قطعه انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش تعداد دفعات شوک‌دهی لیزری و به شرط عدم وقوع ذوب و تخریب سطحی، مقدار تنش پسماند فشاری افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش ۳۰۰ درصدی عمر خستگی و ۲۵ درصدی ریزسختی سطح می‌شود؛ همچنین مشخص گردید علاوه بر بهینه‌سازی پارامترها، افزایش دفعات شوک‌دهی نیز می‌تواند زبری سطح و استحکام کششی را دچار تغییر کند.

## Effect of multiple laser shock peening on mechanical properties of aluminum alloy 2014-T6

Amin Shafinejad Bejandi<sup>1</sup>, Alireza Fayazi Khanigi<sup>2</sup>, Masoud Ghermezi<sup>3\*</sup>, Mohammadreza Bayat<sup>3</sup>

1- Department of Material Engineering, Khajeh Nasir Toosi University, Tehran, Iran

2- Department of Material Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Department of AeroSpace Engineering, Shahid Sattari Aviation University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14515/775 Tehran, Iran, Masoudgh1969@ssau.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper

Received: 9 March 2023

First Decision: 3 June 2023

Accepted: 30 June 2023

## Keywords:

Multiple Laser Shock Peening

Residual Stress

Fatigue

Aluminum Alloy 2014-T6

## Abstract

Laser shock peening is a surface optimization operation that leads to the improvement of mechanical properties such as increasing fatigue strength, surface hardness and tensile strength. This improvement of properties can be attributed to the creation of residual stress and cold work done on the surface. In this new method, which is considered as an alternative to the methods of peening and ultrasonic peening waves, there are many influential factors such as power density, percentage of overlap, type of protective layer and number of shocks, etc. In this research, Al2014-T6 alloy, which is widely used in aviation industries, including aircraft wheels, has been subjected to shock peening in order to increase its strength and fatigue life. Single, triple and quintuple shock processes were applied on this alloy to investigate the effect of different shock modes. Next, the amount of residual stress was analyzed with the help of X-ray diffraction analysis and changes in surface roughness by atomic force microscope, and then fatigue, tensile and microhardness tests were performed on the part. The results of the experiments show that with the increase in the number of times of laser shock and under the condition of no melting and surface destruction, the residual compressive stress increases, which leads to a 300% increase in fatigue life and a 25% increase in microhardness of the surface. It was also found that in addition to optimizing the parameters, increasing the shock frequency can also change the surface roughness and tensile strength.

## ۱- مقدمه

جذب لیزر را ادامه می‌دهد تا اینکه زمان پالس به پایان برسد؛ بنابراین در عرض چند نانوثانیه فشار پلاسما تا چندین گیگاپاسکال افزایش یافته و منجر به نفوذ امواج شوک مانند به درون فلز می‌شود. این نوع برهم‌کنش بین پلاسما و سطح ماده بدون پوشش، به‌عنوان "فرسایش مستقیم" شناخته می‌شود [۵]، [۶]. به‌منظور دست یافتن به فشار شوک بیشتر بایستی انبساط پلاسما به تأخیر بیفتد. به همین منظور در فرایند شوک لیزری از روش محدودسازی استفاده می‌شود و سطح فلز با یک لایه جذب رنگ تیره یا فویل آلومینیومی پوشانده و بر روی آن نیز یک لایه شفاف (آب یا شیشه) قرار داده می‌شود. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که لایه شفاف مانند آب، کوارتز یا شیشه موجب افزایش شدت انرژی موج شوک گسترش یافته در ماده تا دو برابر میزان پلاسمای تولید شده در خلأ می‌شود [۶]. زمانی که لیزر تابیده می‌شود از لایه شفاف عبور کرده، به لایه جذب برخورد می‌کند و موجب شکل‌گیری پلاسما می‌شود. این‌گونه برهم‌کنش "فرسایش محدود" نامیده می‌شود که شماتیک آن در شکل ۱ آورده شده است. در این حالت سطح فلز دچار تغییرات حرارتی نمی‌شود و فرایند به‌صورت مکانیکی انجام می‌شود. امواج شوک تولید شده در جسم موجب تغییر فرم پلاستیک ماده در زیرسطح شده تا جایی که منجر به ایجاد تنش پسماند فشاری در فلز می‌شود. فشار بیشتر پالس به معنی بهبود خروجی مورد نظر است، چرا که باعث افزایش مقدار تنش پسماند در عمق بیشتر می‌شود. پوشش‌های فلزی مختلفی مانند آلومینیوم، روی، مس و پوشش‌های آلی به این منظور گسترش یافتند اما در یک مقایسه کلی بین پوشش‌های جذب مرسوم، رنگ سیاه تجاری در دسترس‌تر و مؤثرتر است.

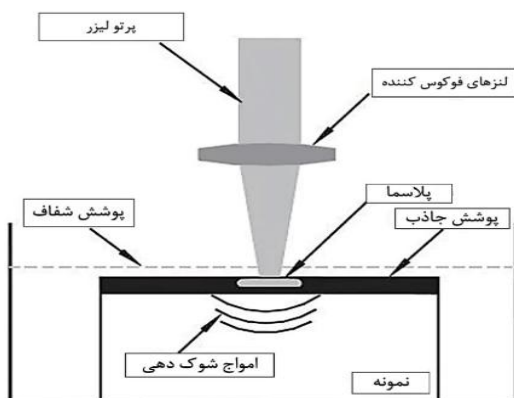


Fig. 1 Schematic of laser shock peening process

شکل ۱ نحوه کار فرایند شوک لیزر [۷]

خستگی به‌عنوان یکی مکانیزم‌های اصلی کاهش طول عمر قطعات و سازه‌های مهندسی شناخته می‌شود. علت اصلی آسیب ناشی از خستگی در مواد فلزی، ایجاد و رشد ترک‌هایی است که در نهایت به نقطه بحرانی می‌رسند و منجر به شکستگی می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که تنش‌های پسماند فشاری مفید می‌توانند نقش مهمی در کاهش نرخ رشد ترک‌های خستگی و کاهش شکست‌های خستگی ایفا کنند. تنش پسماند فشاری با تنش‌های کششی ناشی از اعمال بار به تعادل رسیده و از رشد ترک‌ها و یا شکل‌گیری ریزترک‌ها جلوگیری کرده و در نهایت افزایش عمر قطعات را در پی دارد. به‌منظور کاهش جلوگیری از شکست ناشی از خستگی، فرایندهای مختلفی وجود دارد که به فرایندهای بهبود خواص سطح معروف هستند. از جمله این روش‌ها می‌توان به ساچمه کوبی<sup>۱</sup>، کوبش با امواج ماورای صوت<sup>۲</sup>، شوک‌دهی لیزری<sup>۳</sup> (LSP) و ... اشاره کرد [۱،۲]. در این میان فرایند شوک‌دهی لیزری یک روش نوین می‌باشد که بسیاری از محدودیت‌های روش‌های سنتی مثل ساچمه کوبی را ندارد. کاربرد روش‌های سنتی بهبود خواص سطح به دلیل مشکلاتی نظیر تخریب کیفیت سطح قطعات، عدم یکنواختی تنش‌های پسماند ایجاد شده، محدودیت در دسترسی به نقاط خاص قطعات و عمق تنش پسماند کم (حدود ۰/۲۵ میلی‌متر) محدود می‌باشد. فرایند شوک‌دهی لیزری اثری مشابه فرایند ساچمه‌کوبی 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 کیفیت سطح نهایی قطعات داشته و ایجاد تنش پسماند توسط آن محدود به نواحی خاص قطعات و یا هندسه‌های خاص نیست [۳].

فرایند شوک لیزری می‌تواند برای بهبود و اصلاح خواص مکانیکی متفاوت نظیر عمر خستگی، استحکام سایشی، مقاومت خوردگی، ریز سختی و حتی اصلاح ریزساختار متالورژیکی به کار رود. این فرایند در صنعت هوافضا برای اجزای مختلفی مانند پره توربین، اجزای موتور، شفت‌ها و یاتاقان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. در این فرایند با برخورد یک پرتو شدید لیزر به سطح فلز در زمان بسیار کوتاه (زیر ۵۰ نانوثانیه)، منطقه تحت تابش به حرارتی بیش از ۱۰۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و در نتیجه سطح فلز یونیزه شده و پلاسما تشکیل می‌شود. پلاسما

<sup>1</sup> Shot Peening

<sup>2</sup> Ultrasonic Peening

<sup>3</sup> Laser Shock Peening

برای متحرک‌سازی قطعات از ربات شش درجه آزادی کوکا (شکل ۲) جهت شوک‌دهی نمونه‌ها استفاده شد. مشخصات مکانیکی آلیاژ Al2014-T6 در جدول ۲ آورده شده است. جهت شوک‌دهی، ورق‌هایی از جنس این آلیاژ در ابعاد ۳×۴ سانتی‌متر بریده شدند تا برای انجام آزمون‌های XRD و AFM نیز مناسب باشند. در ادامه بر اساس استاندارد ASTM E606، ۹ عدد نمونه خستگی و بر اساس استاندارد ASTM E8 نیز ۹ عدد نمونه کشش ساخته و عملیات شوک‌دهی بر روی آن‌ها انجام شد.

جدول ۱ مشخصات دستگاه لیزر مورد استفاده در آزمایش

Table 1 Specifications of the laser device used in the experiment

۲ mm	قطر لکه لیزر
دایره	شکل پالس
۱۵ Hz	فرکانس پالس خروجی
۱۰ ns	پهنای پالس
۱۰۶۴ nm	طول موج
۲ J	انرژی هر پالس
مرکز ملی لیزر ایران	شرکت سازنده
Nd:YAG	نوع لیزر



Fig. 2 The laser device and Six degrees of freedom robot Koka used in the research

شکل ۲ دستگاه لیزر و ربات شش درجه آزادی کوکا مورد استفاده در پژوهش

جدول ۲ مشخصات مکانیکی Al2014-T6

Table 2 mechanical properties

Al2014-T6	مشخصات مکانیکی
۰/۳۳	نسبت پواسون
۴۱۴	استحکام تسلیم (MPa)
۱۳%	ازدیاد طول (%)
۱۵۵	سختی (HV)
۴۸۳	استحکام کششی (MPa)
۲/۸	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
۷۰-۸۰	مدول الاستیک (GPa)

عوامل متعددی بر فرایند شوک‌دهی لیزری تأثیرگذار هستند مانند: عرض پالس، انرژی پالس، قطر پرتو، مسیر اسکن، نرخ هم‌پوشانی، منطقه تأثیر و ... [۸-۱۰]. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت فرایند شوک‌دهی لیزری، تعداد دفعات شوک‌دهی است [۱۱]. در مطالعه‌ای که لی و همکاران [۱۲] بر روی شوک‌دهی چندباره فولاد ۳۲۱ انجام دادند، مشاهده کردند که با افزایش دفعات شوک‌دهی از ۱ به ۳ عمر خستگی نیز افزایش می‌یابد؛ در ادامه و پس از بار چهارم شوک‌دهی لیزری به دلیل آسیب لایه جاذب، تخریب سطح قطعه مشاهده شده است. در نتیجه، فرسایش‌های حرارتی منفی و به دنبال آن ذوب سطحی، تنش پسماند فشاری را آزاد و انتشار ترک را تسریع می‌کنند؛ بنابراین، فرایند شوک‌دهی لیزری سه‌گانه به‌عنوان شرایط بهینه برای مقاومت در برابر خستگی این فولاد تعیین می‌شود. در پژوهش‌های دیگری که بیکدل لو و همکاران [۷] روی فولاد زنگ نزن L316، شیانگ فن نی و همکاران [۱۳] روی آلیاژ تیتانیوم TC11، جینگ لی و همکاران [۱۴] روی آلیاژ تیتانیوم TC6 و هوانگ و همکاران [۱۵] روی آلیاژ Al6061-T6، انجام دادند، نتایج مشابهی به دست آوردند.

تاکنون بر روی عمردهی آلیاژ Al2014-T6 به روش شوک‌دهی لیزری و بررسی تأثیر تعداد دفعات شوک‌دهی مطالعه‌ای انجام نشده است. این آلیاژ در صنایع هوایی به‌ویژه چرخ هواپیما از اهمیت و کاربری ویژه‌ای برخوردار است و همواره در معرض بارگذاری سیکلی و شکست خستگی قرار دارد. میزان تأثیرگذاری فرایند شوک‌دهی لیزری در هر آلیاژی منحصر به فرد می‌باشد و به خواص ذاتی ماده نظیر مدول الاستیک، ضریب پواسون، چگالی، استحکام تسلیم دینامیکی، آستانه پلاستیکی الاستیکی ماده<sup>۱</sup> (HEL) و ... بستگی دارد. بنابراین در این پژوهش ابتدا به بهینه‌سازی پارامترهای شوک‌دهی لیزری آلیاژ Al2014-T6 پرداخته و سپس به بررسی همزمان اثر تعداد دفعات شوک‌دهی لیزری بر تنش پسماند سطحی و توپوگرافی سطح پرداخته خواهد شد تا دلایل تغییرات عمر خستگی پرچرخه، سختی و استحکام کششی این آلیاژ نیز بررسی گردد.

## ۲- مشخصات تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام این آزمایش از دستگاه شوک‌دهی لیزری ساخت مرکز ملی لیزر ایران استفاده گردید که مشخصات آن در جدول ۱ و تصویر آن در شکل ۲ آمده است. همچنین در این آزمایش

<sup>1</sup> Hugoniot Elastic Limit

$$I_0 \text{ (GW/cm}^2\text{)} = \frac{E \text{ (J)}}{0.78 \times D^2 \times \tau \text{ (s)}} =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E = 1.8 \text{ , } D = 2.5 \text{ (mm)} \rightarrow I_0 = 3.5 \left( \frac{\text{GW}}{\text{cm}^2} \right) \\ \rightarrow P \approx 1.8 \text{ GPa} \end{array} \right. \quad (4)$$

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، جهت محافظت سطح از پلاسما و جذب بهتر پرتو لیزر، از پوشش جاذب روی سطح استفاده می‌گردد. در منابع این پوشش جاذب با عنوان رنگ سیاه، ورقه آلومینیوم و ... بیان شده است [۱۷]. ابتدا استفاده از نوار چسب وینیل<sup>۱</sup> پیشنهاد شد ولی پس از بررسی‌ها مشخص شد که این نوار چسب میزان بالایی از انرژی لیزر را جذب و از اثرات لیزر بر نمونه‌ها کاسته و شدت شوک لیزری را کاهش می‌دهد. روش بعدی همان‌طور که در منابع نیز پیشنهاد شده بود، استفاده از رنگ سیاه تجاری است [۱۸]. در جدول ۳ درصد ترکیب شیمیایی عناصر مختلف در این آلیاژ آلومینیوم آورده شده است.

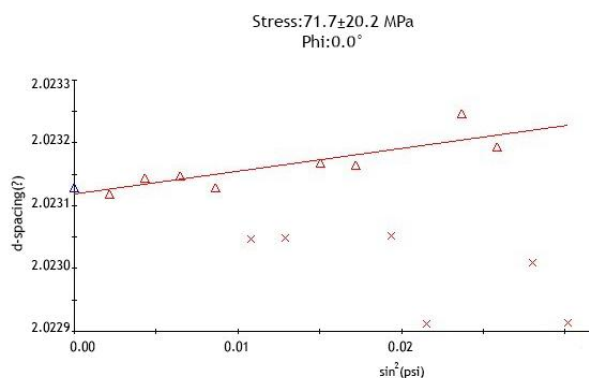
جدول ۳ درصد ترکیب شیمیایی عناصر مختلف در Al-2014 T6

Table 3 percentage of chemical composition (wt%)

۹۰/۴-۹۵	Al
۰/۱ حداکثر	Cr
۳/۹-۵	Cu
۰/۲-۰/۸	Mg
۰/۴-۱/۲	Mn
۰/۵-۱/۲	Si
۰/۱۵ حداکثر	Ti
۰/۱۵ حداکثر	Zn
۰/۷ حداکثر	Fe
<۰/۱۵	Other

### ۳- بحث و نتایج

کلیه نمونه‌های انتخابی تحت زاویه  $45^\circ$  به وسیله دستگاه XRD مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های XRD با نرم‌افزار Xpert Analyse تحلیل شد و اطلاعات زیر که در شکل ۳ آورده شده است، به دست آمد.



الف) قبل از انجام شوک‌دهی لیزری

نمونه‌های خستگی شوک دهی شده در تنش ۲۹۰ مگاپاسکال که در حدود  $0.7 \sigma_y$  فلز پایه است، تحت آزمون خستگی پرچرخه ۴ نقطه‌ای قرار گرفتند.

جهت انجام فرایند شوک‌دهی باید متغیرهای لازم از جمله قطر لکه لیزر و شدت آن را شناسایی و محدوده مناسب را مشخص نمود. برای این منظور با کمک تجهیزات دیگری همچون لنز محدب با فاصله کانونی ۱۰۰ سانتی‌متری و دستگاه ژول‌متر، قطرهای و شدت‌های مختلف لیزر مورد بررسی قرار گرفتند؛ سپس جهت رسیدن به قطر لکه اثر مورد نظر که در اینجا ۲ میلی‌متر است، محاسبات لازم برای تعیین فاصله قرارگیری لنز از قطعه کار انجام گرفت.

در ادامه با مشخص شدن وضعیت اندازه لکه اثر لیزر، متغیر بعدی یعنی شدت لیزر فرودی بررسی شد. برای یک شوک‌دهی مناسب و اعمال اثر بهینه روی یک آلیاژ نیاز است که فشار اوج پلاسمای (P) اعمالی بر روی آن بالاتر از ۲ HEL و در صورت امکان بین ۲-۲/۵ HEL باشد [۷]. به همین منظور و برای AL2014-T6 مقدار HEL از معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$HEL = \frac{1-U}{1-2U} \sigma_y = \frac{1-0.33}{1-2 \times 0.33} 414 \approx 0.815 \text{ GPa} \quad (1)$$

بر این اساس مقدار فشار پلاسمای اعمالی باید بالاتر از ۰.۸۱۵ GPa باشد که در این پژوهش مقادیر ۲/۳ HEL مورد بررسی قرار خواهد گرفت. فابرو [۱۶] در مدل یک‌بعدی پیشنهادی خود برای فشار اوج پلاسما، نحوه محاسبه فشار اوج را به صورت معادله ۲ تشریح کرد:

$$P \text{ (GPa)} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{Z \alpha + 3}} \sqrt{Z \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \text{s}^4} \right)} \sqrt{I_0 \left( \frac{\text{GW}}{\text{cm}^2} \right)} \quad (2)$$

که در آن علاوه بر چگالی توان ( $I_0$ )، امپدانس شوک بین ماده تحت برخورد لیزر و لایه محدودکننده (Z) و بازده واکنش ( $\alpha$ ) نیز تأثیرگذارند. با توجه به آلیاژ Al2014-T6 و همچنین استفاده از لایه محدودکننده آب، معادله ۳ قابل محاسبه می‌باشد:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{Al} = 1.77 \times 10^6 \\ Z_{Water} = 0.165 \times 10^6 \\ \alpha = 0.1 \end{array} \right. \quad \frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{Al}} + \frac{1}{Z_{water}} \rightarrow$$

$$P = 0.968 \sqrt{I_0} \quad (3)$$

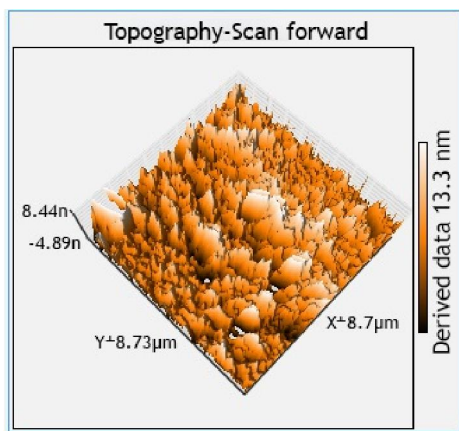
بر این اساس در صورتی که چگالی توان فرایند  $3/5 \text{ GW/cm}^2$  تنظیم شود، فشار HEL ۲/۳ یا ۱/۸ GPa حاصل خواهد شد. برای رسیدن به چگالی توان‌های مورد نظر و بر اساس معادله ۴، می‌توان از تغییر دو پارامتر قطر لکه اثر و انرژی هر پالس استفاده کرد؛ لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها مقدار عرض پالس ( $\tau$ ) ثابت و برابر با ۱۰ ns می‌باشد [۱۶].

<sup>1</sup> Vinyl Tape

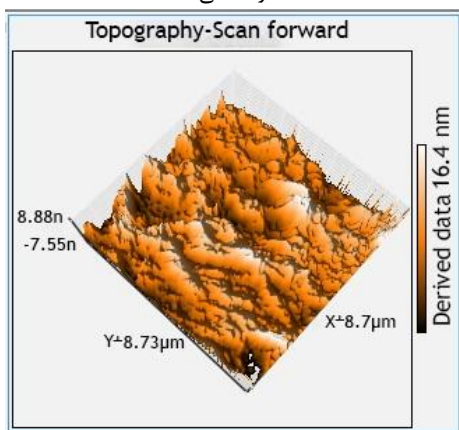
دفعات شوک‌دهی لیزری و کار سرد ایجاد شده در قطعه می‌باشد (شکل ۳-ب و ۳-ج)؛ اما آنچه نمایان است کاهش شیب افزایش تنش پسماند در قطعه با افزایش تعداد دفعات از یک به سه است که در اثر کارسختی در نمونه می‌باشد [۱۹].

در نمونه پنج بار شوک‌دهی لیزری شده (شکل ۳-د)، تنش پسماند کششی در سطح مشاهده می‌شود و شیب نمودار  $\sin^2\alpha$  بر حسب فواصل  $d$  مجدداً مثبت شده است که در اثر تخریب لایه محافظ و به دنبال آن ذوب سطحی و ایجاد یک لایه ذوب مجدد در سطح می‌باشد.

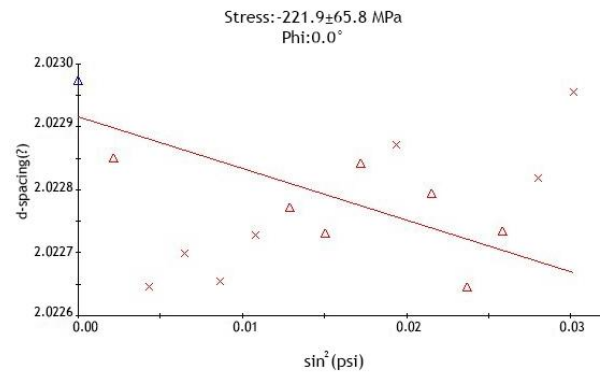
مطالعات توپوگرافی سطح توسط میکروسکوپ نیروی اتمی و با نرم‌افزار Nano surface تحلیل گردید. برای محاسبه عدد زبری ( $R_a$ )، میزان زبری ده خط از روی سطح اندازه‌گیری و میانگین با انحراف از معیار آن‌ها به‌عنوان  $R_a$  مورد نظر گزارش گردید. در بحث خستگی هر فرورفتگی یا دره می‌تواند یک منطقه مستعد تمرکز تنش باشد؛ به همین دلیل  $R_z$  به‌عنوان مجموع ارتفاع قله‌ها و دره‌ها و  $R_v$  به‌عنوان میانگین عمق دره‌ها به‌صورت جداگانه محاسبه شده‌اند. نتایج مطالعات توپوگرافی سطح توسط میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل ۴ و جدول ۴ آورده شده است.



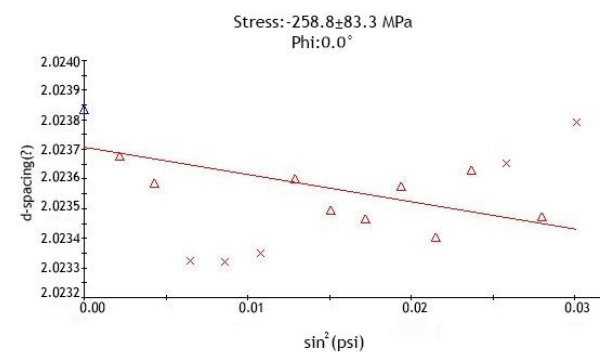
الف) شوک‌دهی نشده



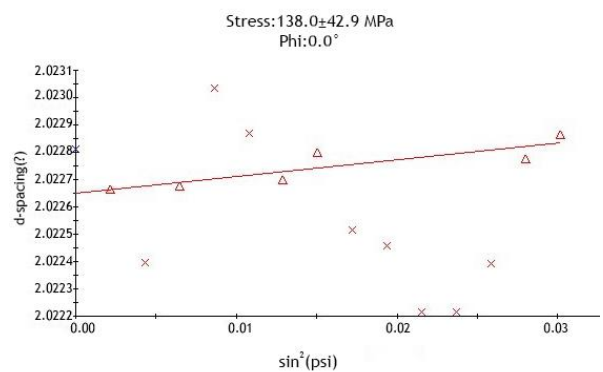
ب) یک‌بار شوک‌دهی شده



ب) پس از یک‌بار شوک‌دهی



ج) پس از سه بار شوک‌دهی



د) پس از پنج بار شوک‌دهی

Fig. 3 XRD test results for different shock modes

شکل ۳ نتایج آزمون XRD برای حالت‌های مختلف شوک‌دهی

همان‌طور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، نمونه قبل از شوک‌دهی دارای ۷۱ مگاپاسکال تنش پسماند کششی است که این مقدار می‌تواند در اثر فرایند آماده‌سازی و یا سنباده و پولیش اولیه قطعات باشد.

در نمونه یک‌بار شوک‌دهی لیزری شده، ۲۲۱- مگاپاسکال تنش ایجاد شده که در اثر موج شوک و تغییرات پلاستیکی است که شوک لیزر در سطح و لایه زیرین آن به وجود آورده است و در نمونه سه بار شوک‌دهی لیزری شده ۲۵۸- مگاپاسکال تنش پسماند فشاری به وجود آمده است که ناشی از افزایش تعداد

محافظ می‌باشد. پس از پنج بار تکرار شوک‌دهی افزایش شدید عدد زبری مشاهده گردید که در اثر از بین رفتن لایه محافظ و ذوب سطحی به وجود آمده در لایه سطحی قطعات می‌باشد که تخریب سطح را به دنبال داشته است.

برای بررسی اثر شوک‌دهی لیزری بر خستگی، نتایج حاصل از شوک به صورت میانگین در جدول ۵ و قطعات آزمون در شکل ۵ آورده شده است.

جدول ۵ نتایج به دست آمده از آزمون خستگی به صورت میانگین

تعداد بار شوک‌دهی	نتیجه آزمون خستگی (میانگین)
قبل از شوک‌دهی	$3-4 \times 10^4$
یک بار شوک‌دهی	$2-3 \times 10^5$
سه بار شوک‌دهی	$6-8 \times 10^5$
پنج بار شوک‌دهی	$4-5 \times 10^5$

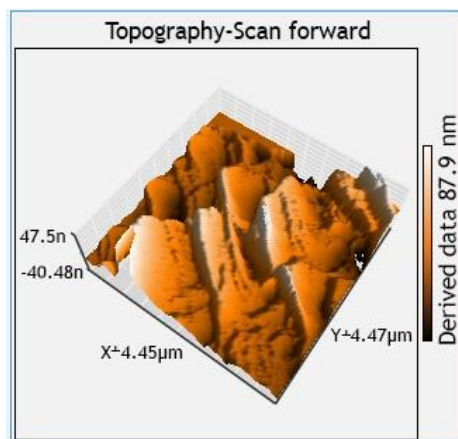


Fig. 5 Fatigue test samples

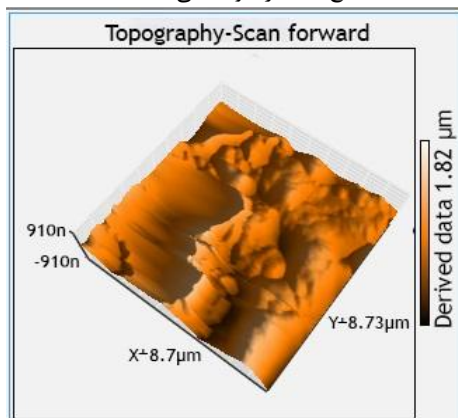
شکل ۵ نمونه‌های آزمون خستگی

عمر خستگی در یک‌بار و سه‌بار شوک‌دهی افزایش چشم‌گیری یافته است که دلیل آن تنش‌های پسماند فشاری به وجود آمده در نمونه و ممانعت از جوانه‌زنی ترک در نزدیکی سطح می‌باشد. در مورد شوک‌دهی پنج‌گانه به دلیل تخریب سطح ناشی از ذوب سطحی و پستی بلندی‌های فراوان ( $R_a$  و  $R_v$  بالا)، مناطق مستعد تمرکز تنش و جوانه‌زنی ترک افزایش یافته که این عامل در کنار تنش‌های پسماند کششی منجر به کاهش عمر خستگی نمونه گردیده است. نتایج تغییرات خستگی در شکل ۶ قابل مشاهده است.

در نمونه پنج بار شوک‌دهی لیزری شده در عمق نمونه، تنش‌های پسماند فشاری به وجود آمده ولی در سطح نمونه به دلیل ذوب سطحی، تنش پسماند کششی و زبری سطح بالایی ایجاد گردیده است. افزایش زبری سطح ( $R_a$  و  $R_v$  بالا) در اثر ذوب لایه سطحی و به وجود آمدن نقاط مستعد تمرکز تنش (دره‌ها) در سطح می‌تواند محلی برای جوانه‌زنی ترک باشند. علاوه بر آن با توجه به وجود تنش پسماند کششی در سطح



(ج) سه بار شوک‌دهی شده



(د) پنج بار شوک‌دهی شده

Fig. 4 AFM test images

شکل ۴ تصاویر آزمون AFM

جدول ۴ نتایج آزمون AFM

نمونه	Ra(nm)	Rp(nm)	Rv(nm)	Rz(nm)
شوک‌دهی نشده	$22 \pm 4$	$56 \pm 15$	$-42 \pm 6$	$98 \pm 21$
یک بار شوک‌دهی	$29 \pm 8$	$69 \pm 14$	$-80 \pm 24$	$149 \pm 38$
سه بار شوک‌دهی	$184 \pm 11$	$294 \pm 18$	$-375 \pm 17$	$669 \pm 35$
پنج بار شوک‌دهی	$384 \pm 14$	$732 \pm 13$	$-705 \pm 33$	$1437 \pm 46$

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، با یک‌بار شوک‌دهی لیزری تغییر چندانی در عدد زبری سطح ایجاد نمی‌شود که در مقایسه با روش ساچمه‌کوبی و دیگر روش‌های کارسرد سطحی کم‌ترین میزان تخریب سطح را نشان می‌دهد و یک مزیت ویژه برای این روش می‌باشد. با افزایش تعداد دفعات شوک‌دهی، میزان زبری سطح افزایش می‌یابد که به دلیل سه برابر شدن میزان کارسرد در سطح قطعه و تحلیل نسبی لایه

و ۵۷۵ مگاپاسکال در ۵ بار شوک‌دهی لیزری رسیده است که نشان می‌دهد اثر شوک‌دهی لیزری بر استحکام کششی اندک بوده و نهایتاً ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش در تنش تسلیم حاصل می‌گردد. علت این امر همان افزایش سختی و بالا رفتن چگالی عیوبی نظیر دوقلویی‌ها در اثر کار سرد می‌باشد که سبب ممانعت در برابر از هم گسیختگی، کشش و تغییر فرم می‌شود.

جدول ۶ نتایج تنش‌های تسلیم به‌دست‌آمده از آزمون کشش (مگاپاسکال)

پنج بار شوک‌دهی	سه بار شوک‌دهی	یک‌بار شوک‌دهی	قبل از شوک‌دهی	آزمون اول
۵۶۱	۵۴۵	۵۳۴	۴۸۶	۵۶۱
۵۶۸	۵۴۹	۵۳۳	۴۷۴	۵۶۸
۵۷۵	۵۴۱	۵۳۵	۴۸۰	۵۷۵

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- نتایج آزمایش‌ها نشان داد که شوک‌دهی لیزری توانایی ایجاد تنش پسماند فشاری در حدود ۲۱۱ مگاپاسکال را دارد که این مهم با افزایش تعداد ضربات تا سه بار شوک‌دهی لیزری امکان افزایش تا ۲۳۸ مگاپاسکال را نیز دارا می‌باشد اما افزایش بیش از اندازه ضربات می‌تواند ذوب سطحی ایجاد کند و تنش پسماند کششی در قطعه به‌جای گذارد.
- این روش کمترین میزان زبری سطح نسبت به سایر روش‌های عمردهی را دارد.
- شوک‌دهی چندباره لیزری توانایی افزایش سختی تا ۲۵ درصد بیشتر از مقدار اولیه را دارا می‌باشد که با افزایش تعداد شوک‌ها این مهم با تغییر در ساختار سطح و ریزدانه‌گی به وجود می‌آید.
- تأثیر شوک‌دهی لیزری بر روی استحکام کششی کمتر از سایر خواص مکانیکی است که در بیشترین حالت در حدود ۲۰ درصد بر تنش تسلیم تأثیر گذاشته است.
- شوک‌دهی چندباره لیزری عمر خستگی را در یک‌بار شوک‌دهی لیزری، ۳ برابر افزایش می‌دهد که این امر می‌تواند با افزایش تعداد دفعات شوک‌دهی به سه بار تا ۷ برابر نمونه اولیه افزایش یابد؛ در ادامه باید در نظر گرفت که در صورت افزایش تعداد دفعات شوک‌دهی به دلیل وقوع ذوب سطحی، افزایش زبری سطح و متعاقباً ایجاد مناطق تمرکز تنش و مستعد رشد ترک از این مقدار بیشینه عمر خستگی کاسته خواهد شد.

به‌جای تنش‌های پسماند فشاری، در نمونه پنج‌بار شوک‌دهی لیزری شده افزایش چشم‌گیری در عمر خستگی به وجود نیامده و نسبت به نمونه سه بار شوک‌دهی لیزری شده عمر کمتری حاصل گردیده است.

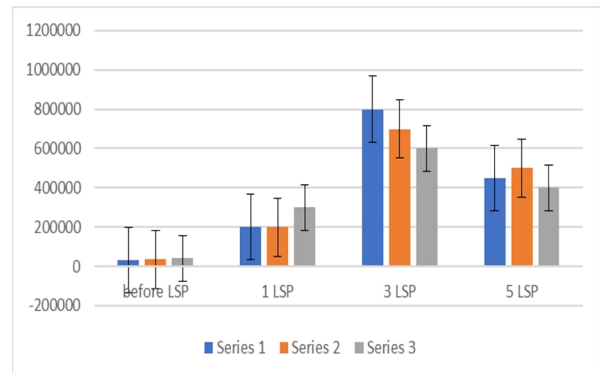


Fig. 6 Fatigue changes results

شکل ۶ نتایج تغییرات خستگی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ریزسختی‌سنجی سطح مطابق با شکل ۷ می‌باشد. همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود به دلیل افزایش میزان کارسرد، میزان ریزدانه‌گی، چگالی عیوب نقطه‌ای و خطی در اثر شوک‌دهی لیزری افزایش می‌یابد که این عیوب به‌عنوان عامل ممانعت‌کننده در برابر فرو رونده از خود مقاومت نشان می‌دهند [۲۱]. در واقع ریزدانه شدن ریزساختار منجر به افزایش چگالی مرزدانه‌ها می‌گردد که این امر موجب کاهش تحرک نابه‌جایی‌ها، برخورد و قفل شدن آن‌ها می‌شود [۲۲].

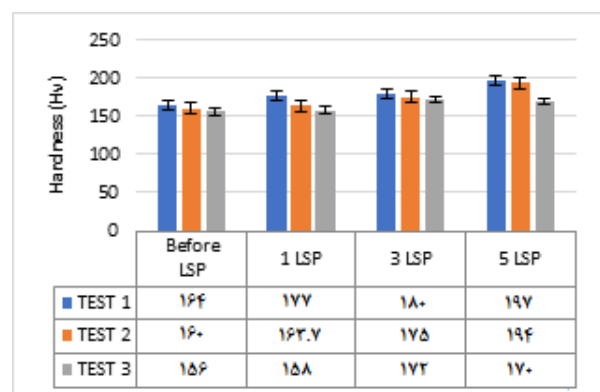


Fig. 7 Surface hardness measurement results

شکل ۷ نتایج حاصل از اندازه‌گیری سختی سطحی

همان‌طور که در جدول ۶ آورده شده است، استحکام کششی از ۴۸۰ مگاپاسکال در نمونه اولیه به ۵۳۵ مگاپاسکال در یک‌بار شوک‌دهی لیزری و ۵۴۱ مگاپاسکال در سه بار شوک‌دهی لیزری

- Applied Fracture Mechanics*, Vol. 105, pp. 102429, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102429>
- [8] S. Adu-Gyamfi, X. Ren, E. A. Larson, Y. Ren, Z. Tong, The effects of laser shock peening scanning patterns on residual stress distribution and fatigue life of AA2024 aluminium alloy, *Optics & Laser Technology*, Vol. 108, pp. 177-185, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.06.036>
- [9] Z. Bergant, U. Trdan, J. Grum, Effects of laser shock processing on high cycle fatigue crack growth rate and fracture toughness of aluminium alloy 6082-T651, *International Journal of Fatigue*, Vol. 87, pp. 444-455, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.027>
- [10] S. Prabhakaran, S. Kalainathan, Compound technology of manufacturing and multiple laser peening on microstructure and fatigue life of dual-phase spring steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 674, pp. 634-645, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.031>
- [11] D. Karthik, J. Jiang, Y. Hu, Z. Yao, Effect of multiple laser shock peening on microstructure, crystallographic texture and pitting corrosion of Aluminum-Lithium alloy 2060-T8, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 421, pp.127354, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127354>
- [12] W. Li, H. Chen, W. Huang, J. Chen, S. An, G. Xiao, S. Zhang, Optimization of multiple laser shock peening on high-cycle fatigue performance of aluminized AISI 321 stainless steel, *International Journal of Fatigue*, Vol. 153, pp. 106505, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106505>
- [13] X. Nie, W. He, S. Zang, X. Wang, J. Zhao, Effect study and application to improve high cycle fatigue resistance of TC11 titanium alloy by laser shock peening with multiple impacts, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 253, pp. 68-75, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.015>
- [14] J. Li, J. Zhou, A. Feng, S. Huang, X. Meng, Y. Sun, Y. Huang, X. Tian, Influence of multiple laser peening on vibration fatigue properties of TC6 titanium alloy, *Optics & Laser Technology*, Vol. 118, pp. 183-191, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.05.007>
- [15] S. Huang, J. Z. Zhou, J. Sheng, K. Y. Luo, J. Z. Lu, Z. C. Xu, X. K. Meng, L. Dai, L. D. Zuo, H. Y. Ruan, H. S. Chen, Effects of laser peening with different coverage areas on fatigue crack growth properties of 6061-T6 aluminum alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 47, pp. 292-299, 2013.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.09.010>
- [16] D. Devaux, R. Fabbro, J. Virmont, Generation of shock waves by laser-matter interaction in confined geometries, *Le Journal de Physique IV*, Vol. 1, pp. 179-182, 1991.  
<https://doi.org/10.1051/jp4:1991747>
- [17] R. Sun, L. Li, W. Guo, P. Peng, T. Zhai, Z. Che, B. Li, C. Guo, Y. Zhu, Laser shock peening induced fatigue crack retardation in Ti-17 titanium alloy, در ادامه چند پیشنهاد جهت بهبود فرایند و نتایج حاصل از آن جهت ادامه تحقیق ارائه می‌گردد:
- انجام آزمون Hole drilling به منظور بررسی عمق تنش پسماند و وضعیت تنش در لایه‌های زیر سطح
  - انجام آزمون‌های مکانیکی خمش و ضربه در شوک‌دهی چندباره لیزری
  - تأثیر فرایند چندباره لیزری بر روی سایش و خستگی کم چرخه
  - تخمین میزان افزایش عمر AL2014-t6 پس از شوک‌دهی لیزری به وسیله فرایندهای شبیه‌سازی
- ۵- مراجع
- [1] M. Abeens, R. Muruganandhan, K. Thirumavalavan, Effect of Low energy laser shock peening on plastic deformation, wettability and corrosion resistance of aluminum alloy 7075 T651, *Optik*, Vol. 219, pp. 165045, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165045>
- [2] B. Dhakal, S. Swaroop, Mechanical properties and deformation dependent microstructural aspects of laser shock peened 7075-T6 aluminum alloy without coating, *Materials Characterization*, Vol. 183, pp. 111620, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111620>
- [3] P. K. Sharp, Q. Liu, S. A. Barter, P. Baburamani, G. Clark, Fatigue life recovery in aluminium alloy aircraft structure, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 25, No. 2, pp. 99-110, 2002.  
<https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2002.00481>
- [4] J. Wang, Y. Lu, D. Zhou, L. Sun, L. Xie, J. Wang, Mechanical properties and microstructural response of 2A14 aluminum alloy subjected to multiple laser shock peening impacts, *Vacuum*, Vol. 165, pp. 193-198, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.03.058>
- [5] J. T. Wang, L. Xie, K. Y. Luo, W. S. Tan, L. Cheng, J. F. Chen, Y. L. Lu, X. P. Li, M.Z. Ge, Improving creep properties of 7075 aluminum alloy by laser shock peening, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 349, pp. 725-735, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.061>
- [6] J. T. Wang, Y. K. Zhang, J. F. Chen, J. Y. Zhou, K. Y. Luo, W. S. Tan, L. Y. Sun, Y. L. Lu, Effect of laser shock peening on the high-temperature fatigue performance of 7075 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering:A*, Vol. 704 ,pp. 459-468, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.050>
- [7] R. Bickdeloo, G. H. Farrahi, A. Mehmanparast, S. M. Mahdavi, Multiple laser shock peening effects on residual stress distribution and fatigue crack growth behaviour of 316L stainless steel, *Theoretical and*



- in 7075-T6 aluminum alloy panel, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 119, pp. 103358, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103358>
- [21] X. Q. Zhang, H. Li, X. L. Yu, Y. Zhou, S. W. Duan, S. Z. Li, Z. L. Huang, L. S. Zuo, Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate, *Materials & Design (1980-2015)*, Vol. 65, pp. 425-431, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.001>
- [22] Z. Ran, Z. Yongkang, S. Guifang, S. Xuting, L. Pu, Finite element analysis of surface roughness generated by multiple laser shock peening, *Rare metal materials and engineering*, Vol. 47, pp. 33-38, 2018.  
[https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(18\)30067-5](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(18)30067-5)
- Materials Science and Engineering: A*, Vol. 737, pp. 94-104, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.016>
- [18] J. Zhang, X. Cheng, Q. Xia, C. Yan, Strengthening effect of laser shock peening on 7075-T6 aviation aluminum alloy, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 12, pp. 1687814020952177, 2020.  
<https://doi.org/10.1177/1687814020952177>
- [19] B. Dhakal, S. Swaroop, Effect of laser shock peening on mechanical and microstructural aspects of 6061-T6 aluminum alloy, *Journal of materials processing technology*, Vol. 282, pp. 116640, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116640>
- [20] X. Zhang, Y. Peng, M. Yang, Y. Du, Z. Wang, Effects of residual stress induced by laser shock peening on mixed-mode crack propagation behavior