



Semnan University



Research Article

Investigating the Effect of Laser Shock Process on Fracture and Fatigue Properties of 2024-T351 Aluminum Alloy Using Numerical Modeling

Javad Pezeshki^a, Danial Ghahremani Moghadam^{b,*} , Massoud Mir^b, Mohammad Ramazani Moghadam^c

^a Msc student, Department of Mechanical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

^b Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

^c Graduated Msc, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 14 April 2023

Revised: 27 May 2023

Accepted: 10 June 2023

Keywords:

Fracture and Fatigue,
Laser Shock Peening,
Numerical Modeling,
Fatigue Crack
Propagation,
Fracture Toughness.

ABSTRACT

One of the most important challenges facing mechanical parts that are exposed to dynamic loads in various industries, such as automotive and aerospace, is their failure due to fatigue. Al-2024 series alloys are widely used due to their high strength-to-weight ratio and high fatigue resistance. Therefore, increasing the fatigue life of structures made of these types of alloys is always one of the most important design issues. In this study, the impact of changes in laser pulse pressure parameters as well as the percentage of overlap of laser effect points in the laser shock process, its effect on the fracture and fatigue behavior of aluminum alloy with the help of numerical modeling methods and also experimental tests were carried out and then evaluated. they got. After examining the results of the fracture tests, it was observed that the fracture toughness of the shocked samples increases by 38%. Also, the fatigue life of the samples treated with this method has been improved by 10-32% in different conditions, and in general, the shock process has been effective in improving the fracture and fatigue behavior of aluminum alloy.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30378.2436>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: d.ghahremani@qiet.ac.ir

How to cite this article:

Pezeshki, J., Ghahremani-moghadam, D., mir, M., & Rramazani moghadam, M. (2023). Investigating the effect of laser shock process on fracture and fatigue properties of 2024-T351 aluminum alloy using numerical modeling. Journal of Modeling in Engineering, 21(75), 67-82. doi: 10.22075/jme.2023.30378.2436

بررسی تأثیر فرآیند شوک دهی لیزر بر خواص شکست و خستگی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 با استفاده از مدل سازی عددی

جواد پزشکی قره‌چه^۱، دانیال قهرمانی مقدم^{۲*}، مسعود میر^۳، محمد رضانی مقدم^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵	یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی قطعات مکانیکی که در صنایع مختلف از جمله خودروسازی و هوافضا در معرض بارهای دینامیکی قرار دارند، شکست ناشی از خستگی در آن‌هاست. آلیاژهای سری ۲۰۲۴-Al به دلیل برخورداری از نسبت استحکام به وزن بالا و همچنین داشتن مقاومت بالا نسبت به خستگی بسیار پرکاربرد شده‌اند. بنابراین افزایش عمر خستگی سازه‌های تشکیل شده از این نوع آلیاژها همواره یکی از مهم‌ترین مسائل طراحی آن‌ها است. در این مطالعه میزان تأثیرگذاری تغییرات در پارامترهای فشار پالس لیزر و همچنین درصد همپوشانی نقاط اثر لیزر در فرآیند شوک دهی لیزری، تأثیر آن بر رفتار شکست و خستگی آلیاژ آلومینیوم با کمک روش‌های مدل سازی عددی انجام شده و سپس مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از بررسی نتایج آزمون‌های شکست، مشاهده شد که چقرمگی شکست در نمونه‌های شوک دهی شده تا ۳۸ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین عمر خستگی نمونه‌های لیزر کاری شده با این روش، به میزان ۱۰ تا ۳۲ درصد در شرایط مختلف بهبود داشته و به‌طور کلی فرآیند شوک دهی در بهبود رفتار شکست و خستگی آلیاژ آلومینیوم تأثیر گذار بوده است.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۶	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰	
واژگان کلیدی:	
شکست و خستگی، شوک دهی لیزری، مدل سازی عددی، رشد ترک خستگی، ضریب شدت تنش.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30378.2436>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

پسماند به صورت تجربی که بر روی خواص خستگی مواد تأثیر گذار هستند [۱-۳]. یکی از مهم‌ترین متغیرهایی که بروز پدیده‌هایی مانند شکست و خستگی را به خود وابسته می‌کنند وجود تنش‌های پسماند در ساختار ماده علاوه بر بار اعمالی بر روی قطعه است. با توجه به نوع و میزان تنش پسماند باقی‌مانده در ساختار قطعه، این تنش می‌تواند برای عمر قطعه مفید یا مضر باشد [۴ و ۵].

بروز پدیده شکست خستگی که در اثر بارگذاری‌های کمتر از استحکام نهایی ماده و بدون اطلاع قبلی به وجود می‌آید یکی از شایع‌ترین عوامل بروز حادثه (شکست) در ساختارهای مکانیکی است. در مطالعات مختلف در این حوزه، روش‌های متفاوتی نیز برای بررسی رفتار خستگی مواد استفاده شده است، نظیر استفاده از بارگذاری‌های چرخه‌ای برای شکست نمونه، همچنین مطالعه تنش‌های

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: d.ghahremani@qiet.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان

۲. استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان

۳. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

استناد به این مقاله:

پزشکی، جواد، قهرمانی مقدم، دانیال، میر، مسعود، & رضانی مقدم، محمد. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر فرآیند شوک دهی لیزر بر خواص شکست و خستگی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 با استفاده از مدل سازی عددی. مدل سازی در مهندسی، ۲۱(۷۵)، ۶۷-۸۲. doi: 10.22075/jme.2023.30378.2436

برای ایجاد امواج ضربه‌ای و تغییر شکل‌های پلاستیک در اهداف فلزی برای اولین بار در سال ۱۹۶۳ در آمریکا صورت گرفت و آزمایش‌های مربوط به این روش در آزمایشگاه شرکت جنرال الکتریک انجام شد [۱۲]. هدف آن‌ها برای این کار افزایش مقاومت پره فن بمب‌افکن‌های راکوی b-1 بود تا زاویه پیشران پره فن بهبود پیدا کند. سپس با توسعه سامانه‌های مورد استفاده در این فرآیند، ساختار لیزر آن بهبود پیدا کرد و مدلی جدید از این فرآیند در سال ۱۹۶۸ مورد استفاده قرار گرفت [۱۳]. پس از آن کاربردهای جدیدی برای این روش استفاده از لیزر در جهت پردازش سطح مواد فلزی ارائه شد، اما به دلیل محدود بودن منابع و تجهیزات لیزری برای استفاده در صنایع مختلف، تا اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی تحقیقات جدیدی از این فرآیند ارائه نشد. در سال ۱۹۶۸ در فرانسه با حمایت گروه خودروسازی PSA^۱ و سایر شرکای صنعتی آن، مطالعات جدیدی درباره فرآیند شوک لیزری آغاز شد [۱۴]. در سال‌های اخیر نیز به سبب مزایای قابل توجه این روش نسبت به سایر عملیات‌های سطحی، بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است تا مدل‌سازی‌های دقیقی برای آن ارائه دهند. همچنین با انجام آزمون‌های مختلف تجربی نیز نسبت به صحت-سنجی مدل‌سازی عددی اقدام می‌شود. در ادامه این بخش برخی از مطالعاتی که در زمینه تأثیرگذاری تنش‌های پسماند فرآیند شوک دهی بر خواص شکست و خستگی انجام شده است، مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

فابرو به همراه همکارانش در تحقیقاتی که در سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۸ انجام دادند، دریافتند در صورتی که از لایه فرسایشی فداشونده بر روی سطح مورد تابش استفاده شود، مطابق شکل (۱) یک فرآیند شوک‌دهی لیزری یا LSP^۲ را می‌توان با یک توالی دو مرحله‌ای توصیف کرد: ۱- انبساط سریع پلازما باعث فشردن شدن تک‌محوری ناگهانی در ناحیه تحت تابش و ارتجاع لایه سطحی می‌شود و ۲- ساختار اطراف به تغییرات واکنش نشان می‌دهند و ناحیه به صورت یک میدان تنش فشاری تغییر شکل پیدا می‌کند [۱۴ و ۱۵].

در سال ۱۹۹۶ پیری و همکارانش مقایسه‌ای بین رفتار خستگی چرخه بالا در نمونه‌های سه آلیاژ مختلف، تحت تأثیر فرآیند SP^۳ و LSP را انجام دادند [۱۴]. در این

وجود تنش پسماند فشاری در شرایطی که بتواند در حین بارگذاری خستگی با تنش‌های کششی ناشی از اعمال بارهای خارجی به تعادل برسد، می‌تواند اثرات آن بارها را کاهش دهد و سبب افزایش عمر قطعه شود. بنابراین استفاده از روش‌ها و عملیات سطحی که به کمک آن‌ها بتوان تنش پسماند فشاری مفیدی در ماده ایجاد کرد، حائز اهمیت است. از طرفی آلومینیوم سری ۲۰۲۴ به دلیل برخورداری از نسبت استحکام به وزن بالا و همچنین داشتن مقاومت بالا نسبت به خستگی کاربردهای مختلفی در صنایع هوافضا و نظامی دارند. بنابراین مطالعه و بهبود رفتار خستگی سازه‌های تشکیل شده از این نوع آلیاژها مهم و مورد توجه است. فرآیند شوک‌دهی لیزری یکی از جدیدترین روش‌های ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعات فلزی است. به علاوه، آلومینیوم سری ۲۰۲۴ باعث کاهش فرکانس لیزر و افزایش عمق حفره می‌شود. این خواص موجب شده است که در بسیاری از موارد از فرآیند شوک دهی لیزری جهت بهبود خواص مکانیکی این آلیاژ استفاده شود [۶].

اساس این روش بهره‌برداری از خاصیت ایجاد فشارهای پلاسمایی بسیار بالا و کوتاه مدت در سطح فلز با کمک لیزر است. این پلازما فشار بسیار بالایی دارد (تا ۱۰ گیگا پاسکال) که از طریق امواج ضربه‌ای به نمونه وارد می‌شود و به صورت پلاستیکی ناحیه نزدیک به سطح را تغییر می‌دهد [۷]. تنش پسماند با این روش در عمق بیشتری ایجاد می‌شود و همچنین دامنه تنش پسماند نیز نسبت به سایر روش‌ها بیشتر است، همچنین تأثیری که بر کیفیت سطح قطعه می‌گذارد به نسبت کمتر از روش‌های مورد اشاره دیگر است. از آنجایی که این فناوری هندسه‌های پیچیده را نیز پوشش می‌دهد انتظار می‌رود که استفاده از آن گسترش پیدا کند [۸]. در این فرآیند می‌توان با تنظیم و بهینه کردن پالس لیزر، به پارامترهای مناسب رسید تا از آن‌ها به جهت تأثیر بهتر فرآیند کوبش لیزری در کاهش نرخ رشد ترک در آلیاژهای مورد نظر نیز رسید.

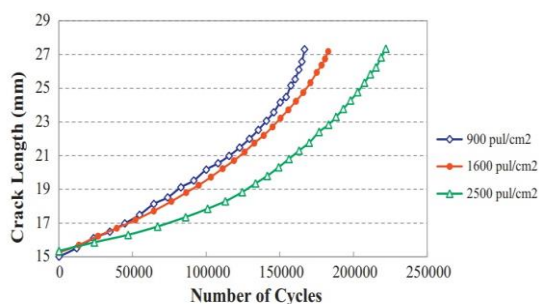
شوک‌دهی لیزری که تقریباً ۶۰ سال پیش ابداع شده، اکنون به عنوان یک روش دقیق و پرکاربرد به عنوان عملیات سطحی و بهبود خواص فیزیکی آلیاژهای مختلف استفاده می‌شود [۹-۱۱]. استفاده از لیزر با انرژی پالسی بسیار بالا

³ Shot Peening

¹ Peugeot Société Anonyme

² Laser Shock Peening

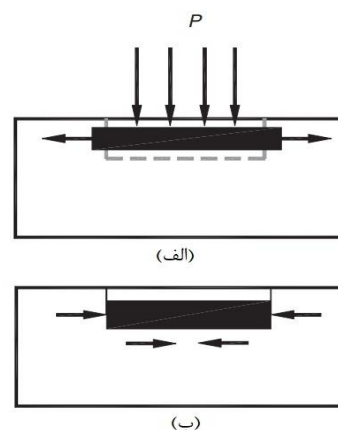
تجربی، روش ابداعی و توسعه یافته عددی خود را مورد صحت سنجی و تأیید قرار دادند و نیز عنوان کردند که تأثیر ایجاد پلاسمای لیزر بر روی سطح امکان دارد برای هر آلیاژ متفاوت باشد و باید در کاربردهای خاص این موضوع مورد توجه قرار بگیرد [۱۸]. در ادامه مطالعات انجام شده در زمینه بررسی تأثیر فرآیند شوک دهی لیزری بر خواص شکست و خستگی مواد، در سال ۲۰۱۱ روبیو گنزالس و همکارانش تأثیر فرآیند LSP بر رشد ترک خستگی فولاد ضد زنگ را بررسی کردند. در این مطالعه مطابق شکل (۲) با انجام آزمون های خستگی و شکست بر روی نمونه های CT^۱، مشخص شد که افزایش میزان چگالی توان تا محدوده مشخصی در فرآیند LSP، شدت رشد ترک خستگی کاهش پیدا می کند [۱۹].



شکل ۲- رشد ترک خستگی آلیاژ فولاد ضد زنگ ۲۲۰۵ با مقادیر مختلفی از چگالی توان لیزر [۱۹]

در همین سیر مطالعاتی در زمینه بررسی تأثیرات LSP بر خواص خستگی فلزات، در سال ۲۰۱۸ سان و همکارانش تأخیر در رشد ترک خستگی در آلیاژ تیتانیوم تحت تأثیر فرآیند LSP را بررسی کردند. در این مطالعه که با اعمال دو مقدار ۲۰ و ۳۰ ژول انرژی برای پالس لیزر انجام گرفت مشخص شد که عمر خستگی می تواند تا ۲/۴ برابر افزایش پیدا کند (شکل-۳). این پژوهش که بر روی آلیاژ Ti-۱۷ انجام شد، مکانیزم تأخیر در رشد ترک بر اساس اندازه ناحیه پلاستیک و افت چگالی انرژی انتشار ترک در نوک آن نیز مورد بحث قرار گرفت و همچنین یک معیار چگالی انرژی نوک ترک برای درک کمی تأخیر رشد ترک خستگی پیشنهاد شد. در نهایت نیز برای صحت سنجی روش های عددی استفاده شده در این مطالعه، نتایج آزمون های تجربی و محاسبات عددی در نرم افزار متلب^۲ در کنار یکدیگر بررسی شدند [۲۰].

تحقیق با کمک نمودارهای تعداد سیکل-طول ترک، مشخص شد که سطح کاری شوک دهی شده نسبت به سطح کاری ساچمه کوبی شده، ۱۲ درصد افزایش عمر بیشتری ارائه می دهد و این روش برای بهبود عمر خستگی چرخه بالا در آلیاژهای A۳۵۶، Al۱۲Si و آلومینیوم ۷۰۷۵ مناسب تر است. مطالعه آن ها محدود به استفاده از یک انرژی پالس ثابت و همچنین درصد همپوشانی ۵۰ بود. سپس در سال ۲۰۰۴ روبیو گنزالس تأثیر شوک دهی لیزری بر رشد ترک خستگی و چقرمگی شکست در آلیاژ آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ را بررسی کرد [۱۶].



شکل ۱- ایجاد تنش پسماند فشاری با LSP: (الف) کشش ناحیه ضربه در طول تعامل، (ب) بازیابی مواد اطراف پس از خاموش شدن پالس لیزر [۱۵]

در سال ۲۰۱۳ لو و همکارانش یک مدل سازی المان محدود برای شبیه سازی اثرات مختلفی از نرخ های همپوشانی، قطر نقطه لیزر و چگالی توان بر میزان تنش پسماند ایجاد شده، توسعه دادند و نتایج شبیه سازی عددی را با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار دادند. در این مطالعه مشخص شد که با افزایش چگالی توان و نرخ همپوشانی نقاط اثر لیزر در آلیاژ Ti-۶Al-۴V، عمق تحت تأثیر تنش پسماند افزایش می یابد [۱۷].

در سال ۲۰۰۷ لیو و همکارانش طی چند مرحله مطالعه تجربی و عددی، اثر چگالی توان لیزر را بر روی رفتار خستگی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بررسی کردند و مشخص کردند در صورتی که چگالی توان در مقابل این آلیاژ از مقدار ۳ تا ۴ گیگاوات بر سانتی متر مربع بیشتر شود، امکان ایجاد ترک های داخلی در نمونه وجود دارد و این باعث کاهش عمر خستگی می شود. همچنین آن ها با انجام آزمون های

² MATLAB

¹ Compact tension specimen

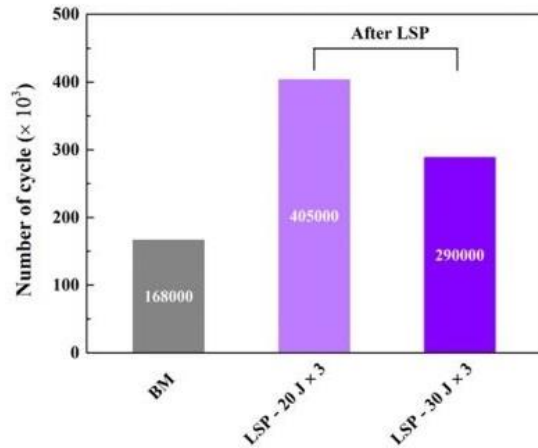
داشته باشد [۲۲]. در همین سال مطالعاتی در رابطه با تأثیر فرآیند LSP بر روی استحکام خستگی خوردگی آلیاژ AA۵۰۸۳ انجام و مشخص شد که در آزمون‌های خستگی ناشی از خوردگی، عمر نمونه‌های شوک‌دهی شده با لیزر، افزایش ۵۹ تا ۶۹ درصدی داشته‌اند [۲۳]. سپس در سال ۲۰۲۲، هو و همکارانش از فرآیند شوک‌دهی لیزری برای بهبود شرایط خستگی بخش جوشکاری شده با آرگون آلیاژ تیتانیوم TA۱۵ استفاده کردند و مشخص شد که رشد ترک خستگی از روی سطح به بخش‌های داخلی منتقل می‌شود. این فرآیند می‌تواند در نسبت تنش‌های ۰/۱ میزان تنش ماکزیمم را تا حدود ۴/۶ برابر و تنش میانگین را تا حدود ۹/۹ برابر بهبود دهد. در این مطالعه روشی جهت محاسبه عددی عمر خستگی استفاده شد و نتایج آن با نتایج حاصل از تست‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص شد نتایج محاسبات عددی و تجربی حداکثر تا ۲۲/۶ درصد و حداقل ۷/۷۸ درصد اختلاف دارند [۲۴].

در مجموع و با توجه به تحقیقات انجام گرفته در سال‌های اخیر می‌توان مشاهده کرد که استفاده از فرآیند LSP برای بهبود رفتار خستگی مواد مختلف کاربرد فراوانی پیدا کرده است. در هر پژوهش، متناسب با شرایط مورد نظر، تأثیر تغییرات یک یا چند پارامتر از فرآیند LSP بر خواص مواد، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه با تمرکز بر بهبود رفتار شکست و خستگی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳۵۱ با فرآیند LSP، با در نظر داشتن تغییرات دو فاکتور فشار پالس و درصد همپوشانی نقاط اثر لیزر اقدام به مدل‌سازی عددی شد تا تأثیر مقادیر مختلفی از پارامترهای فوق، بر خواص شکست و خستگی آلیاژ مورد نظر بررسی شود.

از مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این پژوهش، مشاهده تأثیر مستقیم فرآیند LSP بر بهبود رفتار رشد ترک خستگی آلیاژ آلومینیوم سری ۲۰۲۴ است. به‌طوریکه رفتار خستگی نمونه‌های شوک‌دهی شده در مقایسه با نمونه خام، ۱۲ تا ۳۲ درصد بهبود داشته است. همچنین مشخص شد که تغییر در مقادیر نواحی همپوشانی نقاط اثر لیزر شده نسبت به تغییر در مقادیر فشار پالس لیزر، تأثیرات بیشتری در تغییر رفتار شکست و خستگی آلیاژ مورد مطالعه می‌گذارد.

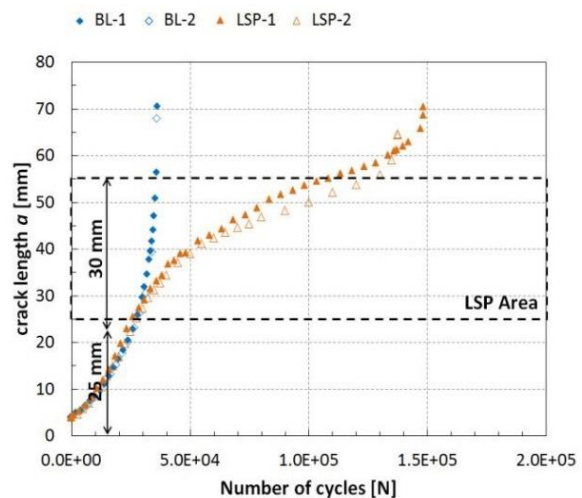
۲- توصیف فرآیند شوک‌دهی لیزری

فرآیند شوک لیزری که هم‌اکنون در صنایع استفاده می‌شود و در این مقاله نیز مورد مطالعه قرار گرفته است، با شلیک



شکل ۳: نمودار تعداد سیکل تا شکست برای نمونه‌های بدون لیزر شده و لیزر شده آلیاژ Ti-۱۷ [۲۰]

در سال ۲۰۱۹ پاون و همکارانش با مطالعه‌ای که بر روی آلیاژ ۲۳۵۱-T۳۵۴ انجام دادند، اثرات تنش پسماند ناشی از شوک‌دهی لیزری را بر رشد ترک خستگی بررسی کردند. در این مطالعه و مطابق شکل (۴)، طول عمر خستگی نمونه‌های لیزر کاری شده تقریباً ۴ برابر نمونه‌های بدون لیزر کاری شده بودند [۲۱].



شکل ۴- نمودار نسبت طول ترک به تعداد سیکل بارگذاری در نمونه‌های بدون لیزر شده و لیزر شده آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳۵۱ [۲۱]

در ۲۰۲۱ لی و همکارانش تأثیر فرآیند LSP برای بهبود عمر خستگی چرخه بالا در آلیاژ فولاد ضد زنگ AISI ۳۲۱ را بررسی کردند. در نتیجه‌ی این مطالعه مشخص شد که نمونه‌ی لیزر شده در مقایسه با حالت بدون لیزر می‌تواند تا ۲۰ درصد نسبت به بهبود رفتار خستگی عملکرد بیشتری

امواج منتشرشده در قطعه سبب تغییر شکل ساختار سطح هدف شده و اگر فشار به حدی باشد که تنش ایجادشده در فلز از حد تسلیم ضربه‌ای ماده یا هوگونیت^۱ (HEL) عبور کند، منجر به ایجاد تنش پسماند فشاری در ساختار آلیاژ می‌شود. مقدار HEL مطابق با رابطه ۱ است [۲۶]:

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

در رابطه بالا، ν ضریب پواسون و σ_Y^{dyn} استحکام تسلیم دینامیکی ماده است.

با استفاده از مدل LSP پیشنهادی توسط فابرو و با در نظر گرفتن پلاسما به عنوان یک گاز کامل، بیشترین فشار پلاسما، P را می‌توان به صورت رابطه ۲ بیان کرد [۱۵]:

$$P_{max}(Gp) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} ZI_0 \quad (2)$$

که در رابطه فوق، I_0 چگالی توان لیزر، α راندمان برهم‌کنش (ضریب که تعیین کننده مقدار انرژی درونی پلاسما نسبت به انرژی گرمایی آن) است و Z امپدانس شوک کاهش یافته بین ماده و فضای محصور متوسط است که از رابطه ۳ بدست می‌آید [۱۴ و ۱۵]:

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{Z_2} \quad (3)$$

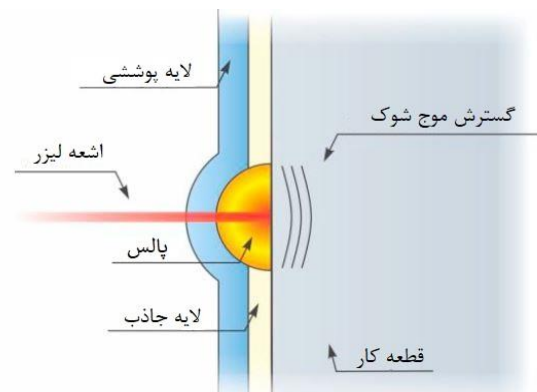
در رابطه بالا Z_1 و Z_2 به ترتیب امپدانس ضربه^۲ ماده و پوشش محدود کننده هستند.

برای به حداکثر رساندن فشار ناشی از پرتو لیزر، پوشش‌های فداشونده جاذب لیزر مانند رنگ یا نوار سیاه و همچنین روکش‌های شفاف مانند آب، به طور عمومی در فرآیندهای LSP استفاده می‌شوند. بخصوص حالت محدود با پوشش آب که حالت محدود آب یا WCM نامیده می‌شود. در صورتی که در فرآیند مورد نظر حالت WCM استفاده شود، رابطه ۲ را می‌توان به صورت رابطه ۴ ساده کرد [۲۲ و ۲۷]:

$$P_{max}(GPa) = 1.02 \sqrt{I_0} \quad (4)$$

چگالی توان لیزر که در منبع [۱۸] با عنوان چگالی توانی برخورد لیزر^۳ نیز شناخته می‌شود، بر اساس رابطه ۵ قابل محاسبه است [۲۸]:

یک پرتو لیزر به سطح هدف آغاز می‌شود. پس از خروج پرتو از چشمه نور، برخورد شدید لیزر به سطح موردنظر در مدت زمان بسیار کوتاه (۱۰ تا ۳۰ نانوثانیه) اتفاق می‌افتد. منطقه مورد برخورد اشعه دچار افزایش دمای ناگهانی بیش از ۱۰۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود که در نتیجه، سطح فلز یونیزه شده و پلاسما تشکیل می‌شود. پلاسما جذب لیزر را ادامه می‌دهد تا اینکه پالس به اتمام برسد. بنابراین، در عرض چند نانو ثانیه فشار پلاسما تا چندین گیگا پاسکال افزایش یافته که منجر به نفوذ امواج شوک مانند به درون فلز می‌شود. این نوع برهم‌کنش بین پلاسما و سطح ماده بدون پوشش به عنوان فرسایش مستقیم شناخته می‌شود. به منظور دست یافتن به فشار شوک بالا باید با روش‌هایی انبساط پلاسما را به تأخیر انداخت. برای اینکار از روش محدودسازی می‌توان استفاده کرد. همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، سطح هدف با یک لایه جاذب پوشانده شده و بر روی آن نیز یک لایه محدود کننده شفاف (معمولاً آب) قرار می‌گیرد که اشعه با عبور از لایه شفاف به لایه جاذب برخورد کرده و به تبع آن لایه فداشونده (معمولاً رنگ سیاه تجاری) تبخیر و موجب ایجاد پلاسما می‌شود. این حالت از برهم‌کنش فرسایش محدود نامیده می‌شود و می‌تواند فشار پلاسما را تا چند گیگا پاسکال (۱۰ گیگا پاسکال) افزایش دهد که انبساط هیدرودینامیکی آن سبب انتشار موج ضربه‌ای در قطعه خواهد شد [۱۹، ۱۵ و ۲۵]. در این مقاله برای رسیدن به مقادیر بالای فشار شوک لیزر از روش فرسایش محدود استفاده می‌شود و در ادامه، تمامی توضیحات بر پایه این روش خواهند بود.



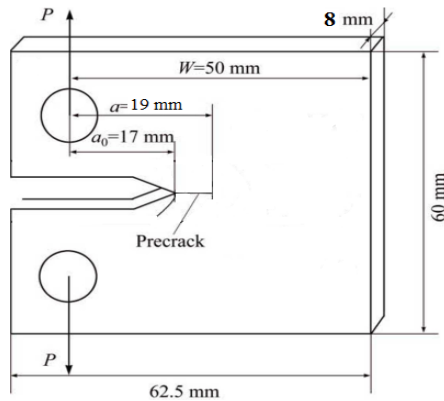
شکل ۵- شماتیک نحوه ایجاد پلاسما در فرآیند شوک‌دهی لیزری [۲۵]

³ Incident Power Density

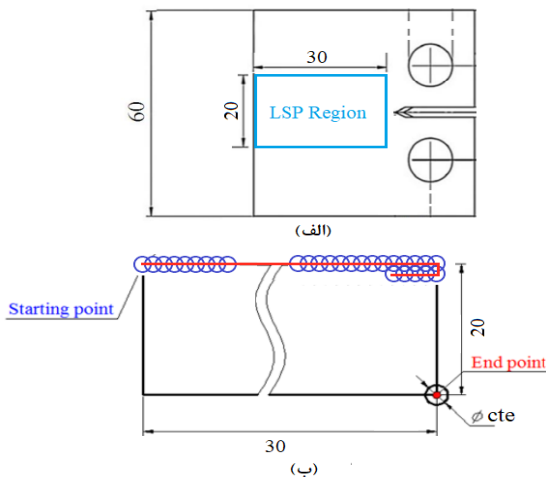
¹ Hugoniot Elastic Limit

² Shock impedance

ترک خستگی قرار بگیرد تا تأثیرگذاری از این عملیات سطحی قابل مطالعه باشد. در شکل (۷-الف) محدوده مورد نظر برای لیزر کاری بر اساس مسیری که از حرکت ترک در تحقیقات پیشین مشاهده شده است، مشخص شده است. همچنین برای یکسان‌سازی الگوی لیزر کاری در قطعه، نحوه حرکت شوک‌دهی لیزری بر روی قطعه در شکل (۷-ب) مشخص شده است. این الگو به گونه‌ای طراحی شده است که در بخش جلویی از پیش‌ترک اولیه که بیرون از ناحیه LSP است، همپوشانی‌های نقاط اثر اتفاق افتاده باشد. این سطح از محدوده جهت LSP بر اساس مراجع [۱۹] و [۲۰]، با در نظر داشتن این مورد که قطعه پس از بازشدگی دهانه ترک تا حد مشخصی دچار شکست سریع ترد می‌شود، تعیین شده است.



شکل ۶- ابعاد نمونه CT آزمون‌های شکست و خستگی



شکل ۷- الف) ناحیه لیزر کاری بر روی نمونه CT، ب) الگوی لیزر کاری

مطالعه رفتار رشد ترک در بخش لیزر شده نیازمند المان-بندی در ابعاد بسیار کوچک است که این مورد باعث تأخیر

$$I_0 = \frac{E_p}{\tau A} \quad (5)$$

که در آن، E_p انرژی پالس لیزر، τ عرض (مدت زمان) پالس لیزر و A مساحت مقطع پرتو لیزر است. با آشنایی با فرآیند شوک‌دهی لیزری و همچنین روابط حاکم بر فاکتورهای مختلف آن، می‌توان مدل‌سازی عددی آن را انجام داد، در ادامه درباره نحوه انجام مدل‌سازی این فرآیند بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳۵۱ توضیح داده خواهد شد.

۳- شبیه‌سازی عددی فرآیند LSP

استفاده از یک روش عددی در محاسبات طراحی پیش از ساخت مدل‌های مهندسی در مباحث مکانیک تأثیر بالایی در کاهش هزینه و زمان طراحی دارد. در این بین، روش المان محدود با داشتن مزیت‌های قابل‌ملاحظه نسبت به سایر روش‌ها و همچنین پشتیبانی این روش در نرم‌افزارهای مختلف طراحی به کمک کامپیوتر^۱ (CAD) کاربرد بیشتری پیدا کرده است. در روش اجزای محدود، غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم و با کمینه نمودن انرژی پتانسیل حل می‌شوند. روش کار بدین صورت است که کل مدل هندسی به اجزای کوچک‌تری به نام المان تقسیم می‌شود. هر المان خود دارای گره‌هایی است که مقادیر ورودی (بارگذاری‌ها و شرایط مرزی) و خروجی‌ها به آن‌ها اختصاص داده می‌شود [۲۹]. بنابراین، در این فرآیند به کمک روش المان محدود، اقدام به مدل‌سازی فرآیند LSP بر روی آلیاژ آلومینیوم در نرم‌افزار آباکوس^۲ خواهد شد و سپس با شبیه‌سازی آزمون‌های شکست و خستگی بر روی نمونه‌ها، تأثیر فرآیند شوک‌دهی لیزری مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۱- مدل‌سازی قطعه و خواص مکانیکی آن

نمونه‌ای که در این مطالعه برای مطالعه رفتار شکست و خستگی مورد نظر است، از نوع کششی-فشاری^۳ یا CT می‌باشد که مشخصات آن در شکل (۶) آورده شده است. هندسه این مدل بر اساس ابعاد مطرح شده در استاندارد ASTM E-۶۴۷ است [۳۰].

مدل‌سازی یک قطعه سه‌بعدی در ماژول پارت نرم‌افزار آباکوس قابل انجام است. در این بخش ذکر این نکته مهم است که نواحی مربوط به لیزر کاری باید در محدوده رشد

³ Compressive-Tensile

¹ Computer Aided Design

² ABAQUS

که در این رابطه $\bar{\sigma}$ تنش وون میسر، $\bar{\epsilon}_{pl}$ کرنش پلاستیکی معادل، $\bar{\epsilon}_0$ و $\bar{\epsilon}_{pl}$ به ترتیب نرخ‌های کرنش فعلی و اولیه هستند. همچنین T_m دمای ذوب ماده و T_0 دمای انتقالی است که در پایین تر از آن استحکام ماده هیچ وابستگی به دما ندارد. در نهایت نیز پنج پارامتر A, B, n, C و q پنج ثابت ماده هستند که باید با آزمایشات کالیبره شوند. برای محاسبه هر یک از پارامترهای مورد اشاره، پژوهش‌های مختلفی با دقت‌های بالا انجام گرفته شده و مقادیر آن‌ها در مقالات مختلف برای هر آلیاژ، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در تمام مراحل شبیه‌سازی فرآیند شوک دهی لیزری از مدل جانسون-کوک استفاده شده است که مقادیر پارامترهای آن برای آلیاژ ۲۰۲۴-T351-Al در جدول ۱ ارائه شده است [۳۳]:

جدول ۱- مقادیر ضرایب رابطه جانسون-کوک برای آلیاژ ۲۰۲۴-T351-Al [۲۷ و ۲۶]

مقدار	پارامتر
۲۶۵	A (MPa)
۴۲۶	B (MPa)
۰/۳۴	n
۰/۰۰۸۳	C
۱/۷	q
۱	$\bar{\epsilon}_0$ نرخ کرنش اولیه،

با توجه به اینکه برای ایجاد تنش پسماند پایدار باید فشار نقطه اثر لیزر با کمک پارامترهایی همچون حد الاستیک هوگونیوت (حد تسلیم ضربه‌ای، HEL) و تنش تسلیم دینامیکی ماده مورد محاسبه قرار بگیرد، لازم است برخی از خواص مکانیکی ماده، مشخص باشند. در جدول ۲ خواص مکانیکی آلیاژ ۲۰۲۴-T351-Al آمده است [۳۴]:

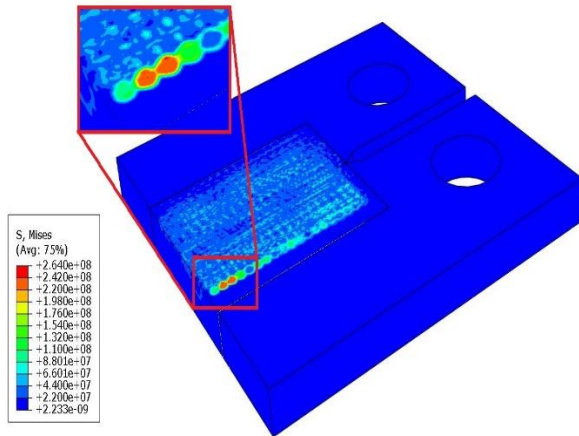
جدول ۲- خواص مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴-T351 [۳۴]

مقدار	پارامتر
۳۲۴	تنش کششی تسلیم (MPa)
۴۲۹	تنش کششی نهایی (MPa)
۰/۳۱	ضریب پواسون
۷۷/۵	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۶	حد الاستیک هوگونیوت (GPa)
۰/۳۴	تنش تسلیم دینامیکی (GPa)

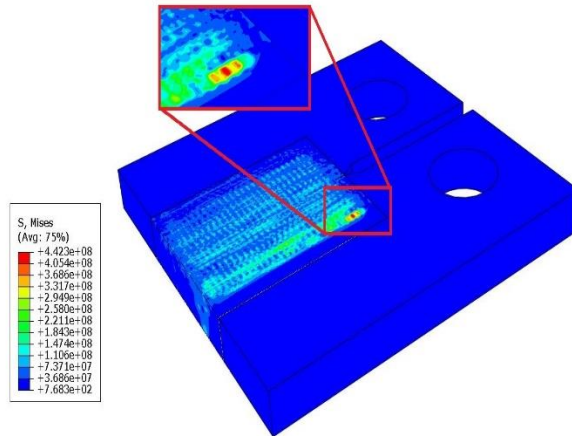
در ارائه داده‌ها از طرف پردازشگر سیستم نرم‌افزاری خواهد شد. بنابراین، برای کاهش زمان شبیه‌سازی، بخش مورد نظر برای عملیات شوک دهی لیزری به صورت جداگانه مش‌بندی ریزتری نسبت به سایر بخش‌های نمونه دارد. همچنین مسئله استقلال مش انجام شده و بنابر داده‌های خروجی و با توجه به محدودیت‌های محاسباتی، مسئله با المان‌هایی با سایز ۰/۱۶ میلی‌متر در ناحیه LSP و در نواحی دیگر با سایز ۲ میلی‌متر با المان‌هایی از نوع C3D8R که یک المان مکعبی خطی هشت گره‌ای با فرمولاسیون انتگرالی کاهش یافته می‌باشد، دانه‌بندی و شبیه‌سازی شد. همچنین، در جهت ضخامت نیز تا عمق ۱ میلی‌متری در ناحیه مورد نظر برای LSP، المان‌هایی با ابعاد ۰/۱۶ میلی‌متر در نظر گرفته شدند، به طوری که بخش‌های نزدیک به سطح المان‌های ریزتری داشته باشند، در نهایت کل قطعه با ۵۷۵۸۶۴ المان C3D8R شبکه‌بندی شده است. در شکل (۸) نهایی مش‌بندی شده از نمونه مورد نظر آورده شده است.

همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، طی یک کوبش لیزری، تغییر شکل پلاستیک بر اثر امواج شوک ناشی از برخورد لیزر با سطح ماده اتفاق می‌افتد. این امواج که باعث ایجاد تنش‌هایی بالاتر از حد الاستیک ماده می‌شوند که با نام امواج پلاستیک نیز شناخته می‌شوند. این امواج سبب ایجاد نرخ کرنش‌های قابل توجهی در سطح ماده می‌شوند. برای مطالعه یک فرآیند مهندسی بر روی یک قطعه با کمک شبیه‌سازی، نزدیک کردن خواص فیزیکی آن با مدل واقعی نمونه بسیار حائز اهمیت است. جهت رسیدن به این هدف مدل‌های مختلفی توسط محققان ارائه شده است. یکی از پرکاربردترین و دقیق‌ترین مدل‌ها که در مطالعات ضربه نیز بیشتر مورد استفاده قرار گرفته شده، مربوط به مدلی است که جانسون و کوک در سال ۱۹۸۶ مطرح کردند [۲۴ و ۲۵]. این مدل جریان تنش در ماده را به عنوان نتیجه‌ای از سه عامل کرنش سختی، نرخ کرنش وابسته و جملات دمایی طبق رابطه ۶ توصیف می‌کند [۳۳]:

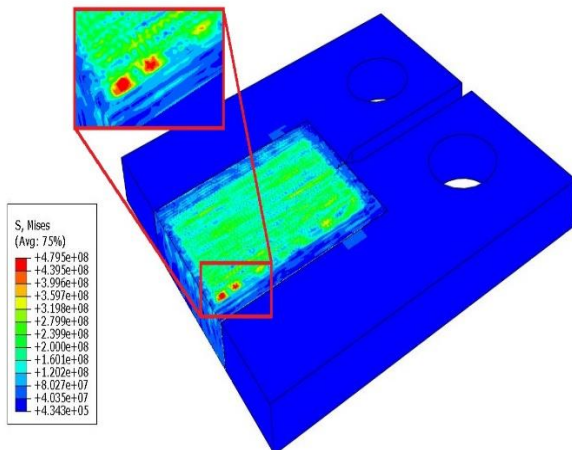
$$\bar{\sigma} = \left[A + B \bar{\epsilon}_{pl}^n \left[1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right] \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^q \right] \quad (6)$$



شکل ۸- توزیع تنش در انتهای عملیات لیزر کاری سطح نمونه بر اساس ترکیب اول جدول ۳



شکل ۹- توزیع تنش در انتهای عملیات لیزر کاری سطح نمونه بر اساس ترکیب دوم جدول ۳



شکل ۱۰- توزیع تنش در انتهای عملیات لیزر کاری سطح نمونه بر اساس ترکیب سوم جدول ۳

۲-۳- بارگذاری شوک لیزری

در این مطالعه، تأثیر سه ترکیب مختلف از پارامترهای فرآیند شوک‌دهی لیزری بر روی رفتار شکست و خستگی بررسی می‌شود، مقادیر مورد نظر برای هر یک از پارامترهای فرآیند شوک‌دهی لیزری در جدول ۳ آورده شده است:

جدول ۳- مقادیر پارامترهای فرآیند LSP

ترکیب‌های مقادیر	همپوشانی نقاط اثر لیزر (%)	فشار پالس لیزر (GPa)
ترکیب اول	۰	۲/۰۴
ترکیب دوم	۳۰	۲/۶۰
ترکیب سوم	۶۰	۳/۰۶

با توجه به اینکه مدت زمان بارگذاری در فرآیند شوک‌دهی لیزری بسیار کم و همچنین نرخ کرنش در آن بسیار بالاست، بارگذاری به فرآیندی دینامیکی تبدیل شده است. بنابراین نحوه تحلیل در نرم‌افزار آباکوس در دو مرحله تحلیل بارگذاری دینامیکی و تحلیل تعادل استاتیکی انجام می‌شود. در طی مرحله اول شبیه‌سازی بارگذاری کامل فشار لیزر در مدت زمان کوتاهی تا زمانی که تغییر فرم پلاستیک ایجاد شود، انجام می‌شود. در مرحله دوم، برای انجام تحلیل تعادل استاتیکی و یافتن میدان تنش پسماند فشاری نیز با استفاده از حل استاندارد آباکوس به این صورت استفاده می‌شود که حالت نهایی مدل پس از پایان تحلیل دینامیک در حلگر صریح آباکوس، با جایگزین نمودن مرحله دینامیک با استاتیک، شبیه‌سازی انجام می‌شود که نتیجه آن، تعیین تنش پسماند در قطعه بر اثر فرآیند شوک‌دهی لیزری است.

با توجه به توضیحات فوق و در نظر داشتن یک محدوده ۲ میلی‌متری از قسمت برش خورده برای ایجاد پیش ترک اولیه خارج از محدوده لیزر کاری، شبیه‌سازی فرآیند LSP با در نظر داشتن حالات مختلف جدول ۳ بر روی نمونه CT انجام گرفت و در بخش‌های بعدی اقدام به بررسی نحوه رشد ترک و تأثیر آن بر خواص شکست و خستگی آلیاژ این نمونه‌ها، در اثر تنش پسماند ناشی از این بخش می‌شود. در شکل (۹)، شکل (۱۰) و شکل (۱۱)، تصویر نمونه بعد از LSP در محیط آباکوس آورده شده است.

۴- شبیه‌سازی آزمون‌های شکست و خستگی

همان‌طور که در بخش اول قبل اشاره شد، تنش پسماند فشاری ناشی از عملیات شوک لیزری بر روی قطعه، سبب تغییر در رفتار شکست و خستگی قطعه خواهد شد. برای مطالعه تأثیر پارامترهای ذکر شده در جدول ۳، در ادامه این بخش دو آزمون شکست و خستگی به ترتیب و بر اساس استانداردهای ASTM E-۶۴۷ و ASTM E-۳۹۹ بر روی نمونه‌های شوک‌دهی شده، مدل‌سازی خواهد شد و نحوه تأثیرگذاری تغییرات در پارامترهای مورد نظر بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-T351 به صورت عددی بررسی می‌شود [۳۵].

۴-۱- مدل‌سازی فرآیند شکست مکانیکی

شکست مکانیکی در یک قطعه زمانی پدید می‌آید که بعد از ایجاد ترک و بارگذاری بر روی قطعه، انتشار آن ناگهانی و سریع باشد. مودهای بارگذاری که بر روی یک قطعه اتفاق می‌افتد تا در آن منجر به شکست ساختار شود، سه حالت اصلی دارد که جهت یک ترک را نسبت به بارگذاری مشخص می‌کنند. ترک را می‌توان منحصراً در یک حالت بارگذاری، بررسی کرد اما ترکیبی از این سه حالت نیز امکان دارد اتفاق بیفتد [۳۶]. حالت I، حالت باز نامیده می‌شود و شامل یک تنش کششی است که سطوح ترک را از هم جدا می‌کند. حالت II، حالت لغزشی است و شامل یک تنش برشی است که سطح ترک را در جهت موازی با بعد ترک اولیه می‌لغزاند. حالت III نیز، حالت پارگی است و شامل تنش برشی است که سطح ترک را در جهت عمود بر بعد ترک اولیه می‌لغزاند [۳۶ و ۳۷]. در اکثر تجزیه و تحلیل‌های مهندسی، مود اول بارگذاری در نظر گرفته می‌شود زیرا این مود بدترین حالت است و همچنین رایج‌ترین آن‌ها است. در این مطالعه نیز مود اول در تمامی آزمون‌های و شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود.

ضریب شدت تنش یک فاکتور مفید برای توصیف میدان تنش در نزدیکی نوک ترک است. برای بارگذاری حالت I، مقدار این ضریب مطابق رابطه ۷ قابل محاسبه است:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

که در آن K_I ، ضریب شدت تنش، σ ، تنش اسمی و a اندازه طول ترک است.

هنگامی که ضریب شدت تنش به حالت بحرانی (K_{IC}) برسد، شکست اتفاق می‌افتد که در این حالت K_{IC} نماد چقرمگی شکست است و در بررسی رفتار شکست مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. چقرمگی شکست، ضریب شدت تنش بحرانی ترک تیزی است که در آن، انتشار ترک به‌طور ناگهانی و نامحدود می‌شود. چقرمگی شکست یکی از ویژگی‌های فیزیکی مواد است که به تنش بحرانی و طول اولیه ترک وابسته است و برای رشد ترک تحت بارهای استاتیکی تعریف می‌شود. چقرمگی شکست در حالت کرنش صفحه‌ای، K_{IC} ، معیاری از میزان مقاومت ترک در برابر رشد ترک برای شرایط مود اول بارگذاری، نرخ بارگذاری پایین، شرایط الاستیک خطی و ناحیه پلاستیک در نوک ترک را نشان می‌دهد.

برای مطالعه عددی ضریب شدت تنش در سه حالت جدول ۳، نمونه CT لیزر کاری شده، تحت بارگذاری کششی در محل سوراخ‌های (شکل ۶) قرار می‌گیرد و ضریب شدت تنش آن را می‌توان تعیین نمود. در مدل‌سازی فعلی یک پیش‌ترک در انتهای نمونه CT در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه ضریب شدت تنش نوک ترک از روش کانتور انتگرال^۱ در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است و تعداد ۸ کانتور برای محاسبه این ضریب درخواست داده شد تا در خروجی نرم‌افزار قابل دریافت باشد.

۴-۱- مدل‌سازی فرآیند خستگی

در تحلیل‌های مربوط به استحکام قطعات در برابر بارگذاری‌های استاتیکی، پدید شکست زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی اعمالی به قطعه بیشتر از حد استحکام ماده باشد و تغییرات در ماده را از حالت الاستیک وارد محدوده پلاستیک کند. اما در بسیاری از قطعات مکانیکی با توجه به اینکه بارگذاری بسیار کمتر از حد تسلیم ماده است، قطعه پس از طی چند بارگذاری تناوبی دچار شکست می‌شود. در این حالت شکست در قطعه از ناحیه‌ای آغاز می‌شود که یک ترک اولیه کوچک در ساختار قطعه وجود داشته باشد و بر اثر تمرکز تنش در آن ناحیه ترک به تدریج رشد کرده و بزرگ می‌شود. به این شکست که در اثر بارگذاری‌های متناوب اتفاق می‌افتد شکست خستگی گفته می‌شود.

پیش از بررسی شیوه مدل‌سازی خستگی در نرم‌افزار

¹ Countour Integral

و نسبت $R = K_{\min}/K_{\max}$ هستند. در نمودار شکل ۱۲ در ناحیه اول مقدار ΔK آستانه رشد ترک را که مقدار متناظر برای راه‌اندازی رشد ترک است، می‌توان مشخص کرد. در ناحیه سوم نیز مقدار نیروی متناظر، با ضریب شدت تنش بحرانی سیکلی شدت می‌یابد.

طول عمر یک قطعه ترک خورده معمولاً به‌عنوان تعداد چرخه‌هایی که طول می‌کشد تا ترک از شرایط اولیه به شرایط بحرانی رشد کند، بیان می‌شود. راه‌های مختلفی برای تعیین طول عمر یک قطعه در مسائل ساده شده، وجود دارد.

همان‌طور که اشاره شد برای مدل‌سازی یک فرآیند خستگی نیاز است تا بارگذاری بر روی قطعه به‌صورت متناوبی و با نیرویی به مراتب کمتر از بارگذاری بحرانی اعمال شود. بنابراین در این شبیه‌سازی نیرویی که به نمونه وارد می‌شود به‌صورت کششی و تناوبی $0.6/6$ کیلو نیوتن تا 6 کیلو نیوتن در نظر گرفته خواهد شد. بنابراین نسبت بارگذاری در این شبیه‌سازی خستگی در نرم‌افزار آباکوس 0.1 است.

در بخش بارگذاری نرم‌افزار، حداکثر بار به اندازه 6000 نیوتن در نظر گرفته می‌شود و سپس برای تناوبی کردن بارگذاری، تنظیمات طوری انجام می‌شود که در لحظه اولیه صفر، مقدار بارگذاری 600 نیوتن باشد و بعد به تدریج افزایش می‌یابد تا در نیمه سیکل بارگذاری به مقدار 6000 نیوتن برسد. سپس، با کاهش متناسب با زمان افزایش نیمه اول سیکل، در انتهای زمان مورد نظر برای یک سیکل، دوباره نیروی بارگذاری به 600 نیوتن باز خواهد گشت. تکرار این فرآیند بر روی قطعه شبیه به بارگذاری دامنه ثابتی است که در برخی از شرایط در قطعات مکانیکی مختلف اتفاق می‌افتد.

تنش‌های محلی در نوک ترک را می‌توان با استفاده از تغییرات ضریب شدت تنش ΔK و بر اساس رابطه ۸ تعریف کرد. بنابراین تنش‌های محلی در نوک ترک با استفاده رابطه ۱۰ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} K_{\min} &= \beta \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} \\ K_{\max} &= \beta \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} \\ \Delta K &= \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (10)$$

نرخ رشد ترک در اثر خستگی بر سیکل da/dN ، با تغییرات ضریب شدت تنش در ناحیه خطی به‌صورت رابطه ۱۱ بیان

آباکوس نیاز است که برخی از مقدمات و روابط اصلی که در تحلیل رفتار خستگی یک ماده مورد استفاده قرار می‌گیرند بررسی شود که در ادامه این بخش مروری کوتاه بر نحوه تحلیل شکست با توجه به نمودارهای قابل‌دستیابی از آباکوس انجام خواهد شد.

رفتار خستگی ناشی از بارگذاری تناوبی یک ماده را می‌توان با نمودارهای ضریب شدت تنش و همچنین مقایسه بین میزان رشد ترک و تعداد سیکل‌های بارگذاری، مورد بررسی قرار داد. در مطالعه خستگی مانند بحث شکست، شرایط مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ (LEFM) بکار می‌رود. بنابراین، شرایط نوک ترک در هنگام خستگی را نیز می‌توان با استفاده از ضریب شدت تنش تعریف کرد. در این شرایط تأثیر تاریخچه بارگذاری و یا آثار بسته شدن دهانه ترک^۲ در نظر گرفته نمی‌شود.

زمانی که یک بار چرخه‌ای^۳ به یک ماده اعمال می‌شود، محدوده شدت تنش طبق رابطه ۸ زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

که ΔK دامنه شدت تنش، Y یک فاکتور هندسی بدون بعد وابسته به هندسه ترک، σ تنش اعمال‌شده و a اندازه ترک است. شدت تنش نوسانی عاملی در سرعت رشد ترک است. هنگامی که یک محدوده شدت تنش (ΔK) در اثر تعدادی چرخه (ΔN) ایجاد می‌شود، این باعث رشد مشخصی از ترک در محدوده (Δa) می‌شود [۳۴ و ۳۷].

در شکل فوق نمودار نرخ رشد و دامنه شدت تنش در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی رسم شده است. در این نمودار، معمولاً یک ناحیه خط مستقیم از da/dN در محدوده‌ای از مقادیر ΔK وجود دارد که این خط در ناحیه دوم نمودار قابل مشاهده است. رشد ترک در این ناحیه را می‌توان به صورت رابطه ۹ تعریف نمود که به رابطه پاریس^۴ شناخته می‌شود [۳۹].

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n \quad (9)$$

که در آن C یک مقدار ثابت و n شیب در مقیاس لگاریتمی است. مقدار n بدون بعد است اما C دارای واحد $(\text{mm/cycle})/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ است. این مقادیر وابسته به نوع ماده، ریز ساختار، فرکانس بارگذاری، شرایط آزمون‌ها

³ Cyclic

⁴ Paris's law

¹ Linear Elastic Fracture Mechanics

² Crack Closure

می‌شود.

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (11)$$

حالت لگاریتمی رابطه بالا، منجر به معادله پاریس می‌شود که در رابطه ۹ ارائه و توضیح داده شد.

نرخ رشد ترک با استفاده از روش سکانت^۱ با رابطه ۱۲ قابل تعیین است [۴۰].

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (12)$$

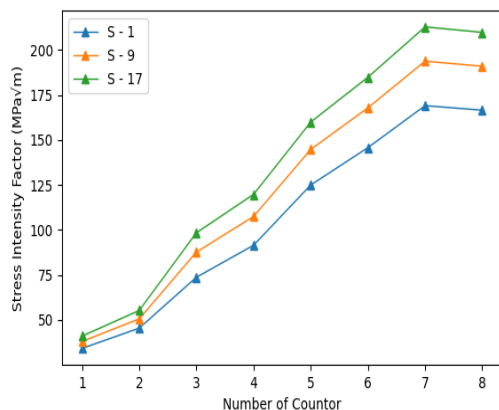
بنا بر توضیحات گفته شده، به کمک نمودار طول ترک-تعداد سیکل و استفاده از استاندارد ASTM E-647 می‌توان نمودار نرخ رشد ترک خستگی (da/dN) بر حسب نرخ تغییرات ضریب شدت تنش (ΔK) را برای نمونه‌های تست شده، بدست آورد. این نمودار برای هر نمونه را می‌توان با نمودار فلز پایه مورد مقایسه قرار داد و میزان تأثیرگذاری تغییر در پارامترهای مربوط به فرآیند شوک-دهی لیزر را در عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-T351 مشخص کرد.

برای صحت‌سنجی روش عددی مورد استفاده در این مطالعه، سه حالت معرفی شده در جدول ۳ به صورت تجربی بر روی نمونه‌های CT آماده شده از یک ورق آلومینیوم ۲۰۲۴-T351 پیاده‌سازی شدند و سپس آزمون‌های کشش و خستگی براساس استانداردهای مربوطه به صورت تجربی نیز انجام گرفت. جهت اعمال نیرو به نمونه‌ها در آزمون تجربی از دستگاه ۱۰۰ Zwick-HB ده تنی استفاده شد (شکل ۱۴).

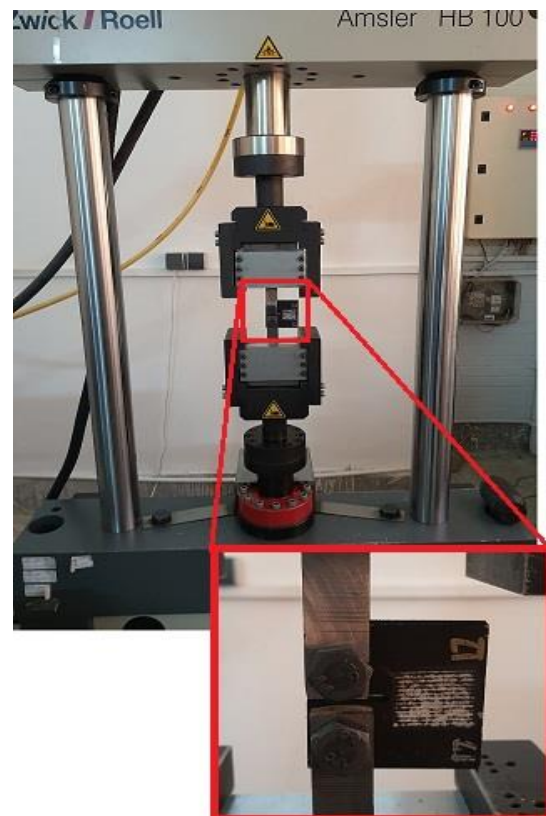
بر اساس استاندارد ASTM E-1290 [۴۱] سطح بار پیش‌ترک خستگی انتخاب شد و جهت ایجاد پیش‌ترک خستگی، نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی با بیشینه ۶ کیلو نیوتن و کمینه ۰/۶ کیلو نیوتن و فرکانس ۱۰ هرتز قرار گرفتند. سپس در طول فرآیند جهت کنترل دقیق‌تر طول ترک و جلوگیری از رشد ناگهانی ترک، بعد از ۵۰۰۰ سیکل این مقادیر به ۵ و ۰/۵ کیلو نیوتن کاهش داده شده‌اند. در نهایت در تمامی نمونه‌ها، طول پیش‌ترک نهایی جهت انجام آزمون‌ها ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

۵- نتایج

بعد از تعریف شرایط بارگذاری در حالت بیشترین بار ۵ و کمترین بار ۰/۵ کیلو نیوتن بر روی نمونه CT، برای محاسبه ضریب شدت تنش در نوک ترک از روش کانتور انتگرال در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد که در این روش تعداد ۸ کانتور برای محاسبه این ضریب درخواست داده شد و در نتیجه داده‌های بدست آمده، نمودار ضریب شدت تنش برای نمونه‌های LSP شده در هر کانتور از عمق به سطح در شکل (۱۵) آورده شده است.

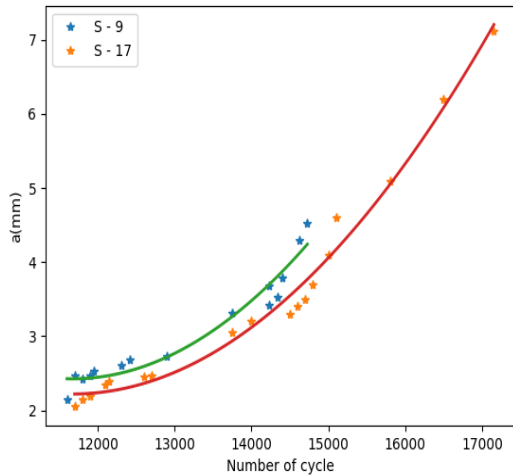


شکل ۱۲- میزان ضریب شدت تنش در هر کانتور برای سه حالت جدول ۳

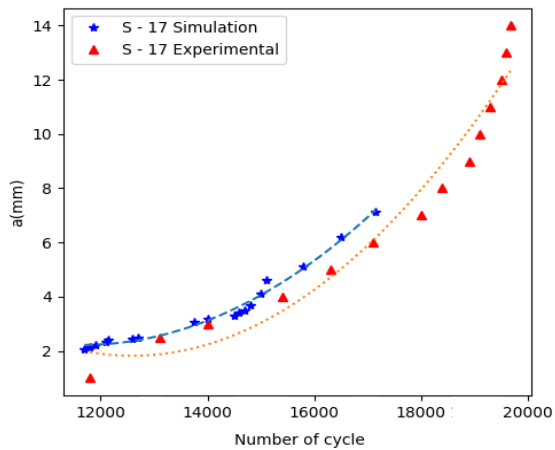


شکل ۱۱- جایگذاری نمونه CT در دستگاه برای انجام آزمون‌های شکست و خستگی

^۱ Secant



شکل ۱۳- نمودار اندازه رشد ترک خستگی بر حسب تعداد سیکل در شبیه‌سازی عددی برای دو نمونه حالت دوم و سوم از جدول ۳



شکل ۱۴- منحنی تعداد سیکل بر حسب طول ترک نتایج عددی و تجربی

۶- نتیجه‌گیری

مطابق با روندی که در این مقاله طی شد، با کمک شبیه‌سازی‌های شکست و خستگی نمونه‌های CT، تأثیرات فرآیند شوک دهی بر خواص شکست و خستگی آلیاژ آلومینیوم T۳۵۱-۲۰۲۴ بررسی شد و نتایج بدست آمده در این مطالعه را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- در یک نمونه شوک‌دهی شده با لیزر، مقدار ضریب شدت تنش نسبت به یک نمونه خام از آلیاژ آلومینیوم T۳۵۱-۲۰۲۴، در شرایط برابر تا ۲۸ درصد افزایش پیدا می‌کند.
- ۲- نمونه‌های شوک‌دهی شده، رفتار خستگی بهتری نسبت به نمونه خام داشته‌اند که این به دلیل بروز تنش‌های پسماند فشاری ناشی از فرآیند LSP بر روی سطح نمونه است.

چقرمگی شکست آلیاژ آلومینیوم T۳۵۱-۲۰۲۴ در حالت بدون عملیات سطحی شده در شرایط کانتور مشابه برابر مقدار $35 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ است و بر اساس نتایج بدست آمده از فایل داده‌های خروجی نرم‌افزار آباکوس کمترین میزان ضریب شدت تنش در هر یک از حالت‌های اول تا سوم از جدول ۳، به ترتیب برابر $34/17$ ، $38/032$ و $41/003$ مگا پاسکال در مجذور متر هستند. بر این اساس، شوک‌دهی لیزری نمونه‌ای با فشار پالس $2/04$ گیگا پاسکال و بدون همپوشانی نقاط لکه اثر، منجر به افزایش ضریب شدت تنش به میزان $6/8$ درصد نسبت به حالت بدون لیزر کاری شده می‌شود. اما با افزایش درصد همپوشانی از صفر به مقدار 30 درصد و همچنین اعمال فشار پالس $2/6$ گیگا پاسکال در فرآیند شوک‌دهی، میزان ضریب شدت تنش در حدود $18/85$ درصد افزایش پیدا کرده است. نهایتاً نیز در این مدل‌سازی عددی با اعمال حداکثر مقادیر مدنظر با همپوشانی 60 درصد و فشار پالس $3/06$ گیگا پاسکال، مقدار ضریب شدت تنش با افزایش $28/13$ درصدی به مقدار $41/003$ مگا پاسکال در مجذور متر خواهد رسید.

شبیه‌سازی عددی آزمون خستگی بر روی نمونه‌های شوک دهی شده انجام گرفت و در نتیجه آن، نمودار تعداد سیکل-طول ترک بدست آمد. مطابق با آنچه که در نمودار این شکل مشاهده می‌شود، افزایش همپوشانی نقاط لکه اثر لیزر از 30 درصد به 60 درصد و همچنین افزایش فشار پالس اعمالی به قطعه، از $2/6$ گیگا پاسکال به $3/06$ گیگا پاسکال، سبب کاهش شدت رشد ترک در سیکل‌های مشابه می‌شود. در شبیه‌سازی عددی، نمونه حالت دوم جدول ۳، بعد از 14727 سیکل بارگذاری چرخه‌ای دچار شکست خستگی شده و نمونه حالت سوم بعد از حدود 17152 سیکل دچار شکست ناشی از بارگذاری خستگی شده است. نمودار ارائه شده در شکل ۱۶ با استفاده از روش چندجمله‌ای افزایشنده رسم شده است.

برای صحت‌سنجی روش عددی استفاده شده در این مطالعه برای پیش‌بینی رفتار خستگی ماده تحت LSP، می‌توان از داده‌های مربوط به آزمون‌های تجربی استفاده کرد. در همین راستا در شکل (۱۷) مقایسه‌ای بین نمودار طول ترک-تعداد سیکل در دو مطالعه تجربی و عددی نمونه شوک دهی شده براساس مقادیر حالت سوم جدول ۳، انجام گرفته است.

۷- پیشنهادات

بر اساس آنچه که از نتایج این پژوهش بدست آمده و همچنین جمع بندی های صورت گرفته و با در نظر داشتن محدودیت های موجود، پیشنهادهایی جهت ادامه طرح و همچنین بهبود استفاده از روش شوک دهی برای بهتر کردن رفتار شکست و خستگی ارائه می گردد:

- بررسی تجربی تغییرات شدت تنش پسماند فشاری ناشی از فرآیند شوک دهی لیزری با تغییر پارامترهای فرآیند

- بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند شوک دهی لیزری نظیر شکل لکه اثر لیزر و قطر لکه اثر بر روی میزان عمر خستگی

- بررسی تأثیرات فرآیند شوک دهی لیزری بر روی خواص مکانیکی مواد مرکب

۳- تغییر در مقادیر درصد همپوشانی نقاط لکه اثر لیزر سبب بهبود ۱۰ تا ۳۲ درصدی در خواص شکست و خستگی ماده می شود و سپس پارامتر فشار پالس لیزر، با تأثیر گذاری تا ۲۸ درصد در رتبه بعدی از نظر تأثیرگذاری قرار دارد.

۴- در یک فرآیند شوک دهی لیزری جهت بهبود خواص شکست و خستگی آلیاژ آلومینیوم T۳۵۱-۲۰۲۴، استفاده از مقادیر بالای درصد همپوشانی نقاط لکه اثر در مقادیر فشار پالس یکسان شرایط بهینه تری را فراهم می کند.

۵- پیش بینی روش عددی مورد استفاده در تخمین رفتار رشد ترک خستگی یک نمونه LSP شده اختلافی کمتر از ۱۵ درصد با آزمون های تجربی داشته که نشان دهنده میزان دقت و جواب های نزدیک این مدل به روش های تجربی است.

مراجع

- [1] M. Shariati, H. Hatami, H. Yarahmadi, and H. R. Eipakchi. "An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading". *Materials & Design* 34. (2012): 302–312.
- [2] H. Hatami and M. Shariati. "Numerical and Experimental Investigation of SS304L Cylindrical Shell with Cutout Under Uniaxial Cyclic Loading". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering* 43. No. 2 (2019): 139–153.
- [3] M. Shariati, H. Hatami, H. Torabi, and H. R. Epakchi. "Experimental and numerical investigations on the ratcheting characteristics of cylindrical shell under cyclic axial loading". *Structural Engineering and Mechanics* 44. no. 6 (2012): 753–762.
- [4] M. Honarpishe and V. Zandian. "Investigation of Residual Stresses in Stress-Relieved Samples by Heat Treatment and Ultrasonic Methods Using Hole-Drilling Method". *Modares Mechanical Engineering* 14. no. 15 (2015): 273–278.
- [۵] آقای عطار، میلاد، و مجید قریشی. "پیش بینی تنش های پسماند و کرنش های الاستیک-پلاستیک در جوشکاری لیزری سوراخ کلیدی دیسک غیر همجنس مس و فولاد زنگ نزن ۳۰۴". *نشریه مدل سازی در مهندسی* ۱۸، ۶۳، (۱۳۹۹): ۱۶۶-۱۵۱.
- [6] S. O. Saied and A. A. El-Danaf. "Laser shock processing of 2024-T351 aluminum alloy: Microstructure and mechanical property modifications". *Materials & Design* 156 (2018): 183–193.
- [7] M. Dorman, M. B. Toparli, N. Smyth, A. Cini, M. E. Fitzpatrick, and P. E. Irving. "Effect of laser shock peening on residual stress and fatigue life of clad 2024 aluminium sheet containing scribe defects". *Materials Science and Engineering A* 548 (2012): 142–151.
- [8] P. K. Sharp, Q. Liu, S. A. Barter, P. Baburamani, and G. Clark. "Fatigue life recovery in aluminium alloy aircraft structure". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 25. no. 2 (2002): 99–110.
- [9] W. Braisted and R. Brockman. "Finite element simulation of laser shock peening". *International Journal of Fatigue* 21 (1999): 719–724.
- [10] J. Fu, Y. Zhu, C. Zheng, R. Liu, and Z. Ji. "Effect of laser shock peening on mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass". *Applied Surface Science* 313 (2014): 692–697.
- [11] B. Dhakal and S. Swaroop. "Effect of laser shock peening on mechanical and microstructural aspects of 6061-T6 aluminum alloy". *Journal of Materials Processing Technology* 282 (2019): 616–640.
- [12] R. M. White. "Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption". *Journal of Applied Physics* 34. no. 7 (1963): 2123–2124.

- [13] N. C. Anderholm. "Laser-generated stress waves". *Applied Physics Letters* 16. no. 3 (1970): 113–115.
- [14] P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, and H. P. Lieurade. "Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour". *Materials Science and Engineering A* 210. no. 1–2 (1996): 102–113.
- [15] K. Ding and L. Ye. *Physical and mechanical mechanisms of laser shock peening*. Woodhead Publishing (2006): 7–46.
- [16] C. Rubio-González *et al.* "Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy". *Materials Science and Engineering A* 386. no. 1–2 (2004): 291–295.
- [17] K. Y. Luo, J. Z. Lu, Q. W. Wang, M. Luo, H. Qi, and J. Z. Zhou. "Residual stress distribution of Ti-6Al-4V alloy under different ns-LSP processing parameters". *Applied Surface Science*, 285 (2013): 607–615.
- [18] 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 & Fracture of Engineering Materials & Structures* 30. no. 11 (2007): 1110–1124.
- [19] C. Rubio-González, C. Felix-Martinez, G. Gomez-Rosas, J. L. Ocaña, M. Morales, and J. A. Porro, "Effect of laser shock processing on fatigue crack growth of duplex stainless steel". *Materials Science and Engineering A* 528. no. 3 (2011): 914–919.
- [20] R. Sun *et al.* "Laser shock peening induced fatigue crack retardation in Ti-17 titanium alloy". *Materials Science and Engineering A* 737 (2018): 94–104.
- [21] M. Pavan, D. Furfari, B. Ahmad, M. A. Gharghour, and M. E. Fitzpatrick. "Fatigue crack growth in a laser shock peened residual stress field". *International Journal of Fatigue* 123 (2019): 157–167.
- [22] W. Li *et al.*, "Effect of laser shock peening on high cycle fatigue properties of aluminized AISI 321 stainless steel". *International Journal of Fatigue* 153 (2020): 1-12
- [23] J. Kaufman *et al.* "Effect of Laser Shock Peening Parameters on Residual Stresses and Corrosion Fatigue of AA5083". *Metals* 11. no. 10. (2021) 1-10.
- [24] X. Hu, J. Zhao, X. Teng, X. Nie, Y. Jiang, and Y. Zhang. "Fatigue Resistance Improvement on Double-Sided Welded Joints of a Titanium Alloy Treated by Laser Shock Peening". *Journal of Materials Engineering and Performance* 31 (2022): 10304–10313.
- [25] B. Starman, H. Hallberg, M. Wallin, M. Ristinmaa, N. Mole, and M. Halilović. "Modelling of the Mechanical Response in 304 Austenitic Steel during Laser Shock Peening and Conventional Shot Peening". *Procedia Manufacturing* 47 (2019): 450–457.
- [26] J. N. Johnson and R. W. Rohde. "Dynamic Deformation Twinning in Shock-Loaded Iron". *Journal of Applied Physics* 42. no. 11 (2003): 41-71.
- [27] J. H. Kim and Y. J. Kim. "Sensitivity analyses of finite element parameters of laser shock peening for improving fatigue life of metallic components". *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A* 34. no. 12 (2010): 1821–1828.
- [28] R. Negarestani and L. Li. "Laser machining of fibre-reinforced polymeric composite materials". *Machining Technology for Composite Materials*, 1st ed. Woodhead Publishing (2012): 288–308.
- [29] M. Shariati, H. Hatami, H. R. Eipakchi, H. Yarahmadi, and H. Torabi. "Experimental and numerical investigations on softening behavior of POM under cyclic strain-controlled loading". *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 50. no. 15 (2011): 1576–1582.
- [30] ASTM International. "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates". ASTM E647-00. 2002.
- [31] G. R. Johnson. "A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures". *Proc. 7th Inf. Sympo. Ballist.* (1983): 541–547.
- [32] G. Singh, R. V Grandhi, and D. S. Stargel. "Modeling and Parameter Design of a Laser Shock Peening Process". *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics* 12. no. 5 (2011): 233–253.
- [33] V. V. Vershinin. "Validation of metal plasticity and fracture models through numerical simulation of high velocity perforation". *International Journal of Solids and Structures* 67 (2015): 127–138.

- [34] G. Ivetic, "Three-dimensional FEM analysis of laser shock peening of aluminium alloy 2024-T351 thin sheets". *Surface Engineering* 27. no. 6 (2011): 445–453.
- [35] ASTM International. "Standard Test Method for Plane Stress Fracture Toughness of Metallic Materials". ASTM E399-97. 2002.
- [36] L. M. Tudose and C. O. Popa. "Stress Intensity Factors Analysis on Cracks in the Hertzian Stresses Field of Teeth Gears". *ROTRIB* 7. no. 118 (2007): 1–8.
- [۳۷] احمدی بروغنی، سید یوسف و سید رسول سجادی، "تحلیل اجزای محدود مکانیک شکست چرخ و ریل"، نشریه مدل سازی در مهندسی ۹، ۲۶، پاییز (۱۳۹۰): ۳۱–۲۳.
- [38] Y. Fu, H. Gao, X. Wang, and D. Guo. "Machining the Integral Impeller and Blisk of Aero-Engines: A Review of Surface Finishing and Strengthening Technologies". *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 30. no. 3 (2017): 528–543.
- [39] M. X. Sun, C. H. Liang, and S. F. Zhang. "Application of laser repairing technology for fan/compressor blisk". *Aeronautical Manufacturing Technology* 429. no. 9 (2013): 62–65.
- [40] G. Ranjith Kumar and G. Rajyalakshmi. "Modelling and multi objective optimization of laser peening process using Taguchi utility concept". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 263. no. 6 (2017): 1-15.
- [41] ASTM International. "Standard guide for conducting static, tension, compression and cyclic tests on fatigue-resistant ferrous alloys". ASTM E1290-08. 2018.