



بررسی اثر هم‌زمان عملیات کوبش شوک لیزری و پوشش‌دهی اکسیدگرافن بر تنش پسماند و خواص خوردگی خستگی آلیاژ IN792

علیرضا افسری مقدم^۱، سید یوسف احمدی بروغنی^{۲*}، یدالله یعقوبی نژاد^۳، محمد خان زاده^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

^۴ استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸

چکیده

سوپرآلیاژهای مورد استفاده در ساخت پره‌های توربین تحت شرایط محیط خوردنده توام با تنش و دمای بالا، مورد تخریب قرار می‌گیرند. اصلاح سطح به روش مکانیکی مانند کوبش شوک لیزری با تابش پرتوی لیزر بر سطح فلز و ایجاد تغییر شکل پلاستیک و تنش پسماند فشاری در سطح موجب بهبود مقاومت ماده در برابر تخریب می‌شود. به علاوه اعمال پوشش‌های نانوساختار یکی از روش‌های نوین جهت افزایش مقاومت اجزاء تحت محیط خوردنده و دما بالا محسوب می‌شود. هدف از این مقاله بررسی کوبش شوک لیزری بر تنش پسماند و خوردگی خستگی اینکونل ۷۹۲ در محیط خوردنده حاوی $75\% \text{Na}_2\text{SO}_4 + 15\% \text{NaCl} + 10\% \text{V}_2\text{O}_5$ است. بدین منظور تعدادی از نمونه‌های خام با اکسید گرافن پوشش‌دهی شدند؛ در نهایت تمامی نمونه‌ها در معرض کوبش شوک لیزری قرار گرفتند. پس از این عملیات نمونه‌ها تحت محیط خوردنده در دمای بالا در معرض خوردگی قرار گرفتند، سپس آزمایش خستگی در دمای محیط انجام شد. نتیجه این پژوهش نشان داد که هر دو عملیات پوشش‌دهی و کوبش لیزری موجب بهبود عمر خستگی می‌شود. کوبش لیزری به تنهایی ۲/۴ برابر عمر خستگی این آلیاژ را افزایش داده است.

کلمات کلیدی: کوبش شوک لیزری؛ پوشش اکسیدگرافن؛ تنش پسماند؛ خوردگی خستگی.

Investigation of The Simultaneous Effect of Laser Shock Peening and Graphene Oxide Coating on Residual Stress and Fatigue Corrosion Properties of IN792 Alloy

A.Afsarimoghaddam¹, Y. Ahmadi broghani^{2*}, Y. Yaghoubinezhad³, M. khazadeh⁴

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., University of birjand, birjand, Iran

² Prof., Mech. Eng., University of birjand, birjand, Iran

³ Assoc. Prof., Materials Eng., Birjand University of Technology, birjand, Iran

⁴ Assis. Prof., Departement of Physics., Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

Abstract

Laser shock peening is a mechanical surface treatment that is caused by laser beam radiation on the surface of the metal. This processing causes plastic deformation, and compressive residual stresses under the surface of metal. In addition, applying nanostructure coatings is one of the new methods to increase the resistance of components under corrosive environment and high temperature. The purpose of this article is to investigate laser shock peening on residual stress and fatigue corrosion of Inconel 792 in $75\% \text{Na}_2\text{SO}_4 + 15\% \text{NaCl} + 10\% \text{V}_2\text{O}_5$ environment. For this purpose, a number of samples were subjected to laser shock peening and another group was coated with graphene oxide before laser processing. Then, all the samples were subjected to corrosive environment at high temperature, and then the fatigue test was performed. The result of this research showed that the laser shock peening operation increased the fatigue life of this alloy for 2.4 times.

Keywords: Laser Shock Peening; Graphene Oxide Coating; Residual Stress; Fatigue Corrosion.

۱- مقدمه

سوپرآلیاژهای پایه نیکلی به دلیل داشتن خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی بالا در نیروگاه‌های گازی به کار می‌روند [۱، ۲]. این آلیاژ در برخی محیط‌ها مستعد به تشکیل حفرات سطحی بوده و در اثر بارگذاری چرخه‌ای ترک خستگی می‌تواند از این حفرات شروع و اشاعه پیدا کند. این امر سبب کاهش مقاومت به خوردگی خستگی این آلیاژ می‌گردد [۳]. اجزای متحرک توربین تحت شرایط کاری دما بالا در اثر هم‌افزایی خوردگی و بارگذاری متناوب، دچار خستگی خوردگی می‌شوند. این سازوکار تخریب یکی از شایع‌ترین دلایل شکست پره‌های توربین است [۴، ۵]

اصلاح سطح به روش مکانیکی نظیر کوبش شوک لیزری^۱ با اعمال امواج ضربه‌ای باعث بهبود عملکرد اجزای فلزی در برابر تخریب می‌شود [۶]. فرایند شوک لیزری یک روش جدید سطحی مبتنی بر لیزر است که موجب اصلاح سطح مواد فلزی می‌شود. این عملیات معمولاً در کاربردهای فضایی مانند پره‌های توربین، اجزا روتورها، دیسک‌ها، شفت‌های چرخنده و بلبرینگ‌ها کاربرد دارد [۷]. مشخصه مفید این عملیات حضور تنش‌های پسماند فشاری زیر سطح ماده فلزی فراوری شده است که به طور مکانیکی در اثر موج شوک توسط پالس لیزر پرا انرژی، تولید شده است. در مقایسه با عملیات ساچمه‌زنی مرسوم که در صنعت بیش از یک قرن برای بهبود سطح و مقاومت خستگی اجزای فلزی به کار می‌رود، کوبش شوک لیزری می‌تواند تنش‌های پسماند فشاری در عمق بیش از ۱ میلی‌متر یعنی ۴ برابر عمیق‌تر از ساچمه‌زنی ایجاد نماید [۸]. وقتی موج شوک گسترش یافته در ماده تضعیف می‌شود، تغییر شکل دائمی به تدریج کاهش می‌یابد و مقدار تنش پسماند در عمق کم می‌شود [۹].

مالکی و همکاران اثر روش‌های مختلف ایجاد تغییر شکل پلاستیک سطحی از جمله ساچمه زنی، کوبش شوک لیزری و اصلاح سطح نانوکریستال مافوق صوت بر ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار خستگی اینکونل

۷۱۸ را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که با استفاده از متغیرهای مناسب برای افزایش انرژی جنبشی با استفاده از عملیات سطحی می‌توان به طور مؤثر یک میدان تنش پسماند فشاری عمیق در نمونه‌های اینکونل ۷۱۸ ایجاد کرد [۱۰].

در پژوهشی با بررسی میزان تأثیر این عملیات بر سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ نشان دادند که تنش پسماند فشاری در جهت سطحی شروع ترک را به تأخیر می‌اندازد و تنش پسماند فشاری در جهت عمق می‌تواند رشد ریزترک را در نمونه کند نماید [۱۱]. در تحقیقی از گرافن به‌عنوان تقویت‌کننده دانه‌بندی در نانوکامپوزیت‌ها استفاده شده است. برای دستیابی به این هدف کوبش شوک لیزری کم‌انرژی به کار رفته است [۱۲].

اثر کوبش شوک لیزری بر خواص خوردگی اینکونل ۶۰۰ در پژوهشی پرداخته و نشان داده شده است که این عملیات خواص خستگی و خوردگی ماده را به میزان قابل توجهی بهبود بخشیده است. آنها نشان دادند نرخ خوردگی نمونه در حالت لیزر شده در برابر نمونه فاقد لیزر افزایش ۱۰۶ برابری داشته است [۱۳].

در پژوهش دیگری پس از کوبش لیزری در اثر تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده، ریز سختی و تنش پسماند بهبود یافته است. علاوه بر این، با افزایش تعداد ضربه‌های لیزر، عمق مؤثر سختی و تنش پسماند نیز افزایش یافته است. نتایج نشان داده که عمر خستگی نمونه‌های تحت سه ضربه لیزر تا ۲۴۴٪ افزایش یافته است [۱۴].

تحقیقات جدید روی اثر عملیات کوبش شوک لیزری بر خواص مکانیکی و خستگی مواد در حال انجام است. در پژوهشی اثر این عملیات بر عمر خستگی اینکونل 738LC در دمای محیط و ۸۵۰ سلسیوس بررسی شده است. کوبش لیزری عمر خستگی را حدوداً ۲/۴ برابر در دمای محیط افزایش داده است، در حالی که در دمای بالا به دلیل آزادسازی تنش این اثر خیلی کم می‌شود [۱۵].

^۱ Laser Shock Peening

پوشش نانوساختار گرافنی و ترکیب اثر آن با یک عملیات سطحی مورد بررسی قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر اثر عملیات کوبش شوک لیزری بر نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دهی شده با اکسیدگرافن تهیه شده از آلیاژ IN792 بررسی شده است. رفتار خوردگی خستگی این آلیاژ قبل و بعد از عملیات لیزری در محیط شبیه‌سازی شده نیروگاه گازی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نمونه‌ها ابتدا در محیط خورنده حاوی نمک مورد نظر قرار گرفته؛ سپس در دما و مدت‌زمان معین داخل کوره تحت خوردگی دما بالا قرار گرفتند. پس از طی این مراحل آزمون خستگی در هوا و دمای محیط روی نمونه‌ها انجام شد. آزمون پراش اشعه ایکس جهت بررسی خواص سطحی ماده و اندازه‌گیری تنش پسماند سطحی، آزمون کشش و ریز سختی‌سنجی جهت بررسی خواص مکانیکی و تصاویر میکروسکوپ نوری و روبشی جهت تعیین اندازه دانه‌بندی و بررسی‌های ریزساختاری به‌کاررفته است.

۲- روش انجام آزمایش

۲-۱- انتخاب مواد

نمونه‌های کششی و خستگی از قطعه ریخته‌گری شده از جنس اینکونل ۷۹۲ تهیه شدند. آزمون XRF^۱ جهت تعیین ترکیب شیمیایی عناصر موجود در این ماده انجام شد و نتایج در جدول ۱ نوشته شده است. ابتدا صفحات به ضخامت ۳ میلی‌متر به‌وسیله اسپارک از قطعه اولیه جدا شدند. سپس با استفاده از دستگاه برش سیم^۲ نمونه‌های آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8 و نمونه‌های خستگی طبق استاندارد ASTM E466 جدا شدند. تمامی نمونه‌ها پس از ساخت با کاغذ SiC شماره ۱۰۰ تا ۱۲۰۰ سنباده‌زنی و سپس با پولیش نمدی نرم کاملاً صیقلی و عاری از هرگونه زبری و شیار شدند.

اثر ایجاد تغییر شکل پلاستیک بر سطح سوپرآلیاژ پایه نیکلی و بررسی خوردگی داغ و خستگی خوردگی در دمای بالا مورد بررسی قرار گرفته است. ایجاد یک‌لایه قابل توجه در سطح ماده در اثر ایجاد کار سرد می‌تواند خوردگی را به تعویق اندازد، مانع شروع ترک خستگی و تاخیر در تبدیل حفرات به ترک شود [۱۶]. در پژوهشی آزمایش خستگی با دامنه کرنش مختلف از ۰/۴ تا ۱/۲ درصد روی نمونه‌ها انجام شده است. بررسی‌ها نشان داد که در نمونه‌های کوبش شوک لیزری جوانه‌زنی ترک‌ها کمتر، فضای خطوط خستگی کوتاه‌تر و ریز حفرات کوچک‌تری ایجاد شده است. علاوه بر این، تغییر شکل پلاستیک، دانه‌های بسیار ریز، دوقلوبی و نابجایی‌های ایجاد شده در اثر این عملیات می‌تواند از شروع و انتشار ترک و در نتیجه شکست نهایی جلوگیری نماید، در نتیجه موجب افزایش عمر خستگی اینکونل ۶۲۵ شود [۱۷].

در پژوهشی اثر عملیات کوبش لیزری بر خواص مکانیکی و عمر خستگی سوپرآلیاژ نیکلی تک کریستال بررسی شده است. نتیجه نشان داد که عمق نفوذ پلاستیک در اثر این عملیات ۲۴ برابر ساچمه‌زنی است. نتیجه آزمون خستگی پس از قرارگیری نمونه‌ها در دمای ۷۰۰ سلسیوس به مدت ۳۰۰ ساعت در محیط خورنده حاوی سولفات نشان داده است که نمونه‌های بدون عملیات تحت سازوکار خستگی کم چرخه شکسته شده‌اند اما نمونه‌های کوبش لیزری شده پس از میلیون‌ها سیکل دچار شکست نشده‌اند، همچنین عمق تنش پسماند پس از این عملیات به طور قابل ملاحظه-ای افزایش یافته است [۱۸].

در پژوهش‌های گذشته در مقایسه با عملیات سطحی متداول، اثر کوبش لیزری بر مقاومت خوردگی خستگی مواد فلزی به‌ندرت بررسی شده است؛ خصوصاً اثرات تنش پسماند ترکیب شده با ریزساختار طی این فرایند برای سوپرآلیاژ اینکونل ۷۹۲ تاکنون بررسی نشده است. از این‌رو تحقیق در زمینه رفتار خوردگی مواد فلزی در معرض کوبش شوک لیزری دارای ارزش است. علاوه بر این تاکنون پوشش‌دهی سوپرآلیاژ با

^۲ Wire Cut

^۱ X-Ray Fluorescence



شکل ۲- شکل و ابعاد نمونه آزمایش خستگی بر حسب میلی‌متر

جهت اندازه‌گیری ریز سختی سطح نمونه‌ها در حالت‌های مختلف، ابتدا نمونه‌ها مانع شده سپس ریز سختی ویکرز در سه نقطه از سطح با نیروی ۱۰۰ گرم و زمان ۱۰ ثانیه انجام شد و میانگین سختی محاسبه گردید.

۳-۲- عملیات پوشش دهی

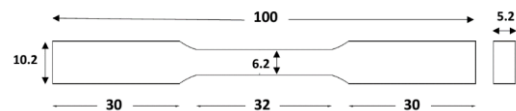
خواص گرافن باعث شده است که به‌عنوان یک مانع مؤثر در برابر اکسیداسیون و خوردگی زیرلایه به کار رود. پوشش‌های گرافنی می‌توانند سرعت خوردگی فلزات را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند که این مسئله از اثر سدکنندگی آنها در برابر محیط خورنده شامل آب، هوا و غیره ناشی می‌شود [۱۹، ۲۰]. به‌منظور ایجاد پوشش روی نمونه‌ها از روش الکتروشیمیایی استفاده شد. حمام الکترولیت با غلظت ۱ گرم اکسیدگرافن در ۱ لیتر آب مقطر تهیه شد. به‌منظور ایجاد پوشش یکنواخت با ضخامت قابل قبول ۱۰ مرحله لایه‌نشانی روی نمونه‌ها انجام شد. شکل ۳ تصویر نحوه انجام این عملیات و نمونه پس از پوشش‌دهی نشان داده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۹۲

نام عنصر	Mn	Cr	V	Ti	Si	Al
درصد	۰/۰۰۵	۱۲/۲۷	۰/۱۹	۲/۹۵	۳/۹۶	۳/۷
نام عنصر	W	Mo	Zr	Ni	Ta	Co
درصد	۳/۰۵	۱/۸۳	۰/۰۰۷۵	۵۶/۹۸	۵/۸۷	۸/۴۴

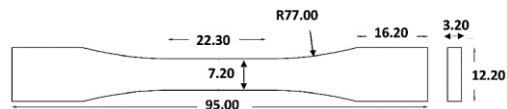
۲-۲- تعیین خواص مکانیکی

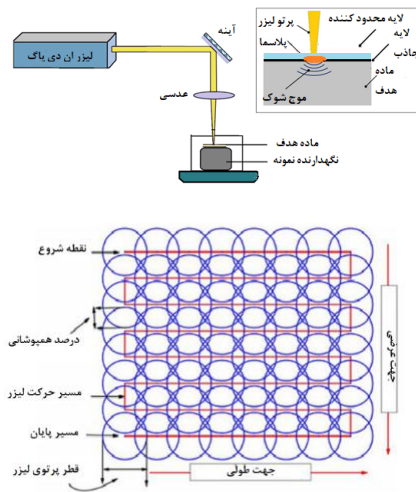
جهت تعیین خواص مکانیکی ماده موردنظر، نمونه‌های کششی تخت با شکل و ابعاد تصویر ۱ تهیه و آزمایش کشش با استفاده از دستگاه زوئیک ۶۰ تن انجام شد.



شکل ۱- ابعاد نمونه‌های آزمون کشش بر حسب میلی‌متر و نمونه‌های تهیه شده از ماده اولیه

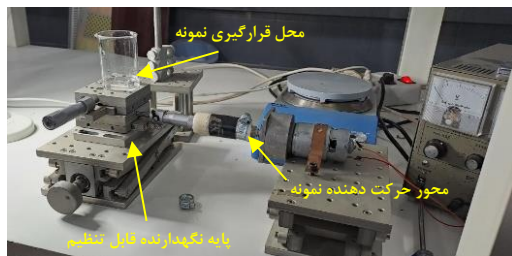
به‌منظور انجام آزمایش خستگی نمونه‌های خستگی با ابعاد شکل ۲ تهیه شده و به صورت کششی و فشاری با فرکانس ۱۰ هرتز آزمایش شدند.





شکل ۴- شماتیک عملیات کوبش شوک لیزری و مسیر حرکت لیزر در این عملیات

بمنظور انجام این عملیات از لیزر پالسی حالت جامد Nd:YAG استفاده شده است. در طول فرایند کوبش تمامی نمونه‌ها در آب غوطه‌ور بوده و لایه آب به ضخامت ۱-۲ میلی-متر به‌عنوان لایه محدودکننده توسط جت آب اعمال شده است. فویل آلومینیومی به ضخامت ۱۰۰ میکرون به‌عنوان یک محیط مانع برای شروع پلاسما جهت محافظت از سطح نمونه از آسیب حرارتی به‌کار رفته است. طی این عملیات پرتو لیزر همواره عمود بر سطح بوده و نرخ همپوشانی ۵۰٪ است تا اطمینان حاصل شود، هیچ ناحیه لیزر نشده در سطح کار وجود ندارد. نمونه‌ها به‌وسیله سازوکار ساخته شده در شکل ۵ در دو راستای طولی و عرضی به‌صورت یکنواخت قابل حرکت هستند.

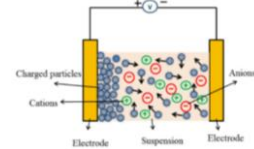


شکل ۵- سازوکار ساخته شده جهت حرکت یکنواخت و قابل تنظیم نمونه‌ها

الف



ب



ج



د

شکل ۳- روش لایه نشانی اکسیدگرافن بر زیرلایه الف) حمام الکترولیت، ب) شماتیک فرآیند پوشش‌دهی [۲۱] ج) نمونه پس از ۵ مرحله پوشش‌دهی و د) نمونه پس از ۱۰ مرحله پوشش‌دهی

۴-۲- عملیات کوبش شوک لیزری

به‌طور معمول، در این عملیات از لیزر Q-Switched Nd:YAG ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) با انرژی بالا ($J = 1-8$) و زمان پالس کوتاه (۶-۲۰ ns) که از محیط محبوس شفاف (آب یا شیشه) می‌گذرد تا پوشش نازک (نوار آلومینیومی یا رنگ سیاه تجاری) را در سطح ماده از بین ببرد [۲۲]. شکل ۴ این عملیات را به‌طور ساده نشان می‌دهد. هنگام شلیک پرتوی لیزر بر یک سطح فلزی در مدت‌زمان بسیار کوتاه (در حد چند نانوثانیه) ناحیه حرارت دیده تبخیر شده تا به دمای بیش از 10000°C برسد؛ سپس توسط یونیزاسیون به پلاسما تبدیل شود. پلاسما تا پایان زمان تابش لیزر به جذب انرژی لیزر ادامه می‌دهد. فشار ناشی از پلاسما از طریق امواج شوک به ماده منتقل می‌شود. به‌منظور افزایش فشار شوک، معمولاً سطح فلز با یک ماده غیرشفاف، مانند رنگ سیاه یا نوار آلومینیومی پوشیده شده و ماده شفاف مانند آب مقطر یا شیشه در برابر اشعه لیزر قرار می‌گیرد [۲۳].

آزمون خستگی طبق استاندارد روی سه گروه از نمونه‌ها (۱) نمونه خام پولیش شده، (۲) نمونه پوشش‌دهی و لیزر شده و (۳) نمونه لیزر شده انجام شد. این آزمون در مرکز پژوهش رازی به صورت کششی و فشاری با فرکانس ۱۰ هرتز در دمای محیط انجام شد. نمونه‌ها تا لحظه شکست با ۵۰٪ تنش نهایی تحت بارگذاری قرار گرفته و تعداد چرخه‌ها تا شکست ثبت شده است.

۳- نتایج و بحث:

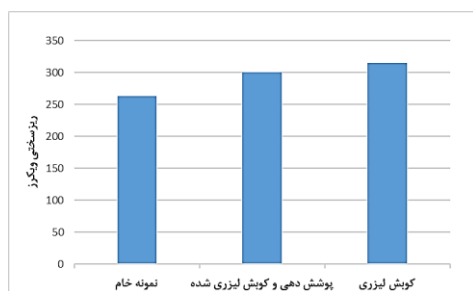
۳-۱- نتایج آزمایش کشش و ریزسختی

آزمایش کشش با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام و نتایج آن در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳- خواص مکانیکی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۹۲ به دست آمده از آزمون کشش

تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	درصد ازدیاد طول
۷۰۰	۷۳۰	۱۸۰	۱/۲

در نمودار ۷ نتایج ریزسختی سنجی نمونه‌ها در حالت‌های مختلف گزارش شده است.



شکل ۷- نمودار ریزسختی سطحی سه گروه نمونه آزمایش

مقدار ریزسختی ماده پس از عملیات کوبش لیزری از 10 ± 263 به 9 ± 315 و 10 ± 300 برای نمونه گروه ۲ و ۳ تغییر یافته است که افزایش ۲۰ درصدی

انرژی پالس لیزر بر اساس نوع ماده زیرلایه انتخاب می‌شود. در بیشتر تحقیقات بیش از ۱ ژول در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای عملیات کوبش شوک لیزری طبق جدول ۲ انتخاب شده است. جهت اندازه‌گیری تنش پسماند ایجاد شده در ماده آزمون پراش اشعه ایکس^۱ به کار رفته است.

جدول ۲- مشخصات لیزر و متغیرهای آزمایش

متغیرها	انرژی	طول موج	عرض پالس
مقدار	۱ J	۱۰۶۴ nm	۵ ns
متغیرها	درصد همپوشانی	قطر لکه لیزر	تعداد ضربات
مقدار	۵۰٪	۱ mm	۱

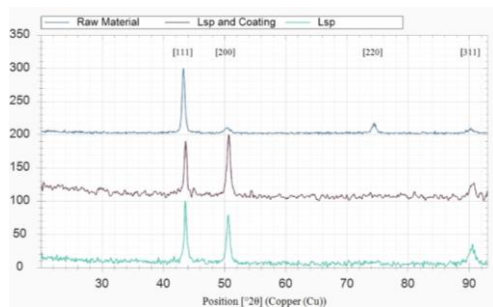
۲-۵- آزمایش خوردگی خستگی

خواص خستگی به طور قابل توجهی تحت تأثیر محیط قرار دارد. جهت شبیه‌سازی محیط نیروگاهی و ایجاد خوردگی، ماده خورنده با ترکیب شیمیایی $75\% \text{Na}_2\text{SO}_4 + 15\% \text{NaCl} + 10\% \text{V}_2\text{O}_5$ روی نمونه‌ها اسپری شده است [۲۴]. پیش از ایجاد پوشش خورنده نمونه‌ها در دمای ۲۰۰ سلسیوس پیش گرم شدند و سپس سطح هر نمونه حدوداً ۳ تا ۴ گرم بر سانتیمتر مربع با ماده خورنده پوشیده شد. سپس در دمای ۶۰۰ سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت داخل کوره قرار گرفتند. شکل ۶ مراحل ایجاد خوردگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶- مراحل پاشش نمک خورنده بر سطح نمونه‌ها: (الف) ترکیب نمک خورنده، (ب) نمونه‌ها قبل از خوردگی و (ج) نمونه‌ها پس از قرارگیری داخل کوره

^۱ X-Ray Diffraction (XRD)



شکل ۸- نتایج آزمون پراش اشعه ایکس سه نمونه مختلف به ترتیب از بالا ماده خام، پوشش‌دهی و کوبش لیزری شده و نمونه کوبش شوک لیزری شده

به دلیل ایجادنشدن پیک جدید در اثر این عملیات در نمودار XRD نشان می‌دهد که هیچ انتقال فاز یا تشکیل فازهای جدید در ماده ایجاد نشده است. فقط شدت پیک‌ها به میزان قابل توجهی کاهش یافته‌اند که نشان‌دهنده ریزشدن اندازه دانه‌ها است. مقدار تنش پسماند در سطح نمونه تحت دو عملیات (کوبش شوک لیزری و پوشش‌دهی) ۲۷۰- مگاپاسکال و برای نمونه تحت عملیات کوبش شوک لیزری ۲۹۰- مگاپاسکال به‌دست آمده است. در تحقیقات صورت گرفته توسط دیگر محققین مقادیر تنش پسماند ایجاد شده در هر یک به شرح جدول ۴ است.

جدول ۴- مقایسه مقدار تنش پسماند فشاری ایجاد شده

در سطح ماده		مرجع	ردیف
مقدار تنش پسماند فشاری	توضیحات		
۱۶۶ مگاپاسکال	ایجاد شده طی عملیات کوبش شوک لیزری	[۲۹]	۱
۴۳۰ مگاپاسکال	با لیزر کم انرژی	[۳۰]	۲
۳۲۵ مگاپاسکال	لیزر با انرژی بالا و تعداد ضربات زیاد تغییر در مشخصات لیزر	[۳۱]	۳

در اثر عملیات شوک لیزری به دلیل کوبش سطح نمونه، تنش‌های پسماند فشاری ایجاد می‌شود. از نرم-افزار Xpert HighScore Plus برای تحلیل الگوی

ریزسختی سطحی پس از عملیات لیزری را نشان می‌دهد. تحقیقات دیگر نیز نشان دادند که این عملیات اثر قابل توجهی بر ریزسختی دارد [۲۵ و ۲۶]. دلیل کمتر بودن مقدار درصد افزایش سختی این پژوهش نسبت به کار سایر محققان این است که تعداد ضربات لیزر در این پژوهش ۱ ضربه و انرژی لیزر حدود ۱ ژول است که مقدار آن از کار سایر محققان کمتر است.

۲-۳- تنش پسماند

اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در اثر عملیات کوبش شوک لیزری به روش پراش اشعه ایکس به طور گسترده استفاده شده است. مبنای این روش اندازه‌گیری تغییرات در فاصله بین شبکه‌های بلوری است. هنگامی که در یک نمونه تنش پسماند وجود داشته باشد، فاصله میان صفحات بلوری با فاصله آنها در حالت بدون تنش متفاوت خواهد بود [۲۷]. این روش کم‌هزینه و پرکاربرد است که به‌صورت غیرمخرب می‌تواند خصوصیات و کمیت‌های بلوری را تعیین نماید [۲۸].

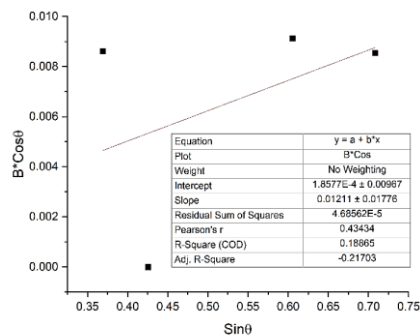
به‌منظور ارزیابی مقدار تنش پسماند نرم‌افزار Xpert HighScore Plus و روش $\sin^2\psi$ به کار رفته است. برای آزمایش تعیین تنش پسماند، ابتدا سطح موردنظر برای اندازه‌گیری تنش، تحت آزمون XRD، از زاویه حدود ۲۰ تا ۹۰ درجه قرار می‌گیرد. مقادیری که برای زاویه ψ در نظر گرفته شده به گونه‌ای است که مجذور سینوس زاویه آن دارای گام ۰/۱ باشد. شکل ۸ تصاویر الگوی پراش اشعه ایکس سه گروه نمونه ذکر شده را نشان می‌دهد. شکل ۸ نشان می‌دهد که وجود تنش پسماند باعث جابجایی پیک به ازای چرخش نمونه در زاویه‌های ψ مختلف شده است. پس از تعیین شیب نمودار $d - \sin^2\psi$ ، تنش پسماند در سطح مورد نظر تعیین می‌شود.

به دست آمده و شناسایی پیک‌ها استفاده شد. ارتفاع، پهنای پیک، $FWHM^1$ ، اندازه بلورک و کرنش محاسبه گردید. با توجه به نمودار ویلیامسون هال مطابق شکل ۹ و با استفاده از روابط ۱ و ۲ تنش پسماند در نمونه‌ها محاسبه گردید. در این دو رابطه E کرنش در صفحه مورد نظر، σ تنش در صفحه، E و ν ثابت‌های ماده، ψ و ϕ زوایای صفحات و d فاصله بین صفحات موازی کریستالی و d_0 فاصله بین صفحه‌ای در یک نمونه بدون کرنش است [۳۲].

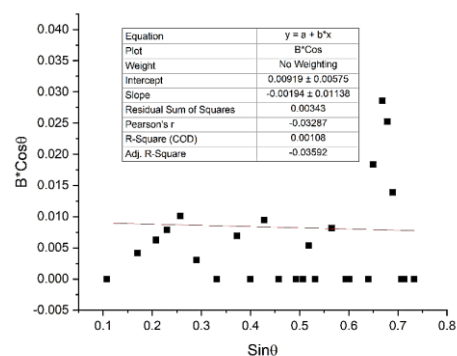
$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \cos^2\phi + \sigma_2 \sin\phi) \sin^2\psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1)$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2\psi} \left(\frac{d_{\psi} - d_n}{d_n} \right) \quad (2)$$

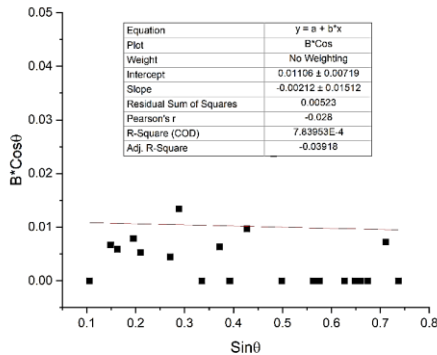
الف



ب



ج



شکل ۹- منحنی ویلیامسون هال برای سه نمونه: الف) ماده خام، ب) پوشش و لیزر شده، پ) لیزر شده

با استفاده از رابطه ۳ (رابطه شرر^۲) می‌توان میانگین اندازه بلورک را محاسبه کرد [۳۳] و با استفاده از تخمین‌هایی اندازه دانه را بدست آورد که در آن D اندازه بلورک، λ طول موج، K فاکتور شکل، β پهنای پیک و θ مکان پیک است. با استفاده از محاسبه گر معادله شرر که در نرم‌افزار Xpert وجود دارد، با وارد کردن مقادیر $FWHM$ و همچنین موقعیت زاویه‌ای خط پراش مورد نظر، اندازه بلورک و کرنش شبکه محاسبه می‌گردد. اندازه بلورک به دست آمده از آزمون XRD در جدول ۵ نشان می‌دهد که عملیات کوبش شوک لیزری سبب کاهش اندازه بلورک‌ها شده‌است.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3)$$

جدول ۵- اندازه بلورک و درصد کرنش محاسبه شده به

کمک نرم افزار Xpert			
ردیف	نوع نمونه	اندازه بلورک (nm)	درصد کرنش
۱	نمونه خام	۷۴۶/۱	۱,۲۱۱٪
۲	نمونه پوشش-دهی و کوبش لیزری شده	۱۵/۱	-۰,۱۹۴٪
۳	نمونه کوبش لیزری شده	۱۲/۵	-۰,۲۱۲٪

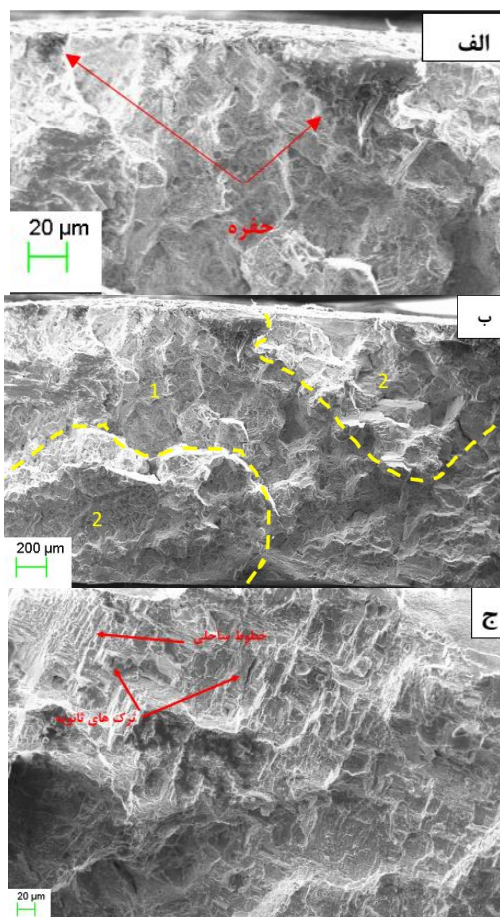
² Debye Scherrer

¹ Full width at half maximum

[۳۶]. لیزر با اعمال ضربه به سطح ماده و ایجاد تغییر شکل پلاستیک توانسته است، مقاومت ماده را در برابر خستگی افزایش دهد. در اثر اعمال ضربات لیزر بر سطح نمونه پوشش‌دهی شده، به دلیل بالا بودن انرژی لیزر پوشش نانوساختار از سطح جدا شده و در اثر ورود مواد خورنده به سطح ماده این نمونه نسبت به حالت لیزر شده در تعداد چرخه کمتری دچار شکست شده است. نتایج به دست آمده با پژوهش سایر مراجع تطابق دارد [۱۴-۱۵ و ۳۷].

۳-۴- تحلیل ریزساختاری

بعد از پایان آزمایش خستگی و شکست نمونه‌ها، سطح مقطع شکست به منظور شکست‌نگاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM تحت آزمون قرار گرفت. شکل ۱۱ این تصاویر را برای نمونه خام و بدون عملیات نشان می‌دهد.



با توجه به تحقیقات صورت گرفته بر روی اثر عملیات کوبش شوک لیزری بر روی ریزساختار و ساختار بلوری، نتایج نشان می‌دهد عملیات کوبش شوک لیزری به دلیل ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در ماده سبب اصلاح دانه‌بندی می‌گردد [۳۴ و ۳۵].

۳-۳- تحلیل خوردگی خستگی

آزمایش خستگی روی نمونه‌های اینکونل ۷۹۲ پس از خوردگی، قبل و بعد از کوبش شوک لیزری انجام شد. این آزمون به صورت کششی فشاری در مرکز پژوهش رازی به وسیله دستگاه یونیورسال صورت گرفته است. نمونه پس از آماده‌سازی درون گیره‌های دستگاه قرار گرفته و با ۵۰٪ تنش نهایی تحت بارگذاری خستگی قرار گرفته است. شکل ۱۰ نمایی کلی دستگاه را نشان می‌دهد. جدول ۶ نتایج آزمایش خستگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- دستگاه آزمایش خستگی به صورت کششی و فشاری

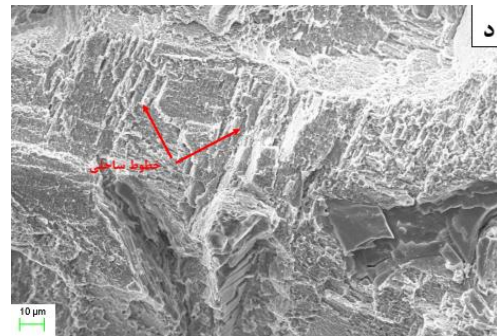
جدول ۶- نتایج آزمایش خستگی

نوع نمونه	(۱) نمونه خام بدون عملیات	(۲) نمونه پوشش‌دهی و کوبش لیزری شده	(۳) نمونه کوبش لیزری شده
تعداد چرخه تا شکست	۱۵۰۰۰	۳۶۱۶۳	۳۶۹۰۰

کاهش چرخه خستگی نمونه‌های خام ناشی از شروع زودهنگام ترک‌های خستگی در سطح این نمونه‌ها می‌باشد

خطوط ساحلی در نمونه بدون عملیات نشان دهنده این است که سرعت انتشار ترک در این نمونه‌ها بالاتر بوده است [۲۴]. مجموعه‌ای از خطوط خستگی موازی در نمونه‌های کوبش لیزری شده مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ الف مشخص است سطح شکست تقریباً عاری از ریزترک می‌باشد. این عملیات موجب کاهش اندازه دانه‌بندی شده است که در شکل ۱۱ ب ریزش دانه‌بندی کاملاً مشهود است. مرز دانه‌ها به عنوان مانعی در برابر انتشار ترک عمل می‌کند [۳۹]. مرز دانه بیشتر تولید شده توسط عملیات کوبش شوک لیزری علت افزایش چرخه خستگی تا شکست در نمونه کوبش لیزری شده نسبت به نمونه بدون عملیات است. نتیجه به دست آمده از SEM با نتیجه آزمون XRD در خصوص کاهش اندازه دانه‌بندی طی این عملیات که در بخش قبل بررسی شد، کاملاً منطبق است. کوبش شوک لیزری توانسته است با ایجاد تغییر شکل پلاستیک در سطح ماده ریزترک‌ها را ببندد. مطابق شکل ۱۱ ب مسیر رشد ترک خستگی در دمای بالا زیگزاگی می‌شود و رشد ترک در نمونه‌های تحت لیزر دشوارتر است. این نتیجه با گزارش سایر محققان مطابقت دارد [۳۹].

بررسی جزئیات تصاویر SEM سطوح شکست نمونه‌های بدون کوبش لیزری نشان‌دهنده این است که در مناطق رشد ترک خستگی پایدار، خطوط خستگی بسیار ظریف و خطوط ساحلی زیادی در مسیر رشد ترک خستگی دیده می‌شود (شکل ۱۰ ب و ج) اما در مورد نمونه لیزر شده، این ویژگی‌های شکست خستگی تنها در چندین محل کوچک ظاهر شده است، همان‌طور که با فلش در شکل ۱۱ الف نشان داده شده است. این مسئله به این معنی است که در مورد نمونه‌های لیزر شده، نرخ رشد ترک خستگی کمتر منجر به تشکیل مسیرهای شکست هموار و کاهش اختلاف ارتفاع مسیرهای شکست مجاور می‌شود. این نتیجه با نتایج سایر مقالات مطابقت دارد [۴۰]. تأثیر تنش‌های پسماند ناشی از عملیات کوبش شوک لیزری بر فاصله خطوط ساحلی توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته و گزارش شده است [۴۱].

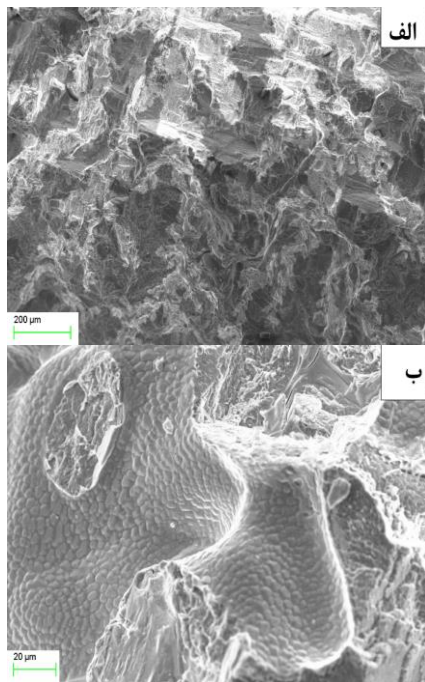


شکل ۱۱- تصویر SEM از سطح شکست نمونه بدون عملیات پس از آزمون خستگی

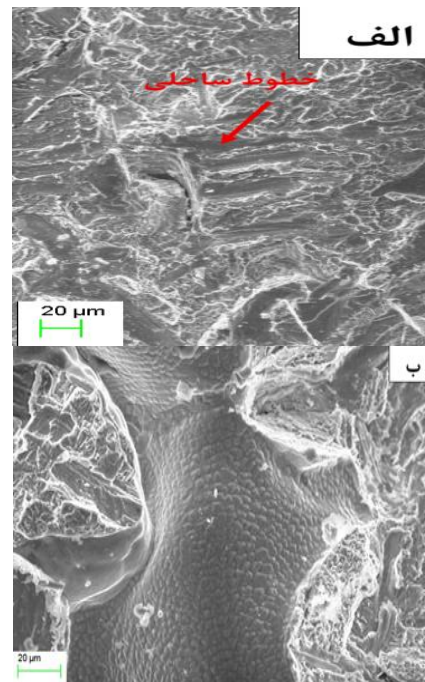
شکل ۱۱ سطح شکست نمونه خورده شده با پوشش نمک به مدت ۴۸ ساعت و دمای ۶۰۰ سلسیوس بدون هیچ‌گونه فراوری پس از شکست خستگی را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ الف محل شروع ترک در امتداد حاشیه سطوح شکست خستگی را نشان می‌دهد. این نواحی حفرات ایجاد شده در سطح به دلیل خوردگی می‌باشند. منشا شروع ترک خستگی از این نقاط در سطح بوده است که در اثر بارگذاری چرخه‌ای شکست نهایی اتفاق افتاده است. تصویر ۱۱ ب تصویر ماکرو با بزرگنمایی بالاتر از سطح شکست و نواحی ایجاد شده در آن را نشان می‌دهد. نواحی رشد ترک خستگی از خطوط ساحلی^۱ مشخص در سطح شکست مشهود است. ناحیه ۱ ناحیه رشد ترک و نواحی ۲ شکست نهایی می‌باشد. وجود ترک‌های ثانویه^۲ و علایم ساحلی که مشخصه رشد ترک خستگی می‌باشند، در شکل ۱۱ ج با بزرگنمایی بالاتر قابل مشاهده هستند. اعمال تنش‌های چرخه‌ای شرایط خستگی را در ماده فراهم می‌کند. در اثر خوردگی پیت‌ها و حفرات در سطح ماده تشکیل می‌شود که رشد ترک‌های خستگی را تسهیل می‌کند [۳۸]. پیت‌های ایجاد شده در اثر خوردگی در دمای بالا فرایند شروع و انتشار ترک خستگی را در نمونه‌های تحت خوردگی به دلیل تمرکز تنش در پیت‌ها تشدید می‌کند [۲۴]. خطوط موجی شکل سازوکار شکست خستگی را نشان می‌دهد. سطح نمونه‌ها ابتدا دچار خوردگی می‌شود؛ این خوردگی به تشکیل و رشد ترک خستگی کمک می‌کند و در نهایت نمونه به دلیل گسترش ترک خستگی تحت سازوکار خستگی دچار شکست می‌شود. فاصله بیشتر بین

² Secondary Fatigue Cracks

¹ Fatigue Striations



شکل ۱۳- تصویر SEM نمونه پس از پوشش‌دهی و کوبش شوک لیزری

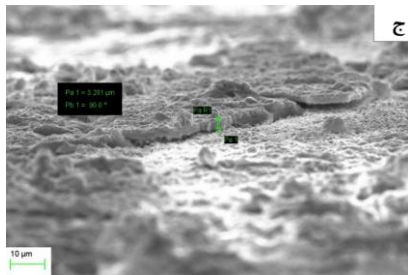
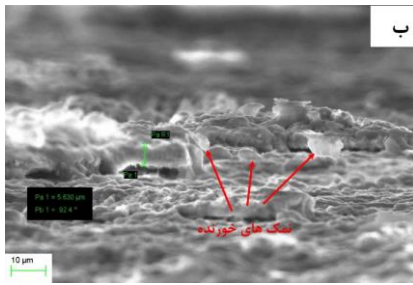


شکل ۱۲- تصویر SEM نمونه پس از عملیات کوبش شوک لیزری

سطح نمونه پس از قرار گرفتن در دمای ۶۰۰ سلسیوس و به مدت ۴۸ ساعت دچار خوردگی شده است. همجواری اولیه مخلوط نمک روی سطح نمونه داغ خورده شده به وضوح دیده می‌شود. شکل ۱۳ تصویر SEM نمک‌های خورنده روی سطح نمونه‌ها را نشان می‌دهد. تصویر ۱۳الف نمونه بدون هیچ گونه عملیات را نشان می‌دهد که لایه نسبتاً ضخیم و یکنواختی از نمک روی آن پوشیده شده است. ضخامت محصولات خوردگی تقریباً به $7/3$ میکرومتر می‌رسد. مشاهدات بصری تشکیل پوسته خاکستری بر نمونه خوردگی در دمای بالا، ناشی از همجواری اولیه مخلوط نمک را نشان می‌دهد. با این حال، پوسته دست نخورده و چسبنده است. ابتدا در چند ساعت اول یک لایه نازک از اکسیدهای کروم، تیتانیوم تشکیل می‌شود. با تشکیل برخی کلریدها/سولفیدها به آرامی روند خوردگی در مراحل بعدی افزایش می‌یابد [۲۴].

در نمونه ۱۳ب به دلیل اجرای عملیات کوبش شوک لیزری ضخامت محصولات خوردگی حدوداً به $5/6$ میکرومتر کاهش یافته و ناهمگنی در توزیع این محصولات در سطح دیده می‌شود. نمونه ۱۳ج که قبل از کوبش لیزری دارای پوششی از جنس اکسیدگرافن است کمترین میزان خوردگی را نشان

تصویر SEM سطح شکست نمونه بعد از پوشش‌دهی و کوبش شوک لیزری نیز عدم وجود ریزترک‌ها و کاهش اندازه دانه‌بندی در اثر این عملیات سطحی را تأیید می‌کند (۱۲الف). همانطور که در شکل ۱۲ب مشخص است، مسیر انتشار ترک زیگزاگی موجب سخت‌تر شدن رشد ترک می‌شود، به همین دلیل نمونه‌های تحت کوبش لیزری و پوشش‌دهی شده چرخه بیشتری را تا شکست طی نموده‌اند. موج ضربه پراورزی ناشی از عملیات کوبش لیزری باعث تغییر شکل پلاستیک ناهموار در سطح ماده می‌شود. ریزساختار سطحی آلیاژ پایه نیکلی IN792 به دلیل این تغییر شکل فشرده‌تر می‌شود، این مسئله به طور موثری عیوب ساختاری را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود در دمای بالا ترک خستگی به نیروی محرکه بیشتری نیاز داشته باشد [۳۹].



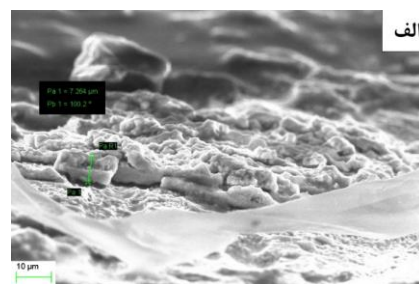
شکل ۱۴- ضخامت لایه خورنده ایجاد شده در سطح نمونه‌های مختلف

۳-۵- تحلیل خوردگی الکتروشیمیایی

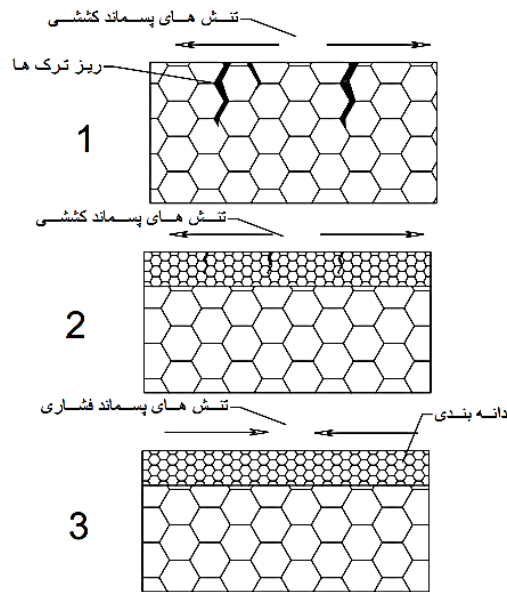
آزمایش خوردگی پلاریزاسیون برای نمونه پوشش‌دهی و لیزر شده در محلول ۳/۵ درصد NaCl به‌وسیله دستگاه پتانسیواستات انجام شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی در شکل ۱۴ و جدول ۷ مشاهده می‌گردد که وجود گرافن در پوشش به عنوان یک لایه حفاظت‌کننده از ماده در برابر خوردگی عمل کرده است. علت این است که افزودن پوشش اکسیدگرافن سبب کاهش سطح تماس زمینه فلزی و الکترولیت شده و سپس سطح فعال زمینه که مستعد به خوردگی است را کاهش می‌دهد. همین مسئله موجب مثبت‌تر شدن پتانسیل خوردگی نمونه دارای پوشش می‌گردد. این نمونه کاهش قابل توجه شدت جریان خوردگی را نیز نشان می‌دهد. از طرف دیگر عملیات کوبش لیزری با ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح ماده و تغییر خواص سطحی از جمله ریزکردن دانه‌بندی احتمال توقف ترک‌های سطحی را افزایش داده و مقاومت به خوردگی ماده بهبود می‌یابد. نتیجه آزمون خوردگی الکتروشیمیایی با نتایج SEM بررسی شده در بخش قبلی مطابقت دارد.

می‌دهد و ضخامت لایه خوردگی حدوداً به ۳/۲ میکرومتر می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۱۳ ج مشخص است، به دلیل حضور لایه‌ای از جنس اکسیدگرافن پوشش خورنده چسبندگی مناسبی با سطح زیرلایه ایجاد نکرده و جدایش این لایه کاملاً مشهود است. بخش پوست کنده شده روی سطح نمونه، شکسته شدن لایه اکسیدی توسط گونه‌های خورنده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که نتایج عمر خستگی نشان داد نمونه بدون فراوری لیزری کمترین میزان عمر خستگی را داراست که به دلیل نفوذ بیشتر مواد خورنده زودتر دچار شکست شده‌است. نمونه پوشش‌دهی و لیزر شده به دلیل نقش محافظتی پوشش اکسیدگرافنی از زیرلایه در برابر محیط خورنده و همچنین وجود تنش‌های پسماند فشاری سطحی در اثر کوبش لیزری نسبت به نمونه قبل عمر خستگی بیشتری دارد. به دلیل ایجاد تنش‌های پسماند فشاری بیشتر در سطح نمونه‌های فراوری شده با شوک لیزری این گروه از نمونه‌ها عمر خستگی بیشتری را نشان دادند. دلیل کمتر بودن عمر خستگی نمونه‌های پوشش‌دهی شده نسبت به لیزر شده این است که در اثر این عملیات بخشی از پوشش اکسیدگرافن از زیرلایه جدا شده و ماده خورنده به زیر سطح راه یافته است؛ به همین دلیل نمونه‌های پوشش‌دهی شده در چرخه کمتری دچار شکست شده‌اند. با توجه به این مسئله برای بهبود عمر خستگی ابتدا باید عملیات کوبش شوک لیزری، سپس در مرحله دوم پوشش‌دهی انجام شود.



عملیات با این سازوکار موجب بسته شدن و کاهش ریز ترک‌های سطحی شده و مقاومت در برابر خستگی را افزایش می‌دهد.

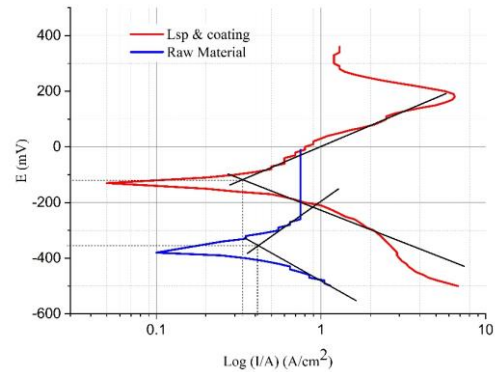


شکل ۱۶- شماتیک اثر عملیات کوبش شوک لیزری بر رشد ترک با کاهش اندازه دانه بندی

۴- نتیجه گیری

شکست ناشی از ترکیب بارگذاری خستگی و خوردگی یکی از دلایل تخریب قطعات توربین‌های گازی می‌باشد. ایجاد تنش پسماند فشاری مطلوب نقش مهمی در بهبود عمر پره‌های توربین ایفا می‌کند. هدف این پژوهش ارائه روشی جدید برای بهبود عمر خستگی قطعات تحت بارگذاری متناوب در محیط خورنده است. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- عملیات کوبش شوک لیزری به دلیل انتشار موج شوک درون ماده سبب ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح ماده می‌شود.
- ۲- عملیات کوبش شوک لیزری هیچ انتقال فازی در ماده ایجاد نمی‌کند.
- ۳- عملیات کوبش شوک لیزری با قفل کردن نابی‌های اندازه دانه بندی ماده را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۵- مقایسه منحنی پلاریزاسیون نمونه خام و نمونه پوشش‌دهی و کوبش لیزری شده

جدول ۷- جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی

شرح	جریان خوردگی (A/cm ²)	پتانسیل خوردگی mV
نمونه خام	۰/۳۳	-۱۱۰
نمونه تحت عملیات	۰/۴۱	-۳۵۰

نرخ خوردگی نمونه تحت عملیات کوبش لیزری در مقایسه با ماده خام به دلیل پتانسیل خوردگی بالاتر و چگالی جریان خوردگی کمتر، کاهش می‌یابد. بهبود مقاومت در برابر خوردگی به کاهش عیوب سطح و افزایش عملکرد مکانیکی ناشی از عملیات کوبش لیزری نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، این عملیات مکانیکی عیوب سطحی مانند منافذ و ترک‌ها را کاهش می‌دهد و از این طریق خوردگی را به تاخیر می‌اندازد [۴۲].

هنگامی که کوبش لیزری بر اینکونل اعمال می‌شود، باعث ایجاد کرنش‌های فشاری بر سطح ماده می‌شود. تنش پسماند فشاری ایجاد شده در اثر آن می‌تواند بر رفتار خوردگی مواد تأثیر بگذارد. در این عملیات، تنش‌های پسماند فشاری ناشی از امواج ضربه‌ای به مقاومت در برابر خوردگی مواد کمک می‌کند. فرآیندهای خوردگی اغلب با تشکیل و انتشار ترک بر روی سطح مواد آغاز می‌شود؛ این عملیات با فشرده‌سازی سطح از انتشار ترک جلوگیری می‌کند. این موضوع به جلوگیری از نفوذ عامل خورنده و گسترش آسیب خوردگی کمک می‌کند [۴۳].

وجود تنش‌های پسماند کششی سبب بازشدگی و رشد ریز ترک‌های می‌گردد، عملیات کوبش شوک لیزری با ایجاد تنش پسماند فشاری و همچنین ریز کردن دانه بندی سطحی موجب بهبود خواص مکانیکی و خستگی ماده می‌گردد. این

- and at different stress ratios. *Int. J. Fatigue*, 65, 33-43.
- [5] Larrosa, N. O., Akid, R., & Ainsworth, R. A. (2018). Corrosion-fatigue: a review of damage tolerance models. *Int. Mater. Rev.*, 63(5), 283-308.
- [6] Lu, J. Z., Luo, K. Y., Yang, D. K., Cheng, X. N., Hu, J. L., Dai, F. Z., & Zhang, Y. K. (2012). Effects of laser peening on stress corrosion cracking (SCC) of ANSI 304 austenitic stainless steel. *Corros. Sci.*, 60, 145-152.
- [7] Rozmus-Górnikowska, M., Kusiński, J., & Cieniek, Ł. (2020). Effect of laser shock peening on the microstructure and properties of the inconel 625 surface layer. *J. Mater. Eng. Perform.* 29, 1544-1549.
- [8] Ding, K., & Ye, L. (2006). *Laser shock peening: performance and process simulation*. Woodhead Publishing.
- [9] Zhang, C., Dong, Y., & Ye, C. (2021). Recent developments and novel applications of laser shock peening: a review. *Adv. Eng. Mater.*, 23(7), 2001216.
- [10] Maleki, E., Unal, O., Guagliano, M., & Bagherifard, S. (2021). The effects of shot peening, laser shock peening and ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue strength of Inconel 718. *Mater. Sci. Eng.: A*, 810, 141029.
- [11] Bai, Y. C., Hua, Y. Q., Rong, Z., Xue, Q., & Chen, R. F. (2014). On laser shock processing to improve hot corrosion resistance of In718 superalloy. *Adv. Mater. Res*, 989, 27-30.
- [12] Prabhakaran, S., Kumar, H. P., Kalainathan, S., Vasudevan, V. K., Shukla, P., & Lin, D. (2019). Laser shock peening modified surface texturing, microstructure and mechanical properties of graphene dispersion strengthened aluminium nanocomposites. *Surf. Interfaces*, 14, 127-137.
- [13] Karthik, D., & Swaroop, S. (2017). Laser shock peening enhanced corrosion properties in a nickel based Inconel 600 superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 1309-1319.
- [14] Wang, C., Shen, X. J., An, Z. B., Zhou, L. C., & Chai, Y. (2016). Effects of laser shock processing on microstructure and mechanical properties of K403 nickel-alloy. *Mater. Des.* 89, 582-588.
- [15] Bae, S., Kim, Y., Jung, J., Shin, K., Suh, C. M., & Jeong, S. (2024). Effects of laser shock peening on Inconel 738LC to improve mechanical and fatigue characteristics. *Opt. Laser Technol.*, 171, 110290.
- [16] Cockings, H. L., Cockings, B. J., Harrison, W., Dowd, M., Perkins, K. M., Whittaker, M. T. & Gibson, G. J. (2020). The effect of near-surface plastic deformation on the hot corrosion and high temperature corrosion-fatigue response of a nickel-based superalloy. *J. Alloys Compd.* 832, 154889.
- ۴- در اثر ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح عملیات کوبش شوک لیزری عمر خستگی ماده را به طور قابل قبولی افزایش می‌دهد.
- ۵- دلیل کاهش عمر خستگی نمونه‌های پوشش‌دهی شده در مقایسه با نمونه لیزر شده تخریب پوشش در اثر عملیات لیزری و افزایش راه ورود مواد خوردنده به سطح زیرلایه است.
- ۶- ایجاد پوششی از جنس اکسیدگرافن مقاومت سوپرآلیاژ را در برابر خوردگی افزایش می‌دهد.
- ۷- یکی از دلایل کاهش تنش پسماند ایجاد شده در نمونه پوشش شده نسبت به نمونه فاقد پوشش بعد از عملیات کوبش شوک لیزری، این است که لایه پوشش قبل از عملیات لیزر ایجاد گردیده است و در زمان عملیات کوبش شوک لیزری به مانند یک لایه ضربه‌گیر عمل کرده و مانع از نفوذ کامل موج لیزر به نمونه اصلی گردیده است.
- ۸- عملیات کوبش شوک لیزری و پوشش‌دهی سبب افزایش ۲/۴ برابری عمر خستگی گردیده است.
- ۹- جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی در نمونه تحت عملیات نسبت به نمونه خام به ترتیب ۲۴٪ و ۲۱۸٪ تغییر داشته است.
- ۱۰- اندازه بلورک نمونه خام پس از انجام عملیات کوبش شوک لیزری و پوشش‌دهی از ۷۴۶/۱ نانومتر به ۱۵/۱ نانومتر کاهش پیدا کرده است.
- ۱۱- سختی سنجی نمونه تحت عملیات نشان‌دهنده افزایش ۲۰ درصدی ریزسختی نمونه تحت عملیات نسبت به نمونه خام است.

مراجع

- [1] Brooks, C. R. (1982). Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys. (No Title).
- [2] Sims, C. T., Stoloff, N. S., & Hagel, W. C. (Eds.). (1987). *superalloys II* (Vol. 8). New York: Wiley.
- [3] Neidel, A., & Riesenbeck, S. (2012). Pitting Corrosion Induced Fatigue Fracture on a Gas Turbine Compressor Blade. *Prakt. Metallogr.*, 49(1), 35-48.
- [4] Schönbauer, B. M., Stanzl-Tschegg, S. E., Perlega, A., Salzman, R. N., Rieger, N. F., Zhou, S. & Gandy, D. (2014). Fatigue life estimation of pitted 12% Cr steam turbine blade steel in different environments

- composite electrodes via in situ high-energy x-ray diffraction computed tomography. *Nano Lett.* 19(6), 3811-3820.
- [29] Nath, S., Shukla, P., Shen, X., & Lawrence, J. (2018). Effect of laser shock peening (LSP) on the phase evolution, residual stress and hardness of Hastelloy-X superalloys. *Lasers Eng.* 39(1-2), 97-112.
- [30] Huang, S., Liu, J., Sheng, J., Meng, X., Hu, X., Zhu, M., Zhou, J. (2022). High-temperature fatigue crack growth characteristics of IN718 Ni-based alloy treated by laser peening. *Eng. Fract. Mech.* 276, 108922.
- [31] Kaufman, J., Špirit, Z., Vasudevan, V. K., Steiner, M. A., Mannava, S. R., Brajer, J., & Mocek, T. (2021). Effect of laser shock peening parameters on residual stresses and corrosion fatigue of AA5083. *Metals*, 11(10), 1635.
- [32] Hilly, M. E. (1971). Residual stress measurement by X-ray diffraction. *SAE Information Report*, 784.
- [33] Ross, J. R. (2018). *Contemporary Catalysis: Fundamentals and Current Applications*. Elsevier.
- [34] Wang, L., Yu, K., Cheng, X., Cao, T., & Zhou, L. (2023). Effect of laser shock peening on microstructure and mechanical properties of laser cladding 30CrMnSiNi2A high-strength steel. *Scientific Reports*, 13(1), 9971.
- [35] Samuel, C., Moganraj, A., Swaroop, S., Praveenkumar, K., Natarajan, A., Nageshwara Rao, M., & Bhattacharya, B. (2023). Effect of laser shock peening without coating on grain size and residual stress distribution in a microalloyed steel grade. *Crystals*, 13(2), 212.
- [36] Mahobia, G. S., Paulose, N., Mannan, S. L., Sudhakar, R. G., Chattopadhyay, K., Srinivas, N. S., & Singh, V. (2014). Effect of hot corrosion on low cycle fatigue behavior of superalloy IN718. *Int. J. Fatigue*. 59, 272-281.
- [37] Bae, S., Kim, Y., Jung, J., Shin, K., Suh, C. M., & Jeong, S. (2024). Effects of laser shock peening on Inconel 738LC to improve mechanical and fatigue characteristics. *Opt. Laser Technol.* 171, 110290.
- [38] Mahobia, G. S., Paulose, N., Mannan, S. L., Sudhakar, R. G., Chattopadhyay, K., Srinivas, N. S., & Singh, V. (2014). Effect of hot corrosion on low cycle fatigue behavior of superalloy IN718. *Int. J. Fatigue*. 59, 272-281.
- [39] Huang, S., Liu, J., Sheng, J., Meng, X., Hu, X., Zhu, M & Zhou, J. (2022). High-temperature fatigue crack growth characteristics of IN718 Ni-based alloy treated by laser peening. *Eng. Fract. Mech.* 276, 108922.
- [40] Mączka, M., Collings, I. E., Leite, F. F., & Paraguassu, W. (2019). Raman and single-crystal X-ray diffraction evidence of pressure-induced phase
- [17] Sun, Y., Wu, H., Du, H., & Yao, Z. (2022). Investigation of Strain Fatigue Behavior for Inconel 625 with Laser Shock Peening. *Materials*. 15(20), 7269.
- [18] Morar, N. I., Holtham, N., Hackel, L., Davami, K., Sharma, M., DeWald, A., & Roy, R. (2023). Effects of high-energy laser peening followed by pre-hot corrosion on stress relaxation, microhardness, and fatigue life and strength of single-crystal nickel CMSX-4® superalloy. *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.* 126(11), 4893-4912.
- [19] Ding, R., Li, W., Wang, X., Gui, T., Li, B., Han, P., & Song, L. (2018). A brief review of corrosion protective films and coatings based on graphene and graphene oxide. *J. Alloys and Compounds*, 764, 1039-1055.
- [20] Yi, Z., Kangning, C., Wei, W., Wang, J., & Lee, S. (2007). Effect of IrO₂ loading on RuO₂-IrO₂-TiO₂ anodes: A study of microstructure and working life for the chlorine evolution reaction. *Ceram.Int.* 33(6), 1087-1091.
- [21] Yadav, V. S., Sankar, M. R., & Pandey, L. M. (2020). Coating of bioactive glass on magnesium alloys to improve its degradation behavior: Interfacial aspects. *J. Magnesium Alloys*, 8(4), 999-1015.
- [22] Telang, A., Gill, A. S., Teyseyre, S., Mannava, S. R., Qian, D., & Vasudevan, V. K. (2015). Effects of laser shock peening on SCC behavior of Alloy 600 in tetrathionate solution. *Corros. Sci.* 90, 434-444.
- [23] TELANG, A., GILL, A. S., RAMAKRISHNAN, G., & VASUDEVAN, V. K. (2018). Effect of Different Ablative Overlays on Residual Stresses Introduced in IN718 SPF by Laser Shock Peening. *Int. J. Peening Sci. Tech. (IJPST)*.
- [24] Pradhan, D., Mahobia, G. S., Chattopadhyay, K., & Singh, V. (2018). Effect of pre hot corrosion on high cycle fatigue behavior of the superalloy IN718 at 600 C. *Int. J. Fatigue*. 114, 120-129.
- [25] Rozmus-Górnikowska, M., Kusiński, J., & Cieniek, Ł. (2020). Effect of laser shock peening on the microstructure and properties of the inconel 625 surface layer. *J. Mater. Eng. Perform.* 29, 1544-1549.
- [26] Bae, S., Kim, Y., Jung, J., Shin, K., Suh, C. M., & Jeong, S. (2024). Effects of laser shock peening on Inconel 738LC to improve mechanical and fatigue characteristics. *Opt. Laser Technol.* 171, 110290.
- [27] Hfaiedh, N., Peyre, P., Song, H., Popa, I., Ji, V., & Vignal, V. (2015). Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy. *Int. J. Fatigue* 70, 480-489.
- [28] Finegan, D. P., Vamvakeros, A., Cao, L., Tan, C., Heenan, T. M., Daemi, S. R., & Ban, C. (2019). Spatially resolving lithiation in silicon-graphite

- [42] Geethapriyan, T., Palani, I. A., Singh, M. K., Rai, D. K., Shanmuga Priyan, V. G., & Subbu, S. K. (2023). Post-processing of wire arc additive manufactured stainless steel 308L to enhance compression and corrosion behavior using laser shock peening process. *J. Mater. Eng. Perform.* 1-15.
- [43] Yoo, Y. R., Choi, S. H., & Kim, Y. S. (2023). Effect of laser peening on the corrosion properties of 304L stainless steel. *Materials*, 16(2), 804.
- transitions in a perovskite-like framework of $[(C_3H_7)_4N][Mn(N(CN)_2)_3]$. *Dalton Transactions*, 48(25), 9072-9078.
- [41] Kashaev, N., Ushmaev, D., Ventzke, V., Klusemann, B., & Fomin, F. (2020). On the application of laser shock peening for retardation of surface fatigue cracks in laser beam-welded AA6056. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 43(7), 1500-1513.