



بررسی المان محدود آزادسازی حرارتی تنش پسماند در Ti-6Al-4V تحت کوبش لیزری چندگانه

سهیل نخودچی^{1*}، محمدامین پورمیر²، مجید صادقی غریب دوستی³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 19395-19991، snakhodchi@kntu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
ایجاد تنش پسماند فشاری در قطعاتی که در تحت بارگذاری خستگی قرار دارند، راه حلی اقتصادی جهت افزایش استحکام می باشد که در واقع تمام و یا قسمتی از تنش های کششی اعمال شده به قطعه خنثی می گردد. این در حالی است که تنشهای پسماند در دمای بالا عموماً کاهش یافته و یا کلاً از بین می روند. لذا همواره نقش این تنش های پسماند در عملکرد قطعات در دمای بالا مورد سؤال بوده است. لذا ابتدا میدان تنش ناشی از روش کوبش لیزری چندگانه مدل سازی شده و سپس تاثیر دمای کاری قطعه که منجر به پدیده ی آزادسازی دمایی این میدان تنش می گردد، بررسی شده است. ماده ی مورد استفاده آلیاژ Ti-6Al-4V بوده و جهت اعمال اثر رفتار غیرخطی ماده در نرخ کرنش های بالا از مدل ماده ی جانسون-کوک استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که میدان تنش پسماند ناشی از این فرآیند به مراتب عمیق تر از روش های مشابه مانند ساچمه زنی بوده و با اعمال کوبش لیزری چندگانه به یک نقطه می توان از حداکثر تنش فشاری 640 مگاپاسکال در یک سیکل کوبش لیزری به 834 مگاپاسکال در دو سیکل و 889 مگاپاسکال در سه سیکل دست یافت. با اعمال دمای 600 درجه سانتی گراد به قطعه نیز مشاهد شد تنش پسماند آزاد شده حرارتی در سطح نمونه ی تحت کوبش لیزری یگانه، دوگانه و سه گانه به ترتیب 28.13%، 41.37% و 43.87% مقدار اولیه تنش پسماند قبل از اعمال حرارت می باشد.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 10 آذر 1396 پذیرش: 09 بهمن 1396 ارائه در سایت: 02 اسفند 1396 کلید واژگان: کوبش لیزری جانسون-کوک Ti-6Al-4V تنش پسماند آزادسازی حرارتی

A finite element study of thermal residual stress relaxation in multiple laser shock peened Ti-6Al-4V

Soheil Nakhodchi*, Mohammad Amin Poormir, Majid Sadeghi Gharibdosti

Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasireddin Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 19991-19395, Tehran, Iran, snakhodchi@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 December 2017
Accepted 29 January 2018
Available Online 21 February 2018

Keywords:
Laser shock peening
Johnson-Cook
Ti-6Al-4V
Residual stress
Thermal relaxation

ABSTRACT

Creation of a compressive residual stress in specimen that are exposed to fatigue induced failure, is considered to be a beneficial solution in order to neutralize all or some parts of the external force. Using components with this residual field stresses in high temperature applications can lead to reduction and termination of residual stress field and the effectiveness of this residual stress fields in high temperature is always questioned. So this paper aimed to simulate and study residual stress field made by multiple laser shot peening which is a novel method to create in depth residual stress. Thermal relaxation of this residual stress field due to working conditions was also investigated by FEM simulation in ABAQUS. Ti-6Al-4V was the employed material and since high strain rates were involved in dynamic loading process of simulation, Johnson-Cook material model was used to count for nonlinear material behavior. Results showed that created residual stress field from this method is much deeper than similar conventional shot peening process and by using multiple laser shot peening on the same spot, it is possible to achieve 640 MPa in one loading cycle, 834 MPa in two cycle loading and 889 MPa in three cycle loading. By applying 600 °C on specimen, it was observed that for each of single shot, double shot and triple shot specimens, a surface residual stress relaxation of 28.13%, 41.37% and 43.87% occurred, respectively.

1- مقدمه

در سازه باعث ایجاد تنش پسماند فشاری است، کوبش لیزری از مطلوب ترین روش ها جهت مقابله با پدیده های مرتبط با خستگی است. در این روش از پالس های لیزر با شدت بالا و مدت بقاء کم جهت ایجاد شوک های فشاری با قدرت زیاد به عنوان بار اعمالی به قطعه فلزی مورد استفاده است [1].

یکی از راه حل های افزایش استحکام قطعات در برابر آسیب های خستگی استفاده از تنش های پسماند فشاری است. این تنش های پسماند فشاری با تنش های کششی ناشی از اعمال بار به تعادل رسیده، باعث کاهش اثرات آن ها شده که در نهایت باعث افزایش عمر قطعات می شود. در میان روش هایی که

Please cite this article using:

S. Nakhodchi, M. A. Poormir, M. Sadeghi Gharibdosti, A finite element study of thermal residual stress relaxation in multiple laser shock peened Ti-6Al-4V, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 03, pp. 38-44, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

که فرآیند کوبش لیزری در حالت برخورد محدود شده انجام می‌شود، فشار پلاسمایی تا حدود 5 تا 10 گیگاپاسکال روی سطح فلز قابل تولید است. فشار پلاسمای قوی‌تر امکان دست یافتن به تنش پسماند فشاری با مقدار بالاتری و در اعماق پایین‌تری از قطعه در فرآیند کوبش لیزری را تسهیل می‌کند [11]. به منظور تأمین احتیاجات فرآیند کوبش لیزری بسیار مهم است که سیستم لیزر مناسبی انتخاب شود. این سیستم باید امکان تولید توانی بین چند صد وات تا چندین کیلووات، انرژی پالسی حدود 100 ژول و طول زمانی پالس حدود 30 نانوثانیه را دارا باشد. به‌علاوه احتیاج به نرخ تکرار بالای پالس‌های لیزر و یک طول موج معقول به منظور اطمینان از دستیابی به نتایج مورد نیاز از مسایلی است که باید مورد توجه قرار گیرد. در اکثر فرآیندهای کوبش لیزری شعاع لیزر بوسیله‌ی یک سیستم لیزری Q سوئیچ بر پایه‌ی شیشه نئودیمیوم اندود² یا اشعه لیزری کریستال ایتیریوم آلومینیوم که با طول موج 1.064 میکرومتر در محدوده‌ی فرورسرخ و با مدت پالس 10 تا 100 نانو ثانیه کار می‌کند، مورد استفاده است. در کل توسعه‌ی سیستم‌های لیزری برای موفقیت کاربرد صنعتی کوبش لیزری بسیار حائز اهمیت است. یک سیستم مناسب برای این فرآیند باید انرژی خروجی بین 10 تا 500 ژول در هر پالس با مدت زمان پالس کمتر از 100 نانو ثانیه دارا باشد. طول موج لیزر هم پارامتر بسیار تأثیرگذاری در چگونگی برهم‌کنش میان شعاع لیزر و سطح ماده است [12].

یکی از تحقیقات جدی در زمینه مقایسه اثرات این فرآیند با روش‌های متداول ایجاد تنش پسماند سطحی در سال 2009 و بر روی قطعاتی از جنس Ti-6Al-4V انجام شد. در این بررسی، نمونه‌های کاملاً مشابه از همین جنس تحت عملیات ساچمه‌زنی و کوبش لیزری قرار می‌گرفتند و سپس از نمونه‌ها آزمون خستگی کشش-کشش به عمل آمد [13]. دیگر پژوهش قابل توجه در خصوص عملیات کوبش لیزری، در سال 2014 و بر روی سوپر آلیاژ IN718 انجام شد. بدین منظور نمونه‌هایی از جنس این سوپر آلیاژ را تحت عملیات کوبش لیزری قرار داده و سپس اثر میدان تنش پسماند حاصل در نمونه و همچنین اثر شرایط محیط کارکرد بر این میدان را مورد بررسی قرار دادند.

همچنین در سال 2015 تحقیق بر تأثیر کوبش لیزری بر روی رشد ترک خستگی انجام شد که دستاورد آن بررسی رشد ترک خستگی در آلیاژ Ti-6Al-4V است [14]. آن‌ها ابتدا نمونه مورد آزمایش را تحت فرآیند کوبش لیزری قرار دادند و سپس به تحلیل مسیر ترک خستگی پرداختند. سپس نمونه بدون کوبش لیزری را با نمونه کوبش لیزری مقایسه کردند. همچنین اندازه‌گیری تنش باقی‌مانده با استفاده از روش پرتو X مورد بررسی قرار دادند [15]. تحقیق در زمینه تأثیر کوبش لیزری بر خواص سطحی و تنش باقی مانده سطحی در آلیاژ Al6061-T6 در سال 2016 با استفاده از لیزری با انرژی 1200 MJ و چگالی توان 5.6 GW/cm² با زمان روشنی پالس 8 ns نمونه تحت کوبش لیزری قرار گرفته و سپس بررسی نمونه موردنظر از لحاظ تنش‌های باقیمانده و سختی سطحی انجام شد [16]. مطالعه تجربی روی این آلیاژ همچنین بر روی زبری سطح و سختی نمونه‌ها نیز انجام شد [17].

تفاوت بین آزمایش‌های فوق علاوه بر جنس آلیاژ به کار رفته در شیوه اندازه‌گیری نیز می‌باشد. به این شکل که در خصوص آلیاژ Al6061-T6 از روش سوراخ‌کاری به منظور اندازه‌گیری تنش باقیمانده استفاده شده است، در حالی که روش پرتو اشعه ایکس روی Ti-6Al-4V به کار گرفته شد. در پژوهشی دیگر با استفاده از لیزر فرابنفش سطح نمونه‌ای از جنس Ti-6Al-

فرآیند کوبش لیزری به نوعی یک روش بهبود سطح نسبتاً جدید و تا حدودی خلاقانه است که در آن از امواج شوک ناشی از برخورد لیزر با سطح قطعه جهت تشکیل یک لایه تنش پسماند فشاری در سطح و تا عمق‌های نسبتاً کم در داخل قطعه استفاده می‌شود.

در فرآیند کوبش لیزری، فشاری شدید در اثر موج لیزر به سطح قطعه اعمال می‌شود، امواج شوک تولید شده باعث تغییر فرم پلاستیک ناحیه‌ی فوقانی قطعه می‌شوند. تغییر شکل پلاستیک سطحی به نوعی ازدیاد طول می‌باشد که در ناحیه الاستیک زیرین حبس شده است. این نوع فرآیند باعث به‌وجود آمدن یک تنش پسماند سطحی می‌گردد. از طرفی از آن‌جا که شدت موج شوک حین حرکت آن به سمت داخل جسم کاهش پیدا می‌کند، این امواج قادر به ایجاد تغییر فرم پلاستیک فقط در یک عمق کم در داخل قطعه هستند. لذا به منظور حفظ پیوستگی میان سطح دچار کشیدگی شده و هسته، لایه‌ی سطحی تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد. همچنین جهت حفظ تعادل، تنش‌های کششی جبرانی در داخل قطعه به‌وجود می‌آید [2].

مسأله‌ی ایجاد تغییر شکل پلاستیک در مواد فلزی بوسیله‌ی امواج شوک ناشی از پالس‌های لیزر پرنانرژی اولین بار در سال 1963 در ایالات متحده آمریکا کشف و تشخیص داده شده است [3]. اولین تحقیقات روی تشخیص پدیده‌ی انتقال تکانه برای پلاسمای حاصل از لیزر را بسط داده شد [5,4]. افزایش فشار بوسیله‌ی استفاده از لایه‌ی شفاف نیز در سال 1970 کشف شد [6]. اندازه‌گیری‌های تنش بوسیله‌ی استفاده از تور کوارتز انجام شد. به این منظور فویل آلومینیوم و دیسک کوارتز به‌عنوان روکش روی سطح قطعه قرار گرفتند. اگرچه آزمایش در محفظه‌ی [1] خلاء انجام شد، بهبود فشار در معرض هوا هم قابل حصول است. مزایای به‌کارگیری امواج شوک حاصل از لیزر در خواص مواد در سال 1974 بررسی شده است [7]. یکی از عوامل مهم در اهمیت اثرات تنش پسماند تأثیر مثبت تنش پسماند فشاری عامل در جهت افزایش عمر خستگی اجزاء فلزی است [8]. اولین قدم‌ها جهت ورود کوبش لیزری به تولید در دهه‌ی 1990 انجام شد؛ هنگامی که از کوبش لیزری روی پره‌های فن هواپیما F101 به‌منظور کاهش صدمه ناشی از اجسام خارجی اعمال شد [9].

فرآیند کوبش لیزری، فرآیندی بسیار پرنانرژی با طول زمان بسیار اندک است. این روش نیازمند لیزری با چگالی توان 10^9 W.cm^{-2} و طول پالس در بازه‌ی چندین نانو ثانیه است [10]. هنگامی که یک تابش شدید از باریکه‌ی لیزر به سطح یک قطعه فلزی برای مدت بسیار کمی (در حد 30 نانوثانیه) برخورد می‌کند، ناحیه‌ی اصابت لیزر با جذب انرژی بخار شده و به دمایی بالاتر از $10000 \text{ }^\circ\text{C}$ می‌رسد؛ در این حین بخار ایجاد شده بر اثر یونیزاسیون به پلازما تبدیل می‌شود. پلازما تا پایان زمان تابش لیزر به جذب انرژی ادامه می‌دهد. فشار تولید شده توسط پلازما به‌صورت امواج شوک به ماده منتقل می‌شود. بر هم‌کنش میان پلازما با سطح قطعه فلزی بدون پوشش را "برخورد مستقیم" می‌نامند. در این حالت فشار پلازما تا چند دهم گیگاپاسکال رسیده است. به‌منظور دستیابی به مقادیر بالای فشار شوک، فرآیند کوبش لیزری معمولاً در یک حالت تعریف شده به این صورت انجام می‌شود که سطح فلز به‌وسیله‌ی یک ماده‌ی کدر مانند رنگ سیاه یا فویل آلومینیوم پوشش داده شده و قطعه توسط یک ماده‌ی نور گذران مانند آب مقطر یا شیشه در مقابل تابش لیزر احاطه می‌شود. به این نوع برهم‌کنش "برخورد محدود شده"¹ می‌گویند. تحقیق‌های اخیر نشان داده است هنگامی

¹ Direct ablation² Confined ablation³ Neodymium-doped glass (Nd-glass)

معادله‌ی (1) توصیف می‌کند [22]:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T - T_m} \right)^m \right] \quad (1)$$

که در آن T_r دمای اتاق و T_m دمای ذوب ماده است. A , B , n , C و $\dot{\varepsilon}_0$ نیز ثوابتی هستند که از آزمون تیر هاپکینسون برای کرنش‌هایی با نرخ حدود 10^4 s^{-1} بدست می‌آید. A استحکام آغاز تسلیم در دمای اتاق، n جهت به احتساب آوردن کرنش سختی، m جهت مدل‌سازی نرمی در اثر دما و C معرف حساسیت نرخ کرنش است.

مهم‌ترین مزیت این مدل این است که تخمین پارامترهای دخیل در مساله به علت ایزوله بودن اثر سه مؤلفه ذکر شده، آسان می‌باشد. البته این خود می‌تواند یک عیب به حساب آید زیرا اثر برهم کنش میان این مؤلفه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. بر پایه‌ی تمام آنچه گفته شد، این مدل جهت استفاده در شبیه‌سازی فرآیند کوبش لیزری انتخاب و به کار برده شده است. برای Ti-6Al-4V ثوابت مربوط به مدل جانسون کوک در جدول 1 مشاهده می‌شود. خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V نیز در جدول 2 مشاهده می‌شود [22]:

2-2- هندسه و بارگذاری

امواج شوک ایجاد شده در طول فرآیند کوبش لیزری در حین تحلیل المان محدود به صورت بارگذاری فشاری مدل‌سازی می‌شوند. این بارگذاری با یک منحنی زمانی واقع‌گرایانه که مشابه منحنی زمانی ضربه لیزر است به قطعه اعمال شده است. فرم گوسی و فرم مثلثی از جمله پرکاربردترین این پروفیل‌ها است. البته شکل واقع‌گرایانه‌تر منحنی فشار کمی متفاوت از این دو حالت است. "شکل 1" پالس‌های لیزر و فشار را نمایش می‌دهد. کاملاً واضح است که زمان از بین رفتن پالس تنش بسیار آهسته‌تر از پالس لیزر است که علت آن حضور پلازما می‌باشد [23].

پالس فشاری مورد استفاده جهت شبیه‌سازی فرآیند کوبش لیزری براساس حالت واقعی بارگذاری که در نمودار "شکل 1" ارائه شده است، به صورت مجموعه‌ای از بارگذاری‌های خطی متوالی، در "شکل 2" نشان داده شده است [22].

همان‌گونه که پیش از این گفته شد مدت زمان بارگذاری در فرآیند کوبش لیزری بسیار کم می‌باشد و وجود نرخ کرنش بسیار بالا، بارگذاری در آن را به فرآیندی دینامیک تبدیل کرده است. لذا آنالیز در نرم‌افزار المان محدود آباکوس باید به دو مرحله‌ی تحلیل بارگذاری دینامیکی و تحلیل تعادل استاتیک تقسیم شود. طی مرحله اول بارگذاری پر سرعت، شدید و

جدول 1 ثوابت مدل جانسون کوک برای Ti-6Al-4V

پارامتر	مقدار
A (MPa)	950.2280
B (MPa)	603.3825
n	0.1992
c	0.0198
m	0.8000
$\dot{\varepsilon}_0$ (1/s)	0.0009

جدول 2 خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V [22]

خاصیت	مقدار
E (GPa)	113.8
ν	0.342
ρ (kgm ⁻³)	4500

4V تحت عملیات کوبش لیزری قرار گرفت و اثر این عملیات بر روی ریزساختار و دوقلوبی شدن‌های محل اعمال لیزر مورد تحقیق قرار گرفت [18].

همچنین مطالعات بسیاری در زمینه تاثیر کوبش لیزری بر خواص عمر خستگی انجام شده است که برای مثال می‌توان به ژابین و همکاران اشاره کرد که در سال 2015 تحقیقات خود را مبنی بر تاثیر کوبش لیزری بر روی رشد ترک خستگی آغاز کردند که دستاورد آن بررسی رشد ترک خستگی در آلیاژ Ti-6Al-4V است. آن‌ها ابتدا نمونه مورد آزمایش را تحت فرآیند کوبش لیزری قرار دادند و سپس به تحلیل مسیر ترک خستگی پرداختند. سپس نمونه بدون کوبش لیزری را با نمونه کوبش لیزری شده مقایسه کردند. همچنین اندازه‌گیری تنش باقی مانده با استفاده از روش پرتو ایکس انجام شده است [19].

به طور کلی می‌توان بیان کرد که کوبش لیزری با توجه به پارامترهای کنترلی بالاتر نسبت به سایر روش‌های ایجاد تنش پسماند از مزایای بالاتری برخوردار است و به همین دلیل و دلایلی که در قسمت‌های بالا ذکر شد یکی از کارآمدترین روش‌ها برای رسیدن به تنش پسماند با عمق نفوذ دلخواه و موقعیت دقیق است.

فرآیند کوبش لیزری در این تحقیق بر روی آلیاژ پرکاربرد Ti-6Al-4V به کمک روش اجزاء محدود مدل‌سازی شده است و با اعمال پارامترهای حقیقی این آزمایش تنش‌های پسماند بوجود آمده در قطعه، در مدل اجزاء محدود محاسبه شده‌اند. با مقایسه این تنش‌ها با مقادیر به‌دست آمده از نتایج آزمایش‌های تجربی، مدل اجزاء محدود صحه‌گذاری شده است. سپس فرآیند آزادسازی تنش‌های پسماند در مدل مذکور شبیه‌سازی شده و مقادیر جدید تنش‌های پسماند برای دمای ثابت 600 درجه سانتی‌گراد محاسبه شده‌اند.

2- شبیه‌سازی کوبش لیزری

2-1- مدل ماده

طی کوبش لیزری تغییر شکل پلاستیک بر اثر امواج شوک ناشی از برخورد لیزر با سطح ماده اتفاق می‌افتد. امواجی که باعث ایجاد تنش‌های بالاتر از حد تسلیم ماده می‌شوند، عموماً امواج پلاستیک نامیده می‌شوند. این امواج پلاستیک هنگامی که جبهه‌ی موج شیب زیادی دارد به‌عنوان موج شوک شناخته می‌شوند. این امواج شوک که در فرآیند کوبش لیزری استفاده می‌شود باعث ایجاد نرخ کرنش بسیار زیاد در قطعه می‌گردند. قطعات تحت کوبش لیزری گاهی نرخ کرنش‌هایی بیش از $10^6/\text{s}$ را تجربه می‌کنند که در مقایسه با نرخ کرنش‌های متداول مقدار بسیار زیادی است. در نرخ کرنش‌های پایین رفتار ماده مستقل از نرخ کرنش است اما پاسخ ماده به بارگذاری ضربه به صورت قابل توجهی متفاوت از حالت شبه استاتیک است و باید این تاثیر مدنظر باشد [20].

مدل‌سازی صحیح هر فرآیند تولید نیازمند شبیه‌سازی رفتار مکانیکی ماده در شرایط فرآیند می‌باشد. جهت نیل به این مقصود مدل‌های مادی مختلفی توسط محققان مختلف ارائه شد. یکی از بهترین مدل‌هایی که ارائه شد و پس از آن در کاربردهای گوناگون مورد استفاده قرار گرفت مدلی بود که جانسون و کوک در سال 1986 مطرح نمودند [21].

در خصوص مطالعات ضربه بیش از هر مدل دیگری از مدل جانسون-کوک استفاده شده است. این مدل جریان تنش در ماده (σ) را به عنوان محصولی از سه عامل کرنش سختی، نرخ کرنش وابسته و جملات دمایی طبق

بارگذاری 5.5 GPa به عنوان شرایط بارگذاری دینامیک استفاده شده است. برای انجام تحلیل تعادل استاتیک و یافتن میدان تنش پسماند نیز با استفاده از حل استاندارد آباکوس به این صورت استفاده می‌شود که حالت نهایی مدل پس از پایان تحلیل دینامیک در حل گر صریح آباکوس، با جایگزین نمودن مرحله دینامیک با استاتیک، تحلیل انجام می‌شود. نتیجه‌ی این تحلیل تعیین تنش پسماند در قطعه بر اثر فرآیند کوبش لیزری خواهد بود.

قطر محل اصابت لیزر نیز متفاوت بوده و بسته به چگالی توان و قدرت لیزر مورد نیاز، دارای محدودیت می‌باشد. با تغییر قطر از 1.2 mm تا 5 mm رفتار انتشاری موج شوک تغییر می‌کند [24]. برای قطرهای کوچک، موج شوک مانند یک کره گسترش پیدا می‌کند که باعث فرسایش انرژی موج با نرخ $1/r^2$ خواهد شد. برای قطرهای بزرگ‌تر نیز نشر موج به صورت صفحه‌ای با کاهش انرژی با نرخ $1/r$ صورت می‌پذیرد. لذا نرخ کاهش انرژی امواج حاصل از اصابت لیزر به ماده برای قطرهای بزرگ‌تر، کمتر بوده و امواج تنش صفحه‌ای به عمق بیشتری از ماده نفوذ می‌کنند.

همچنین لازم به ذکر است که اعمال بار لیزر به روش‌های گوناگون دیگری نیز قابل انجام است که از آن جمله می‌توان به استفاده از سابروتین‌نویسی در آباکوس اشاره نمود [25,26]. اما چون در روش کوبش لیزری بار مکانیکی عامل اصلی ایجاد میدان تنش پسماند است و می‌توان از حرارت ایجاد شده حین فرآیند صرف‌نظر نمود، نیازی به استفاده از این روش وجود نداشت.

پس از ایجاد میدان تنش پسماند ناشی از یک بار بارگذاری، با اعمال چند باره‌ی روند بارگذاری، می‌توان اثر ناشی از کوبش لیزری چندگانه روی میدان تنش پسماند شعاعی را مشاهده نمود. در مرحله‌ی بعد با اعمال حرارت به مدل، بررسی آزادسازی تنش پسماند ایجاد شده در مراحل اولیه برای حالات کوبش لیزری یگانه، دوگانه و سه‌گانه انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- صحنه‌سنجی مدل

جهت اطمینان از صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزاء محدود، نتایج مربوط به مدل کوبش لیزری یگانه شامل میدان تنش پسماند شعاعی و کرنش پلاستیک معادل در مسیر خطی به فاصله‌ی یک میلی‌متر از مرکز و در عمق نمونه با نتایج حاصل از آزمایش [22] مقایسه و مدل صحنه‌گذاری شد. "شکل 4 و 5" به ترتیب نشان دهنده‌ی میدان تنش پسماند شعاعی برحسب عمق قطعه و میدان کرنش پلاستیک معادل برحسب عمق قطعه است.

همان‌طور که در "شکل‌های 4 و 5" مشاهده می‌شود، نتایج مدل‌سازی انطباق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. خطای مشاهده شده در نتایج را نیز می‌توان ناشی از تفاوت در شرایط انجام آزمایشات، عدم یکنواختی بار اعمال شده به نمونه و همچنین تفاوت در پروفیل بارگذاری واقعی با تقریب انجام شده در مدل عددی دانست.

همچنین جهت بررسی همگرایی نتایج، مدل موردنظر برای 4 اندازه المان مختلف شامل 0.05، 0.1، 0.2 و 0.4 میلی‌متر در ناحیه‌ی اعمال بارگذاری و ایجاد میدان تنش پسماند انجام شد. اگر چه در اکثر نواحی دامنه موردنظر، نتایج تنش پسماند حاصل از کوبش لیزری عملاً منطبق بر یکدیگرند، اما جهت دستیابی به بیشترین دقت ممکن در ناحیه‌ی سطحی که عمده اختلاف میان نتایج در این ناحیه اتفاق می‌افتد، از سایز مش 0.1 میلی‌متر استفاده شده که انطباق بسیار خوبی با ابعاد مش ریزتر دارد و پس از

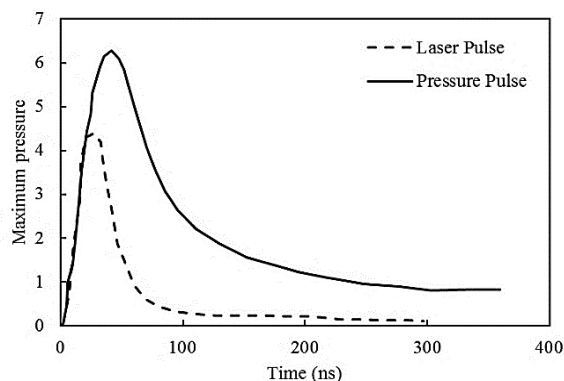


Fig 1. Laser pulse and resultant pressure force [23].

شکل 1 پالس لیزر و بار فشاری حاصل [23].

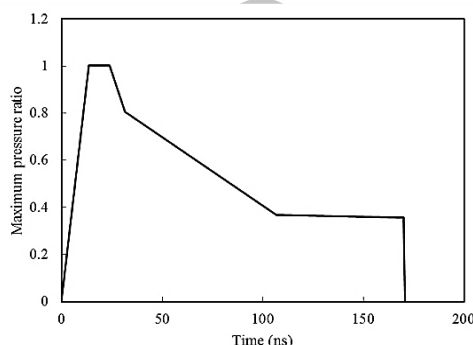


Fig. 2 Temporal shock wave pressure curve applied in FE Model

شکل 2 منحنی فشار گذرای موج شوک اعمال شده در مدل اجزاء محدود

کوتاه تا زمانی که تغییر فرم پلاستیک کامل شود، انجام خواهد شد. در مرحله‌ی دوم تحلیل تعادل استاتیکی جهت یافتن تنش پسماند حاصله انجام خواهد شد. اطلاعات حاصل از مرحله‌ی اول شامل تنش‌ها، کرنش‌ها و جابه‌جایی گره‌ها به صورت یک میدان پیش تعیین شده در تحلیل تعادل در آباکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همچنین فرآیند کوبش لیزری به وسیله‌ی یک شعاع لیزر دایروی روی مقطع یک استوانه انجام شده است. لذا با استفاده از شرایط تقارن هندسه نهایی مدل مورد استفاده به صورت "شکل 3" خواهد بود.

شعاع بارگذاری (r_p) 4 mm، شعاع محدوده‌ی المانی (r_f) 6 mm و فشار

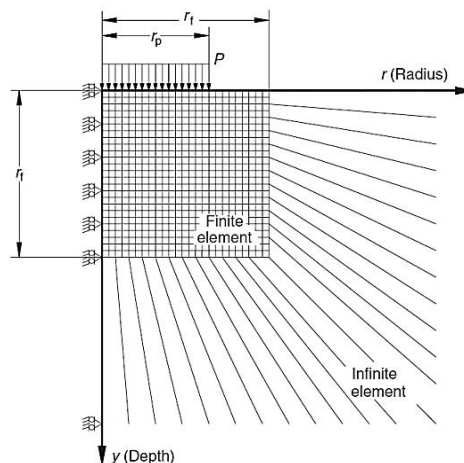


Fig. 3 2D symmetric model for laser shot peen simulation [23]

شکل 3 مدل دو بعدی متقارن جهت شبیه‌سازی کوبش لیزری [23]

می‌باشد. از طرفی دیگر در صورت بررسی میدان تنشی هرچه از سطح فاصله بگیریم تنش باقی مانده کاهش پیدا می‌کند که این امر نشان‌دهنده‌ی آن است که انرژی تنش با تغییر زیاد ابعاد در دانه‌های سطحی باعث شده انرژی کمتری به لایه‌های پایینی برسد و لذا مقدار تنش پسماند با عمق رابطه‌ی معکوس دارد [27].

جهت بررسی نحوه‌ی تشکیل میدان تنش پسماند، مطالعه‌ی چگونگی گسترش امواج تنش ناشی از اصابت لیزر به سطح نمونه راهگشا است. لذا در "شکل 7" نحوه‌ی گسترش موج تنش درون قطعه در زمان‌های 200 تا 1200 ns پس از اعمال بار فشاری، درون قطعه مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در "شکل 7" مشاهده می‌شود موج تنش پس از اصابت لیزر به سطح جسم، به صورت یک جبهه از تنش فشاری شروع به نفوذ در قطعه می‌کند. به مرور و با نفوذ بیشتر این موج به داخل قطعه شدت تنش فشاری در پیشانی موج تنش کاهش یافته و انرژی اولیه‌ی موج مستهلک می‌شود. نکته قابل توجه عمق نفوذ موج تنش با شدت بالا درون قطعه است. با توجه به آن که اولاً موج تنش ناشی از این فرآیند تا عمق نسبتاً زیادی درون قطعه منتشر می‌شود، ثانیاً موج تنش شدت اولیه خود را تا حد خوبی حین انتشار درون قطعه حفظ می‌کند، این فرآیند توانایی ایجاد تغییر فرم پلاستیک در عمق قطعه را دارا می‌باشد. این همان توانایی است که موجب شده از این روش جهت ایجاد تنش‌های پسماند در قطعاتی که در معرض شکست در اثر خستگی هستند استفاده شود. "شکل 8" میدان تنش شعاعی ناشی از بارگذاری دینامیکی در 400 نانوثانیه پس از بارگذاری را نشان می‌دهد.

3-2- نتایج کوبش لیزری چندگانه

با توجه به این که نتایج مربوط به مدل کوبش لیزری یگانه منطبق بر داده‌های آزمایشگاهی بود، با استفاده از میدان تنش پسماند حاصل از آن به عنوان حالت اولیه مدلی ثابته و تکرار همین روند، می‌توان میدان تنش پسماند ناشی از کوبش لیزری دوگانه و سه گانه را نیز به دست آورد. "شکل 9" تغییرات ایجاد شده در میدان تنش پسماند شعاعی ناشی از بارگذاری در همان محل اولیه بر روی مسیری در عمق نمونه و به فاصله‌ی 2 mm از مرکز محل بارگذاری نشان می‌دهد.

در "شکل 9" مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری شدت میدان تنش در عمق یکسان از قطعه افزایش قابل توجهی می‌یابد به نحوی که بیشینه‌ی تنش پسماند فشاری برای حالت کوبش لیزری یگانه

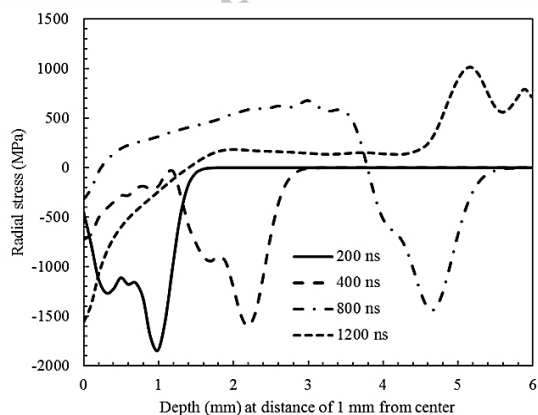


Fig. 7 Stress wave propagation in specimen in different step times.

شکل 7 گسترش موج تنش درون نمونه طی گام‌های زمانی مختلف.

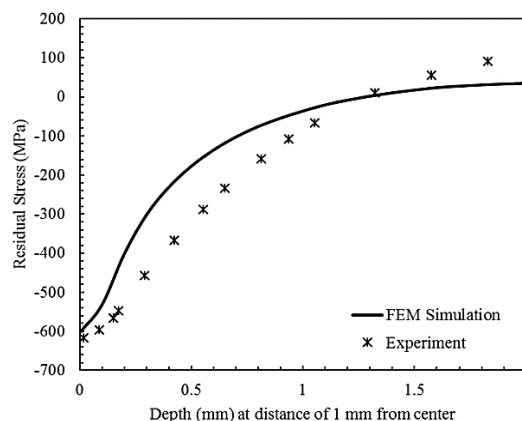


Fig. 4 Radial residual stress field versus depth of the specimen

شکل 4 میدان تنش پسماند شعاعی برحسب عمق نمونه

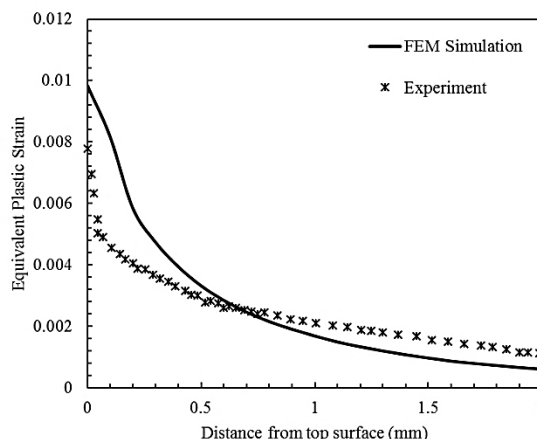


Fig. 5 Equivalent plastic strain field versus depth of the specimen

شکل 5 میدان کرنش پلاستیک معادل برحسب عمق نمونه

آن کاهش سایز المان تاثیر قابل توجهی در نتایج ایجاد نمی‌کند. "شکل 6" میدان تنش پسماند شعاعی ناشی از کوبش لیزری یگانه را نشان می‌دهد.

در فرآیند کوبش لیزری در صورتی که سرعت موج تنش گذرنده از ماده بسیار بالا باشد، عبور این موج باعث ایجاد تغییر در ابعاد دانه‌های سطحی فلز می‌شود. این تغییر در ابعاد شامل کشیده شده دانه‌ها شده که در اثر افزایش شدید ناهم‌جایی‌ها درون دانه و روی سطح مرز دانه می‌شود که این امر موجب افزایش سختی سطحی و افزایش استحکام فلز و همچنین افزایش تنش تسلیم خواهد شد. این افزایش خواص مکانیکی در اثر تغییر در خواص متالوگرافی بوده و این امر خود متأثر از تنش پسماند فشاری در سطح نمونه

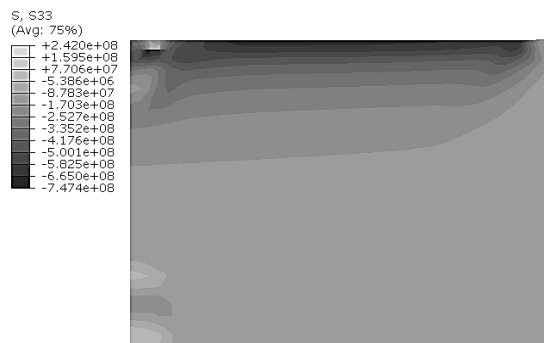


Fig. 6 Radial residual stress field (Pa) for single laser shot peen

شکل 6 میدان تنش پسماند شعاعی (پاسکال) حاصل از کوبش لیزری یگانه

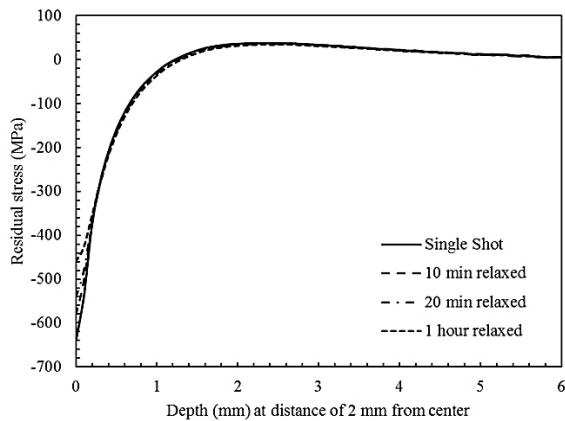


Fig. 10 Residual stress relaxation for a single shot peened specimen at 600 °C

شکل 10 آزادسازی تنش پسماند در دمای 600 درجه سانتی گراد برای نمونه کوبش لیزری یگانه

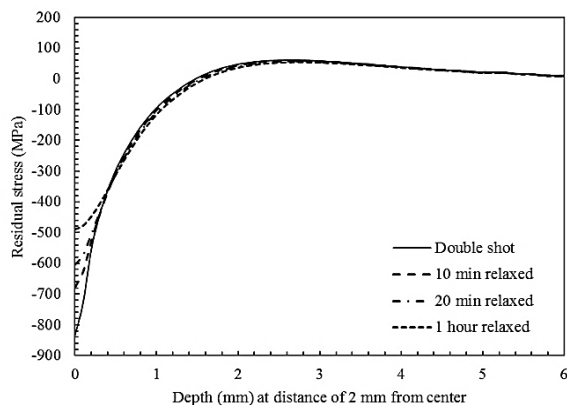


Fig. 11 Residual stress relaxation for a double shot peened specimen at 600 °C.

شکل 11 آزادسازی تنش پسماند در دمای 600 درجه سانتی گراد برای نمونه کوبش لیزری دوگانه

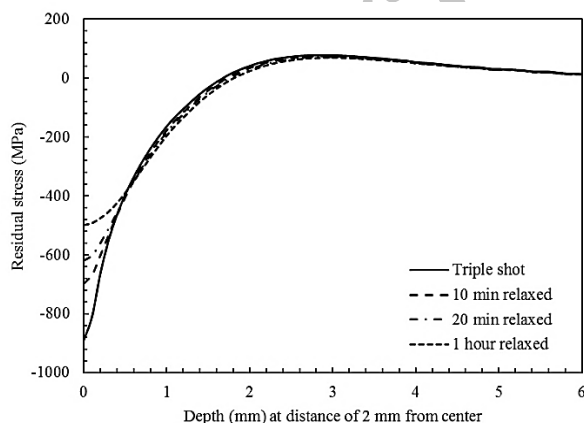


Fig. 12 Residual stress relaxation for a triple shot peened specimen at 600 °C.

شکل 12 آزادسازی تنش پسماند در دمای 600 درجه سانتی گراد برای نمونه کوبش لیزری سه گانه

و 43.87% می باشد.

این امر متأثر از تغییر در خواص متالوگرافی قطعه مورد نظر می باشد.

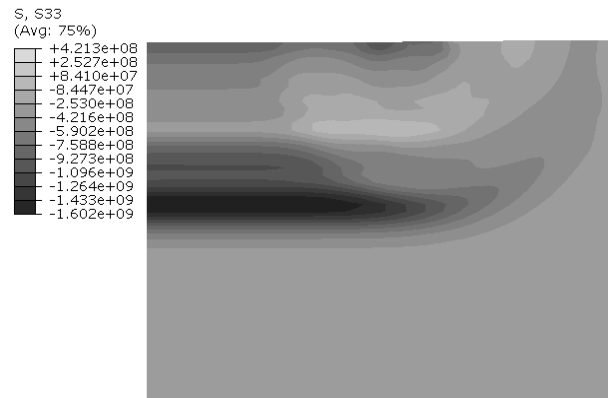


Fig. 8 Radial stress field (Pa) 400 ns after loading

شکل 8 میدان تنش شعاعی (پاسکال) 400 نانو ثانیه پس از بارگذاری

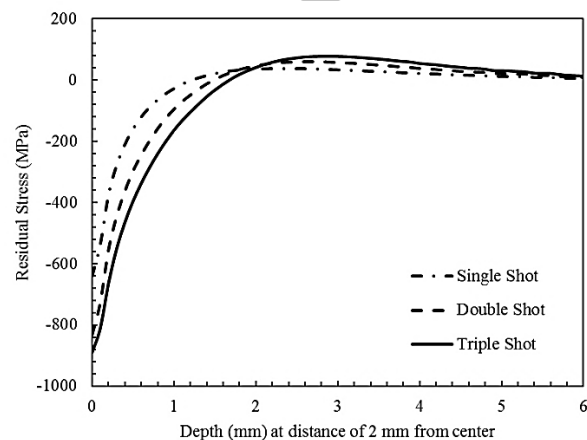


Fig. 9 Radial residual stress field for single, double and triple laser shot peen.

شکل 9 میدان تنش پسماند شعاعی کوبش لیزری یگانه، دوگانه و سه گانه.

640 MPa بوده اما برای کوبش لیزری دوگانه و سه گانه به ترتیب به 834 MPa و 889 MPa می رسد. البته نکته‌ی جالب توجه آن است که با وجود افزایش شدت میدان تنش پسماند در حالت‌های کوبش لیزری دوگانه و سه گانه، مقدار تنش پسماند برای هر سه حالت در عمق 2 mm از سطح نمونه به مقداری یکسان می رسد.

اگر چه با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری شدت تنش پسماند افزایش می یابد اما این امر خود منجر به افزایش تغییر فرم پلاستیک در نمونه شده و می تواند عامل ناپایداری میدان تنش پسماند شود. به منظور بررسی اثر این عامل در میزان تنش آزادسازی شده حین قرارگیری قطعه در دماهای بالا، مدل تا دمای 600 درجه سانتی گراد گرم شده و برای هر یک از حالات کوبش لیزری یگانه، دوگانه و سه گانه آزادسازی دمایی میدان تنش پسماند شعاعی در زمان‌های 10، 20 و 60 دقیقه پس از قرارگیری مدل در معرض حرارت بررسی شد. "شکل‌های 10 تا 12" به ترتیب نشان دهنده‌ی اثر اعمال حرارت در دمای 600 درجه سانتی گراد بر نمونه‌های کوبش لیزری یگانه، دوگانه و سه گانه هستند.

آنچه در "شکل‌های 10 تا 12" مشاهده می شود آن است که با افزایش تعداد دفعات اصابت لیزر در یک نقطه شدت آزادسازی حرارتی افزایش می یابد به طوری که در کوبش لیزری یگانه بیشینه‌ی کاهش میدان تنش پسماند شعاعی در مدت یک ساعت حرارت دهی مقدار 28.13% بوده است که این عدد برای نمونه‌های کوبش لیزری دوگانه و سه گانه به ترتیب 41.37%

- for Laser Shock Processing, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 3, No. 10, pp. 3997-4002, 2016.
- [2] A. Warren, Y. Guo, S. Chen, Massive Parallel Laser Shock Peening: Simulation, Analysis, and Validation, *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, No. 1, pp. 188-197, 2008.
- [3] R. M. White, Elastic Wave Generation by Electron Bombardment or electromagnetic Wave Absorption, *Journal of Applied Physics*, Vol. 34, No. 7, pp. 2123-2124, 1963.
- [4] C. Skeen, C. York, LASER-INDUCED "BLOW-OFF" PHENOMENA, *Applied Physics Letters*, Vol. 12, No. 11, pp. 369-371, 1968.
- [5] D. W. Gregg, S. J. Thomas, Momentum transfer produced by focused laser giant pulses, *Journal of Applied Physics*, Vol. 37, No. 7, pp. 2787-2789, 1966.
- [6] N. Anderholm, Laser-generated stress waves, *Applied Physics Letters*, Vol. 16, No. 3, pp. 113-115, 1970.
- [7] P. Mallozzi, B. Fairand, *Altering material properties*, US Patent No. 3850698, 1974.
- [8] A. Clauer, B. Fairand, Interaction of laser-induced stress waves with metals, *Applications of Lasers in Materials Processing* Ed., E. Metzbowler, *ASM International, Materials Park, OH*, Vol. 1, No. 1, pp. 229, 1979.
- [9] A. H. Clauer, Laser Shock Peening for fatigue Resistance, Surface performance of titanium, Vol. 1, No. 1, pp. 217-230, 1996.
- [10] P. Peyre, R. Fabbro, Laser Shock Processing: a Review of the Physics and Applications, *Optical and quantum electronics*, Vol. 27, No. 12, pp. 1213-1229, 1995.
- [11] J. Bolger, C. Montross, A. V. Rode, Shock waves in basalt rock generated with high-powered lasers in a confined geometry, *Journal of Applied Physics*, Vol. 86, No. 10, pp. 5461-5466, 1999.
- [12] K. Ding, L. Ye, *Laser Shock Peening: Performance and Process Simulation*: Woodhead Publishing, 2006.
- [13] K. K. Liu, M. R. Hill, The Effects of Laser Peening and shot Peening on Fretting Fatigue in Ti-6Al-4V Coupons, *Tribology International*, Vol. 42, No. 9, pp. 1250-1262, 2009.
- [14] S. Zabeen, M. Preuss, P. Withers, Evolution of a laser shock peened residual stress field locally with foreign object damage and subsequent fatigue crack growth, *Acta materialia*, Vol. 83, No. 1, pp. 216-226, 2015.
- [15] Z. Zhou, A. S. Gill, A. Telang, S. R. Mannava, K. Langer, V. K. Vasudevan, D. Qian, Experimental and finite element simulation study of thermal relaxation of residual stresses in laser shock peened IN718 SPF superalloy, *Experimental Mechanics*, Vol. 54, No. 9, pp. 1597-1611, 2014.
- [16] A. Salimianrizi, E. Foroozmehr, M. Badrossamay, H. Farrokhpor, Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 77, No. 1, pp. 112-117, 2016.
- [17] A. Salimian, E. Foroozmehr, M. Badrossamay, Laser Shock Peening of Al 6061-T6 Alloy, a theoretical and experimental study, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 73-79, 2015. (in Persian)
- [18] D. F. Carpeno, T. Ohmura, L. Zhang, M. Dickinson, C. Seal, M. Hyland, Softening and compressive twinning in nanosecond ultraviolet pulsed laser-treated Ti6Al4V, *Scripta Materialia*, Vol. 113, No. 1, pp. 139-144, 2016.
- [19] M. Kattoura, S. R. Mannava, D. Qian, V. K. Vasudevan, Effect of laser shock peening on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 102, No. 1, pp. 121-134, 2017.
- [20] Z. Zhou, A. S. Gill, D. Qian, S. Mannava, K. Langer, Y. Wen, V. K. Vasudevan, A finite element study of thermal relaxation of residual stress in laser shock peened IN718 superalloy, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 7, pp. 590-596, 2011.
- [21] G. R. Johnson, W. H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *In Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, pp. 541-547, 1983.
- [22] H. Amarchinta, R. Grandhi, K. Langer, D. Stargel, Material model validation for laser shock peening process simulation, *Modelling and simulation in materials science and engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 10-15, 2008.
- [23] C. Crudo, *Investigation on laser shock peening capability by FE simulation*, PhD Thesis, UNIVERSITA DI BOLOGNA, 2012.
- [24] R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe, X. Scherpereel, Physics and applications of laser-shock processing, *Journal of laser applications*, Vol. 10, No. 6, pp. 265-279, 1998.
- [25] E. Golchin, M. Moradi, S. Shamsaei, Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution, *in Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 416-420, 2015.
- [26] M. Moradi, E. Golchin, Investigation on the Effects of Process Parameters on Laser Percussion Drilling Using Finite Element Methodology; Statistical Modelling and Optimization, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 14, No. 3, pp. 464-484, 2017.
- [27] G. E. Dieter, D. J. Bacon, *Mechanical metallurgy*, McGraw-hill, New York, Vol. 3, pp. 393-417, 1986.
- [28] J. Sieniawski, W. Ziaja, K. Kubiak, M. Motyka, Microstructure and mechanical properties of high strength two-phase titanium alloys, *Titanium Alloys-Advances in Properties Control InTech*, Vol. 1, pp. 71-79, 2013.

زمانی که نمونه آزمایش را در دمای 600 درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار می‌دهیم طبق نمودار تغییرات سرد کردن پیوسته برای آلیاژ تیتانیوم آلومینیوم [28]، فاز آلفا به فاز جدیدی شامل آلفا + بتا تبدیل شده است که در آن فاز بتای تشکیل شده مقاومت بسیار بالایی در مقابل خزش دارد. از طرفی طبق "شکل 9" هر چه تعداد دفعات کوبش لیزری افزایش پیدا کند، مقدار تنش پسماند نیز افزایش می‌یابد و لذا دانه‌ها کشیده‌تر می‌شوند. تحت عملیات حرارتی مذکور، دانه‌ها از آلفا به آلفای + بتا تبدیل می‌شوند که این امر موجب تغییر در ابعاد دانه‌ها شده و تنش پسماند به‌طور قابل توجهی آزاد می‌شود زیرا هرچه دانه‌ها کشیده‌تر باشند، نسبت به حالت آلفا + بتا تغییر بیشتری پیدا می‌کنند پس آزادسازی تنش بالاتری داریم.

نکته‌ی جالب توجه دیگر آن است که پس از اعمال حرارت به مدل، تنش پسماند موجود در نمونه‌ی کوبش لیزری یگانه تنها تا عمق 0.2 mm از سطح نمونه آزاد شد و میدان تنش پسماند شعاعی در عمق بیش از 0.2 mm مدل دچار تغییر قابل توجهی نشد. این در حالی است که آزادسازی تنش پسماند در مدل‌های کوبش لیزری دوگانه و سه‌گانه به ترتیب به 0.4 mm و 0.5 mm می‌رسد. لذا مشاهد می‌شود اگر چه کوبش لیزری دوگانه و سه‌گانه موجب افزایش چشمگیر شدت میدان تنش پسماند می‌شود، اما در همین حین با افزایش کار سرد روی ماده، نرخ آزادسازی تنش پسماند نیز افزایش یافته و در دمای یکسان نمونه‌های کوبش لیزری دوگانه و سه‌گانه با شدت بیشتر و در عمق بیشتری دچار آزادسازی تنش پسماند می‌شوند.

4- نتیجه‌گیری

فرآیند کوبش لیزری برای حالات کوبش لیزری یگانه، دوگانه و سه‌گانه و همچنین آزادسازی تنش پسماند حاصله در اثر اعمال حرارت در دمای 600 درجه سانتی‌گراد با استفاده از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. این مدل شامل دو مرحله‌ی اصلی بود. مرحله‌ی اول ایجاد میدان تنش پسماند که خود شامل بارگذاری دینامیکی و باربرداری استاتیکی است. مرحله‌ی دوم نیز شامل اعمال حرارت به قطعه جهت بررسی میزان تنش پسماند آزادسازی شده در این فرآیند است. در این مدل با توجه به بارگذاری دینامیکی در بازه‌ی زمانی چند نانوثانیه از مدل ماده جانسون-کوک جهت احتساب اثرات نرخ کرنش بالا استفاده شد. نتایج این پژوهش را به صورت خلاصه عبارتند از:

- فرآیند کوبش لیزری برخلاف روش‌های ایجاد تنش پسماند سطحی مشابه، توان ایجاد میدان تنش پسماند تا عمق 2 میلی‌متر و بیشتر را نیز دارا می‌باشد.
- بیشینه‌ی تنش پسماند ایجاد شده در فرآیند کوبش لیزری سه‌گانه، در سطح نمونه ایجاد شده و به مقدار 889 MPa می‌رسد.
- بیشترین مقدار تنش پسماند آزادسازی شده در حالت کوبش لیزری سه‌گانه، در سطح نمونه و به مقدار 43.87% نسبت به حالت پیش از اعمال حرارت بوده است.
- در تمامی نمونه‌ها آزادسازی تنش در نهایت تا عمق 0.5 میلی‌متری نمونه اتفاق می‌افتد و پس از این عمق عملاً تنش پسماند تغییری نمی‌کند.

5- مراجع

- [1] C. Danduk, A. Jinoop, M. J. Yadav, S. K. Subbu, Modeling and Strategies