



بررسی تجربی تنش پسماند در قطعات با مقطع متغیر در فرآیند ذوب انتخابی لیزری

مرتضی منصوری¹، افشین کازرونی²، محمدمقداد فلاح^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* صندوق پستی 163-16785، m.fallah@sru.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از چالش‌های مهم در فرآیند ذوب انتخابی لیزری، ایجاد تنش‌های پسماند در قطعات تولید شده می‌باشد. تنش‌های پسماند می‌تواند روی دقت ابعادی، خواص مکانیکی و عملکرد قطعه اثرات منفی داشته باشد. در اغلب قطعات صنعتی مانند پره‌های توربین، مقطع قطعه در طول آن تغییر می‌کند که می‌تواند در مقدار تنش‌های پسماند تأثیرگذار باشد. مهمترین پارامترهای فرآیند ذوب انتخابی لیزری شامل توان لیزر، سرعت اسکن، ضخامت لایه‌ها و فاصله هاشور مسیر اسکن می‌باشد. پارامترهای مذکور روی پروفیل حرارتی ایجاد شده در حین فرآیند ساخت موثراند؛ بنابراین می‌تواند در ایجاد تنش‌های پسماند در قطعات نقش اساسی داده باشند. در این مقاله با روش تجربی تأثیر پارامتر فاصله هاشور مسیر اسکن روی مقدار تنش پسماند نمونه‌های اینکونل 625 با مقاطع متفاوت در فرآیند ذوب انتخابی لیزری مورد بررسی قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که چگالی انرژی از محدوده مناسب برای تراکم نمونه‌ها خارج نشود. با استفاده از روش تست غیر مخرب پراش اشعه ایکس، تنش پسماند در مرکز سطح نمونه‌ها و فصل مشترک مقاطع نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله هاشور مسیر اسکن، مقدار تنش پسماند کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه مقدار تنش پسماند در مرکز سطح دو بخش پایینی و بالایی نمونه‌ها نشان می‌دهد که مقدار تنش پسماند در فصل مشترک دو سطح مقطع تقریباً به نصف کاهش می‌یابد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 2 اسفند 1400
داوری اولیه: 26 فروردین 1401
پذیرش: 7 تیر 1401

کلیدواژگان:

فرآیند ذوب انتخابی لیزری (SLM)
تنش پسماند
نمونه‌های با مقاطع متفاوت
اینکونل 625

Experimental study of residual stress in parts with variable cross section in selective laser melting process

Morteza Mansouri, Afshin Kazerooni, Mohammad Meghdad Fallah*

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16785-163, Tehran, Iran, m.fallah@sru.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 21 February 2022
First Decision: 15 April 2022
Accepted: 28 July 2022

Keywords:

Selective Laser Melting Process (SLM)
Residual Stress
Samples with variable cross section
Inconel 625

Abstract

One of the major challenges in the selective laser melting process is the generation of residual stresses in the processed parts. The residual stress can have detrimental effects on the dimensional accuracy, mechanical properties and performance of the part. In most industrial components, such as turbine blades, the cross section of the part changes along its length which can affect the amount of residual stress. The most important parameters of selective laser melting process include laser power, scanning speed, layer thickness and hatch spacing. These parameters are effective on the thermal profile created during the manufacturing process. Therefore, they can play an essential role in the formation of residual stresses in parts. In this paper, the effect of hatch spacing parameter on the residual stress magnitude of Inconel 625 samples with different cross sections has been investigated experimentally; so that the energy density does not exceed the appropriate range for the density of the samples. Using the non-destructive X-ray diffraction method, the residual stresses measured in the center of the sample surface and the intersection of the two variable sections of the samples. The results showed that the use of a larger hatch space significantly reduces the amount of residual stress. Also, the comparison of the amount of residual stress in the center of the surface of the lower and upper parts of the samples shows that the amount of residual stress in the interface between the two cross sections is reduced by almost half.

1- مقدمه

صنایع هوافضا و ارتوپدی پزشکی در استفاده از روش ذوب انتخابی لیزری برای ساخت قطعات پیشرو بوده‌اند. اینکونل 625 یک سوپر آلیاژ پایه نیکل شامل کروم، مولیبدن و نیوبیم می‌باشد تا استحکام و مقاومت در برابر خزش مناسب در دمای بالا داشته باشد. همچنین این متریال، مقاومت در برابر خوردگی مناسبی در محیط‌های مختلف و جوش پذیری

ذوب انتخابی لیزری¹ یکی از فرآیندهای ساخت افزایشی² برای ساخت قطعات فلزی به وسیله ذوب پودر فلزات می‌باشد که در آن از پرتو لیزر با توان بالا به عنوان منبع انرژی استفاده می‌شود.

¹ Selective Laser Melting (SLM)

² Additive Manufacturing

Please cite this article using:

M. Mansouri, A. Kazerooni, M. M. Fallah, Experimental study of residual stress in parts with variable cross section in selective laser melting process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 8- 17, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جهت‌گیری مسیر ساخت روی تنش پسماند بررسی شده است. همچنین آنها دریافتند که استفاده از اسکن جزیره‌ای با سایز کوچکتر و افزایش چگالی انرژی⁴ پرتوی لیزر منجر به کاهش تنش پسماند می‌گردد. لیو و همکارانش [8] در سال 2015 تأثیر سایز جزیره مربوط به طرح اسکن را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سایز جزیره 2 در 2 میلی‌متر کمترین تنش پسماند را خواهد داشت ولی ایجاد ترک⁵ شدید در نمونه‌ها مشاهده شد. در این تحقیق سایز جزیره 5 در 5 میلی‌متر به دلیل چگالی بالاتر و خواص مکانیکی بهتر به عنوان طرح اسکن بهینه در نظر گرفته شد. یادروسیو و همکارانش [9] در سال 2015 در یک کار تجربی تنش پسماند را با استفاده از روش پراش اشعه ایکس⁶ در فرآیند ذوب انتخابی لیزری جهت نمونه‌هایی از جنس Ti6Al4V و فولاد زنگ نزن 316 اندازه‌گیری نمودند و نشان دادند که مقدار تنش پسماند در مسیر اسکن نسبت به مسیر عمود بر آن بیشتر است و در فصل مشترک ورق پایه و قطعه بیشترین مقدار را دارد. سوچلاسکی و همکارانش [10] در سال 2015 در یک کار تجربی توزیع تنش پسماند در نمونه‌های مکعبی از جنس اینکونل 718 که به وسیله دو فرآیند ذوب انتخابی لیزری و ذوب با پرتو الکترونی⁷ تولید شده بودند را با استفاده از روش پراش نوترونی اندازه‌گیری و مقایسه نمودند. آنها نتیجه گرفتند که تنش پسماند در نمونه ایجاد شده بوسیله ذوب انتخابی لیزری مقداری بزرگتر از نمونه‌های تولیدی به روش ذوب با پرتو الکترونی می‌باشد. چنگ و همکارانش [11] در سال 2016 با هدف یافتن یک طرح اسکن بهینه بطوری که تنش پسماند و تغییر شکل در فرآیند ذوب انتخابی لیزری کمینه گردد، آزمایشاتی را انجام دادند. ژیانو و همکارانش [12] در سال 2020 یک مدل المان محدود سه بعدی ایجاد کردند تا اثر پارامترهای فرآیند ذوب انتخابی لیزری را روی تنش‌های پسماند ارزیابی کنند. بر اساس این تحقیق، اثر سرعت اسکن بیشتر از توان لیزر و فاصله هاشور مسیر اسکن روی تنش پسماند در Ti6Al4V است. ژو و همکارانش [13] در سال 2020 با یک مدل ترمومکانیکی سه بعدی، اثر تعدد پرتوهای لیزر را روی تنش پسماند بررسی و روشی برای کاهش تنش‌های پسماند علی‌رغم وجود پرتوهای متعدد بر اساس طرح اسکن پیشنهاد کردند. تان و همکارانش [14] در سال 2021 با انجام یک تحقیق اعلام کردند که طرح اسکن مجدد باعث

خوبی از خود نشان می‌دهد [1، 2]. با این حال، قابلیت ماشینکاری اینکونل 625 به دلیل سختی بالا، هدایت حرارتی کم و نرخ کارسختی¹ بالا، پایین است [3] و در ماشینکاری این قطعات ابزارهای برشی خیلی سریع فرسوده می‌شوند. علاوه بر آن، کنترل خواص اینکونل 625 در فرآیندهای ریخته‌گری یا شکل‌دهی چالش‌های زیاد دارد. به این دلایل، فناوری‌های جدید مانند فرآیند ذوب انتخابی لیزری برای ساخت قطعات پیچیده اینکونل 625 که اغلب در صنایع هوافضا مورد تقاضا هستند، به شدت کاربردی می‌باشد.

با توجه به اثرات مخرب وجود تنش‌های پسماند حرارتی در قطعات تولید شده به روش‌های ساخت افزایشی، تلاش برای کاهش این تنش‌ها با طراحی مناسب فرآیند، اهمیت بالایی دارد. در فرآیند ذوب انتخابی لیزری، اگر چه تلاش‌هایی برای کم کردن تنش پسماند انجام شده است، هنوز چگونگی تنظیم پارامترهای ساخت نظیر توان لیزر، سرعت، ضخامت لایه‌ها و فاصله هاشور مسیر اسکن² جهت کاهش تنش پسماند دشوار است.

در طول فرآیند ذوب انتخابی لیزری، همیشه یک گرادیان حرارتی شدید بین حوضچه مذاب و بستر منجمد شده قبلی وجود دارد که منجر به ایجاد تنش پسماند زیاد در قطعات تولید شده می‌شود [4، 5]. تحقیقات زیادی جهت بررسی تنش پسماند در فرآیند ذوب انتخابی لیزری انجام شده است. در عمده این تحقیقات اثر طرح اسکن، پارامترهای فرآیند و چگالی انرژی روی تنش‌های پسماند مواد مختلف ارزیابی شده است.

کورت و همکارانش [6] در سال 2012 با هدف بررسی روش‌های کاهش تنش پسماند در فرآیند ذوب انتخابی لیزری، یک روش تجربی جدید برای آنالیز ساده، سریع و دقیق طرح‌های ممکن به منظور کاهش تنش پسماند ارائه نمودند. در این بررسی از روش انحنا³ پل جهت اندازه‌گیری تنش پسماند با تغییر الگوهای مختلف اسکن لیزری و پارامترهای فرآیند (سرعت لیزر و ضخامت لایه‌ها) استفاده شده است. ویو و همکارانش [7] در سال 2014 در یک کار تجربی، تنش پسماند در نمونه‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن 316 که به وسیله فرآیند ذوب انتخابی لیزری تولید شده بود را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تنش پسماند نزدیک مرکز محصول بصورت فشاری و نزدیک سطح بصورت کششی می‌باشد. در این کار تجربی اثر پارامترهای طرح اسکن، توان لیزر، سرعت اسکن و

⁴ Energy Density⁵ Crack⁶ X-Ray Diffraction (XRD)⁷ Electron Beam Melting¹ Work Hardening² Hatch Spacing³ Bridge Curvature Method

$$\int \sigma_{xx}(z) \cdot dz = 0 \quad (1)$$

$$\int \sigma_{xx}(z) \cdot z \cdot dz = 0 \quad (2)$$

در روابط (1) و (2)، σ_{xx} تنش در راستای مسیر اسکن و Z ارتفاع قطعه تولید شده به وسیله فرآیند ذوب انتخابی لیزری می‌باشد [16].

رابطه (3) به عنوان یک روش ساده برای محاسبه تنش پسماند به صورت تحلیلی در نظر گرفته می‌شود که در آن مقدار تنش پسماند به ضریب انبساط حرارتی و گرادیان دما بستگی دارد.

$$\sigma_{th} = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (3)$$

در رابطه (3)، σ_{th} تنش پسماند، α ضریب انبساط حرارتی، ΔT گرادیان دما و E مدول یانگ می‌باشد [4]. با افزایش هدایت حرارتی، گرمای بیشتری به پایین قطعه هدایت می‌شود، بنابراین گرادیان دمای بالا بین قطعه و لایه زیرین کاهش می‌یابد و در نهایت تنش پسماند کاهش می‌یابد. برعکس، افزایش ضریب انبساط حرارتی به طور مستقیم تنش پسماند سطحی را افزایش می‌دهد.

2-1- انواع تنش پسماند

تنش پسماند از لحاظ گستردگی در جسم به سه نوع σ_{II} ، σ_I و σ_{III} تقسیم می‌شوند:

1- تنش‌های پسماند نوع اول (σ_I)، اغلب در ناحیه وسیعی از ماده (چندین دانه) بصورت همگن و یکنواخت قرار دارد. برهم‌خوردگی و اغتشاش در تعادل نیروها همواره منجر به تغییرات ابعادی ماکروسکوپی می‌شود.

2- تنش‌های پسماند نوع دوم (σ_{II})، اغلب در ناحیه کوچکتري از ماده (در یک دانه یا در تعداد اندکی از دانه‌ها) به طور یکنواخت و همگن توزیع شده‌اند. در این حالت اغتشاش در تعادل نیروهای مناطق مختلف می‌تواند منجر به تغییرات ابعادی ماکروسکوپی شود.

3- تنش‌های پسماند نوع سوم (σ_{III})، در سرتاسر محدوده ماده حتی در ابعاد چند فاصله اتمی بصورت ناهمگن پخش شده‌اند. اغتشاش در تعادل نیرو منجر به تغییرات ابعادی ماکروسکوپی نمی‌شود.

تنش‌های پسماند را از لحاظ گستردگی توزیع در داخل ماده، در مجموع می‌توان به دو گروه میکروسکوپی و ماکروسکوپی تقسیم نمود. در مقیاس میکروسکوپی تنش‌های پسماند بر اثر انواع عیوب متالورژیکی ایجاد می‌شوند. ایجاد و توزیع تنش‌های پسماند میکروسکوپی موجود در جسم بیشتر به فرآوری مواد اولیه بستگی داشته و اغلب در کل مواد بصورت پراکنده موجود می‌باشد. مکان‌های خالی، جابجایی اتم‌ها، عیوب شبکه در اثر

افزایش تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌ها به دلیل افزایش گرادیان حرارتی حین فرآیند می‌شود. گائو و همکارانش [15] در سال 2022 به روش تجربی و عددی، تنش‌های پسماند را در فرآیند ذوب انتخابی لیزری آلیاژ تیتانیوم متأثر از اندازه و شکل هندسی قطعه مطالعه کردند. در این تحقیق پیچیدگی قطعه و ابعاد آن باعث افزایش تنش‌های پسماند شده است.

یکی از مسائل مهم در فرآیند ذوب انتخابی لیزری ایجاد تنش‌های پسماند در قطعات است که می‌تواند باعث ترک‌های حرارتی و اعوجاج در قطعه شود. در اکثر تحقیقات انجام شده، تأثیر پارامترهایی نظیر توان لیزر، سرعت و طرح اسکن بر روی تنش پسماند سطحی قطعات با سطح مقطع ثابت مورد بررسی قرار گرفته است و تحقیقات اندکی در خصوص تأثیر پارامتر فاصله هاشور مسیر اسکن بر روی تنش پسماند سطحی و بخش داخلی قطعه انجام شده است. از طرفی با توجه به اینکه اکثر قطعات صنعتی مثل پره‌های توربین دارای مقاطع متغیر در طول خود می‌باشند، بررسی وضعیت تنش پسماند در این قطعات که متأثر از تغییرات مقطع آنها می‌باشد، اهمیت زیادی دارد. لذا در این مقاله تأثیر پارامتر فاصله هاشور مسیر اسکن بر روی میزان تنش پسماند ایجاد شده در سطح و فصل مشترک دو سطح نمونه‌های با مقطع متغیر از جنس سوپر آلیاژ اینکونل 625 مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از روش تست غیر مخرب پراش اشعه ایکس بزرگی تنش پسماند در مرکز سطح و فصل مشترک دو سطح مقطع متفاوت نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است.

2- تنش پسماند

تنش‌های پسماند به آن دسته از تنش‌هایی گفته می‌شود که پس از انجام عملیات خاص یا تغییرات حرارت ناشی از گرم و سرد شدن غیریکنواخت در جسم باقیمانده می‌ماند. هنگامی که یک جسم دارای تنش‌های پسماند تحت بارگذاری خارجی قرار می‌گیرد، تنش‌های ناشی از بار خارجی به تنش‌های پسماند افزوده شده و منجر به کاهش عمر قطعه می‌شود. تنش‌های پسماند در نتیجه اعمال بارهای مکانیکی و حرارتی روی قطعات در فرآیندهای مختلف از جمله ریخته‌گری، آهنگری، نوردکاری و جوشکاری ایجاد می‌شوند. در فرآیندهای ساخت افزایشی فلزی به ویژه فرآیند ذوب انتخابی لیزری به دلیل وجود نرخ بالای گرم و سرد شدن مواد هنگام تولید قطعه، بررسی تنش پسماند اهمیت فراوانی دارد. با توجه به اینکه پس از پایان فرآیند هیچ نیروی خارجی به قطعه وارد نمی‌شود، بنابراین برآیند نیرو و مومنتوم وارد بر قطعه صفر می‌باشد یعنی:

سردتر پایینی محدود می‌شود؛ یک شرایط تنش- کرنش فشاری در منطقه تحت تابش ایجاد می‌گردد (شکل 1 الف)).

2) مکانیزم فاز سرد شدن: پس از عبور پرتوی لیزر، سرد شدن و تمایل به انقباض ایجاد می‌شود که به وسیله لایه‌های پایینی یا ورق پایه محدود می‌شود. لذا تنش کششی پسماند در لایه جدید و تنش فشاری در لایه زیرین اتفاق می‌افتد (شکل 1- ب).

گرادیان دمایی ایجاد شده ناشی از مراحل گرم و سرد شدن مواد در فرآیند ذوب انتخابی لیزری موجب ایجاد تنش پسماند می‌شود که شامل سه وضعیت دمایی 1- حالت ذوب 2- حالت پلاستیک 3- حالت دمای پایدار محیطی می‌باشد. در حین فرآیند ذوب انتخابی لیزری، وقتی یک نقطه تحت تأثیر پرتو لیزر قرار می‌گیرد، در اثر حرارت لیزر مواد پودر فلزی گرم شده و به مرحله ذوب می‌رسد. تا زمانی که پرتو لیزر بر روی آن نقطه قرار دارد، چون در حالت ذوب کامل می‌باشد هیچ گونه تنشی در آن نقطه ایجاد نمی‌شود ولی به محض عبور پرتو لیزر و شروع فرآیند سرد شدن و کاهش دما تا قبل از نقطه دمای پلاستیک، مواد تمایل به انبساط دارد ولی میل به انبساط مواد در این مرحله به وسیله مواد منجمد در لایه‌های قبلی محدود و مهار می‌شود. بنابراین مواد نقطه موردنظر در این حالت تحت تنش فشاری قرار می‌گیرند. با ادامه فرآیند سرد شدن و کاهش دما از وضعیت دمای پلاستیک تا دمای پایدار محیطی، مواد تمایل به جمع‌شدن³ و انقباض دارد و از طرفی با توجه به جامد بودن مواد لایه‌های زیرین و نقاط سرد شده قبلی، این مواد اجازه انقباض به مواد موردنظر را نمی‌دهند در نتیجه تنش پسماند کششی ایجاد می‌شود.

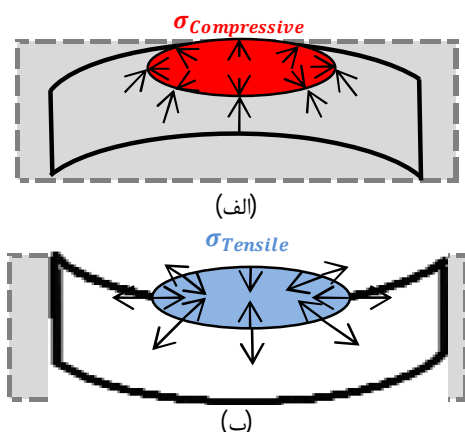


Fig. 1 Residual stress mechanism a) Creating compressive stress during laser beam heating b) Creating tensile stress during cool down

شکل 1 مکانیزم تنش پسماند الف) ایجاد تنش فشاری در حین گرمایش به وسیله پرتو لیزر ب) ایجاد تنش کششی در حین سرد شدن

تغییر شکل و عیوب مرزخانه‌ها از عوامل مهم بروز این تنش می‌باشند. در مقیاس ماکروسکوپی، گروهی از دانه‌ها و یا قسمتی از قطعه تحت تنش قرار دارد. تنش‌های ماکروسکوپی سبب ناهمگونی رفتار مکانیکی قسمت‌های مختلف می‌شوند. در این مقاله تنش‌های ماکروسکوپی بررسی می‌شود.

2-2- مکانیزم ایجاد تنش پسماند

منابع ایجاد تنش بسیار متنوع بوده و می‌توان آنها را در سه مجموعه کلی مکانیکی، حرارتی و متالورژیکی دسته‌بندی نمود. تنش پسماند معمولاً توسط ترکیبی از این سه نوع منبع ایجاد می‌شوند. تنش پسماند متالورژیکی اغلب از نوع تنش‌های پسماند میکروسکوپی می‌باشد ولی تنش‌های پسماند مکانیکی و حرارتی از نوع ماکروسکوپی به شمار می‌روند و عموماً به دلایل ذیل بوجود می‌آیند [17]:

الف- تغییر شکل پلاستیک تحت تأثیر نیروهای خارجی در فرآیندهای نورد، کشش، اکستروژن، خمش، ساچمه‌زنی و یا بطور کلی بارگذاری مکانیکی.

ب- تغییر شکل پلاستیک در هنگام گرم کردن و یا سرد کردن غیریکنواخت مثل عملیات جوشکاری.

ج- تغییر شکل ساختاری به دلیل تغییرات فازی در فرآیندهای عملیات حرارتی نظیر کوئینچ کردن.

در فرآیند ذوب انتخابی لیزری، وقتی پودر فلزی تحت تأثیر پرتو لیزر، گرم و سرانجام ذوب می‌شود گرادیان دما ایجاد شده که پس از سرد شدن و انجماد، موجب ایجاد تنش‌های پسماند می‌شود. تنش‌های پسماند در فرآیند ذوب انتخابی لیزری اغلب از مقادیر تنش پسماند سایر فرآیندهای ساخت افزایشی فلزی مانند تف‌جوشی لیزری انتخابی¹ بزرگتر می‌باشد. چون در فرآیند تف‌جوشی لیزری انتخابی معمولاً ساختار قطعات بصورت متخلخل می‌باشد که وجود این حفره‌ها تمایل به کاهش تنش را بیشتر می‌کند.

مرسلیس و همکارانش [16] مکانیزم ایجاد تنش پسماند در فرآیند ذوب انتخابی لیزری را مورد بررسی قرار دادند و با دو مکانیزم ایجاد تنش پسماند را توضیح دادند:

1) مکانیزم گرادیان دما²: در این مکانیزم، به دلیل حرارت دادن سریع سطح به وسیله پرتوی لیزر، گرادیان حرارتی بزرگی در اطراف نقطه لیزر با ورق پایه یا لایه رسوب شده قبلی ایجاد می‌شود. چون انبساط حرارتی لایه گرم شده بالایی بوسیله مواد

¹ Selective Laser Sintering

² Temperature Gradient Mechanism (TGM)

³ Shrinkage

2-3- روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند

می‌باشند. مهمترین پارامترها عبارتند از توان لیزر، سرعت اسکن، ضخامت لایه‌ها و فاصله هاشور مسیر اسکن. شرکت‌های تولید کننده ماشین آلات ذوب انتخابی لیزری، یک سری پارامترهای تنظیمی را به صورت پیش‌فرض برای ساخت مواد محدودی روی ماشین‌های خود تنظیم می‌کنند تا خواص مطلوب محصول بدست آید. در تحقیق حاضر، اثر فاصله هاشور مسیر اسکن روی تنش‌های پسماند نمونه‌های دارای سطح مقطع متفاوت بررسی شده در حالیکه دیگر پارامترها شامل توان، سرعت و ضخامت در محدود تنظیمی دستگاه برای مترال 625 ثابت بوده‌اند. تنش‌های پسماند در مقاطع مختلف نمونه‌ها اندازه‌گیری و مقایسه شده‌اند. همچنین با در نظر گرفتن مطالعات انجام شده در خصوص کمترین چگالی انرژی مورد نیاز 85 ژول بر میلی‌متر مکعب به منظور دستیابی به تراکم کامل قطعات سوپر آلیاژهای پایه نیکل، پارامترهای ماشین ذوب انتخابی لیزری مطابق جدول 1 جهت تولید نمونه‌های A، B و C انتخاب شده است [16]. چگالی انرژی به معنی انرژی اعمال شده در واحد حجم ماده می‌باشد که با رابطه (4) محاسبه می‌شود.

$$E_d = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (4)$$

در رابطه (4) پارامترهای P توان لیزر، v سرعت اسکن، h فاصله هاشور مسیر اسکن و t ضخامت لایه پودر است [18]. بررسی فعالیت‌های تحقیقاتی انجام شده در مورد تأثیر طرح اسکن بر روی تنش پسماند نمونه‌های تولید شده به وسیله فرآیند ذوب انتخابی لیزری نشان می‌دهد که استفاده از طرح اسکن جزیره‌ای نسبت به سایر طرح‌های اسکن، کمترین مقدار تنش پسماند را ایجاد می‌نماید [5، 10]. به همین دلیل در این کار تحقیقی از طرح اسکن جزیره‌ای استفاده شده است. شکل 2 طرح اسکن مورد استفاده و مشخصات ابعادی هر جزیره جهت تولید نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مدل موردنظر جهت ساخت نمونه‌ها در نرم‌افزار سالیدورک نسخه 2016 طراحی و در قالب فایل STL به عنوان ورودی به نرم‌افزار ماشین ذوب لیزری انتخابی داده شده است.

جدول 1 پارامترهای مورد استفاده در فرآیند ذوب لیزری انتخابی

Table 1 Parameters used in the selective laser melting process				
نمونه	چگالی انرژی	فاصله هاشور مسیر	توان	سرعت
		mm	j	mm/s
A	231/48	0/18	200	120
B	208/33	0/20	200	120
C	189/34	0/22	200	120

شکل 3 هندسه نمونه‌های طراحی شده به وسیله نرم‌افزار سالیدورک را نشان می‌دهد. نمونه از صد لایه با ضخامت 0/04

برای اندازه‌گیری تنش پسماند یک روش کلی که پاسخگوی تمام مسائل مطرح شده باشد، وجود ندارد ولی اغلب می‌توان با انتخاب یک روش مناسب، نیازهای مورد نظر را برطرف کرد. بطور کلی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی نمود. دسته اول، طبقه‌بندی از لحاظ عمق اندازه‌گیری تنش پسماند است. از این لحاظ تکنیک‌های اندازه‌گیری تنش پسماند به دو گروه سطحی و زیرسطحی طبقه‌بندی می‌شوند. از روش‌های سطحی زمانی استفاده می‌شود که اندازه‌گیری تنش، محدود به سطح جسم باشد. البته در خیلی از موارد همین تنش‌های پسماند سطحی مهم است، چون اکثر ترک‌ها در بارگذاری‌های کششی از سطح شروع می‌شوند و از این نظر تنش‌های پسماند سطحی خطرناک می‌باشند. دسته دیگری که می‌توان تکنیک‌های موجود را طبقه‌بندی کرد، بر اساس میزان تنش است که در عمق قطعه ایجاد می‌شود. از این لحاظ تکنیک‌های اندازه‌گیری به سه دسته مخرب، غیر مخرب و نیمه مخرب تقسیم می‌شوند.

در این تحقیق اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش پراش اشعه ایکس انجام شده است. روش پراش اشعه ایکس غیر مخرب است و به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری تنش‌های سطحی در قطعات تولید شده با فرآیند ذوب انتخابی لیزری استفاده می‌شود. اگرچه ارزیابی تنش پسماند در عمق نمونه‌ها ترجیح داده می‌شود ولی به دلیل هزینه زیاد انجام چنین اندازه‌گیری‌هایی و همچنین، با توجه به اینکه بیشترین مقادیر تنش معمولاً در نزدیکی سطوح قطعات متمرکز می‌شوند، تجزیه و تحلیل تنش پسماند معمولاً در سطح نمونه‌ها صورت می‌گیرد.

3- مواد و روش‌ها

بوسیله فرآیند ذوب انتخابی لیزری سه نمونه از جنس سوپر آلیاژ اینکونل 625 تولید شده است. نمونه‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر با استفاده از دستگاه EOS M250 Extended مجهز به لیزر فیبر ایتربیوم 200 وات با اندازه بیم لیزری 100 میکرومتر در حالت متمرکز ساخته شده‌اند. محفظه ساخت به منظور به حداقل رساندن سطح اکسیژن با گاز آرگون پر شده است. قبل از شروع فرآیند ساخت نمونه‌ها، به منظور کاهش اثرات مربوط به تنش پسماند، ورق پایه تا دمای 80 درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم می‌شود.

در فرآیند ذوب انتخابی لیزری، پارامترهای تنظیمی متعددی وجود دارد که روی خواص مکانیکی و متالورژی قطعات اثر گذار

عناصر موجود با توجه به برگ اطلاعات¹ سازنده مطابق جدول 2 می‌باشد.

به منظور حصول اطمینان از مطابقت ترکیب شیمیایی پودر اینکونل 625 مورد استفاده، از آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس² برای تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی پودر جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شده است (شکل 4). به دلیل تأثیر مورفولوژی ذرات پودر روی شرایط ذوب و انجماد پودر و در نتیجه ریزساختار و تنش پسماند و بطور کلی کیفیت و خواص مکانیکی قطعه نهایی، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی³ مدل TeScan-Mira III، مورفولوژی ذرات پودر بررسی شده است (شکل 5). همان‌گونه که مشاهده می‌شود ذرات پودر تقریباً دارای شکل کروی و صاف هستند و سایز آنها بطور متوسط 35 ± 6 میکرون می‌باشد. باید توجه نمود که سایز ذرات پودر در فرآیند ذوب انتخابی لیزری اهمیت زیادی دارد بطوری که وجود ذرات پودر با قطر کمتر از 10 میکرومتر، منجر به تجمع شدید و عدم گستردگی یکنواخت پودر بین ورق پایه و تیغه⁴ می‌شود و تأثیر منفی بر قابلیت استفاده از پودر در فرآیند ذوب انتخابی لیزری دارد [19].

جدول 2 ترکیب شیمیایی پودر اینکونل 625 بر حسب درصد وزنی

Table 2 Chemical composition of Inconel 625 powder in weight percentage

عنصر	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	Si	Mn
درصد وزنی بالانس	20-23	8-10	3/15-4/15	$5 \geq$	$0/5 \geq$	$0/5 \geq$	$0/5 \geq$
عنصر	Al	C	Co	S	Ti	P	
درصد وزنی	$0/4 \geq$	$0/1 \geq$	$1 \geq$	$0/15 \geq$	$0/4 \geq$	$0/15 \geq$	

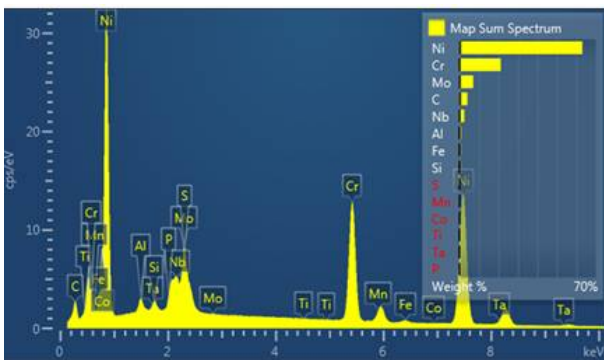
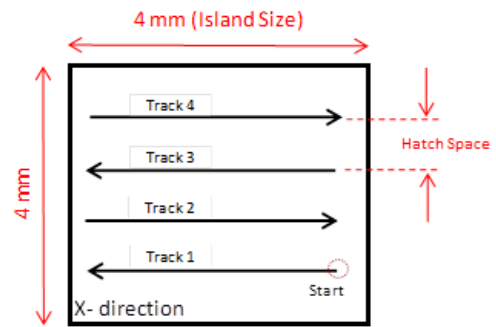


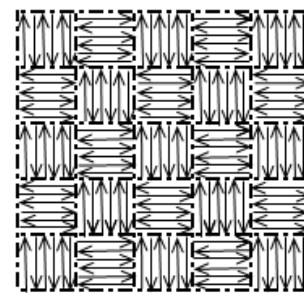
Fig. 4 Determination of chemical composition of Inconel 625 powder by EDS analysis

شکل 4 تعیین ترکیب شیمیایی پودر اینکونل 625 به وسیله آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس

میلی‌متر تشکیل شده است که پنجاه لایه مربوط به سطح مقطع اول (پایینی) با ابعاد 20 در 20 میلی‌متر و پنجاه لایه مربوط به سطح مقطع دوم (بالایی) با ابعاد 15 در 15 میلی‌متر می‌باشد.



(الف)



(ب)

Fig. 2 Scanning strategy used in the selected laser melting process a) Dimensional characteristics of each island b) Scanning pattern

شکل 2 طرح اسکن مورد استفاده در فرآیند ذوب انتخابی لیزری انتخابی (الف) مشخصات ابعادی هر جزیره (ب) طرح اسکن

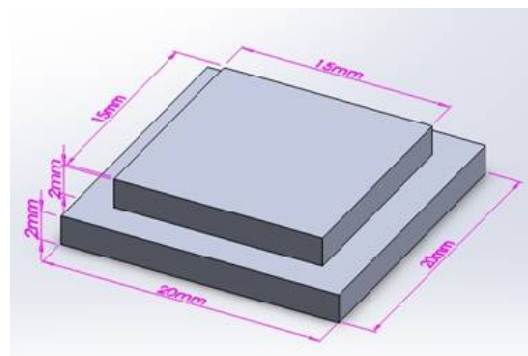


Fig. 3 Geometry of samples designed

شکل 3 هندسه نمونه‌های طراحی شده

3-1- مشخصات مواد

در فرآیند ذوب انتخابی لیزری برای اطمینان از کیفیت مناسب قطعات ساخته شده، به پودری ایده‌آل کروی نیاز می‌باشد. در این کار تجربی از پودر تجاری سوپر آلیاژ اینکونل 625 متمایز شده با گاز ساخت شرکت EOS GmbH آلمان، استفاده شده است. ترکیب شیمیایی پودر اینکونل 625 بر اساس درصد وزنی

¹ Data Sheet

² Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

³ Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

⁴ Blade

بدین منظور، نمونه‌ها در آزمایشگاه متالوگرافی آماده‌سازی و طبق استاندارد ASTM E1558 تحت عملیات الکتروپولیش با دستگاه Struers-LectroPol-5 قرار گرفتند (شکل 6). شکل 7 نمونه‌های آماده شده را نشان می‌دهد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام عملیات الکتروپولیش، تنش پسماند در مرکز سطح به وسیله دستگاه پراش اشعه ایکس مدل Equinox 600 اندازه‌گیری شده است.



Fig. 6 Struers-LectroPol-5 for Electropolishing the surface of the samples

شکل 6 دستگاه Struers-LectroPol-5 برای الکتروپولیش سطح نمونه‌ها



Fig. 7 The electro polished samples

شکل 7 نمونه‌های الکتروپولیش شده

در مرحله بعد نمونه‌ها از محل تغییر سطح مقطع با استفاده از دستگاه وایرکات طبق شکل 8 برش زده شد و مجدداً در آزمایشگاه متالوگرافی، نمونه‌ها آماده‌سازی و عملیات الکتروپولیش بر روی سطح بخش پایینی با مقطع بزرگتر انجام شد (شکل 9).

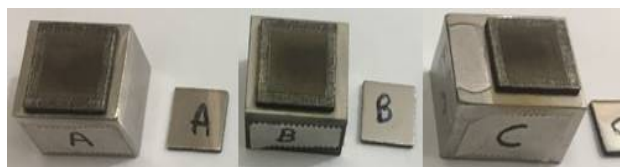


Fig. 8 Cutting the upper part of the samples using a wire cut machine

شکل 8 جدا کردن بخش بالای نمونه‌ها با دستگاه وایرکات

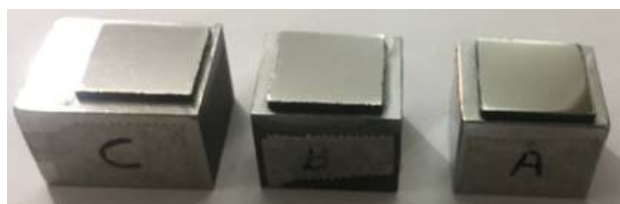
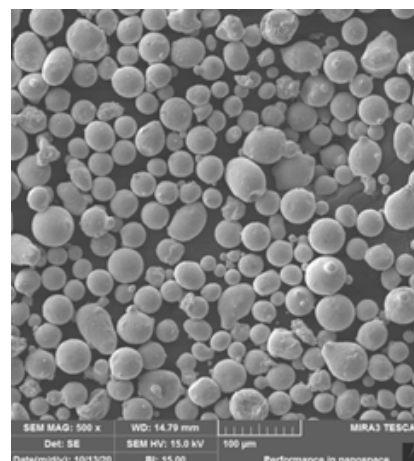
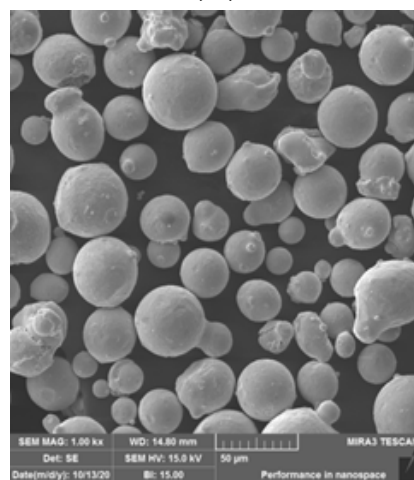


Fig. 9 Preparation of samples at the location of cross-section change

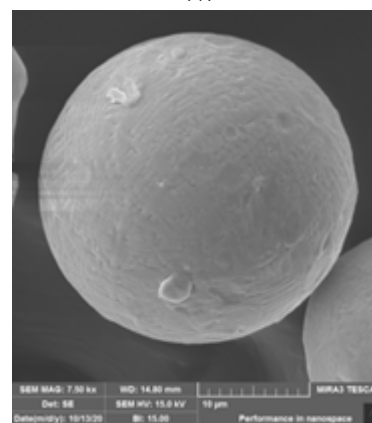
شکل 9 آماده‌سازی نمونه‌ها در محل تغییر سطح مقطع



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 5 SEM of powder particles a) magnification 500x b) magnification 1000x c) a spherical particle with magnification 7500x

شکل 5 تصاویر ذرات پودر به وسیله میکروسکوپ الکترونی (الف) با بزرگنمایی 500x (ب) با بزرگنمایی 1000x (ج) یک ذره پودر کروی با بزرگنمایی 7500x

2-3- اندازه‌گیری تنش پسماند

پس از تولید نمونه‌ها به وسیله ماشین ذوب انتخابی لیزری، از روش غیر مخرب پراش اشعه ایکس بر اساس استاندارد BS EN 15305 جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند استفاده شد.

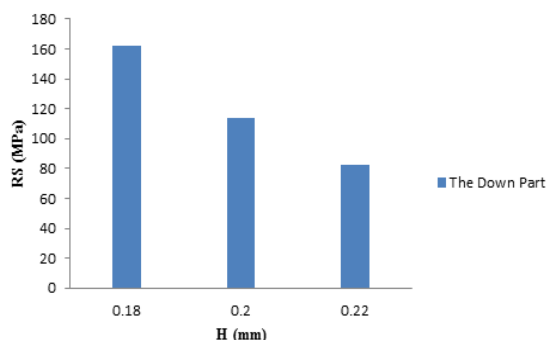


Fig. 11. Residual stress changes of the lower part of the samples by changing the hatch space

شکل 11 تغییرات تنش پسماند بخش پایینی نمونه‌ها با تغییر فاصله هاشور

شکل 12 نمودار مقایسه تنش پسماند در سطح بخش بالایی و پایینی نمونه‌ها بر اساس چگالی انرژی را نشان می‌دهد. همانگونه که در نمودار شکل 12 مشاهده می‌شود با توجه به مقادیر مثبت بدست آمده، تنش پسماند در سطح نمونه‌ها بصورت تنش کششی می‌باشد. همچنین مقدار تنش پسماند در هر دو بخش بالایی و پایینی نمونه‌ها با افزایش مقدار چگالی انرژی افزایش می‌یابد. علت این موضوع را می‌توان به کاهش فاصله هاشور مسیر اسکن نسبت داد. زیرا با کاهش فاصله هاشور مسیر اسکن تعداد سیکل‌های گرمایش و سرمایش مواد افزایش می‌یابد و در این حالت میزان همپوشانی مسیرهای اسکن لیزری افزایش می‌یابد. علت کاهش محسوس تنش پسماند در مرکز سطح مقطع پایینی را می‌توان به دو موضوع نسبت داد: 1) تحت گرمایش مجدد ناشی از ذوب ذرات پودر جهت تشکیل لایه‌های بعدی (2) آزاد شدن تنش‌ها، ناشی از جدا کردن دو سطح مقطع نمونه‌ها از یکدیگر. در خصوص مورد اول باید گفت که لایه موجود در فصل مشترک فرصت انقباض و انبساط ناشی از چرخه گرم و سرد شدن و در نتیجه تبادل حرارت با محیط را پیدا نمی‌کند و در حقیقت با قرار گرفتن لایه‌های بعدی بر روی این لایه، به نوعی تحت گرمایش مجدد قرار می‌گیرد که با قرارگیری لایه آخری نمونه با یک نرخ مشخص با محیط تبادل حرارت انجام می‌دهد. مورد دوم نیز به دلیل جدا کردن دو سطح نمونه از یکدیگر مقداری از تنش پسماند ناشی از حرارت و جابجایی بسیار ناچیز ایجاد شده از بین می‌رود. به همین دلیل مقدار تنش پسماند در سطح مقطع بخش پایینی نمونه به میزان چشمگیری کمتر از سطح مقطع بخش بالایی نمونه‌ها می‌باشد. بنابراین با توجه به موارد بیان شده با افزایش گرادیان حرارتی مقدار تنش پسماند افزایش می‌یابد. در جدول 3 مقادیر تنش پسماند مربوط به سطح مقطع بخش بالایی و پایینی جهت هر سه نمونه آمده است. مقایسه مقدار تنش پسماند در مرکز سطح دو بخش

پس از انجام عملیات الکتروپولیش، مقدار تنش پسماند در مرکز سطح مقطع بخش پایینی نیز با استفاده از روش پراش اشعه ایکس اندازه‌گیری شد.

4- نتایج و بحث

شکل‌های 10 و 11 به ترتیب نمودارهای مربوط به مقادیر تنش پسماند بر اساس فاصله هاشور مسیر اسکن در سطح بخش بالایی نمونه‌ها (لایه صدم) قبل از جدایش و همچنین در سطح بخش پایینی نمونه‌ها (لایه پنجاهم) بعد از جدایش را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت جهت تنش پسماند بیانگر تنش کششی در سطح نمونه‌ها می‌باشد. مقادیر تنش پسماند در مرکز سطح بالایی نمونه‌های A، B و C به ترتیب 360، 206 و 173 مگاپاسکال و مقدار تنش پسماند در مرکز سطح پایینی نمونه‌های A، B و C به ترتیب 162، 114 و 82 مگاپاسکال می‌باشد. با مقایسه و بررسی مقادیر تنش پسماند بدست آمده جهت نمونه‌ها می‌توان دریافت که مقادیر تنش پسماند در سطح بالایی بیشترین مقدار را دارد و در لایه‌های پایین‌تر مقدار تنش پسماند کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه شکل هندسی نهایی قطعات در فرآیند ذوب انتخابی لیزری به وسیله روی هم قرار گرفتن لایه‌های نازک متوالی بوجود می‌آید و پس از اتمام مرحله ساخت نمونه و تشکیل لایه آخر نمونه (لایه سطحی)، به دلیل اینکه لایه دیگری روی آن قرار نمی‌گیرد، افزایش سرعت گرم و سرد شدن مواد لایه سطح موجب ایجاد گرادیان حرارتی شدید در لایه سطحی می‌شود در نتیجه بیشترین مقدار تنش پسماند را لایه مذکور شامل می‌شود. لایه‌هایی که زیر لایه سطحی قرار می‌گیرند به دلیل اینکه پس از ایجاد هر لایه بر روی آنها تحت حرارت ناشی از تشکیل لایه بعدی قرار می‌گیرند و به نحوی تحت تأثیر گرمایش مجدد قرار دارند (لایه‌های متأثر از حرارت لایه‌های بعدی)، بنابراین مقدار تنش پسماند لایه‌های زیرین کمتر از لایه سطحی قطعه می‌باشد.

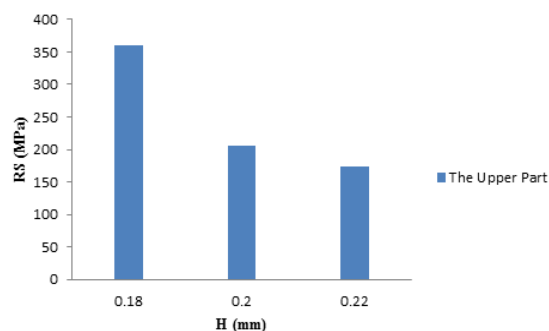


Fig. 10. Residual stress changes of the upper part of the samples by changing the hatch space

شکل 10 تغییرات تنش پسماند بخش بالایی نمونه‌ها با تغییر فاصله هاشور

بصورت دو سطح مقطع متفاوت طراحی و ساخته شده است. با استفاده از روش تست غیر مخرب پراش اشعه ایکس، تنش پسماند در مرکز سطح مقطع نمونه‌های اینکونل 625 اندازه‌گیری شده است. در مرحله بعد بخش بالایی هر نمونه از بخش پایینی جدا شده و تنش پسماند در مرکز سطح پایینی نمونه‌ها نیز بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش پارامتر فاصله هاشور مسیر اسکن در فرآیند ذوب انتخابی لیزری موجب افزایش مقدار تنش پسماند در نمونه‌های اینکونل 625 می‌شود که علت آن افزایش شیب حرارتی ایجاد شده ناشی از افزایش چرخه سرد و گرم‌شدن مواد در طول فرآیند ذوب انتخابی لیزری می‌باشد. همچنین مقایسه مقدار تنش پسماند در مرکز سطح دو بخش پایینی و بالایی نمونه‌ها نشان می‌دهد که مقدار تنش پسماند در فصل مشترک دو سطح مقطع تقریباً به نصف کاهش می‌یابد که دلیل آن گرمایش مجدد لایه‌های پائینی تحت تأثیر گرمای ناشی از لایه‌های بالایی و همچنین آزاد شدن مقداری از تنش‌های پسماند در اثر جدایش دو سطح مقطع از یکدیگر می‌باشد.

پایینی و بالایی نمونه‌ها نشان می‌دهد که مقدار تنش پسماند در فصل مشترک دو سطح مقطع تقریباً به نصف کاهش می‌یابد که علت این امر مربوط به گرمایش مجدد لایه‌های پائینی تحت تأثیر گرمای ناشی از لایه‌های بالایی و همچنین آزاد شدن مقداری از تنش‌های پسماند در اثر جدایش دو سطح مقطع از یکدیگر می‌باشد.

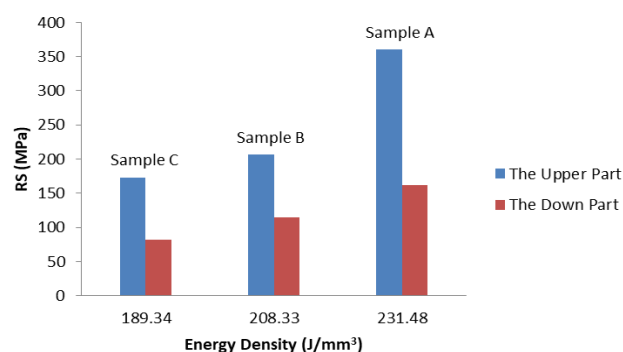


Fig. 12 Comparison diagram of upper and lower residual stresses of samples based on energy density

شکل 12 نمودار مقایسه تنش پسماند بخش بالایی و پایینی نمونه‌ها بر اساس چگالی انرژی

6- مراجع

- [1] F. Xu, Y. Lv, Y. Liu, F. Shu, P. He, B. Xu, Microstructural evolution and mechanical properties of inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 29, No. 5, pp. 480–488, 2013.
- [2] Ö. Özgün, H. Özkan Gülsoy, R. Yılmaz, F. Findik, Injection molding of nickel based 625 superalloy: Sintering, heat treatment, microstructure and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 546, pp. 192–207, 2013.
- [3] C. Nath, Z. Brooks, T. R. Kurfess “ On Machinability Study and Process Optimization in Face Milling of stone Alloys with Indexable Copy Face Mill Inserts, *Procedia Manufacturing*, Vol. 1, pp. 487–500, 2015.
- [4] M. A. Balbaa, M. A. Elbestawi, J. McIsaac., An experimental investigation of surface integrity in selective laser melting of Inconel 625, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104, No. 9–12, pp. 3511–3529, 2019.
- [5] J. Zhang, S. Li, Q. Wei, Y. Shi, L. Wang, and L. Guo, Cracking behavior and inhibiting process of inconel 625 alloy formed by selective laser melting, *Chinese Journal of Rare Metals*, Vol. 39, pp. 961–966, 2015.
- [6] JP. Kruth, J. Deckers, E. Yasa, R. Wauthle, Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 226, No. 6, pp.

جدول 3 مقادیر تنش پسماند بخش‌های بالایی و پایینی در فاصله هاشورهای مختلف

Table 3 Residual stress values of the upper and down parts in different hatch spacing

نمونه	فاصله هاشور مسیر (میلی‌متر)	تنش پسماند بخش بالایی (مگا پاسکال)	تنش پسماند بخش پایینی (مگا پاسکال)
A	0/18	360	162
B	0/20	206	114
C	0/22	173	82

5- نتیجه‌گیری

هدف از این کار تجربی بررسی چگونگی تأثیر پارامتر فاصله هاشور مسیر اسکن بر مقدار تنش پسماند در سطح و مقایسه آن با تنش پسماند ایجاد شده در فصل مشترک دو سطح مقطع متفاوت نمونه‌ها در فرآیند ذوب انتخابی لیزری می‌باشد.

با توجه به وجود پارامترهای متعدد در فرآیندهای ساخت افزایشی و مکانیزم‌های اثر متفاوت آنها روی خواص نمونه‌های تولیدی، اظهار نظر قطعی و دقیق در مورد اثر پارامترها مستلزم انجام تحقیقات گسترده عددی، تجربی و تحلیلی می‌باشد که به مرور با تکمیل تحقیقات توسط پژوهشگران امکان پذیر می‌شود. در این تحقیق، آزمایشات در سه سطح از فاصله هاشور انجام شده، لذا نتیجه‌گیری نیز محدود به ابعاد این پروژه از لحاظ مواد، ماشین، پارامترهای ورودی و خروجی است. هندسه نمونه

- scan strategy on the residual stress in the multi-laser selective laser melting, *Results in Physics*, Vol. 16, 2020.
- [14] Z. Tan, S. Gao, L. Lan, and B. He, Effect of Rescanning Strategy on Residual Stress and Distortion of Two alloys Manufactured by Selective Laser Melting, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 30, pp. 6493–6501, 2021.
- [15] S. Gao, Z. Tan, L. Lan, G. Lu, B. He, Experimental Investigation and Numerical Simulation of Residual Stress and Distortion of Ti6Al4V Components Manufactured Using Selective Laser Melting, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022.
- [16] P. Mercelis, J. P. Kruth. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12, pp. 254-265, 2006.
- [17] S. Kou, *Welding Metallurgy*, Second Edition, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.
- [18] H. Shipley, D. McDonnell, M. Culleton, R. Coull, R. Lupoi, G. O'Donnell, D. Trimble, Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: a review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 128, pp. 1-20, 2018.
- [19] C. Pleass, S. Jothi, Influence of powder characteristics and additive manufacturing process parameters on the microstructure and mechanical behaviour of Inconel 625 fabricated by Selective Laser Melting, *Additive Manufacturing*, Vol. 24, 419–431, 2018.
- 980–991, 2012.
- [7] A. S. Wu, D. W. Brown, M. Kumar, G. F. Gallegos, W. E. King, An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 45, pp 6260-6270, 2014.
- [8] Y. Lu, S. Wu, Y. Gan, T. Huang, C. Yang, L. Junjie, J. Lin, Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy, *Optics & Laser Technology*, Vol. 75, pp. 197-206, 2015.
- [9] I. Yadroitsev, I. Yadroitsava, Evaluation of residual stress in stainless steel 316L and Ti6Al4V samples produced by selective laser melting, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 10, No. 2, pp. 67-76, 2015.
- [10] L.M. Sochalski-Kolbus, E.A. Payzant, P.A. Cornwell, T.R. Watkins, S.S. Babu, R.R. Dehoff, M. Lorenz, O. Ovchinnikova, C. Duty, Comparison of residual stresses in inconel 718 simple parts made by electron beam melting and direct laser metal sintering, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.46, No.3, pp. 1419-1432, 2015.
- [11] B. Cheng, S. Shrestha, K. Chou, Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting, *Additive Manufacturing*, Vol. 12, pp. 240-251, 2016.
- [12] Z. Xiao, C. Chen, H. Zhu, Z. Hu, B. Nagarajan, L. Guo, X. Zeng, Study of residual stress in selective laser melting of Ti6Al4V, *Materials & Design*, Vol. 193, 2020.
- [13] S. Zou, H. Xiao, F. Ye, Z. Li, W. Tang, F. Zhu, C. Chen, C. Zhu, Numerical analysis of the effect of the