



Experimental and Analytical Investigation on Stress Relaxation Behavior of IN718 Superalloy Made by Selective Laser Melting Method Subjected to Variable Initial Strains

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Nakhodchi S.¹,
Alikarami S.¹,

How to cite this article

Nakhodchi S, Alikarami S, Experimental and Analytical Investigation on Stress Relaxation Behavior of IN718 Superalloy Made by Selective Laser Melting Method Subjected to Variable Initial Strains. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(01):1-9.

¹ Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
snakhodchi@kntu.ac.ir

Article History

Received: November 20, 2023
Accepted: March 2, 2024
Published: April 4, 2024

ABSTRACT

In this paper, by performing heat treatment on IN718 superalloy specimens that are manufactured by additive manufacturing method, the purpose is to investigate the experimental and analytical behavior of stress relaxation. The 3D printed specimens were made by the selective laser melting (SLM) method and after homogenization and solution heat treatment; they were subjected to stress relaxation at the temperature of 650 °C with an initial strain of 1.1% and 2.1% for 8 hours. Due to investigate the effect of strain changes on the stress relaxation, the stress relaxation limit diagram, which is 119.55 and 514.35 MPa for strains of 1.1% and 2.1%, respectively, shows that the stress relaxation limit increases with the increase of the initial strain. Furthermore, by examining the stress relaxation behavior in the experimental specimens, it was found that the amount and slope of the relaxation curve is higher in the specimen with a strain of 2.1%. In the analytical study, the creep constitute equations were also used to investigate the stress relaxation behavior, which by checking the presented comparative curves, by recording the error amount of 2.17% and 3.85% for the strains of 1.1% and 2.1%, respectively, the result of the comparison indicates a good agreement between the analytical results and the experimental curves.

Keywords Inconel 718 Superalloy, Additive Manufacturing, Stress Relaxation, Heat Treatments.

CITATION LINKS

1- Comparative evaluation of thermal and 2- Effect of pretreatment process on microstructure 3- The formation and dissolution mechanisms of Laves phase in Inconel 718 4- Saga of gas turbine materials: part II of this four-part series on gas turbine materials development covers 5- Alloy 718 manufactured by AM selective laser melting 6- Laser Metal Deposition using Alloy 718 Powder: Influence 7- Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 8- Process gas infiltration in Inconel 718 samples during 9- Build height effect on the Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting. 10- Long fatigue crack growth in 11- Investigation on the effect of bonding time on microstructure and mechanical 12- Review on powder-bed laser additive 13- The effect of interdendritic δ phase on the mechanical properties of Alloy 718 built up 14- Creep and thermomechanical fatigue of 15- Microstructural investigation of as-fabricated and heat-treated Inconel 625 and 16- Laser additive manufacturing of high-performance materials. 17- Selective laser melting of Inconel super alloy-a review. 18- Additively Manufactured Inconel 718: Microstructures and 19- Comparison of the stress relaxation and creep behavior of conventionally forged 20- Characterization of precipitation kinetics of 21- Stress Relaxation Behavior 22- Stress relaxation behavior and mechanism of AEREX350 and 23- Stress relaxation behavior of heat treated Inconel 718. 24- Stress Relaxation Behaviour and 25- Stress relaxation behaviour in IN718 nickel based superalloy 26- On selective laser melting of Inconel 718: Densification.... 27- Inconel 718 Ni-based superalloys 30 Micrometer. 28- Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. 29- Comparison of microstructures and 30- Interaction of stress relaxation aging behavior and 31- The stress relaxation of a Fe59Mn30Si6Cr5 32- Microstructural Investigation of Inconel 718 Superalloy in 33- Effect of standard heat treatment on the microstructure and 34- High temperature mechanical integrity of 35- Mechanical and microstructural investigation of 36- Stress relaxation and the structure size-dependence of plastic deformation 37- Limitations of calculating stress relaxation limit by

بررسی تجربی و تحلیلی رفتار رهایش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی تحت کرنش‌های اولیه متغیر

سپیل نخودچی^{۱*}، شهریار علی کرمی^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله با انجام عملیات حرارتی در قطعات با جنس سوپر آلیاژ (IN718) که به روش ساخت افزایشی تولید شده‌اند، هدف بررسی تجربی و تحلیلی رفتار رها سازی تنش می‌باشد. نمونه‌های آزمایش از روش ذوب لیزر انتخابی ساخته شده و پس از عملیات حرارتی همگن‌سازی و انحلالی، با اعمال کرنش اولیه فشاری به میزان ۱/۱٪ و ۲/۱٪ در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۸ ساعت تحت عملیات رهایش تنش قرار گرفتند. بمنظور بررسی اثر تغییرات کرنش بر میزان رهایش تنش، نمودار حد رهایش تنش که برای کرنش‌های ۱/۱٪ و ۲/۱٪ به ترتیب میزان ۱۱۹/۵۵ و ۵۱۴/۳۵ مگا پاسکال می‌باشد نشان می‌دهد حد رهایش تنش با افزایش کرنش اولیه افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی نمودارهای رهایش تنش در قطعات آزمایش تجربی مشخص شد که میزان شیب منحنی رهایش در نمونه با درصد کرنش ۲/۱ بیشتر می‌باشد. در بخش تحلیلی از معادله ساختاری خزش جهت بررسی رفتار رهایش تنش استفاده شد که با بررسی نمودارهای مقایسه‌ای ارائه شده، با ثبت میزان خطای ۲/۱۷٪ و ۳/۱۸۵٪ به ترتیب برای کرنش‌های ۱/۱٪ و ۲/۱٪، نتیجه مقایسه حاکی از تطابق خوب نتایج تحلیلی با نمودارهای تجربی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سوپر آلیاژ (IN718) - ساخت افزایشی - رها سازی تنش - عملیات حرارتی؛

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

*نویسنده مسئول: snakhodchi@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ یک آلیاژ نیکل-کروم می‌باشد که دارای عناصر آلیاژی نیوبیوم، مولیبدن، تیتانیوم و آلومینیوم است. این سوپر آلیاژها به دلیل استحکام مناسب در دمای بالا در بسیاری از کاربردها از جمله موتورهای توربین هواپیما، توربین‌های گازی، موتورهای موشک، صنایع نفت، کارخانه‌های پتروشیمی و توربوشارژرها مورد استفاده قرار گرفته‌اند^[1-3]. برای مثال سوپر آلیاژ (IN718) ۴۰ تا ۵۰ درصد وزن کل یک موتور هواپیما را می‌تواند تشکیل دهد که بیشتر در مائول احتراق و توربین موتور که دمای کاری بالا است استفاده شده است^[4].

فرآیند ساخت افزایشی (Additive Manufacturing) فرآیندی نوین برای ساخت قطعات به شکل تقریباً نهایی با هندسه پیچیده می‌باشد. برخلاف روش‌های تولید معمول که در آن اغلب مقدار زیادی از مواد تا مرحله نهایی سازی حذف می‌شوند، در روش (AM) از حداقل ماده‌ای که برای تولید هندسه نهایی لازم است استفاده

می‌گردد. واضح است که فرآیند و پارامترهای تولید به طور قابل توجهی بر خواص نهایی قطعه ساخته شده تأثیر می‌گذارد^[5]. این روش دارای چالش‌هایی است که برای مثال سرعت تولید معمولاً به اندازه روش‌های مرسوم نیست. به همین دلیل (AM) برای نمونه-سازی قطعات دارای هندسه پیچیده و یا بمنظور ترمیم قطعات استفاده می‌شود. علاوه بر این، کیفیت نهایی محصول به شدت به پارامترهای فرآیند بستگی دارد. در فرآیند ساخت افزایشی دارا بودن مجموعه مشخصات کلی دشوار بوده و بهره بردن از پتانسیل‌های این روش در صنایع مهم مانند صنایع هوایی و هسته‌ای را دشوار می‌کند^[6]. فرآیندهای مختلف (AM) بسته به حالت ماده اولیه (پودر، سیم، مایع، و غیره) و انواع منبع انرژی (لیزر، Ultraviolet)، پرتو الکترونی و غیره) دسته‌بندی شده‌اند^[5]. در روش ذوب لیزر انتخابی (SLM) لیزر به عنوان منبع انرژی برای ذوب نمودن لایه‌های نازک پودر فلز استفاده می‌گردد.

ساخت قطعات سوپر آلیاژ (IN718) به روش (SLM) در دهه‌ی اخیر بسیار صورت گرفته است^[7-10]. بطور کلی، چهار روش اصلی عملیات حرارتی برای اینکونل ۷۱۸ وجود دارد که عبارتند از: همگن سازی، فشار ایزواستاتیک داغ (HIP)، عملیات حرارتی انحلالی و عملیات پیر سازی^[5]. آلیاژ اینکونل ۷۱۸ جزء آلیاژهای رسوب سخت‌شونده است که استحکام کششی این آلیاژ به وسیله عملیات آنیل انحلالی و پیرسختی از طریق کنترل رسوب‌گذاری فازهای γ' و γ'' در فاز γ افزایش می‌یابد^[11]. وانگ و همکاران^[12] در بررسی جامع خود در ساخت آلیاژ ۷۱۸ با لیزر پودر بستر، مقالات مختلفی را با هم مقایسه کردند. نتیجه‌گیری آنها این بود که چرخه عملیات حرارتی مطلوب برای اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش (SLM) عبارتست از: همگن سازی در درجه حرارت ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد برای ۱/۵ ساعت، عملیات حرارتی انحلالی در درجه حرارت ۹۸۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۱ ساعت و به دنبال آن عملیات حرارتی پیری سازی دو مرحله‌ای طولانی در دمای ۷۲۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۸ ساعت که بعد از آن دما به ۶۲۰ درجه سانتیگراد کاهش یافته و به مدت ۸ ساعت در این دما نگه داشته می‌شود. به منظور مطالعه فاز δ آلیاژ ۷۱۸، کو و همکاران^[13] از دو حالت عملیات حرارتی استفاده کردند. یک بخش از نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی انحلالی و عملیات حرارتی پیری سازی قرار گرفتند و بخشی دیگر مستقیماً پیری سازی داشتند. آنها نتیجه گرفتند که مورفولوژی و محل ذرات فاز δ بر روی شکل‌پذیری ماده تأثیر می‌گذارد. پوپوویچ و همکاران^[14]، از عملیات حرارتی متشکل از آنیل کردن و پیری سازی به طور خاص بمنظور تشکیل ریز ساختار استفاده کردند. بنابراین، می‌توان فاز (Laves) را به رسوب فاز دلتا تبدیل کرده و خواص خزش و عمر خستگی اجزا را افزایش داد. مارچس و همکاران^[15] با بررسی ریزساختاری سوپر آلیاژهای اینکونل ۶۲۵ و اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ساخت افزودنی به این نتیجه رسیدند که عملیات حرارتی انحلالی نمونه‌ها منجر

دمای پایین مناسب‌تر باشد در حالی که (AEREX 350) انتخاب بهتری برای سرویس دمای بالا است. باپوکوتی و همکاران^[23] بررسی کردند که نرخ رهایش تنش با میزان کرنش ۱ درصد در اینکونل ۷۱۸ عملیات حرارتی شده با افزایش دما افزایش می‌یابد. افت تنش با افزایش نرخ رهایش تنش و دمای تست، افزایش می‌یابد. شن و همکاران^[24] رفتار رهایش تنش و معادلات ساختاری خزش در فولاد کم آلیاژ (SA302Gr.C) را مورد مطالعه قرار دادند. آنها تست‌های رهایش تنش در سه دمای ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۲۰ درجه سانتیگراد با کرنش ثابت ۰/۵٪ را انجام داده و بر این اساس و با استفاده از نمودارهای رهایش تنش، رابطه بین تنش و نرخ کرنش خزشی بدست آمده و نمودارهای تنش-نرخ کرنش خزشی در دماهای مختلف ترسیم شدند. بمنظور صحت سنجی معادلات ساختاری خزش توسعه داده شده، مدل المان محدود رهایش تنش فولاد کم آلیاژ (SA302Gr.C) توسط نرم‌افزار المان محدود (MSC.Marc) ایجاد شد. نتایج مقایسات، همخوانی منحنی های رهایش تنش تجربی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و بیانگر تناسب معادلات ساختاری خزشی توسعه داده شده در فولاد مورد آزمایش می‌باشد. صلاح‌الدین رحیمی و همکاران^[25] در مطالعه خود، رفتار رهایش تنش سوپرآلیاژ (IN718) کوئینچ شده در طی فرآیند پیری را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های رهایش تنش کششی وجود تنش رهایش غیر صفر (σ_{∞}) که متناسب با تنش اولیه اعمال شده (σ_0) در ابتدای آزمایش است را نشان داد. در این مطالعه نشان داده شده است که نسبت ($\sigma_{\infty} / \sigma_0$) با افزایش دما در محدوده دمای پیری به سرعت کاهش می‌یابد. منحنی‌های رهایش توسط یک معادله هیپربولیک بیان شده و پارامترهای این معادله از طریق آنالیز عددی و فیت کردن منحنی مشخص شده است. این قانون هیپربولیک می‌تواند در مدل‌های شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رهایش تنش در طی عملیات حرارتی پیری اجرا شود. اهمیت بررسی خواص رهایش تنش سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش (SLM) در صنایع مهم مانند موتورهای هوایی سبب انجام تحقیق حاضر شده است. در این تحقیق اثر کرنش‌های اولیه متغیر بر میزان رهاسازی تنش تحت دمای ثابت بررسی شد. طبق گزارشات پیشین هیچ تحقیقی پیرامون رهایش تنش نمونه-های سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی بطور تجربی و تحلیلی ارائه نشده است. بنابراین انجام این تحقیق حائز اهمیت می‌باشد.

۲- روش تحقیق

آزمایش‌های رهایش تنش روی نمونه‌ها از جنس سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM) توسط دستگاه NOURA M100P SLM بوده که ابعاد ذرات کروی پودر ۱۰ تا ۴۵ میکرون می‌باشد^[26]. رسوب‌گذاری پودر توسط لیزر فیبری با طول موج ۱۰۶۷ نانومتر، توان ۳۰۰ وات، ضخامت لایه‌ای ۳۰ میکرومتر، گاز خنثی

به ریزساختار و خواص مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده بدون عملیات حرارتی می‌شود و همچنین گزارش شد زمانی که عملیات انحلالی در دمای بالا انجام می‌شود، بهبودها می‌تواند افزایش یابد. با توجه به نرخ بالای خنک شوندگی فرآیند (SLM) (تا ۱۰۸ K/s)^[16,17]، این فرآیند با فازهای غیر تعادلی و ریزساختار کوچک و سلولی همراه است. همچنین از مشخصه‌های روش (SLM) دوباره گرم کردن و دوباره ذوب شدن لایه چاپ شده قبلی است که این امر منجر به نوسانات ریزساختاری بدلیل پیشروی ساختار از پایین به بالا می‌شود^[16]. چرخه‌های فرآیند حرارتی برای سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش (AM) باید بسته به تاریخچه فرآیند، یعنی روش تولید ((EBM)، (SLM) و غیره)، پارامترهای فرآیند، شکل قطعه و غیره بطور خاص توسعه یابد^[18]. بدین منظور از عملیات حرارتی همگن سازی برای از بین بردن فواصل ریزساختاری حین تولید و توزیع یکنواخت عناصر در ماتریس استفاده شده است.

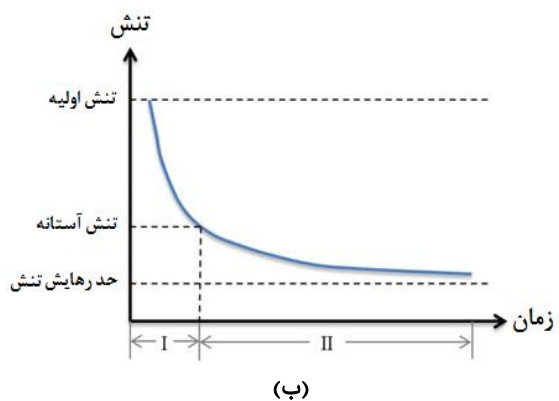
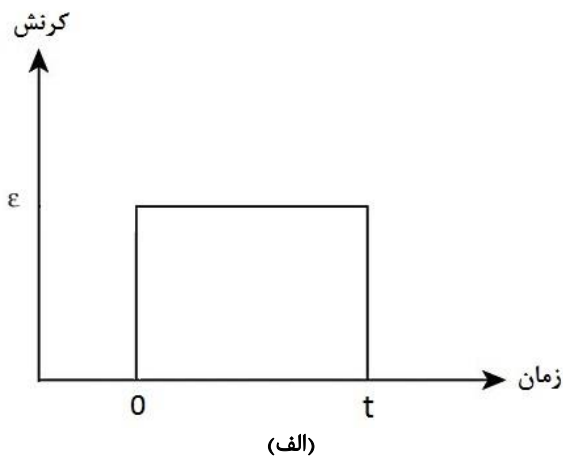
کاهش وابسته به زمان میزان تنش در اثر یک کرنش ثابت اعمال شده در سازه تحت دمای ثابت، آزادسازی و یا رهایش تنش تعریف می‌شود^[19]. میزان رهایش تنش تابعی از زمان، دما و سطح تنش است. آلیاژ ۷۱۸ به طور گسترده به علت مقاومت بالا در برابر خوردگی و خواص مکانیکی خوب در دماهای تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد استفاده می‌شود^[20]. جیانگ و همکاران^[21] رفتار رهایش تنش در چند آلیاژ پایه نیکل را بررسی و مقایسه کردند. آنها رفتار رهایش تنش سه سوپر آلیاژ پایه نیکل: اینکونل ۷۱۸، (Waspaloy) و (AEREX 350)، در محدوده دما بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد را برای مدت ۱۰ ساعت مورد بررسی قرار دادند. تأثیر پارامترهای رهایش تنش بر رفتار مورد بررسی قرار گرفت و خصوصیات رهایش تنش سه سوپر آلیاژ با یکدیگر مقایسه و مکانیسم‌های مشاهده شده توسط (FESEM) و (TEM) بررسی شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که خاصیت رهایش تنش سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ نسبت به دما بسیار حساس است. در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد رهایش تنش بسیار پایدار است، اما با افزایش درجه حرارت به ۷۵۰ درجه سانتیگراد تنش کاهش می‌یابد که به عنوان یک نتیجه از تخریب جدی میکرو ساختار است. علاوه بر این، پایداری رهایش تنش با تنش اولیه ارتباط دارد و افزایش مناسب تنش اولیه در دمای کاری عادی می‌تواند حد رهایش تنش سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را افزایش دهد. وانگ و همکاران^[22] خواص رهایش آلیاژهای (AEREX 350) و (Waspaloy) در دماهای مختلف از ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد با تنش اولیه ۵۱۰ مگاپاسکال را مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما، محدوده و پایداری رهایش دو آلیاژ بصورت واضح کاهش یافته است، اما پایداری رهایش (AEREX 350) به میزان کندتر در مقایسه با (Waspaloy) کاهش می‌یابد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که به عنوان آلیاژهای اتصال دهنده، (Waspaloy) برای سرویس با

در جدول (۱) ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ (IN718) بر اساس درصد وزنی مشاهده می‌شود [30].

جدول (۱) درصد ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ (IN718) (الف): این مقاله و (ب): استاندارد (ASTM F3055-14a)

عناصر	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Co
(الف)	۵۲٫۱	۱۹٫۲	۱۸٫۵	۵٫۱	۳	۱٫۱	۰٫۵۲	۰٫۲
(ب)	۵۰-۵۵	۱۷-۲۱	Bal.	۴٫۷۵-۵٫۳	۲٫۸-۳٫۳	۰٫۶۵-۱٫۱۵	۰٫۲-۰٫۸	۰-۱

همانطور که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است مقدار کرنش اولیه در طول آزمایش رهايش تنش ثابت نگه داشته می‌شود. منحنی رهايش تنش نشان داده شده در شکل (۲-ب) را می‌توان با توجه به نرخ رهايش به دو بخش تقسیم کرد. در ابتدا تنش به سرعت با گذشت زمان کاهش می‌یابد و سپس در بخش بعدی تنش به آرامی آزاد می‌شود و در نهایت به محدوده‌ای می‌رسد که به عنوان حد رهايش تنش تعریف می‌شود [31].

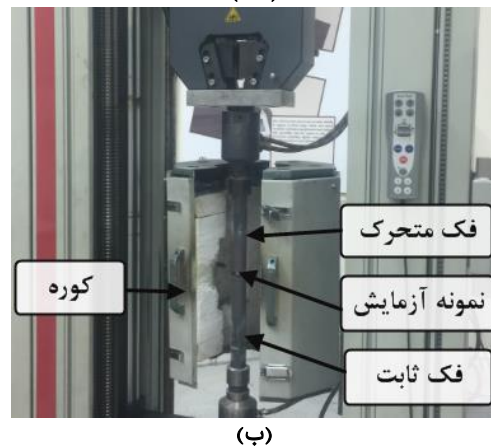
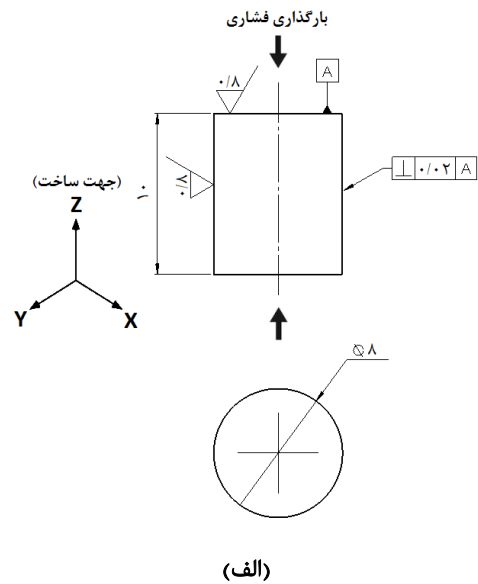


شکل (۲) نمودار (الف): زمان-کرنش (ب): رهايش تنش

۲-۱- بررسی تحلیلی

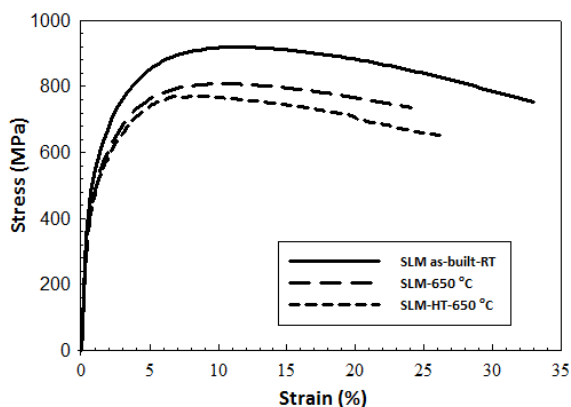
هنگامی که تست‌های رهايش تنش در شرایط کرنش ثابت انجام می‌شود کرنش الاستیک به تدریج به کرنش خزشی تبدیل می‌شود. کرنش ثابت کل مطابق معادله (۱) تعریف می‌شود [24].

آرگون و نرخ ساخت حجمی $8-12 \text{ cm}^3/\text{h}$ می‌باشد [27]. قطعات دارای هندسه استوانه‌ای بوده و دارای ابعاد به قطر 8 mm و ارتفاع 10 mm می‌باشد که توسط دستگاه (Zwick/Roell-Z250) بصورت فشاری طبق استاندارد (ASTM E209) با نرخ جابجایی $2 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ در دمای 750°C درجه سانتیگراد [20] تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. تعداد تکرار آزمایش دو مرتبه بوده و کرنش ثابت اولیه اعمالی به نمونه‌ها 1% و 2% می‌باشد و مقدار تغییرات تنش برای طول آزمایش 8 ساعت ثبت گردید. اندازه دانه نمونه‌های ساخته شده به روش (SLM) مقدار $20/17$ میکرومتر می‌باشند. طبق دما و مدت زمان عملیات حرارتی بکار رفته در مراجع [28,29]، در این آزمایش ابتدا نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی (طبق استاندارد AMS 5383) همگن سازی در دمای 1100°C درجه سانتیگراد به مدت $1/5$ ساعت قرار گرفته و سپس از عملیات حرارتی انحلالی در دمای 980°C درجه سانتیگراد به مدت 1 ساعت برای همگن سازی مناطقی که همچنان فواصل ریز دارند و همچنین رسوب فاز دلتا مورد استفاده قرار گرفت [28,29].



شکل (۱) (الف): هندسه، ابعاد، جهت ساخت و راستای بارگذاری نمونه آزمایش رهايش تنش، (ب): دستگاه (Zwick/Roell-Z250) آزمایش رهايش تنش

صورت گرفته گر چه باعث کاهش حدود ۳٪ خواص مکانیکی مذکور در جدول (۲) مقاله می‌گردد ولی بطور کل سبب افزایش سختی، خواص خزشی، گسیختگی و خستگی می‌گردد. ریزساختار آلیاژ (IN718) نوع (as-built)، مستعد ریز جداسازی (Nb) و (Mo) و تشکیل فازهای غیرتعادلی و همچنین داشتن سطح قابل توجهی از تنش‌های پسماند می‌باشد که باید با عملیات حرارتی اصلاح شود^[7]. عملیات حرارتی همگن‌سازی جهت انحلال فاز مضر لایه (Ni2Nb) و ناپدید شدن ساختار دندریتی می‌باشد^[32]. ضمناً استحکام و سختی مواد SLM در اثر عملیات حرارتی افزایش می‌یابد و با آلیاژ (IN718) ساخت مرسوم قابل مقایسه است، در حالی که شکل‌پذیری آنها در مقایسه با نوع (as-built) کاهش می‌یابد که به دلیل رسوب فازهای تقویت کننده ظرفیت γ' و γ'' و فازهای سوزنی شکل δ می‌باشد^[33].



شکل ۳) نمودار تجربی تنش- کرنش فشاری سوپر آلیاژ IN718 ساخته شده به روش (SLM)، تحت دمای محیط (RT) و ۶۵۰ درجه سانتیگراد، حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی (HT)

جدول (۲) خواص مکانیکی سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده با روش (SLM)، تحت دمای محیط و ۶۵۰ درجه سانتیگراد در حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی

استحکام نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	نوع نمونه آزمایش	دمای آزمایش (°C)
۹۲۸ ± ۲	۵۳۲ ± ۳	۱۹۸ ± ۲	as-built	دمای محیط
۸۱۷ ± ۱	۴۹۳ ± ۱	۱۸۱ ± ۴	as-built	۶۵۰
۸۰۸ ± ۱	۴۸۱ ± ۲	۱۷۶ ± ۳	عملیات حرارتی شده	۶۵۰

در شکل (۴) میکروساختار سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM) نشان داده شده است. ریزساختار (IN718) ساخته شده توسط (SLM) از ساختار دندریتی ریز و بوتکتیک فاز γ/γ' و کاربردهای نوع (MC) در مناطق بین دندریتی تشکیل شده

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_c = Const. \quad (1)$$

که در آن ε_T کرنش کلی، ε_e کرنش الاستیک و ε_c کرنش خزشی می‌باشد. با دیفرانسیل‌گیری از طرفین معادله (۱) نسبت به زمان و با توجه به اینکه تغییرات کرنش کل نسبت به زمان صفر است ($\frac{d\varepsilon_T}{dt} = 0$):

$$\frac{d\varepsilon_e}{dt} = -\frac{d\varepsilon_c}{dt} \quad (2)$$

با دیفرانسیل‌گیری از رابطه کرنش الاستیک ε_e ($\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$) نسبت به زمان، رابطه نرخ کرنش خزشی عبارتست از:

$$\frac{d\varepsilon_e}{dt} = -\frac{d\varepsilon_c}{dt} \rightarrow \dot{\varepsilon}_c = -\frac{1}{E}\dot{\sigma} \quad (3)$$

که $\dot{\varepsilon}_c$ نرخ کرنش خزشی و $\dot{\sigma}$ نرخ تنش می‌باشد. پس می‌توان با استفاده از معادله (۳)، نرخ کرنش خزشی را از منحنی‌های تجربی رهایش تنش بدست آورد.

رایج‌ترین روابطی که برای توصیف رابطه بین نرخ کرنش خزشی حالت پایدار و تنش استفاده می‌شود قانون توانی نورتن و تابع نمایی (۴) می‌باشد^[24].

$$\dot{\varepsilon}_c = A \exp(B\sigma) \quad (4)$$

که σ تنش اعمال شده، A و B ثوابت مواد (وابسته به دما) می‌باشند که از داده‌های تجربی قابل استخراج می‌باشند. با ترکیب معادلات (۳) و (۴) و با لگاریتم‌گیری از طرفین معادله، ساختاری (۵) بدست می‌آید:

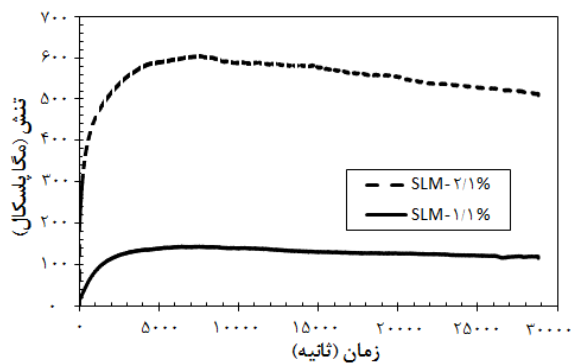
$$\sigma = \frac{1}{B} \ln\left(-\frac{1}{EA}\dot{\sigma}\right) \quad (5)$$

که $\dot{\sigma}$ نرخ رهایش تنش می‌باشد.

۳- تحلیل نتایج

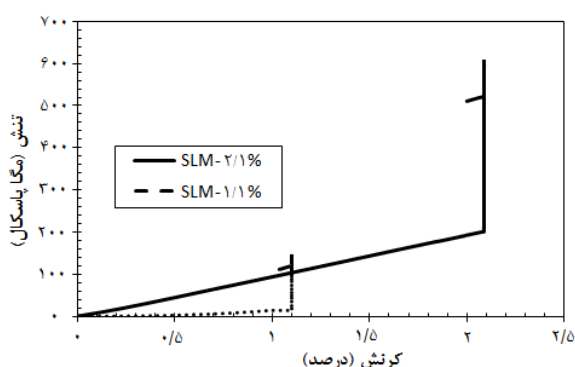
در شکل (۳) نمودار تنش-کرنش فشاری در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد در حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی با شرایط نمونه اولیه (as-built) در دمای محیط مقایسه شده است. به کمک نمودار شکل (۲) خواص مکانیکی هر یک از نمونه‌ها از جمله مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و استحکام نهایی محاسبه و در جدول (۲) مقایسه شده است. برای مثال مدول الاستیسیته در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد در نمونه عملیات حرارتی شده مقدار ۱۷۶ گیگا پاسکال می‌باشد که در مقایسه با نمونه عملیات حرارتی نشده که ۱۸۱ گیگا پاسکال است تقریباً ۳٪ کمتر می‌باشد. همچنین در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد، تنش تسلیم و استحکام نهایی نمونه عملیات حرارتی شده به ترتیب ۱۲ و ۴۴ مگا پاسکال نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده کاهش یافته‌اند. طبق نتیجه مشابه در مرجع^[25] و نتایج مقالات آورده شده در ادامه، عملیات حرارتی

معادل کرنش ۱/۱٪ و ۲/۱٪ نشان داده شده است. منحنی با کرنش ۱/۱٪ دارای نقطه بیشینه ۱۴۳ مگاپاسکال در زمان ۶۵۰۰ ثانیه است و سپس به حالت پایدار می‌رسد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود نقطه بیشینه و سطح زیر نمودار در نمونه با درصد کرنش ۲/۱٪ بیشتر بوده و این نمونه تحت تنش اولیه بیشتری قرار دارد. همچنین با بررسی نمودار و نرخ رهايش تنش در هر نمونه مشخص می‌شود که میزان و شیب منحنی رهايش در نمونه با درصد کرنش ۲/۱٪ بیشتر می‌باشد. ضمناً با تحلیل داده‌های تجربی و مقایسه با معادلات تحلیلی مشخص شد که تنش بصورت نمایی رها می‌شود.



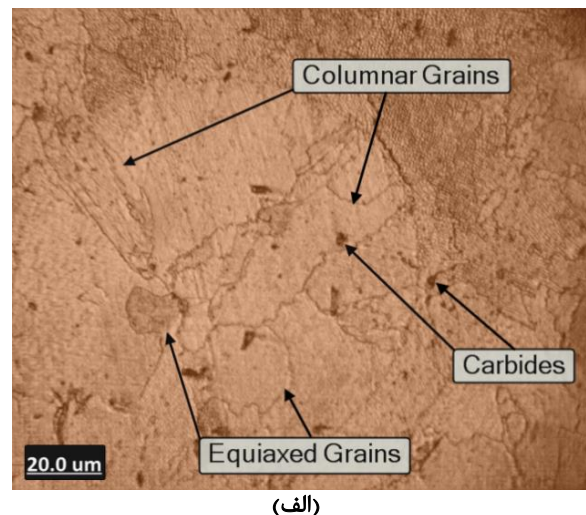
شکل ۵) نمودار تجربی رهايش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM)، تحت دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد، زمان ۸ ساعت و کرنش‌های ۱/۱٪ و ۲/۱٪

در شکل (۶) نمودار تنش-کرنش حاصل از رهايش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM) در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد با مقدار کرنش ۱/۱٪ و ۲/۱٪ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است با افزایش مقدار کرنش تا کرنش اسمی، میزان تنش افزایش یافته و سپس در حالی که کرنش ثابت است و با گذشت زمان، رهايش تنش صورت می‌گیرد.

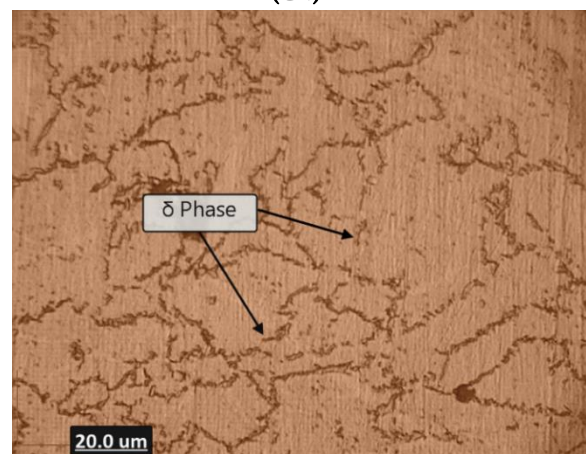


شکل ۶) نمودار تجربی تنش-کرنش حاصل از رهايش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM) تحت عملیات حرارتی انحلالی، دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد، زمان ۸ ساعت و کرنش‌های ۱/۱٪ و ۲/۱٪

است [7]. با توجه به شکل (۴-الف)، دانه‌های نمونه‌های SLM شده نه کاملاً هم محور و نه کاملاً ستونی هستند بلکه نامنظم بوده و عمدتاً مرزخانه‌ها در امتداد جهت ساخت تشکیل می‌شوند [34]. پس از فرآیند عملیات حرارتی، نمونه‌های اولیه (as-built) ساختار دانه‌های هم محور را حفظ کرده و دانه‌های ستونی به دانه‌های هم محور تبدیل می‌شود و کاربیدها به حداقل مقدار می‌رسند. همانطور که در شکل (۴-ب) نشان داده شده است، فازهای سوزنی شکل δ نه تنها در اکثر مرزهای دانه وجود دارند بلکه در داخل دانه‌ها نیز توزیع می‌شود و با توجه به اندازه‌گیری‌های EDX اثبات می‌شود این به دلیل ریز جداسازی‌های نیوبیوم به علت سرد شدن سریع مواد ذوب شده است [35]. برای بهبود خواص مکانیکی نمونه‌های (SLM)، به ویژه در دماهای بالا، تشکیل فاز δ درون دانه‌ای باید کاهش یابد.



(الف)

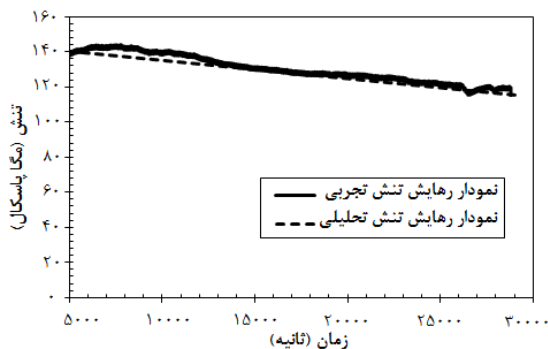


(ب)

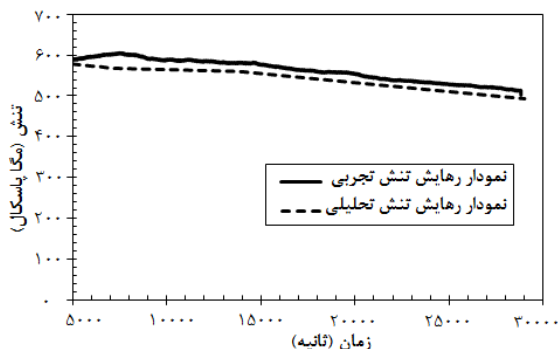
شکل ۴) میکروساختار سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM) (الف): نمونه اولیه (as-built)؛ (ب): نمونه عملیات حرارتی شده، تحت آزمایش رهايش تنش

در شکل (۵) نمودار تجربی رهايش تنش بدست آمده از آزمون رهايش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM)، در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد، زمان ۸ ساعت و تحت تنش اولیه

شکل (۹) و شکل (۱۰) نمودار تجربی و تحلیلی رهایش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM) تحت کرنش‌های ۱/۱٪ و ۲/۱٪ را نمایش می‌دهند. با ترکیب معادلات (۳) و (۵) و محاسبه ثوابت A و B از نمودار تجربی رهایش تنش، منحنی رهایش تنش بدست آمده از معادلات ساختاری خزش به ترتیب دارای مقدار میانگین مربع خطاها ۳/۵۶ و ۲۲/۷۹ و مقدار خطای ۲/۱۷٪ و ۳/۸۵٪ برای کرنش‌های ۱/۱٪ و ۲/۱٪ می‌باشند که مطابقت خوبی با نمودار نتایج تجربی دارد. توافق بین نتایج تحلیلی و تجربی نشان می‌دهد که معادله ساختاری خزش مورد استفاده در این مطالعه برای آزمایش رهایش تنش در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش SLM تحت کرنش‌های متغییر معتبر است. اهمیت این یافته به این دلیل مهم است که در هنگام پیش‌بینی رفتار رهایش تنش در این مواد، اطمینان به دقت مدل‌های تحلیلی را فراهم می‌کند و به تقویت اعتبار و کارایی استفاده از معادلات ساختاری خزش برای پیش‌بینی پاسخ مکانیکی مواد (IN718-SLM) کمک می‌کند.



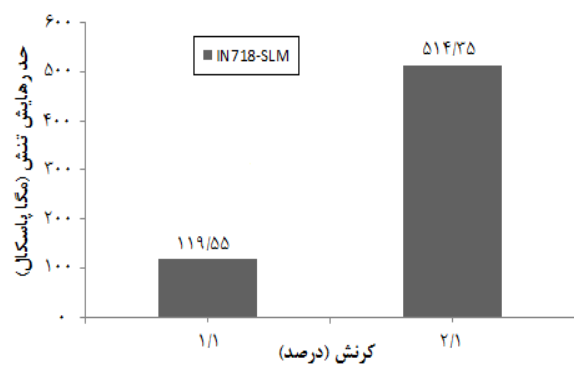
شکل ۹) مقایسه نمودار تجربی و تحلیلی رهایش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM)، دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد، زمان ۸ ساعت و کرنش ۱/۱٪



شکل ۱۰) مقایسه نمودار تجربی و تحلیلی رهایش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM)، دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد، زمان ۸ ساعت و کرنش ۲/۱٪

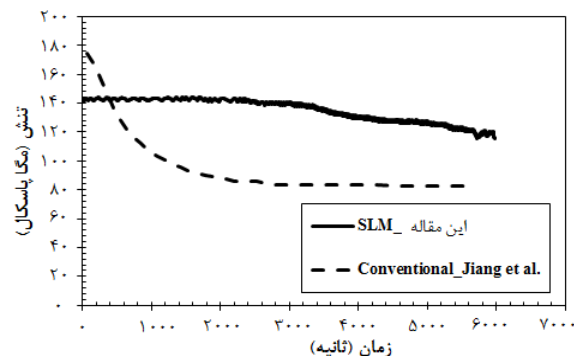
مقادیر ثوابت A و B معادله (۵) برای نمونه‌های (SLM) با میزان کرنش ۱/۱٪ و ۲/۱٪ در جدول (۳) نشان داده شده است.

حد رهایش تنش یک پارامتر مهم برای تعیین پایداری رهایش تنش می‌باشد^[36,37]. بمنظور بررسی اثر تغییرات کرنش بر میزان رهایش تنش، نمودار حد رهایش تنش در شکل (۷) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حد رهایش تنش با افزایش کرنش اولیه که منجر به افزایش تنش اولیه می‌گردد افزایش می‌یابد. سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش ریخته‌گری در مرجع^[21]، در آزمایش رهایش تنش تحت تنش اولیه ۵۱۰ مگاپاسکال در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد دارای مقدار حد رهایش تنش ۴۴۵/۱ مگاپاسکال می‌باشد که با نمونه با کرنش اولیه ۲/۱ درصد این تحقیق که دارای تنش اولیه حدود ۶۰۰ مگاپاسکال و حد رهایش ۵۱۴/۳۵ می‌باشد قابل مقایسه است.



شکل ۷) نمودار حد رهایش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM)، تحت دمای آزمایش ۶۵۰ درجه سانتیگراد و کرنش‌های ۱٪/۱ و ۲٪/۱

در شکل (۸) نمودارهای تجربی رهایش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM) مربوط به این تحقیق و (IN718) ساخته شده به روش فورج مربوط به مقاله جیانگ و همکاران^[21] در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. با توجه به نرخ بالای خنک شوندگی فرآیند SLM و اختلاف در ریزساختار نسبت به روش ساخت مرسوم، شیب و رفتار رهایش تنش دو نمونه دارای اختلافاتی می‌باشند.



شکل ۸) نمودار تجربی رهایش تنش سوپر آلیاژ (IN718) ساخته شده به روش (SLM) و مرسوم^[21] در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد

جدول ۳) مقادیر ثوابت A و B

کرنش اولیه	A	B
۱/۱ %	$۱۸/۵۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	۷۷×۱۰^{-۴}
۲/۱ %	$۲۰/۵۶ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۱۷/۳۶ \times ۱۰^{-۱۶}$

۴- نتیجه گیری

بمنظور مقایسه رفتار رهایش تنش نمونه‌های تولید شده به روش (SLM) سوپر آلیاژ (IN718)، تست‌های رهایش تنش در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد و کرنش اولیه ثابت ۱٪ و ۲٪ و زمان ۸ ساعت انجام شدند.

۱- از عملیات حرارتی همگن سازی و عملیات حرارتی انحلالی برای رفع نوسانات ریزساختاری و فازهای غیر تعادلی و همچنین از بین بردن فواصل ریزساختاری حین تولید و توزیع یکنواخت عناصر در ماتریس استفاده شد.

۲- با بررسی نمودارها و نرخ رهایش تنش در هر نمونه مشخص می‌شود که میزان و شیب منحنی رهایش در نمونه با درصد کرنش ۲٪/۱ بیشتر از نمونه با درصد کرنش ۱٪/۱ می‌باشد.

۳- با تحلیل داده‌های تجربی و نمودارهای معادلات تحلیلی مشاهده شد که تنش بصورت نمایی رها می‌شود.

۴- نمودار حد رهایش تنش بمنظور بررسی اثر تغییرات کرنش بر میزان رهایش تنش ارائه شد که نتایج نشان می‌دهد حد رهایش تنش با افزایش کرنش اولیه افزایش می‌یابد.

۵- با مطالعه نمودارهای رهایش تنش و با یافتن ضرایب مدل ساختاری خزش از نمودارهای تجربی، مشاهده می‌شود که منحنی رهایش تنش بدست آمده از معادلات ساختاری خزش مطابقت خوبی با نمودار نتایج تجربی دارد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچگونه تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

1- Hakeem AS, Patel F, Minhas N, Malkawi A, Aleid Z, Ehsan MA, Sharrofna H, Al Ghanim A. Comparative evaluation of thermal and mechanical properties of nickel alloy 718 prepared using selective laser melting, spark plasma sintering, and casting methods. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021 May 1;12:870-81.

2- Zhu J, Yuan W. Effect of pretreatment process on microstructure and mechanical properties in Inconel 718 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023 Apr 5;939:168707.

3- Zhang S, Wang L, Lin X, Yang H, Huang W. The formation and dissolution mechanisms of Laves phase in Inconel 718 fabricated by selective laser melting compared to directed energy deposition and cast. *Composites Part B: Engineering*. 2022 Jun 15;239:109994.

4- Schafrik R, Sprague R. Saga of gas turbine materials: part II of this four-part series on gas turbine materials development covers vacuum arc remelting, early superalloys, and titanium processing. *Advanced materials & processes*. 2004 Apr 1;162(4):27-31.

5- Petkov VI. Alloy 718 manufactured by AM selective laser melting: evaluation of microstructure and weldability.

6- Segerstark A. Laser metal deposition using alloy 718 powder: influence of process parameters on material characteristics (Doctoral dissertation, University West).

7- Chlebus E, Gruber K, Kuźnicka B, Kurzac J, Kurzynowski T. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*. 2015 Jul 15;639:647-55.

8- Aydinöz MS. M. Sc. Christopher Schaak Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Tillmann Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Universität Paderborn. *laser*. 2016;100:175.

9- Wang X, Keya T, Chou K. Build height effect on the Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting. *Procedia Manufacturing*. 2016 Jan 1;5:1006-17.

10- Konečná R, Kunz L, Nicoletto G, Bača A. Long fatigue crack growth in Inconel 718 produced by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*. 2016 Nov 1;92:499-506.

11- Khorram A, Jamaloei AD, Jafari A, Moradi M. Investigation on the effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonding between Inconel 718 and Inconel. 12- Wang X, Gong X, Chou K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. *In International Manufacturing Science and Engineering Conference 2015 Jun 8 (Vol. 56826, p. V001T02A063)*. American Society of Mechanical Engineers.

13- Kuo YL, Horikawa S, Takechi K. The effect of interdendritic δ phase on the mechanical properties of Alloy 718 built up by additive manufacturing. *Materials & Design*. 2017 Feb 15;116:411-8.

14- Popovich VA, Borisov EV, Heurtebise V, Riemslog T, Popovich AA, Sufiarov VS. Creep and thermomechanical fatigue of functionally graded Inconel 718 produced by additive manufacturing. *In TMS 2018 147th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings 2018 (pp. 85-97)*. Springer International Publishing.

15- Marchese G, Bassini E, Calandri M, Ambrosio EP, Calignano F, Lorusso M, Manfredi D, Pavese M, Biamino S, Fino P. Microstructural investigation of as-fabricated and heat-treated Inconel 625 and Inconel 718 fabricated by direct metal laser sintering: Contribution

- laser melting and casting. *Materials Science and Engineering: A*. 2018 May 2;724:357-67.
- 30- Zhu J, Yuan W, Peng F, Fu Q. Interaction of stress relaxation aging behavior and microstructural evolution in Inconel 718 alloy with different initial stress status. *Journal of Materials Science*. 2021 Aug;56(24):13814-26.
- 31- Lin HC, Wang TP, Lin KM, Chung CY, Wang PC, Ho WH. The stress relaxation of a Fe59Mn30Si6Cr5 shape memory alloy. *Journal of alloys and compounds*. 2008 Oct 20;466(1-2):119-25.
- 32- Sohrabi MJ, Mirzadeh H. Microstructural Investigation of Inconel 718 Superalloy in the As-Cast and Homogenized Conditions. *Metallurgical Engineering*. 2019 Dec 22;22(4):290-5.
- 33- Zhang D, Niu W, Cao X, Liu Z. Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2015 Sep 17;644:32-40.
- 34- Deng D, Peng RL, Moverare J. High temperature mechanical integrity of selective laser melted alloy 718 evaluated by slow strain rate tests. *International Journal of Plasticity*. 2021;140:102974.
- 35- Strößner J, Terock M, Glatzel U. Mechanical and microstructural investigation of nickel-based superalloy IN718 manufactured by selective laser melting (SLM). *Advanced Engineering Materials*. 2015 Aug;17(8):1099-105.
- 36- Lu L, Zhu T, Shen Y, Dao M, Lu K, Suresh S. Stress relaxation and the structure size-dependence of plastic deformation in nanotwinned copper. *Acta Materialia*. 2009 Oct 1;57(17):5165-73.
- 37- Yang J, Jiang H, Yao Z, Dong J. Limitations of calculating stress relaxation limit by function-fitting of Inconel718 superalloy. *Materials Letters*. 2018 Jun 15;221:89-92.
- of Politecnico di Torino and Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) di Torino. *Metal Powder Report*. 2016 Jul 1;71(4):273-8.
- 16- Gu D. *Laser additive manufacturing of high-performance materials*. Springer; 2015 Apr 21.
- 17- Karia MC, Papat MA, Sangani KB. Selective laser melting of Inconel super alloy-a review. In *AIP Conference Proceedings 2017 Jul 19 (Vol. 1859, No. 1)*. AIP Publishing.
- 18- Deng D. *Additively Manufactured Inconel 718: Microstructures and Mechanical Properties*. Linköping University Electronic Press; 2018 Jan 24.
- 19- Tiparti D, Wessman A, Cormier J, Tin S. Comparison of the stress relaxation and creep behavior of conventionally forged and additively manufactured René 65. *Journal of Materials Science*. 2023 Apr;58(13):5951-69.
- 20- Calvo J, Shu SY, Cabrera JM. Characterization of precipitation kinetics of Inconel 718 superalloy by the stress relaxation technique. In *Materials Science Forum 2012 Jan 31 (Vol. 706, pp. 2393-2399)*. Trans Tech Publications Ltd.
- 21- Jiang H, Yang J, Dong J, Zhang M, Yao Z, Xie X. Stress Relaxation Behavior Comparison of Typical Nickel-Base Superalloys for Fasteners. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Superalloy 718 & Derivatives: Energy, Aerospace, and Industrial Applications 2018 (pp. 789-804)*. Springer International Publishing.
- 22- Wang Y, Dong J, Zhang M, Yao Z. Stress relaxation behavior and mechanism of AEREX350 and Waspaloy superalloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2016 Dec 15;678:10-22.
- 23- Bapokutty O, Sajun Z, Syarif J. Stress relaxation behavior of heat treated Inconel 718. *Journal of Applied Sciences(Faisalabad)*. 2012;12(9):870-5.
- 24- Shen W, Zhang C, Zhang L, Yang Y, Zhu Z. Stress relaxation behaviour and creep constitutive equations of SA302Gr. C low-alloy steel. *High Temperature Materials and Processes*. 2018 Oct 25;37(9-10):857-62.
- 25- Rahimi S, King M, Dumont C. Stress relaxation behaviour in IN718 nickel based superalloy during ageing heat treatments. *Materials Science and Engineering: A*. 2017 Dec 21;708:563-73.
- 26- Balbaa M, Mekhiel S, Elbestawi M, Mclsaac J. On selective laser melting of Inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses. *Materials & Design*. 2020 Aug 1;193:108818.
- 27- Noura. *Inconel 718 Ni-based superalloys 30 Micrometer*. Noura Materials R&D Dept.; 2022 September.
- 28- Wang X, Gong X, Chou K. Review on Powder-Bed Laser Additive Manufacturing of Inconel 718 Parts. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference 2015 Jun 8 (Vol. 56826, p. V001T02A063)*. American Society of Mechanical Engineers.
- 29- Zhang D, Feng Z, Wang C, Wang W, Liu Z, Niu W. Comparison of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 alloy processed by selective