



The Effect of Cold Pre-Strain on the Tensile and Compressive Strength of Inconel 718 Superalloy Produced by Selective Laser Melting

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Lohrasbi S.¹,
Nakhodchi S.^{1*}

How to cite this article

Lohrasbi S, Nakhodchi S, The Effect of Cold Pre-Strain on the Tensile and Compressive Strength of Inconel 718 Superalloy Produced by Selective Laser Melting. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(08):475-484.

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: August 17, 2024
Accepted: October 22, 2024
Published: November 16, 2024

ABSTRACT

Inconel 718 superalloy is widely used in various industries due to its excellent high-temperature properties. The production of components made from Inconel 718 superalloy through the Selective Laser Melting (SLM) method enables the fabrication of parts with complex geometries. Therefore, improving the mechanical properties of parts produced by SLM using secondary strengthening processes is of great importance. This study investigates the effect of cold pre-strain on the tensile and compressive strength of Inconel 718 superalloy samples produced by SLM. The test specimens were produced by the SLM method and subjected to single-stage (5%-15%-30%) and two-stage (4%-12%-16%) loading. To examine the impact of initial loading on mechanical properties, tensile, compression, and hardness tests were performed, and the microstructure behavior was analyzed using an optical microscope. The results indicate that the yield strength and ultimate tensile strength of the Inconel 718 superalloy in the Y-axis (XY plane) increased by 31.8% and 11.6%, respectively, after applying a 30% initial strain along the Z-axis. The compressive yield strength of Inconel 718 superalloy increased by 79.3% in the Z-direction with a 30% pre-strain. In other words, applying pre-strain along the Z-axis affects the compressive strength in the XZ plane as the principal strain and the tensile strength in the XY plane as the shear strain. Increasing pre-strain to 30% has a minimal effect on the hardness properties of Inconel 718 superalloy. The results from the two-stage loading process indicate an enhancement in strength with the increase in the number of loading stages, attributed to the work-hardening phenomenon.

Keywords Inconel 718, Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, Strengthening, Cold Pre-Strain.

CITATION LINKS

1- Strengthening mechanisms in selective 2- Strengthening additively manufactured Inconel 718 through 3- A review of mechanical properties of 4- Saga of gas turbine materials: part II of this four-part series on 5- Alloy 718 manufactured by AM selective laser melting: evaluation of 6- Microstructural design of Ni-base alloys for high-temperature applications: impact of 7- Influence of build orientation on microstructure, mechanical and corrosion behavior of 8- δ Phase precipitation in Inconel 718 and associated mechanical properties. 9- Effect of δ phase on high temperature mechanical performances of 10- Deposition characteristics of cold sprayed Inconel 718 particles on Inconel 718 substrates with 11- Microstructure, precipitates and mechanical properties of 12- The superplasticity improvement of Inconel 718 through grain refinement by 13- Dislocation distribution, crystallographic texture evolution, and plastic inhomogeneity of 14- Hot tensile behavior of cold-rolled Inconel 718 alloy at 650 C: The role of δ phase. 15- Effect of rolling force on tensile properties of additively manufactured Inconel 718 at 16- Effect of pre-stretching on residual stresses and microstructures of 17- Study of the effects of hot forging on 18- The effect of pre-strain on tensile behaviour of 19- The Effect of the Pre-strain Process on 20- Influence of cold rotary swaging on microstructure and 21- Optimizing Tensile Properties and Hardness of 22- Relief of strain hardening in deformed Inconel 718 by 23- Selective laser melting of Inconel super alloy-a review. 24- On selective laser melting of Inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses. 25- Effects of processing routes on room temperature tensile strength and elongation for Inconel 718. 26- Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting. 27- Microstructure and properties of periodic porous Inconel 718 alloy prepared by

تاثیر پیش‌کرنش سرد بر استحکام کششی و فشاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی

سجاد لهراسبی^۱، سهیل نخودچی^{۱*}

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

چکیده

سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به دلیل خواص خوب در دمای بالا به شکل گسترده‌ای در صنایع مختلف مصرف می‌شود. تولید قطعات از جنس سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش ذوب لیزر انتخابی امکان تولید قطعات با هندسه پیچیده را فراهم می‌سازد. براین اساس بهبود خواص مکانیکی قطعات تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی با استفاده از فرایندهای ثانویه استحکام بخشی حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش تاثیر پیش‌کرنش سرد بر استحکام کششی و فشاری نمونه‌های سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی بررسی شده است. نمونه‌های آزمایش با روش ذوب لیزر انتخابی تولید شده و تحت بارگذاری تک مرحله‌ای (۵%-۱۵%-۳۰%) و دو مرحله‌ای (۴%-۱۲%-۱۶%) قرار گرفته است. به منظور بررسی تاثیر بارگذاری اولیه بر خواص مکانیکی از آزمون کشش، آزمون فشار و آزمون سختی و برای بررسی رفتار میکروساختار از میکروسکوپ نوری استفاده شد. طبق نتایج بدست آمده استحکام تسلیم و استحکام نهایی کششی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در راستای محور Z (صفحه XY) بعد از اعمال ۳۰٪ کرنش اولیه در راستای محور تولید (Z) معادل ۳۱/۸٪ و ۱۱/۶٪ افزایش یافته است. استحکام تسلیم فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با افزایش پیش‌کرنش به ۳۰٪ معادل ۷۹/۳٪ در راستای جهت تولید (Z) افزایش یافته است. به عبارت دیگر اعمال پیش‌کرنش در راستای محور Z بر استحکام فشاری در صفحه XZ به عنوان کرنش اصلی و بر استحکام کششی در صفحه XY به عنوان کرنش برشی بر قطعه تاثیرگذار می‌باشد. اعمال پیش‌کرنش تا ۳۰٪ تاثیر کمی بر خواص سختی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ دارد. نتایج حاصل از اعمال بارگذاری در دو مرحله بیانگر بهبود استحکام با افزایش تعداد مراحل بارگذاری بدلیل وجود پدیده کارسختی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: اینکونل ۷۱۸، ساخت افزایشی، ذوب لیزر انتخابی، استحکام بخشی، پیش‌کرنش سرد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

* نویسنده مسئول: snakhodchi@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

سوپرآلیاژهای پایه نیکل دارای استحکام کششی، استحکام خزشی و ضربه‌پذیری بالایی در دمای محیط و دماهای بالای کاری دارند. همچنین این آلیاژها دارای مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون خوبی مخصوصاً در دماهای بالا می‌باشند [1-3]. عناصر اصلی تشکیل دهنده سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ نیکل و کروم می‌باشد که علاوه بر آن دارای عناصر آلیاژی نیوبیوم، مولیبدن، تیتانیوم و آلومینیوم نیز می‌باشد. سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به دلیل استحکام مناسب در دمای بالا در بسیاری از کاربردها از جمله موتورهای

توربین هواپیما، توربین‌های گازی، موتورهای موشک و غیره با هندسه پیچیده استفاده می‌شود. به عنوان مثال، تقریباً ۴۰ تا ۵۰٪ از وزن کل یک موتور پیشرفته هواپیما با استفاده از سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید می‌شود [4]. که بیشترین این قطعات در بخش احتراق و توربین موتور استفاده می‌گردد. با این حال، قطعات سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ برای کاربردهای هوافضا معمولاً به ساختاری پیچیده با دقت بالا نیاز دارند که تولید این قطعات با فرایندهای تولید به روش سنتی مشکل، زمان‌بر و نیازمند نیروی متخصص می‌باشد.

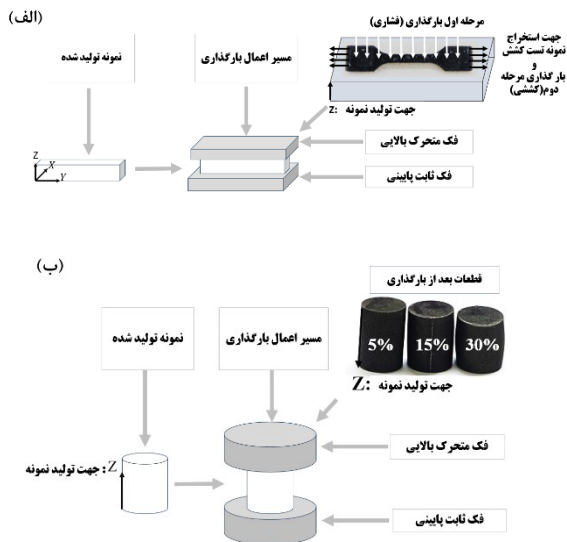
فرایندهای مختلف ساخت افزایشی (AM) با توجه به ماده اولیه (پودر، سیم، مایع و غیره) و منبع انرژی استفاده شده در فرایند (لیزر، پرتو الکترونی و غیره) دسته بندی شده‌اند [5]. از بین تنوع روش‌های موجود دو روش نشاندهنده مستقیم انرژی و ذوب لیزر انتخابی جزء پرکاربردترین روش‌های ساخت افزایشی برای تولید قطعات سه‌بعدی فلزی محسوب می‌شوند. تکنولوژی فرایند ذوب لیزر انتخابی (SLM) یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های ساخت افزایشی است که در آن یک قطعه با ذوب کردن پودر به صورت لایه به لایه توسط یک پرتوی لیزری متمرکز ساخته می‌شود. در مقایسه با فناوری‌های ساخت سنتی، فرایند SLM مزایای زیادی از جمله بهره‌وری بالاتر در تولید، نسبت مواد مصرفی، دقت ابعادی بالاتر و آزادی بیشتر در ساخت را دارا می‌باشد. با این حال با توجه به سرعت پایان در تولید قطعات برای تولید قطعات با هندسه پیچیده و یا به منظور ترمیم قطعات استفاده می‌شود. همچنین برای حذف تنش‌های پسماند، میکروجدایش ناشی از گرادیان دمایی فوق‌العاده بالا، نرخ خنک‌سازی بسیار سریع در طول فرایند SLM و افزایش خواص مکانیکی بایستی از فرایندهای ثانویه از قبیل عملیات حرارتی، کار سرد و ... نسبت به روش‌های سنتی تولید قطعات استفاده شود [3,6,7].

در سوپر آلیاژها می‌توان از چند نوع مکانیزم استحکام بخشی از جمله پالایش دانه، سخت شدن کرنشی، تقویت بارش استفاده کرد [1,2]. استحکام کششی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بوسیله فرایند آنیل انحلالی و پیرسختی از طریق کنترل رسوب‌گذاری فازهای γ' و γ'' در فاز γ افزایش می‌یابد. مقدار، شکل و توزیع فازهای مختلف بر خواص نهایی آلیاژ تاثیرگذار است. فاز γ'' با ترکیب شیمیایی Ni_3Nb دارای ساختار کریستالی تتراگونال است. این فاز بعنوان فاز استحکام بخش اصلی شناخته می‌شود. فاز γ'' ناپایدار بوده و با گذشت زمان در دماهای بالا به فازهای δ و γ تبدیل می‌شود. فاز γ' با ترکیب شیمیایی $Ni_3(Al, Ti)$ دارای ساختمان کریستالی مکعبی است و استحکام آن از فاز γ'' کمتر است. فازهای γ' و γ'' در مدت زمان کمتر از ۲۴ ساعت در گستره دمایی ۸۴۰ درجه سانتیگراد تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل می‌شوند. فاز δ دارای ترکیب Ni_3Nb و ساختمان کریستالی اورتورومبیک

به نمونه اولیه می‌باشد. همچنین افزایش پیش‌کرنش سبب بهبود استحکام تسلیم در هر دما شده است. یان و همکاران [19] اثر فرآیند پیش‌کرنش بر خواص مکانیکی، ریزساختار، عمر خستگی و نوع شکست فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ مورد بررسی کرده‌اند. شش حالت مختلف پیش‌کرنش تا ۳۵٪ مورد بررسی قرار گرفت. استحکام تسلیم و استحکام کششی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با افزایش پیش‌کرنش افزایش می‌یابند، اما استحکام تسلیم بیشتر از استحکام کششی افزایش می‌یابد. با توجه به مشاهده ریزساختار، یک نقطه پیش‌کرنش بحرانی توسط محققین پیشنهاد شد. وقتی پیش‌کرنش کمتر از مقدار بحرانی باشد، تنها کار سختی اتفاق می‌افتد. وقتی پیش‌کرنش بیشتر از مقدار بحرانی باشد، خواص مکانیکی تحت تأثیر اثرات ترکیبی کار سختی و تغییر فاز مارتنزیتی قرار می‌گیرند. همچنین یک نقطه پیش‌کرنش بحرانی در عمر خستگی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ وجود دارد که در نتایج آزمایش عمر خستگی نمونه‌های مختلف پیش‌کرنش شده نشان داده شده است. کلامپ و همکاران [20] تأثیر فرایند چرخش سرد بر میکرو ساختار و رفتار مکانیکی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ را با استفاده از تست کشش و فشار تک محوره در دمای محیط و دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد افزایش زاویه تغییر شکل تا ۹۱/۰ باعث افزایش خواص کششی، فشاری و سختی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در دمای محیط و دمای بالا شده است. توچو و همکاران [21] یک رفتار کششی بهینه از سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ عملیات حرارتی شده (در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت) بعد از اعمال فرایند نورد سرد ارائه کردند. برخی از قطعات بعد از نورد سرد مجدد تحت عملیات حرارتی ثانویه قرار گرفت. نتایج نشان داد سختی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با افزایش تغییر شکل تا ۵۰٪ در فرایند نورد افزایش می‌یابد. همچنین سختی قطعات تحت عملیات حرارتی ثانویه بیشتر از قطعات نورد شده بدون عملیات حرارتی ثانویه می‌باشد. افزایش تغییر شکل تا ۵۰٪ در نورد سرد سبب بهبود خواص کششی و کاهش شکل‌پذیری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ شده است. جی و همکاران [22] تأثیر اعمال پیش‌کرنش مکانیکی و جریان الکتریکی پالسی بر خواص مکانیکی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ مورد مطالعه قرار دادند. بهترین خواص مکانیکی در شرایط اعمال ۵۰٪ کرنش پلاستیک بدون اعمال جریان الکتریکی پالسی صورت گرفت. افزایش زمان انتقال پالس سبب افزایش شکل‌پذیری و کاهش استحکام تسلیم شده است. شی و همکاران [16] بررسی تأثیر پیش‌ککش در دمای محیط بر تنش‌پسماند و ریز ساختار سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ انجام شد. اعمال پیش‌ککش تا ۹ درصد سبب افزایش استحکام تسلیم و استحکام نهایی و کاهش شکل‌پذیری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ شده است. در این پژوهش تأثیر بارگذاری سرد بر خواص مکانیکی و ریز ساختاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی مورد بررسی قرار گرفت. قطعات تولید شده به روش ذوب

است و با فاز ۷ غیر هم دوست بوده و بر روی صفحات (۱۱۱) رشد کرده و یا در مرزخانه‌ها تشکیل می‌شود. فاز ۵ دارای شکل سوزنی است و در گستره دمایی ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۱۰۱۰ درجه سانتی‌گراد مستقیماً از ماتریس فاز ۷ تشکیل می‌شود. بدلیل شکل سوزنی فاز ۵ سخت‌سازی با آن مقدور نبوده و علاوه بر این، حساسیت به ایجاد ترک گرم افزایش می‌یابد. در این آلیاژ از فاز مرزخانه‌ای می‌توان به نحو مؤثری در کنترل اندازه دانه‌ها استفاده کرد که موجب دستیابی به ساختارهای بسیار ریز دانه با مقاومت به خستگی استثنایی شده و بهینه‌ترین خواص کششی و خواص گسیختگی تنشی را به همراه دارد [8,9].

در حین کار سرد، قسمت عمده انرژی وارد شده به نمونه به شکل گرما تلف می‌شود و باقیمانده انرژی باعث ایجاد شبکه‌های نابجایی و جاهای خالی و در نتیجه افزایش خواص سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ مانند استحکام کششی، مقاومت در برابر خزش و سختی می‌گردد [10]. کار سرد باعث تغییر شکل پلاستیک که منجر به تغییر در مورفولوژی دانه‌ها و مناطق مرزی دانه می‌شود [11]. مکانیسم تغییر شکل باعث ایجاد نابجایی، کشیدگی دانه‌ها و تغییراتی است که در ساختار داخلی درون دانه‌ها رخ می‌دهد. علاوه بر این، بیشتر دانه‌ها با توجه به جهت تنش‌های اعمال شده در طول کار سرد تغییر جهت می‌دهند و اگر ماده به شدت تغییر شکل داده شود، دانه‌ها می‌توانند به حدی منحرف شوند که در نتیجه دانه‌ها شکسته شده و دانه‌های کوچکتری تشکیل می‌دهند [12-14]. دانه‌های کوچکتر برابر با دانه‌های بیشتر و تراکم بیشتر مرزهای دانه است که مانع حرکت می‌شود و در نهایت استحکام ماده را افزایش می‌دهد. در حالی که سردکاری یک ماده باعث افزایش استحکام و سختی می‌شود، شکل‌پذیری و توانایی عمومی مواد برای تغییر شکل کاهش می‌یابد [14-16]. به عبارت دیگر تراکم نابجایی‌ها با افزایش کار سرد به دلیل تکثیر نابجایی یا تشکیل نابجایی‌های جدید افزایش می‌یابد. با افزایش تراکم در نابجایی، فاصله متوسط بین آنها کاهش می‌یابد و در نتیجه فضای کمتری برای حرکت در نابجایی و در نهایت افزایش استحکام ایجاد می‌شود. پرنیچی و همکاران [17] تأثیر فورج داغ و پیش‌کرنش را بر روی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ تولید شده به روش ساخت افزایشی بررسی کردند. قطعات در بازه دمایی (۹۰۰°C-۱۰۴۰°C) فورج داغ شده و سپس فرایند ثانویه اعمال پیش‌کرنش در دمای محیط به نمونه‌ها اعمال شده است. نتایج نشان داد افزایش پیش‌کرنش از ۵٪ به ۳۰٪ در دمای بالا سبب کاهش استحکام تسلیم کششی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ شده است. پنگ و همکاران [18] اثر پیش‌کرنش بر رفتار کششی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ مورد بررسی قرار دادند. بررسی رفتار کششی نمونه‌های پیش‌کرنش شده در بازه دمایی ۲۹۳ کلین تا ۵۷۳ کلین صورت گرفت. نتایج نشان داد با افزایش دما استحکام کششی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ کاهش می‌یابد. قطعات پیش‌کرنش شده در هر دما دارای استحکام کششی بالاتری نسبت



شکل ۱) تصویر شماتیک از نحوه اعمال بارگذاری ، (الف) فشاری-کششی و (ب) فشاری-فشاری

۲-۲- نمونه ها

از لحاظ ابعادی دو نوع نمونه در این تحقیق استفاده شده است. جهت بررسی تاثیر بارگذاری اولیه سرد بر رفتار کششی، قطعات به شکل هندسه مکعب مستطیل به ابعاد $7 \times 7 \times 7$ میلیمتر ساخته شده‌اند. همچنین جهت بررسی رفتار فشاری، قطعات استوانه‌ای به قطر ۸ میلیمتر و ارتفاع ۱۲ میلیمتر براساس استاندارد ASTM E9 توسط ذوب لیزر انتخابی تولید شده‌اند. نمونه‌های ساخته شده مکعبی شکل قبل از تست کشش تحت بار مکانیکی اولیه در دمای اتاق قرار گرفته‌اند.

۳- آزمایشات

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است در این نمونه‌ها بارگذاری مکانیکی اولیه در جهت ساخت نمونه (به طول ۷ میلیمتر) انجام شد. بارگذاری‌های مکانیکی فشاری اولیه توسط دستگاه (Zwick/Roell-Z250) در دمای اتاق با نرخ جابجایی ۱ میلیمتر بر دقیقه انجام شد. تمامی بارگذاری‌های اولیه در جدول ۲ خلاصه شده است. بارگذاری‌های اولیه در دو گروه تک مرحله-ای (گروه الف) و دو مرحله‌ای (گروه ب) دسته‌بندی شده است. در بارگذاری تک مرحله‌ای قطعه یک بار تحت بارگذاری فشاری اولیه قرار گرفته سپس تاثیر بارگذاری اولیه بر رفتار کششی و فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی شده است. در بارگذاری دو مرحله‌ای، قطعات تحت نیروی ثابت مطابق جدول ۲ در دو مرحله بارگذاری قرار گرفته است. سپس تاثیر تعداد مراحل بارگذاری بر رفتار فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی شده است. تعداد تکرار هر آزمایش دو مرتبه می‌باشد.

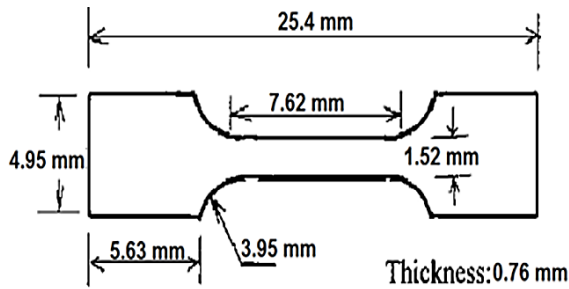
لیزر انتخابی دارای استحکام کمتری به دلیل شرایط تولید نسبت به برخی از فرایندهای سنتی مانند فرایند فورج می‌باشد. لذا اعمال فرایندهای ثانویه جهت افزایش استحکام اینگونه از قطعات جهت جایگزین کردن با قطعات تولید شده به روش فورج حائز اهمیت می‌باشد. طبق گزارشات پیشین هیچ تحقیقی پیرامون اعمال کرنش اولیه بدین گونه بر سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی ارائه نشده است. بنابراین انجام این پژوهش حائز اهمیت می‌باشد.

۲- مواد و نمونه ها

۲-۱- سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی در روش ذوب لیزر انتخابی، پودر بر سطحی که فرایند ساخت انجام می‌شود پخش شده و سپس روی سطح تراز می‌گردد. سیستم نوری، لیزر را به نقطه مورد نظر برای ذوب هدایت می‌کند. اگر میزان انرژی لیزر کافی باشد، پودرها ذوب شده و یک حوضچه مذاب از پودر را تشکیل می‌دهند. دمای سطح را به دمای محیط می‌رسانیم، نتیجه این کاهش دما انجماد سریع است که اتصال و یکپارچگی پودرها را به همراه دارد. هر لایه طبق همین فرایند روی لایه‌ی قبل با ضخامتی حدود ۲۰ تا ۳۰ میکرومتر تشکیل می‌شود. این فرایند تا رسیدن به قطعه نهایی نهایی ادامه دارد. پس از تولید محصول نهایی، محفظه خالی شده و با گازهای بی اثر آرگون پر می‌شود که منجر به کاهش قابل توجه مقدار اکسیژن موجود در محیط می‌شود [23]. پودر سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با ابعاد ذرات کروی بین ۱۰ تا ۴۵ میکرون برای تولید نمونه‌ها استفاده شده است [24]. رسوبگذاری پودر توسط لیزر فیبری با طول موج ۱۰۶۷ نانومتر، توان ۳۰۰ وات، ضخامت لایه‌ای ۳۰ میکرومتر، تحت گاز خنثی آرگون انجام شده است. ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده براساس درصد وزنی در جدول ۱ نشان داده و با نتایج استاندارد ASTM F3055 - 14a مقایسه شده است. ترکیبات پودر استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها در محدوده مجاز این استاندارد می‌باشد.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ مورد استفاده و مقایسه با استاندارد ASTM F3055-14a بر حسب درصد وزنی.

Co	Mo	Nb	Ti	Al	Fe	Cr	Ni	درصد وزنی	قطعات
۱	۳/۳	۵/۳	۰/۹	۰/۵	۱۶/۵	۲۰	۵۲/۵	Wt. %	نمونه
۲/۸-۰/۱	۴/۷۵-۳/۳	۰/۶۵-۵/۳	۰/۲-۱/۱۵	۰/۲-۰/۸	بقیه	۱۷-۲۱	۵۰-۵۵	Wt. %	استاندارد ASTM F3055-14a



شکل ۲) ابعاد نمونه تست کشش (ابعاد بر حسب میلیمتر است).

جدول ۳) خواص مکانیکی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸

نمونه	استحکام تسلیم کششی (MPa)	استحکام نهایی کششی (MPa)	استحکام تسلیم فشاری (MPa)
ذوب لیزر انتخابی (SLM)	۶۶۳	۸۶۷	۷۰۵
استاندارد ASTM F3055	۶۳۰-۷۷۰	۹۷۰-۱۰۶۰	---
فورج شده	۱۱۸۸	۱۳۵۰	۱۳۴۷

تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی می‌باشد. همچنین استحکام نهایی نیز با اختلاف کمی در محدوده استاندارد فوق قرار دارد. استحکام تسلیم فشاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در راستای محور تولید (در صفحه XZ) برابر ۷۰۵ مگاپاسگال می‌باشد. در این پژوهش استحکام کششی و استحکام فشاری یک نمونه تولید شده به روش فورج اندازه گیری و جهت مقایسه با سایر قطعات ارائه گردید. نمونه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش فورج دارای استحکام تسلیم ۱۱۸۸ مگاپاسگال و استحکام نهایی ۱۳۵۰ مگاپاسگال می‌باشد. همچنین استحکام تسلیم فشاری برابر ۱۳۴۷ مگاپاسگال می‌باشد. مدول یانگ سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در دمای محیط برابر ۱۹۸ گیگاپاسگال می‌باشد.

۴-۲- استحکام نمونه ها بعد از پیش کرنش سرد در یک سیکل

رفتار تنش-کرنش مهندسی قطعات در زمان انجام فرایند پیش-کرنش ثبت شده و در شکل ۳ نمایش داده شده است. مطابق شکل ۳، ماکزیمم تنش مهندسی فشاری مورد نیاز جهت اعمال ۵٪-۱۵٪ و ۳۰٪ کرنش اولیه به ترتیب برابر ۸۲۰ مگاپاسگال، ۱۰۲۰ مگاپاسگال و ۱۷۷۰ مگاپاسگال می‌باشد. هر کدام از نمونه‌ها بعد از اعمال پیش کرنش فشاری سرد تحت بارگذاری کششی قرار گرفته اند.

جدول ۲) پارامترهای اعمال بارگذاری بر سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی

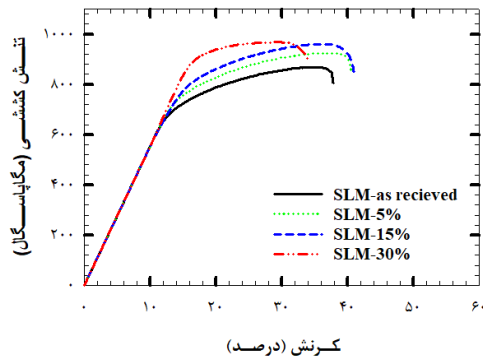
دسته بندی	بارگذاری مرحله اول (درصد)	بارگذاری مرحله دوم (درصد)	بارگذاری مرحله سوم تا شکست
گروه الف	۰	۰	فشاری - کششی
	۵	۰	
	۱۵	۰	
	۳۰	۰	
گروه ب	۰	۴	فشاری
	۴	۰	
	۱۲	۱۲	
	۱۶	۱۶	

مطابق شکل ۱-الف، قطعات مستطیلی شکل تحت بارگذاری اولیه (۵٪-۱۵٪-۳۰٪) در راستای محور Z قرار گرفته‌اند. نمونه‌های تست کشش در راستای عمود بر جهت ساخت (راستای محور Y) از داخل نمونه‌های مکعب مستطیل استخراج شده‌اند. با استفاده از ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) هندسه قطعات براساس شکل ۲ جهت بررسی تاثیر بارگذاری بر رفتار کششی استخراج شد. قطعات استوانه‌ای نیز طوری ساخته شده‌اند که جهت ساخت در جهت ارتفاع نمونه‌ها باشد. (مطابق شکل ۱-ب) این نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های اولیه در راستای ساخت (محور Z) قرار گرفته‌اند. به منظور بررسی میکروساختار قطعات از میکروسکپ نوری (OM) استفاده شد. قبل از بررسی میکروساختار، سطح نمونه با سنباده‌های متفاوت از ۴۰ تا ۲۵۰۰ صیقل، پولیش و با محلول مناسب، اچ شد. از آزمون سختی برینل (BH) بر اساس استاندارد $ASTM E10$ (با نیروی ۱۸۷/۵ کیلوگرم با ساچمه‌ای به قطر ۲/۵ میلیمتر) به منظور بررسی تاثیر بارگذاری بر تغییرات سختی استفاده شد. نتایج بر اساس میانگین پنج اندازه‌گیری می‌باشد.

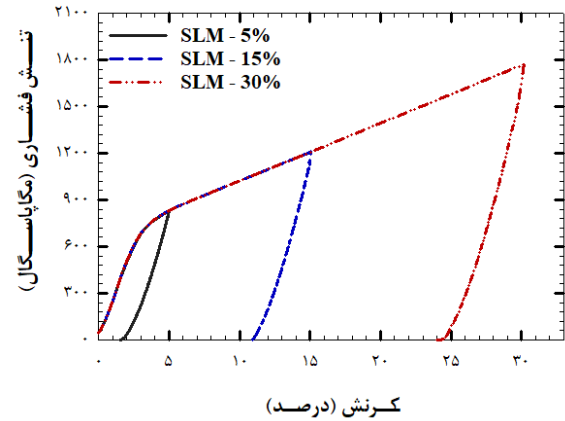
۴- نتایج و بحث

۴-۱- استحکام نمونه ها قبل از پیش کرنش سرد

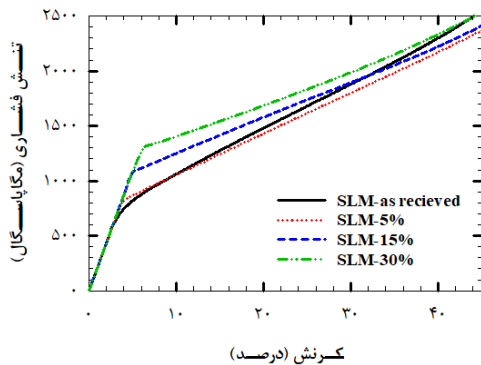
قبل از شروع تست‌های پیش‌کرنش سرد، استحکام نمونه‌ها در بارگذاری کششی و فشاری اندازه گیری و جدول ۳ به صورت خلاصه ارائه گردید. همانطور که از این جدول مشخص است، استحکام تسلیم کششی نمونه تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی در جهت عمود بر محور تولید (در صفحه XY) برابر ۶۶۳ مگاپاسگال و استحکام نهایی ۸۶۷ مگاپاسگال می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد استحکام تسلیم نمونه تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی در محدوده استاندارد ($ASTM - F3055$) قطعات



شکل ۴) نمودار تجربی تنش - کرنش کششی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی، قبل و بعد از پیش کرنش های اولیه فشاری



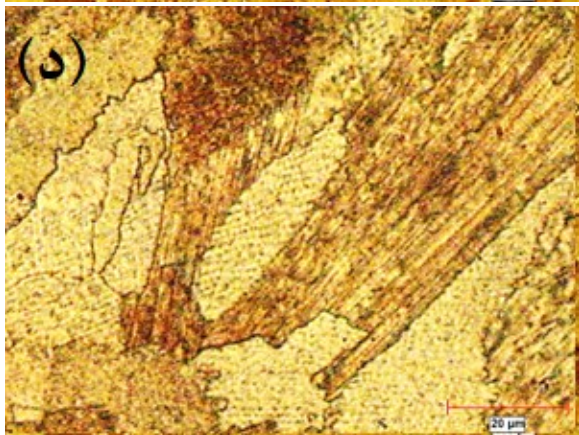
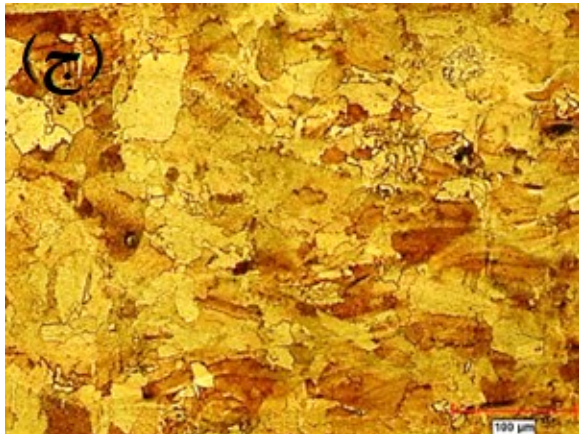
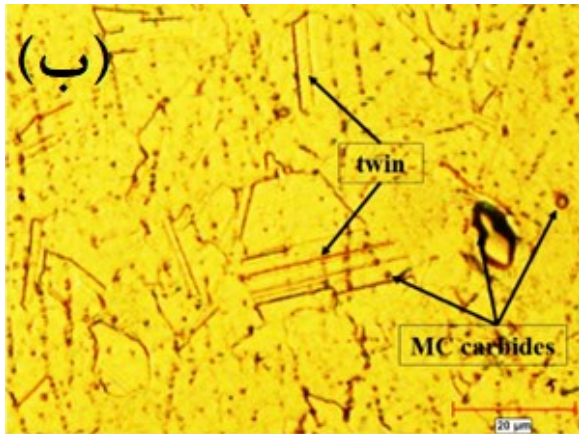
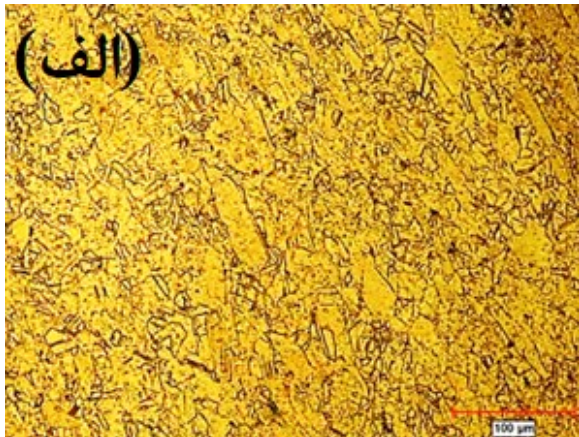
شکل ۳) نمودار تجربی تنش - کرنش فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی حاصل از پیش کرنش های اولیه



شکل ۵) نمودار تجربی تنش - کرنش فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی، قبل و بعد از پیش کرنش های اولیه فشاری

شکل ۴ نمودار تنش و کرنش مهندسی حاصل از تست کشش سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ قبل و بعد از اعمال پیش کرنش های فشاری نشان داده شده است. استحکام تسلیم کششی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در راستای محور Y (در صفحه XY) برابر 663 مگاپاسکال می باشد. با اعمال 5% پیش کرنش فشاری، استحکام تسلیم به 712 مگاپاسکال معادل $7/4\%$ افزایش می یابد. با افزایش پیش کرنش فشاری به 15% و 30% استحکام تسلیم کششی به 723 مگاپاسکال و 874 مگاپاسکال معادل 9% و 31% افزایش می یابد. استحکام تسلیم نهایی نمونه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده برابر 867 مگاپاسکال می باشد. با اعمال 5% - 15% و 30% پیش کرنش اولیه، استحکام تسلیم نهایی به 924 مگاپاسکال، 960 مگاپاسکال و 967 مگاپاسکال معادل $6/5\%$ ، $10/8\%$ و $11/6\%$ افزایش می یابد که در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد پیش کرنش فشاری سبب بهبود استحکام تسلیم و استحکام نهایی کششی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی می شود. این فرایند تاثیر بیشتری بر بهبود استحکام تسلیم نسبت به استحکام نهایی کششی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در راستای محور Y دارد. نتایج فوق با نتایج تست های انجام شده در خصوص بهبود خواص کششی و فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ساخت افزایشی و روش های سنتی در فرایند نورد سرد با اعمال بارگذاری اولیه تطابق دارد [15,25]. مطابق شکل ۴، ازدیاد طول حاصل از تست کشش نمونه تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی (As-received) برابر $37/8\%$ می باشد. اعمال پیش کرنش اولیه 15% سبب افزایش ازدیاد طول برابر 41% که 8% بیشتر از نمونه اولیه شده است. به عبارت دیگر با اعمال حداکثر 15% پیش کرنش اولیه می توان ضمن افزایش شکل پذیری، استحکام ماده را افزایش داد. لازم به توضیح است رفتار ازدیاد طول حاصل از 5% و 15% کرنش اولیه تقریباً یکسان می باشد. در حالیکه بعد از 30% اعمال پیش کرنش اولیه، ازدیاد طول نمونه به مقدار 9% کاهش می یابد. به عبارت دیگر بروز کار سختی سبب کاهش

ازدیاد طول و افزایش چشمگیر استحکام تسلیم و استحکام تسلیم نهایی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ شده است [15]. منحنی تنش و کرنش مهندسی حاصل از اعمال پیش کرنش بر رفتار فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در شکل ۵ و جدول ۴ نشان داده شده است و با نمونه اولیه تولید شده به روش لیزر انتخابی مقایسه شد. بررسی تاثیر بارگذاری بر رفتار فشاری با جهت اعمال بارگذاری در یک راستا (Z) می باشد. اعمال پیش کرنش اولیه به میزان 5% - 15% و 30% سبب افزایش استحکام تسلیم از 705 مگاپاسکال در نمونه اولیه به 805 مگاپاسکال، 1080 مگاپاسکال و 1264 مگاپاسکال معادل $14/2\%$ - $53/2\%$ و $79/3\%$ شده است. نتایج حاصل از بررسی رفتار کششی و فشاری نشان می دهد سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی همگن نبوده و استحکام تسلیم در صفحات مختلف متفاوت می باشد. پیش کرنش (بارگذاری) اعمالی به صورت یک نوع کرنش برشی بر رفتار کششی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تاثیرگذار بوده در حالیکه به دلیل جهت اعمال بارگذاری، پیش کرنش اولیه بر رفتار فشاری به عنوان کرنش اصلی تاثیرگذار می باشد. به همین علت بهبود استحکام تسلیم در رفتار فشاری بیشتر از رفتار کششی می باشد.



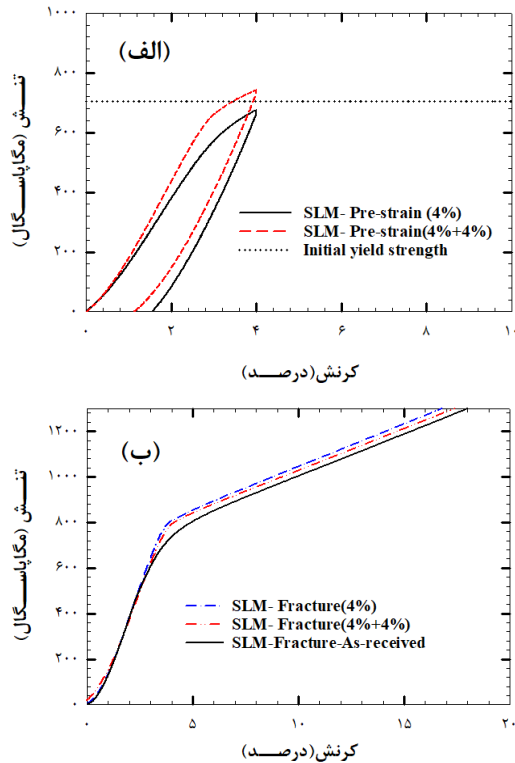
شکل ۶) میکروساختار سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی (الف - ب) نمونه اولیه و (ج - د) نمونه تحت ۳۰ درصد بارگذاری اولیه در دمای محیط

جدول ۴) خواص مکانیکی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی قبل و بعد از پیش‌کرنش‌های اولیه فشاری

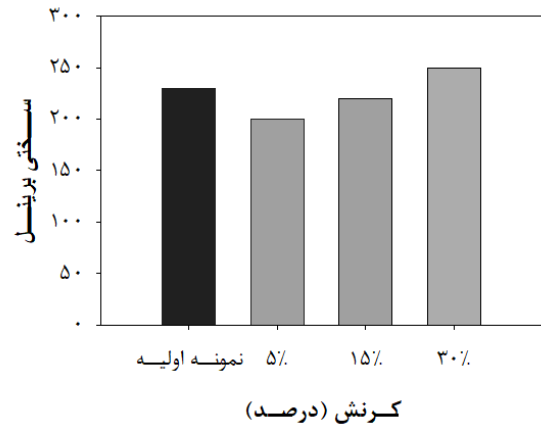
پیش‌کرنش‌های اولیه فشاری (%)	کششی در جهت Y			فشاری در جهت Z
	استحکام تسلیم (مگاپاسگال)	استحکام نهایی (مگاپاسگال)	استحکام تسلیم (مگاپاسگال)	
۰	σ_y	σ_{ut}	σ_y	
۵	۶۶۳	۸۶۷	۷۰۵	
۱۵	۷۱۲	۹۲۴	۸۰۵	
۳۰	۷۲۳	۹۶۰	۱۰۸۰	
	۸۷۴	۹۶۷	۱۲۶۴	

میکرو ساختار سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی قبل و بعد از ۳۰٪ اعمال پیش‌کرنش در صفحه XY بررسی شده و در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶-الف، دانه‌های نمونه‌های تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی نه کاملاً هم محور و نه ستونی هستند بلکه نامنظم بوده و عمدتاً مرز دانه‌ها در امتداد جهت ساخت تشکیل می‌شوند. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که ریز ساختار سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده توسط ذوب لیزر انتخابی از ساختار دندریتی ریز و یونکتیک فاز $\delta/Laves$ و کاربیدهای نوع MC در مناطق بین دندریتی تشکیل شده [26] که در شکل ۶-ب این ساختار قابل رویت می‌باشد. ساختار دندریتی ایجاد شده به سرعت سرد شدن ناهموار مواد در حین فرایند تولید نسبت داده می‌شود زیرا مواد در طول فرایند تولید افزودنی به صورت لایه به لایه ساخته می‌شوند. عواملی مانند شار حرارتی و گرادیان‌های حرارتی به طور قابل توجهی بر رشد دانه تأثیر می‌گذارند. مطابق شکل ۶-ج و ۶-د، با اعمال ۳۰٪ پیش‌کرنش اولیه، محتوا و توزیع انواع مرز دانه‌ها تغییر کرده است. به طور خاص، محتوای مرزهای دوقلو به طور قابل توجهی کاهش یافته است. در حالیکه مرزهای دانه با زاویه کم افزایش می‌یابد. همچنین هنگامی که سطح بارگذاری به ۳۰٪ افزایش یافت، چگالی نابجایی افزایش یافته که ناشی از تغییر شکل پلاستیک در حین بارگذاری می‌باشد. این نابجایی‌ها مکان‌های موثری را برای هسته زایی رسوبات فراهم می‌کنند. متوسط اندازه دانه پس از ۳۰٪ پیش‌کرنش نسبت به نمونه اولیه افزایش می‌یابد.

بررسی تأثیر بارگذاری بر رفتار سختی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در شکل ۷ نشان داده شده است. نمونه‌های اولیه دارای سختی ۲۳۰ برینل می‌باشد. که این موضوع با نتایج مرجع [27] که سختی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی در صفحات مختلف بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ برینل گزارش شده است همخوانی دارد. اعمال پیش‌کرنش اولیه به میزان ۵٪، سختی به ۲۰۰ برینل کاهش می‌یابد. همچنین افزایش پیش‌کرنش به میزان ۱۵٪، سختی نمونه به ۲۲۰ برینل کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر سختی قطعات متأثر از پیش‌کرنش اولیه تا سقف ۱۵٪، کمتر از نمونه تولید شده می‌باشد. اهمیت این یافته به این دلیل مهم



شکل ۸) نمودار تجربی تنش - کرنش فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی، (الف) اعمال ۴ درصد بارگذاری در دو گروه تک مرحله ای و دو مرحله ای و (ب) تاثیر ۴ درصد بارگذاری بر استحکام فشاری و مقایسه با نمونه اولیه



شکل ۹) سختی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی، حالت قبل و بعد از بارگذاری اولیه فشاری

است که ضمن حفظ یا افزایش شکل پذیری، استحکام قطعات سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی افزایش یابد. در حالیکه با افزایش پیش کرنش به میزان ۳۰٪، سختی به ۲۵۰ برینل افزایش می‌یابد. مطابق نتایج مرجع [15] نتایج حاصل از رفتار کششی و رفتار سختی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی نشان می‌دهد تغییرات سختی با رفتار ازدیاد طول قطعات متاثر از پیش کرنش اولیه رابطه مستقیم دارد.

۳-۴- استحکام نمونه ها بعد از پیش کرنش سرد در دو سیکل

در شکل‌های ۸-۱۰ و جدول ۵ تاثیر بارگذاری مرحله‌ای در راستای تولید قطعه بر رفتار فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ نشان داده شده است. در شکل ۸ نمودار تجربی تنش-کرنش فشاری حاصل از اعمال پیش کرنش اولیه به میزان ۴٪ در دو گروه تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای و تاثیر آن بر رفتار فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۸-الف مقدار تنش مهندسی مورد نیاز جهت اعمال ۴٪ پیش کرنش اولیه در مرحله اول برابر ۶۸۰ مگاپاسکال بوده که کمتر از استحکام تسلیم سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ می‌باشد. به عبارت دیگر قطعه تحت تاثیر بارگذاری الاستیک قرار گرفته و مکانیزم لغزش در قطعه فعال می‌شود. در مرحله دوم بارگذاری، نیروی مورد نیاز برای اعمال ۴٪ پیش کرنش اولیه برابر ۷۴۵ مگاپاسکال و بیش از نیروی مورد نیاز در مرحله اول می‌باشد. در این مرحله قطعه تحت تاثیر تغییر شکل پلاستیک قرار گرفته است. به عبارت دیگر بارگذاری در مرحله اول بر کاهش عیوب حاصل از فرایند تولید تاثیر گذاشته و سبب افزایش مقاومت قطعه در برابر تغییر شکل در مرحله دوم شده است که این امر سبب افزایش نیروی مورد نیاز جهت اعمال پیش کرنش در مرحله دوم شده است. شکل ۸-ب تاثیر پیش کرنش به میزان ۴٪ بر استحکام فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ را نشان می‌دهد. اعمال پیش کرنش به میزان ۴٪ در مرحله اول سبب افزایش استحکام تسلیم فشاری

از ۷۰۵ مگاپاسکال به ۸۰۴ مگاپاسکال می‌شود. اعمال پیش کرنش به میزان ۴٪ در مرحله دوم سبب افزایش استحکام تسلیم به ۸۰۰ مگاپاسکال نسبت به نمونه اولیه شده است. نتایج نشان می‌دهد اعمال پیش کرنش در مرحله دوم سبب افزایش استحکام فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ نسبت به مرحله اول بارگذاری نشده است. مطابق شکل ۹-الف، در هر دو گروه بارگذاری با اعمال ۱۲٪ پیش-کرنش سبب ایجاد تغییر شکل پلاستیک در نمونه شده است. مطابق شکل ۹-ب، اعمال ۱۲٪ پیش کرنش در مرحله اول سبب افزایش استحکام تسلیم فشاری به ۱۰۴۰ مگاپاسکال و در مرحله دوم سبب افزایش استحکام تسلیم فشاری به ۱۲۲۰ مگاپاسکال شده است. به عبارت دیگر افزایش تعداد مراحل بارگذاری در پیش-کرنش ثابت سبب بهبود استحکام تسلیم فشاری نمونه شده است. شکل ۱۰، تاثیر افزایش پیش کرنش (۱۶٪) و تعداد مراحل اعمال پیش کرنش بر رفتار فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ نشان داده شده است. شکل ۱۰-الف نشان می‌دهد افزایش مراحل اعمال پیش-کرنش سبب افزایش مقدار کارسختی شده است که این موضوع از انحنای منحنی های بارگذاری در ناحیه تسلیم مشهود می‌باشد. مطابق شکل ۱۰-ب، استحکام تسلیم فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی با اعمال ۱۶٪ پیش-کرنش در مرحله اول به ۱۰۸۵ مگاپاسکال و در مرحله دوم به ۱۳۱۴ مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

جدول ۵) خواص فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی قبل و بعد از پیش کرنش های اولیه فشاری در مراحل مختلف

بارگذاری (درصد)	تنش تسلیم فشاری (مگاپاسگال)		
	σ_{z_0}	σ_{z_1}	σ_{z_2}
۰	۷۰۵	---	---
۴	---	۸۰۴	---
۴+۴	---	۸۰۴	۸۰۰
۱۲	۷۰۵	---	۱۰۴۰
۱۲+۱۲	۷۰۵	۱۰۴۰	۱۲۲۰
۱۶	۷۰۵	---	۱۰۸۵
۱۶+۱۶	۷۰۵	۱۰۸۵	۱۳۱۴

۴- نتیجه گیری

به منظور بررسی و مقایسه تاثیر پیش کرنش سرد بر خواص مکانیکی و ریز ساختاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی از تست های کششی و فشاری تک محوره استفاده شد.

۱- تاثیر بارگذاری فشاری سرد در راستای محور Z سبب بهبود رفتار کششی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در راستای محور Y (صفحه XY) می شود. با اعمال پیش کرنش به میزان حداکثر ۱۵٪، استحکام تسلیم و استحکام تسلیم نهایی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با حفظ شکل پذیری، افزایش می یابد. در حالیکه با افزایش پیش کرنش اولیه تا ۳۰٪، شکل پذیری به دلیل بروز کار سختی کاهش می یابد.

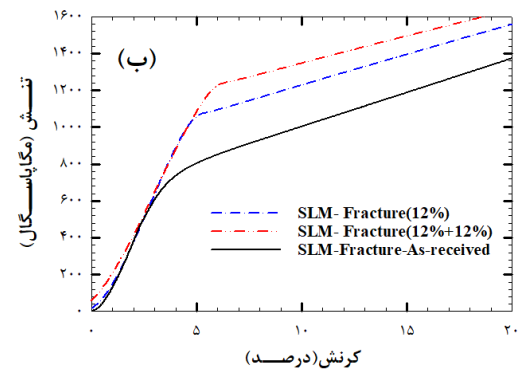
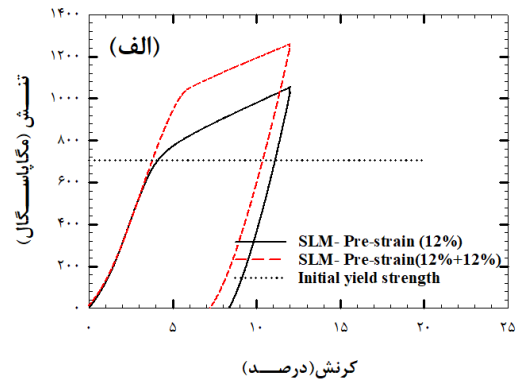
۲- تاثیر بارگذاری فشاری سرد در راستای محور Z سبب بهبود رفتار فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در همان راستا شده است. نتایج نشان می دهد تاثیر استحکام بخشی به کمک اعمال پیش کرنش در صفحات مختلف متفاوت می باشد.

۳- افزایش پیش کرنش اولیه سبب افزایش متوسط اندازه دانه به دلیل افزایش چگالی نابجایی ها می شود که مکان های موثری را برای هسته زایی رسوبات فراهم می کند. تغییرات بارگذاری اولیه تاثیر کمی بر خواص سختی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ دارد.

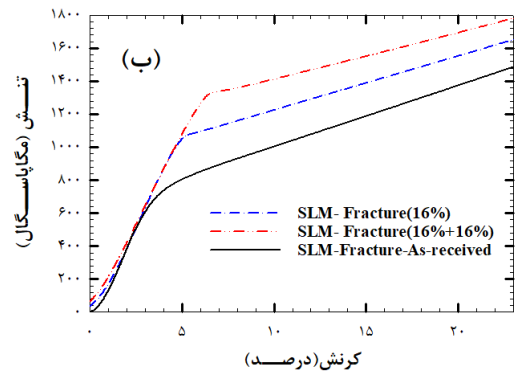
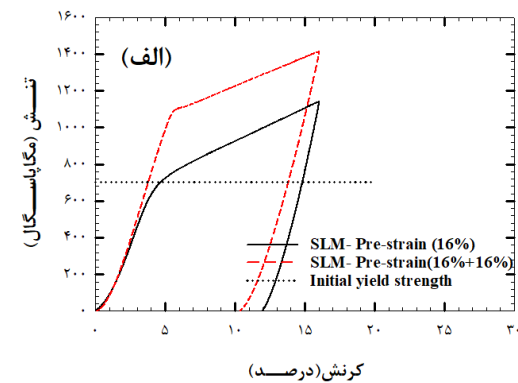
۴- نتایج حاصل از اعمال بارگذاری در دو مرحله نشان می دهد می توان با اعمال پیش کرنش کمتر در تعداد سیکل بیشتر استحکام تسلیم فشاری بیشتری نسبت به اعمال پیش کرنش بیشتر در یک سیکل دست یافت.

تاییدیه 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 هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.



شکل ۹) نمودار تجربی تنش - کرنش فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی، (الف) اعمال ۱۲ درصد بارگذاری در دو گروه تک مرحله ای و دو مرحله ای و (ب) تاثیر ۱۲ درصد بارگذاری بر استحکام فشاری و مقایسه با نمونه اولیه



شکل ۱۰) نمودار تجربی تنش - کرنش فشاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی، (الف) اعمال ۱۶ درصد بارگذاری در دو گروه تک مرحله ای و دو مرحله ای و (ب) تاثیر ۱۶ درصد بارگذاری بر استحکام فشاری و مقایسه با نمونه اولیه

- fabricated by laser powder bed fusion. *Advanced Engineering Materials*. 2024;2400524.
- 14 - Zhang H, Li C, Guo Q, Ma Z, Huang Y, Li H, Liu Y. Hot tensile behavior of cold-rolled Inconel 718 alloy at 650 C: The role of δ phase. *Materials Science and Engineering: A*. 2018 Apr 11;722:136-46.
- 15 - Zhang T, Li H, Gong H, Wu Y, Ahmad AS, Chen X. Effect of rolling force on tensile properties of additively manufactured Inconel 718 at ambient and elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021 Dec 5;884:161050.
- 16 - Zhu J, Yuan W. Effect of pre-stretching on residual stresses and microstructures of inconel 718 superalloy. *Metals*. 2021 Apr 9;11(4):614.
- 17 - Pruncu CI, Hopper C, Hooper PA, Tan Z, Zhu H, Lin J, Jiang J. Study of the effects of hot forging on the additively manufactured stainless steel preforms. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Sep 1;57:668-76.
- 18 - Peng J, Li K, Peng J, Pei J, Zhou C. The effect of pre-strain on tensile behaviour of 316L austenitic stainless steel. *Materials Science and Technology*. 2018 Mar;34(5):547-60.
- 19 - Yuan Z, Huo S. The Effect of the Pre-strain Process on the Mechanical Properties, Microstructure, Fatigue Life, and Fracture Mode of 304 Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023 May;32(10):4446-55.
- 20 - Klumpp A, Kauffmann A, Seils S, Dietrich S, Schulze V. Influence of cold rotary swaging on microstructure and uniaxial mechanical behavior in alloy 718. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2021 Oct;52(10):4331-4.
- 21 - Tucho WM, Sletsjøe AT, Sayyar N, Hansen V. Optimizing Tensile Properties and Hardness of Inconel 718 by Cold Rolling. *Metals*. 2024 Apr 12;14(4):455.
- 22 - Gu S, Cui Y, Kimura Y, Toku Y, Ju Y. Relief of strain hardening in deformed Inconel 718 by high-density pulsed electric current. *Journal of Materials Science*. 2021 Oct;56:16686-96.
- 23 - Karia MC, Popat 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.
- 24 - Balbaa M, Mekhiel S, Elbestawi M, McIsaac J. On selective laser melting of Inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses. *Materials & Design*. 2020 Aug 1;193:108818.
- 25 - Chen YT, Yeh AC, Li MY, Kuo SM. Effects of processing routes on room temperature tensile strength and elongation for Inconel 718. *Materials & Design*. 2017 Apr 5;119:235-43.
- 26 - 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.
- 27 - Zhao Z, Xu X, Wang Q, Bai P, Du W, Zhang L, Wang W. Microstructure and properties of periodic porous Inconel 718 alloy prepared by selective laser melting. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2021 Jun;4:332-8.
- 1 - Zhang S, Lin X, Wang L, Yu X, Hu Y, Yang H, Lei L, Huang W. Strengthening mechanisms in selective laser-melted Inconel718 superalloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2021 Apr 22;812:141145.
- 2 - Tekoğlu E, O'Brien AD, Liu J, Wang B, Kavak S, Zhang Y, Kim SY, Wang S, Ağaoğulları D, Chen W, Hart AJ. Strengthening additively manufactured Inconel 718 through in-situ formation of nanocarbides and silicides. *Additive Manufacturing*. 2023 Apr 5;67:103478.
- 3 - Hosseini E, Popovich VA. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. *Additive Manufacturing*. 2019 Dec 1;30:100877.
- 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 - Brenne F, Taube A, Pröbstle M, Neumeier S, Schwarze D, Schaper M, Niendorf T. Microstructural design of Ni-base alloys for high-temperature applications: impact of heat treatment on microstructure and mechanical properties after selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*. 2016 Dec;1:141-51.
- 7 - Du D, Dong A, Shu D, Zhu G, Sun B, Li X, Lavernia E. Influence of build orientation on microstructure, mechanical and corrosion behavior of Inconel 718 processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*. 2019 Jul 8;760:469-80.
- 8 - Anderson M, Thielin AL, Bridier F, Bocher P, Savoie J. δ Phase precipitation in Inconel 718 and associated mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2017 Jan 2;679:48-55.
- 9 - Gao Y, Zhang D, Cao M, Chen R, Feng Z, Poprawe R, Schleifenbaum JH, Ziegler S. Effect of δ phase on high temperature mechanical performances of Inconel 718 fabricated with SLM process. *Materials Science and Engineering: A*. 2019 Nov 8;767:138327.
- 10 - Sun W, Tan AW, Bhowmik A, Marinescu I, Song X, Zhai W, Li F, Liu E. Deposition characteristics of cold sprayed Inconel 718 particles on Inconel 718 substrates with different surface conditions. *Materials Science and Engineering: A*. 2018 Mar 21;720:75-84.
- 11 - Ran R, Wang Y, Zhang YX, Fang F, Wang HS, Yuan G, Wang GD. Microstructure, precipitates and mechanical properties of Inconel 718 alloy produced by two-stage cold rolling method. *Materials Science and Engineering: A*. 2020 Aug 19;793:139860.
- 12 - Yang X, Wang B, Jiang W, Chen SN, Wang J. The superplasticity improvement of Inconel 718 through grain refinement by large reduction cold rolling and two-stage annealing. *Materials Science and Engineering: A*. 2021 Aug 17;823:141713.
- 13 - Al-Lami J, Dessolier T, Rogers SR, Pirzada T, Pham MS. Dislocation distribution, crystallographic texture evolution, and plastic inhomogeneity of Inconel 718