



Thermal Analysis and Microstructural Changes in Plasma Welding Process Inconel718 Fabricated by Selective Laser Melting

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Nakhodchi S.^{1*},
Shakarami K.¹,
Salmasi H.¹,

How to cite this article

Nakhodchi S, Shakarami K, Salmasi H, Thermal analysis and microstructural changes in plasma welding process inconel718 fabricated by selective laser melting. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(02):77-86.

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 16, 2023
Accepted: April 30, 2024
ePublished: June 9, 2024

ABSTRACT

Inconel 718 is used in a wide range of industries such as oil and gas, nuclear, aviation, and etc. due to its excellent mechanical properties. The use of additive manufacturing (AM) to manufacture parts is increasing rapidly. Due to the dimensional limitations in the manufacturing of parts using the additive manufacturing methods, these parts must be connected to other parts in different applications with the help of conventional methods such as welding. In this research, the thermal analysis of plasma welding of an Inconel 718 sheet made by SLM method using ABAQUS software is discussed. Input heat with Gaussian distribution was entered into the model by DFLUX subprogram with FORTRAN program language. In order to validate the thermal model, the temperature was measured during the welding process using a thermocouple. A relatively good match is observed between the numerical and experimental thermal analysis results. The microstructure of the welded samples was examined with an optical microscope and the microstructure of base metal, fusion zone, and heat affected zone were investigated. The dendritic structure in the welding area and the occurrence of recrystallization in the heat-affected area was evident. The tensile test results showed that the sample without welding has a higher yield and ductility.

Keywords Additive Manufacturing (AM), Inconel718, Plasma Welding, Selective Laser Melting (SLM), Thermal Analysis.

CITATION LINKS

1- Additive manufacturing with welding. 2- Review of selective laser melting: Materials and applications. 3- Nickel, cobalt, and their alloys. 4- Modelled and measured residual stresses in a bimaterial joint. 5- A comparative analysis of Inconel 718 made by additive manufacturing and 6- Laser welding of a selective laser melted Ni-base superalloy: microstructure and 7- Study on the microstructure and fatigue behavior of a 8- Laser Welding of L-PBF AM components out of inconel 718. 9- Laser welding of SLM-manufactured tubes made of IN625 and IN718. 10- Laser welding of laser powder bed fusion manufactured inconel 718 11- Grain size and misorientation evolution in linear friction welding of 12- 3D finite element modeling of the welding process using 13- Comparative evaluation of thermal and mechanical properties of nickel alloy 718 prepared using 14- Numerical and experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of 15- Densification and microstructural investigation of Inconel 718 16- Effect of welding thermal treatment on the microstructure and 17- Influence of heat treatments on heat affected zone cracking of 18- Optimization of weldment in bead on plate welding of nickel based superalloy using 19- The influence of Laves phases on the high-cycle fatigue behavior of 20- Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by 21- Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during 22- Microstructural characteristics and tensile properties of 23- Physical metallurgy of alloy 718. 24- High temperature behavior of Ni-base weld metal 25- An overview on welding of Inconel 718 alloy-Effect of welding processes on 26- Combined butt joint welding and post weld heat treatment 27- Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718. 28- Influence of magnetic arc oscillation and 29- Effect of enhanced cooling on microstructure evolution of 30- Effect of Mo-rich fillers in pulsed current gas tungsten arc welding of 31- Laves phase control in Inconel 718 weldments. 32- Simultaneously enhanced strength and ductility of TiG welds in Inconel 718 super-alloy via ultrasonic pulse current.

تحلیل حرارتی و تغییرات ریزساختار در فرآیند جوش پلازما اینکونل ۷۱۸ ساخته شده توسط ذوب لیزری انتخابی

سهیل نخودچی^{۱*}، کیومرث شاکرمی^۱، هادی سلماسی^۱

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

چکیده

اینکونل ۷۱۸ به دلیل خواص مکانیکی فوق العاده در طیف گسترده‌ای از صنایع نفت و گاز، هسته‌ای، هوایی و ... استفاده می‌شود. استفاده از روش ساخت افزایشی جهت تولید قطعات با سرعت در حال افزایش می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های ابعادی که در ساخت قطعات به روش ساخت افزایشی وجود دارد این قطعات در کاربردهای متفاوت باید به سایر قطعات به کمک روش‌های مرسوم اتصال‌دهی مانند جوشکاری متصل شوند. در این تحقیق به تحلیل حرارتی جوشکاری پلازما یک ورق اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزری انتخابی با استفاده از نرم افزار آباکوس پرداخته می‌شود. حرارت ورودی با توزیع گوسی توسط زیر برنامه دیفلکس با زبان برنامه نویسی فرترن به مدل وارد گردید. جهت اعتبار سنجی مدل حرارتی، اندازه‌گیری دما حین انجام فرآیند جوشکاری با استفاده از ترموکوپل انجام گرفت و تطابق نسبتاً مناسبی بین نتایج آنالیز حرارتی عددی و تجربی مشاهده شد. بررسی‌های میکروساختار توسط میکروسکوپ نوری بر روی نمونه‌های جوشکاری شده صورت گرفت و ریزساختار فلز پایه، ذوب و منطقه متأثر از حرارت مورد بررسی قرار گرفت. ساختار دندریتی در ناحیه جوش و رخ دادن تبلور مجدد در ناحیه متأثر از حرارت مشهود بود. نتایج آزمون کشش نشان داد که نمونه بدون جوش دارای حد تسلیم و شکل-پذیری بالاتری است.

کلیدواژه‌ها: اینکونل ۷۱۸، تحلیل حرارتی، جوش پلازما، ساخت افزایشی، ذوب لیزری انتخابی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

*نویسنده مسئول: snakhodchi@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

ساخت افزایشی از فرآیندهای تولید نوین است که از آن در "نمونه-سازی سریع" قطعات استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه روش ساخت افزایشی انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به سایر روش‌های تولید دارد عموماً می‌تواند باعث کاهش وزن قطعه و تسهیل در تولید را به همراه داشته باشد^[1]. ذوب لیزری انتخابی یک روش متداول برای تولید مواد فلزی است. اصل اساسی در این روش، شکل دادن به لایه نازک پودری با اسکن لیزری است. قدرت لیزر و سرعت اسکن، پارامترهای مهم برای داشتن خواص بهینه قطعه مانند تخلخل کم، استحکام بالا، سختی و خواص مکانیکی خوب می‌باشند^[2].

اینکونل ۷۱۸ (Inconel 718) یک آلیاژ پایه نیکل، سختی شده رسوبی و اصلاح‌شده با نیوبیم (Nb) است. این آلیاژ برای استحکام، مقاومت در برابر خزش و عمر خستگی خوب در دماهای بالا تا ۷۰۰

درجه سانتیگراد طراحی شده است و جوش‌پذیری خوبی دارد^[3]. یکی از موانع برای تجاری کردن ساخت افزایشی، اندازه قطعات ساخته شده با این روش می‌باشد. محدودیت در اندازه و همچنین هزینه بالای ساخت در روش‌های ساخت افزایشی، نیاز به اتصال قطعات تولید شده با این روش توسط روش‌های ساخت سنتی همچون جوشکاری را ضروری می‌کند. قطعات ساخت افزایشی دارای ساختار و خواص مکانیکی متفاوتی نسبت به قطعات سنتی هستند و همچنین اطلاعات محدودی در ارتباط با جوشکاری اینگونه قطعات موجود است^[4]. همانگونه که ژاو و همکاران^[5] اشاره کرده‌اند، میکروساختار اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزری انتخابی با حالت ریخته‌گری آن کاملاً متفاوت است. میکروساختار اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزری انتخابی از دانه‌های ستونی که در امتداد جهت ساخت کشیده شده‌اند تشکیل شده است و مقدار نیوبیوم رسوبی در آن پایین است. در حالی که ساختار دانه‌ها در اینکونل ۷۱۸ ریخته‌گری شده به صورت هم محور بوده و سطح نیوبیوم رسوبی بالا می‌باشد. بنابراین، فرآیند جوشکاری تأثیر متفاوتی بر روی هریک از این میکروساختار خواهد داشت. خیاون و همکاران^[6] بر روی استحکام و میکروساختار ناحیه جوش اینکونل ۶۲۵ ساخته شده به روش ذوب لیزری انتخابی در دمای بالا تحقیق کردند. یافته‌های آنها نشان داد که استحکام ناحیه جوش بالاتر از فلز پایه بوده که ناشی از ساختار دانه ستونی در ناحیه جوش بود. در تحقیقی مشابه توسط ژانگ و همکاران^[7]، خواص خزشی و خستگی جوش اینکونل ۶۲۵ ساخته شده به روش ذوب لیزری انتخابی بالاتر از نمونه بدون جوش بود و این بخاطر دندریت‌های ستونی ناحیه جوش می‌باشد. طبق مقاله^[8] جوکیشا^[9] و راتیو^[10] اولین تحقیقات در ارتباط با جوشکاری لیزر قطعات اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب بستر پودری انجام دادند. نتایج تحقیق راتیو و همکاران نشان داد که عملیات حرارتی قبل و بعد از جوشکاری مانع شکل‌گیری ترک انجمادی می‌شود. مطالعه جوکیشا بر روی جوش لیزر دو قطعه استوانه‌ای اینکونل ۷۱۸ و اینکونل ۶۲۵ بود و به بررسی تنش پسماند و عیوب جوش پرداخت. نتیجه این تحقیق تأکید بر کاهش تنش پسماند حاصل از جوشکاری با استفاده از عملیات آنیل قطعات قبل از جوشکاری و همچنین آماده‌سازی لبه قطعات در محل جوشکاری بود. طبایی و همکارانش^[11] به منظور ارزیابی و ساخت پره‌های توربین، سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی را با استفاده از جوشکاری اصطکاکی خطی به سوپر آلیاژ پایه نیکل AD730 جوش زدند. همچنین میکروساختار از دو جنبه اندازه دانه‌ها و تغییرات زاویه انحراف مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعاتی در ارتباط با جوشکاری پلاسمای اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب بستر پودری وجود ندارد. تأثیر سیکل حرارتی این نوع جوشکاری بر ریزساختار اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب بستر پودری حایز اهمیت می‌باشد.

عناصر	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Co	Mn	Si	Al	C	N	P	S	B	Fe	Cu
درصد	۵۵	۲۱	۵/۳	۳/۳	۱/۱۵	۱	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۲	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	Bal.	-

جدول ۲) پارامترهای جوشکاری و مقدار آن‌ها

پارامتر	آمپر (A)	ولتاژ (V)	سرعت خطی حرکت نازل (mm/s)	دبی گاز محافظ (L/min)
مقدار	۵۰	۲۲/۳	۲/۵	۱۰

با استفاده از دستگاه جوش پلازما در راستای طول و در وسط ورق اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزری انتخابی یک پاس جوش خطی انجام شد. جوشکاری با استفاده از دستگاه جوش سی ان سی (CNC) دو محوره به صورت اتوماتیک و بدون فلز پرکننده انجام شد (شکل ۱). از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه به عنوان گاز محافظ استفاده شد. به منظور دستیابی به کیفیت جوش بالا با حداقل عیب، مجموعه‌ای از پارامترهای جوشکاری مطابق جدول ۲ بهینه شده است.

۲-۲- اندازه‌گیری حرارت در حین فرآیند جوشکاری

جهت به دست آوردن تاریخچه دمایی قطعه و نیز اعتبار سنجی مدل حرارتی، نیاز به اندازه‌گیری دما حین انجام فرآیند جوشکاری می‌باشد. ترموکوپل‌های نوع S برای اندازه‌گیری دما استفاده شده است. این ترموکوپل‌ها توانایی اندازه‌گیری دما تا ۱۸۰۰ سانتی‌گراد را دارا هستند. بعد از اتصال، جهت گزارش و ثبت تاریخچه دمایی نیاز به یک دستگاه رایانه و یک دستگاه ثبت کننده‌ای داده‌ها برای برقراری ارتباط بین رایانه و ترموکوپل می‌باشد. با شروع فرآیند جوشکاری تغییرات دما نسبت به زمان برای هر نقطه‌ای که ترموکوپل در آن قرار دارد، ثبت می‌شود.

۲-۳- بررسی ریزساختار قبل و بعد از جوشکاری

بررسی‌های میکروساختار توسط میکروسکوپ نوری بر روی نمونه‌های جوشکاری شده انجام گرفت و ریزساختار فلز پایه، جوش و منطقه متأثر از حرارت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های متالوگرافی، که از برش عرضی منطقه جوش با دستگاه وایرکات بدست آمده بودند، ابتدا آماده‌سازی شدند که شامل سنباده‌زنی و پولیش با سوسپانسیون آلومینا ۵ میکرون و سپس الکترو اچ کردن توسط محلول حاوی تری اکسید کروم و اسید فسفریک می‌باشد. بعد از آماده‌سازی، این نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری عکسبرداری شدند.

در این تحقیق فرآیند جوشکاری پلاسمای اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزری انتخابی به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. تحلیل اجزا محدود حرارتی جوشکاری پلازما نمونه اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزری انتخابی، با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شده است. جهت اعتبار سنجی مدل حرارتی، اندازه‌گیری دما حین انجام فرآیند جوشکاری از ترموکوپل‌های نوع S استفاده شد. بررسی‌های میکروساختار توسط میکروسکوپ نوری بر روی نمونه‌های جوشکاری شده انجام گرفت و ریزساختار فلز پایه، ذوب و منطقه متأثر از حرارت مورد بررسی قرار گرفت.

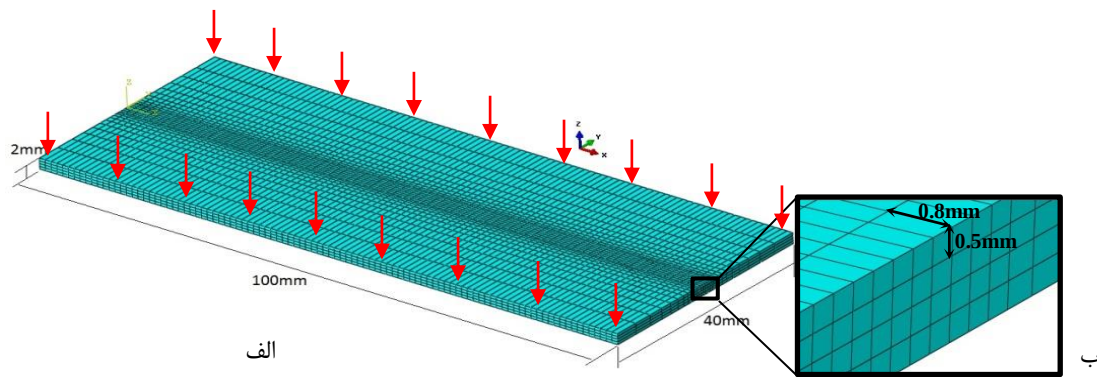
۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- آماده‌سازی و ساخت نمونه‌ها و انجام فرآیند جوشکاری

ساخت ورقی به ابعاد ۴۰*۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر توسط دستگاه ذوب بستر پودر با لیزر توسط شرکت نورا انجام گرفت. پودر فلزی مورد استفاده در این دستگاه بصورت از پیش آلیاژ شده توسط فرآیند اتمیزاسیون گازی تولید شده است. برای بهبود کیفیت لایه‌های رسوب شده و کاهش ترک‌ها یا سوراخ‌ها از استراتژی اسکن دو طرفه (یعنی جهت رسوب لایه دوم با ۹۰ درجه چرخش نسبت به لایه قبلی) استفاده شده است. با توجه به چگالی بالای ۹۹ درصد و تخلخل بسیار پایین، نشان دهنده کیفیت بالای نمونه‌ها است. ترکیب آلیاژهای پودر اینکونل ۷۱۸ در جدول ۱ فهرست آمده است.



شکل ۱) نمایی از جوشکاری قطعه با استفاده از دستگاه جوش قوس پلازما و قید و بندهای استفاده شده



شکل ۲) مش بندی اجزاء محدود مورد استفاده در تحلیل اجزا محدود (الف) نمای کلی (ب) جزئیات هر المان

۴-۲- استحکام کششی

به منظور ارزیابی خواص کششی، نمونه‌هایی از فلزات پایه و جوش بر اساس استاندارد ASME SS-J3 تهیه شد. نمونه‌ها به گونه‌ای طراحی و ساخته شدند که منطقه تحت کشش شامل هر دو فلز جوش و فلز پایه باشد و فلز جوش در مرکز نمونه قرار دارد. در این حالت علاوه بر فلز جوش، مناطق متأثر از حرارت و فلزات پایه نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. تست کشش در دمای اتاق توسط دستگاه کشش مدل Zwick/Roell انجام شد.

۳- تحلیل عددی

۱-۳- هندسه مدل اجزا محدود و مش‌بندی

شبیه‌سازی المان محدود انجام شده در این تحقیق به کمک نرم افزار آباکوس صورت گرفت. مش‌بندی المان مورد استفاده در این مدل DC3D8 می‌باشد. شکل ۲ مش طراحی شده را نشان می‌دهد. در مجاورت خط جوش، اندازه المان‌ها ریزتر در نظر گرفته شد تا به طور دقیق فرآیند گرمایش و شیب‌های درجه حرارت نزدیک به منبع حرارتی شبیه‌سازی شود. تعداد المان‌ها ۱۴۴۰۰ است که با در نظر گرفتن پیشینه دمای مربوط به نقاط روی نمونه به عنوان شاخص سنجش همگرایی جواب، این تعداد المان با اختلاف حدود ۲ درصد با تعداد المان بیشتر، پاسخ قابل قبولی را ارائه می‌دهد. دمای محیط و دمای اولیه صفحات هر دو روی ۳۰ درجه سانتیگراد تنظیم شد. ضرایب همرفت و انتشار به ترتیب برابر با ۲۰ وات بر متر مربع و ۰/۸ تعیین شد. در حالت تجربی لبه‌های ورق توسط گیره ثابت شده بودند. جهت برقراری این شرایط مرزی، لبه‌های ورق در راستای عمود بر سطح ورق ثابت در نظر گرفته شد (شکل ۲).

جدول ۳) خواص حرارتی اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی [13]

خواص حرارتی	ضریب هدایت حرارتی	گرمای ویژه	چگالی	میزان تشعشع
	(W/m. °C)	(J/kg °C)	(kg/m³)	
مقدار	۹/۱	۴۳۵	۸۲۳۰	۰/۸

۲-۳- تحلیل حرارتی و سازه‌ای

منبع حرارت دوبعدی گاوسی [12] برای ایجاد میدان حرارتی ناشی از فرآیند جوشکاری به کار گرفته شد (رابطه ۱) که در آن Q_p ، η و r به ترتیب توان ورودی، بازده حرارتی و فاصله از مرکز دیسک هستند. توان ورودی Q_p که مربوط به جریان جوشکاری I و ولتاژ V است و در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$q(r) = \frac{\eta Q_p}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

$$Q_p = I \cdot V \quad (2)$$

منبع حرارتی دایروی با سرعت جوشکاری v حرکت می‌کند به صورتی که دایره در صفحه $x-y$ در زمان t با رابطه (۳) تعیین می‌گردد:

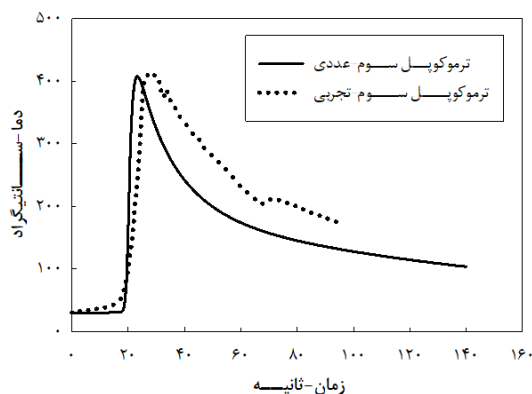
$$y^2 + (x - vt)^2 = r^2 \quad (3)$$

در این تحلیل از خواص حرارتی مستقل از دما استفاده شده است. خواص حرارتی شامل ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه، چگالی و میزان تشعشع می‌باشند که در جدول ۳ ارائه شده است.

۴- نتایج

۱-۴- تحلیل حرارتی فرآیند جوشکاری

جهت ثبت تاریخچه دمایی و همچنین صحت‌سنجی مدل حرارتی، ترموکوپل‌ها در سه نقطه در امتداد خط جوش نصب شدند. ترموکوپل یک به فاصله یک میلی‌متر از لبه جوش به منظور ثبت حداکثر دمای تجربه شده نزدیک به ناحیه جوش، نصب شد. ترموکوپل دوم به فاصله ۳ میلی‌متر در راستای عرضی و طولی نسبت به ترموکوپل اول قرار گرفت و ترموکوپل سوم نسبت به ترموکوپل دوم همین مختصات را دارد. در مدل اجزاء محدود نیز در همان محل ترموکوپل‌ها تاریخچه‌ی دمایی محاسبه شده است. محل قرارگیری ترموکوپل‌ها مطابق تحقیق [14] بوده و صرفاً جهت مقایسه تاریخچه‌ی دمایی به دست آمده از اندازه‌گیری تجربی و حل عددی می‌باشد. شکل کلی نمودارها به اینصورت می‌باشد که دارای یک ناحیه صعود، نقطه پیک و نزول است. شکل‌های ۳ تا



شکل ۵) مقایسه توزیع دما در محل ترموکوپل سوم

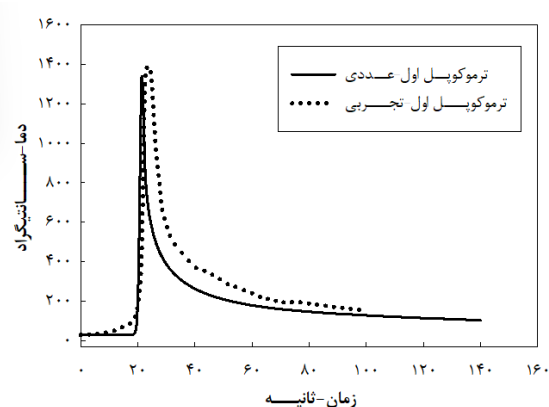
۲-۴- ریزساختار جوش

ناحیه جوش متشکل از سه ناحیه ذوب، منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه است. اگر بخواهیم دید کلی به این سه ناحیه داشته باشیم می‌توان گفت که در فلز پایه دانه‌های ستونی شکل کوتاه در جهت ساخت مشهود هستند. ناحیه متأثر از حرارت دارای دانه‌های ریز است و ناحیه ذوب متشکل از دانه‌های فرعی با مرز دانه زاویه بزرگ و دانه‌های فرعی انجماد با مرز دانه زاویه کم است. شکل ۶ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی فلز پایه را نشان می‌دهد. چنین ساختاری حاصل ذوب چند پاسی لیزر و همپوشانی در سطح افقی و عمودی می‌باشد. تداخل افقی معمولاً با درصد همپوشانی پرتو لیزر در صفحه x-y توصیف می‌شوند. در حالی که همپوشانی عمودی با ضخامت لایه و زاویه اسکن توصیف می‌شود. تداخل لیزر در راستای افقی و عمودی، دلیل اصلی تغییر نرخ خنک‌کننده بین لایه‌های چاپی اولیه و نهایی است [15]. مشاهده می‌شود که یک سری از دانه‌های ستونی در امتداد جهت ساخت رشد کرده و بزرگترین آنها می‌تواند تقریباً ۳۵۰ میکرومتر طول داشته باشد. چنین ساختار دانه‌ای بر اساس این واقعیت است که یک حداکثر گرادیان حرارتی از حوضچه‌های مذاب لیزری موضعی به سمت بستر، منجر به یک فرآیند رشد هم محور در طول انجماد سریع می‌شود [16].

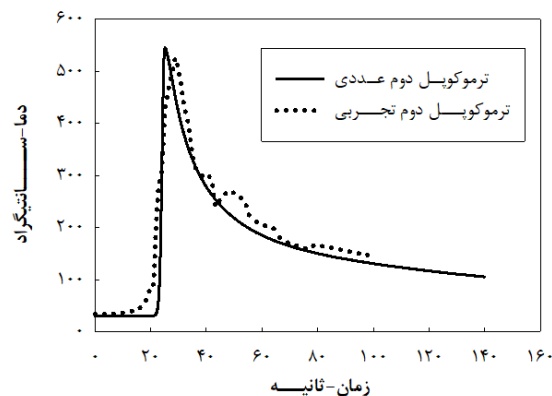
چرخه حرارتی تحمیل شده بر ناحیه متأثر از حرارت تا حد زیادی بر درجه انحلال ساختاری، انحلال رسوب، و جداسازی مرز دانه‌ای که می‌تواند رخ دهد، تأثیر می‌گذارد [17]. ضعیف‌ترین ناحیه جوشکاری در سوپرآلیاژ مبتنی بر نیکل منطقه متأثر از حرارت است که مستعد شکست است. این پدیده ناشی از تشکیل و انتشار ترک‌های مایع است که این ترک‌ها خود حاصل برهم‌کنش تنش‌های پسماند کششی و لایه مایع می‌باشند [18]. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ترک‌های مایع در ناحیه متأثر از حرارت تمایل به گسترش در امتداد مرز دانه‌ها دارند که این بخاطر ذوب شدن ذرات رسوبی مانند گاما پرایم و کاربیدها می‌باشد [19]. لذا توجه و بررسی این ناحیه از

۵ مقایسه توزیع دما در محل ترموکوپل‌های ۱، ۲ و ۳ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که در ترموکوپل اول که نزدیک به خط جوش می‌باشد دما تا حدود ۱۳۷۰ درجه سانتی‌گراد بالا می‌رود ولی در ترموکوپل دوم و سوم که دورتر از ناحیه جوش می‌باشند بیشینه دما به ترتیب ۵۲۰ و ۴۱۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در مدل اجزا محدود نیز در همان محل تاریخچه دمایی محاسبه شده است. همانند حالت تجربی، نقطه نزدیک به خط جوش بیشترین دما را تجربه می‌کند و دارای بیشینه دمایی ۱۳۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نقاط دوم و سوم به ترتیب دارای بیشینه دمایی ۵۴۵ و ۴۰۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشند.

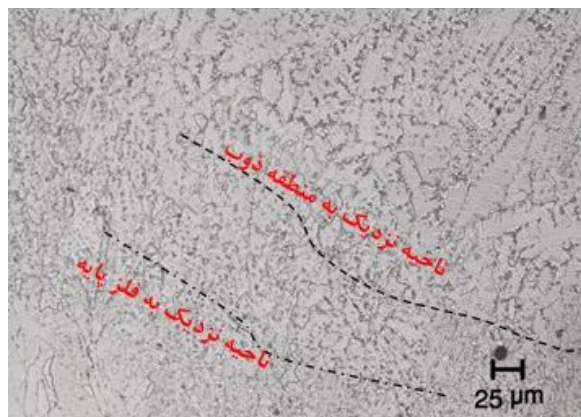
تطابق نسبتاً مناسبی بین نتایج آنالیز حرارتی عددی و تجربی مشاهده می‌شود. خطای مشاهده شده در نمودارهای دمایی می‌تواند ناشی از نحوه‌ی مدل‌سازی منبع دمایی و شرایط انتقال حرارت با محیط اطراف باشد. درصد خطای بیشینه دما در محل ترموکوپل‌ها برای حالت عددی و تجربی در محل ترموکوپل اول ۲/۱ درصد، در محل ترموکوپل دوم ۴/۸ درصد و در محل ترموکوپل سوم ۱۳ درصد بود. خطای بالا در محل ترموکوپل سوم می‌تواند به علت درشت بودن المان‌ها در نواحی دور از ناحیه جوش باشد.



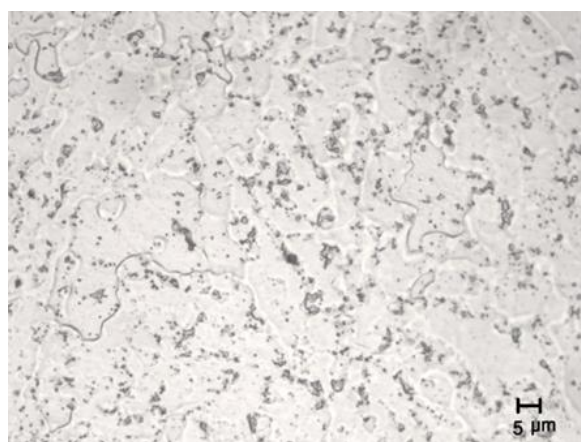
شکل ۳) مقایسه توزیع دما در محل ترموکوپل اول



شکل ۴) مقایسه توزیع دما در محل ترموکوپل دوم



شکل ۷) تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه متأثر از حرارت



شکل ۸) تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه متأثر از حرارت و توزیع گسترده از ذرات کاربیدی در ماتریس آستینیت

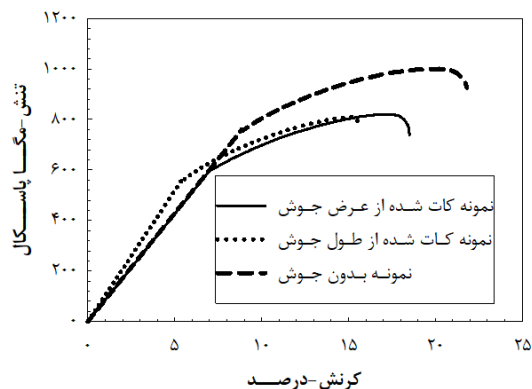
ساختاری هستند که می‌توان با میکروسکوپ نوری مشاهده کرد. این دانه‌های فرعی معمولاً به صورت سلول‌ها یا دندریت‌ها موجود هستند و مرزی که دانه‌های فرعی مجاور را از هم جدا می‌کند به عنوان مرز دانه فرعی انجماد شناخته شده است. این مرزها از نظر کریستالوگرافی به عنوان مرز دانه‌های با زاویه کم شناخته شده‌اند. از تلاقی بسته‌ها یا گروه‌های دانه‌های فرعی، مرز دانه انجماد تشکیل می‌شود. این مرزها معمولاً مرز دانه‌های با زاویه بزرگ نامیده می‌شوند (شکل ۹) [22]. فاز لایه یک ترکیب بین فلزی سخت و شکننده است که با فرمول عمومی A_2B نشان داده می‌شود که در آن A بیان‌کننده عناصر نیکل، کروم و آهن است و B نشان‌دهنده عناصر نیوبیم، مولیبدن، تیتانیوم و سیلیسیم می‌باشد. اتم‌های آهن، نیکل و کروم اتم‌های کوچکی هستند و پیوند مناسب در جهت مشخص با اتم‌های بزرگ نیوبیم و تیتانیوم ممکن می‌سازند. این منجر به ساختار شبکه ای پیچیده‌ای می‌شود که از لایه‌های از اتم‌ها با فاصله بین صفحه‌ای بزرگ تشکیل شده است. فاز لایه فاقد تغییر شکل پلاستیک است و باعث شروع و رشد سریع ترک می‌شود [23].



شکل ۹) تصویر میکروسکوپ نوری فلز پایه اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی

اهمیت بالایی برخوردار است. در ناحیه متأثر از حرارت که نزدیک به فلز پایه است مرز لایه‌ها تار شده‌اند و حتی در مناطق نزدیک به مرکز به طور کامل ناپدید شده‌اند (شکل ۷). قسمت مرکزی این ناحیه یک ریزساختار کاملاً متفاوت را نشان می‌دهد، که در آن مقدار زیادی دانه‌های تبلور مجدد هم محور با اندازه‌های غیریکنواخت ظاهر می‌شوند. مرز ناحیه ذوب و ناحیه متأثر از حرارت هم دارای دانه‌های ریزی است که نشانه تشکیل و رشد دانه‌های تبلور مجدد می‌باشد. اندازه این دانه‌های تبلور مجدد از قسمت مرکزی ناحیه متأثر از حرارت درشت‌تر می‌باشند که این بخاطر حرارت بیشتر و در نتیجه رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته در این قسمت بوده است. قابل توجه است که بیشتر آلیاژها به صورت آنیل انحلالی شده عرضه می‌شوند و تبلور مجدد در این آلیاژها رخ نمی‌دهد. اما در حالتی که به وسیله کار سرد استحکام یافته‌اند یا حاوی مقداری کار گرم از فرآیندهای قبلی هستند و همچنین در قطعات ساخت افزایشی به روش ذوب لیزر انتخابی امکان تبلور مجدد در جوشکاری آنها وجود دارد [20]. در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر (شکل ۸) از ناحیه متأثر از حرارت توزیع گسترده از ذرات کاربیدی در ماتریس آستینیت قابل مشاهده است که این به معنای کاهش عناصر محلول جامد در این ناحیه می‌باشد. دیگر فازهای بین فلزی همچون گاما دوپرایم، دلتا و لایه قابل مشاهده نیست. به طور کلی بیشتر اتم‌های محلول مانند مولیبدن، کروم و نیوبیم در طول فرآیند ذوب لیزر انتخابی بخاطر بالا بودن نرخ خنک‌کنندگی فرآیند، فرصت نفوذ ندارند و به آسانی در ماتریس آستینیت به دام می‌افتند [21].

آلیاژهای پایه نیکل به صورت آستینیتی منجمد می‌شوند. خوشبختانه به دلیل آنکه ساختار انجمادی آستینیتی پس از پولیش و اچ کردن به وضوح آشکار می‌گردد، مرزها به خوبی در ناحیه جوش قابل مشاهده است. دانه‌های فرعی انجماد ظرف‌ترین



شکل ۱۰) نمودار تنش-کرنش نمونه جوشکاری نشده، نمونه تهیه شده از عرض جوش و نمونه تهیه شده از طول جوش

جدول ۴) استحکام نهایی کشش و تنش تسلیم در ۰/۲ درصد کرنش

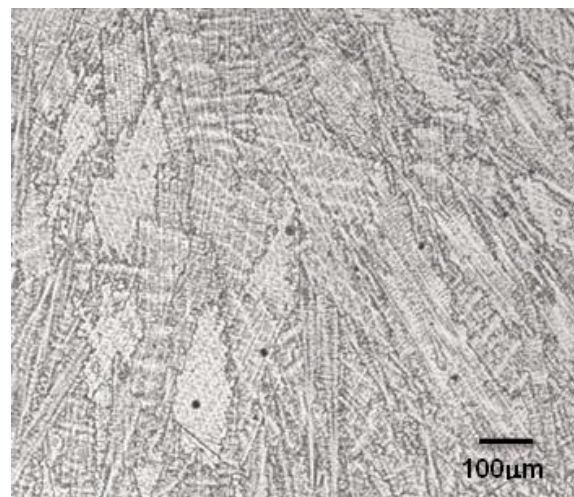
نمونه	استحکام نهایی کشش (N/mm^2)	تنش تسلیم در ۰/۲ درصد کرنش (N/mm^2)
نمونه بدون جوش	۱۰۰۰	۸۹۷
نمونه کات شده در راستای عرضی جوش	۸۹۱	۶۰۲/۱۱
نمونه کات شده در راستای طولی جوش	۸۷۰	۷۴۵

ویژگی‌های ریزساختاری ناحیه جوش وابسته است. این کاهش استحکام نشان دهنده گسترش فاز لاهه در ناحیه جوش است که استحکام چسبندگی را در بین دانه‌های دندریتی کاهش داده و عملکرد کششی اتصالات اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی را کاهش می‌دهد [25].

۵- بحث

متالورژی فیزیکی آلیاژهای استحکام یافته رسوبی مانند اینکونل ۷۱۸ کاملاً پیچیده است زیرا این آلیاژها شامل مخلوطی از افزودنی‌ها برای تشکیل رسوب، مقاومت به اکسیداسیون، مقاومت به خوردگی داغ و خواص خزشی هستند. بدون تعجب متالورژی جوشکاری این آلیاژها به همین میزان پیچیده است، زیرا جدایش این عناصر حین انجماد منطقه ذوب می‌تواند منجر به تشکیل ترکیبات نوع یوتکتیکی و فازهای ثانویه گردد که در حالت معمول در فلز پایه مشاهده نمی‌شوند. در ناحیه متأثر از حرارت، جدایش عناصر آلیاژی در مرز دانه‌ها می‌تواند ذوبی شدن یا تشکیل رسوب را باعث شود که اثر منفی بر جوش‌پذیری و خواص مکانیکی سازه‌های جوشکاری شده دارد.

روش آلمان محدود که براساس تکنیک‌های عددی می‌باشد، در سال‌های اخیر به عنوان یک روش مطلوب برای پیش‌بینی پروفیل دما، هندسه جوش، محاسبه تنش پسماند و اعوجاج مد نظر قرار



شکل ۹) تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه جوش جهت نمایش مرز دانه‌های انجماد

جوش‌پذیری، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی به‌طور کلی به‌وسیله رفتار انجمادی و ریزساختار منطقه ذوب کنترل می‌شود. مشخصه‌های ریزساختاری اصلی شامل توزیع عناصر آلیاژی در امتداد دانه‌های فرعی انجماد یا دندریتی می‌باشند که حین انجماد در منطقه ذوب به‌وسیله توزیع مجدد اجزای حل شده کنترل می‌شود. فازهای لاهه و کاربید در فاصله و مرز بین دندریتی مشاهده می‌شود [24].

۴-۳- استحکام کششی

به منظور مقایسه خواص کششی نمونه‌های بدون جوش و جوشکاری شده اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی، تست کشش برای نمونه‌های بدون جوش و نمونه‌های جوشکاری شده انجام گرفت. این نمونه‌ها از صفحه جوشکاری شده و صفحه بدون جوش توسط دستگاه وایرکات بریده شدند. نمونه‌های جوشکاری شده جهت انجام تست کشش، در دو راستای عرضی و طولی در جهت جوش انتخاب شدند. نمونه کات شده در راستای عرضی به‌منظور مقایسه خواص کششی آن با نمونه بدون جوش می‌باشد و نمونه کات شده در راستای طولی جوش جهت بررسی استحکام ناحیه جوش مورد تست قرار گرفت. نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد که نمونه بدون جوش دارای حد تسلیم و شکل‌پذیری بالاتری است. نتایج آزمون کشش در شکل ۱۰ برای سه نمونه در نمودار تنش-کرنش نمایش داده شده است. نمودار تنش-کرنش نشان می‌دهد که نمونه بدون جوش دارای حد تسلیم و شکل‌پذیری بالاتری است. جدول ۴ استحکام نهایی و تسلیم در ۰/۲ درصد کرنش را نشان می‌دهد. خواص کششی اتصال جوش در تمام مطالعات کمتر از فلز پایه است. این بیانگر این است که فلز پایه قوی‌تر از ناحیه جوش است و خواص کششی جوش به

گرفته است. گرچه این روش‌ها بدلیل مغایرت‌های جزئی در تعریف پارامترهای جنس و شرایط جوشکاری، نتایج را به همراه خطاهای جزئی ارائه می‌دهند، لیکن استفاده از این روش‌ها با توجه به هزینه‌بر و زمان‌بر بودن آزمایشات تجربی، در حال حاضر امری ضروری به شمار می‌رود.

در حین فرآیند جوشکاری ذوبی، منابع حرارتی با تراکم بالا، مانند لیزر و پلاسما، گرادیان‌های حرارتی تیزی را ایجاد می‌کنند که به سرعت ماده را نسبت به دمای ذوب آن گرم و سرد می‌کنند. سیکل حرارتی سریع، انتقال فازهای متعدد و تغییرات میکروساختاری ایجاد شده، علاوه بر تاثیر روی سختی و مقاومت تسلیم سازه جوشی، می‌تواند بر تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری و عملکرد نهایی سازه جوشکاری شده، مثل مقاومت خستگی نیز اثر بگذارد. شکل‌های ۳ تا ۵ تاریخچه دمای در محل ترموکوپل‌ها در آزمایش تجربی و عددی را نشان می‌دهند و همانگونه که در بالا ذکر شد، تطابق نسبتاً مناسبی بین نتایج آنالیز حرارتی عددی و تجربی مشاهده می‌شود. در محل ترموکوپل اول در دو حالت تجربی و عددی دما به سرعت و در مدت زمان کوتاه از ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد و در ادامه ملاحظه می‌شود دما با شیب کمتری کاهش پیدا می‌کند. در محل ترموکوپل دوم دما حداکثر ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و این نشان می‌دهد که دما تا حدی بالا نمی‌رود که باعث تغییر در ساختار قطعه‌کار شود. می‌توان گفت این یکی از مزایای جوشکاری پلاسما می‌باشد که دارای ناحیه متأثر از حرارت باریکی است. تفاوت در حداکثر دمای پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی و حالت تجربی قابل انتظار بود. همانگونه که دشپاند و همکاران^[26] قبلاً اشاره کرده‌اند، مدل منبع حرارت به صراحت در زیربرنامه آباکوس کدگذاری نشده و بنابراین مجموع گرمای ورودی به مش حفظ نمی‌شود. شیب دما در مرحله صعود در هر دو مورد تجربی و عددی به خوبی برهم منطبق بوده، هرچند در مرحله خنک شدن مدل شبیه‌سازی با نرخ خنک کننده تندتر در مقایسه با مورد تجربی پیش‌بینی می‌شود. قابل ذکر است در اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل عواملی باعث خطا می‌شوند که شامل خطا در نصب ترموکوپل، اکسید شدن حسگرهای نوک ترموکوپل و خطا در ثبت دما توسط دستگاه ثبت کننده داده‌ها که باید در حذف و بهبود این خطاها دقت لازم را انجام داد.

ریزساختار قطعه در اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی، تشکیل دانه‌های ستونی بزرگ را نشان می‌دهد. ساختارهای ستونی به دلیل ذوب مجدد جزئی لایه‌های قبلی و هسته‌زایی ناهمگن دندریت‌های آستنیت (۲) (یعنی رشد اپیتاکسیال) از طریق چندین لایه رسوب شده، گسترش می‌یابند. ایجاد دانه‌های ستونی را باید انتظار داشت زیرا انرژی بکار رفته در فرآیند لیزر زیاد بوده و این به معنای حوضچه مذاب بزرگ و عمیق است. پارامترهای فرآیند مانند ورودی گرما، سرعت اسکن و استراتژی اسکن، بر ریزساختار آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تأثیر می‌گذارند.

تأثیر قدرت منبع گرما عمدتاً به صورت ترکیبی بررسی شده است. تأثیر توان منبع گرما عمدتاً در ترکیب با سرعت اسکن و با استفاده از پارامتر چگالی انرژی خطی بررسی می‌شود. پارامتر چگالی انرژی خطی به طور قابل توجهی بر اندازه و شکل حوضچه مذاب و ویژگی‌های ریزساختاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تأثیر می‌گذارد. چگالی انرژی خطی بالاتر منجر به حوضچه ذوب بزرگتر و داغ‌تر می‌شود. کاهش چگالی انرژی خطی منجر به تغییرات پی‌درپی در ریزساختار از یک ستون با بافت درشت به یک ساختار با دانه‌های هم محور با بافت تقریباً تصادفی می‌شود^[27].

تفکیک و توسعه فاز لاهه در ناحیه جوش اینکونل ۷۱۸ به گرمای ورودی و سرعت خنک کننده بستگی دارد. این می‌تواند تا حد زیادی توسط انواع فرآیند جوشکاری، تکنیک و پارامترهای جوشکاری که گرمای ورودی و سرعت خنک شدن را تنظیم می‌کند، کنترل شود. گرمای ورودی کمتر، سرعت خنک‌سازی سریع‌تر، استفاده از جریان پالسی و نوسان قوس مغناطیسی در فرآیند جوشکاری سبب پالایش در دندریت‌های ناحیه جوش و کاهش حجم درصد فاز لاهه در مناطق بین دندریتی می‌شود^[28]. در تحقیق^[29] از نیتروژن به عنوان خنک کننده ناحیه جوش استفاده شد و درصد فاز لاهه ۵۰ درصد کاهش یافت. هرچند استفاده از نیتروژن به عنوان خنک کننده دارای محدودیت‌های می‌باشد. در تحقیقات^[30,31] از الکتروود غنی شده با مولیبدن و وانادیم برای کنترل فاز لاهه استفاده شد و کاهش فاز لاهه را گزارش کردند.

با توجه به تاریخچه حرارتی ثبت شده برای ناحیه متأثر از حرارت اینکونل ۷۱۸ ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی (شکل ۳) که در محدوده ۱۳۴۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، می‌توان گفت با رسیدن دما به ۱۳۴۰ درجه سانتی‌گراد، کاربیدهای MC کاملاً ذوب شده و زمینه نیکل هم به صورت جزئی ذوب می‌شود. این دمای بالا باعث تسهیل پدیده نفوذ برای اتم‌های حل شده می‌شود و همچنین مهاجرت مرز دانه‌ها را تسریع می‌کند. در ادامه، با پایین آمدن دما، اتم‌های کربن با نزدیک‌ترین اتم‌های مولیبدن یا نیبوم پیوند برقرار می‌کنند و کاربیدهای MC را تشکیل می‌دهند. این کاربیدهای جدید نسبت به کاربیدهای اصلی دارای اندازه کوچکتری هستند. همچنین اتم‌های کربن با توجه به شعاع اتمی کوچکی که به نسبت سایر عناصر دارند، از طریق پدیده نفوذ بین‌نشینی می‌توانند در داخل دانه‌ها نفوذ کنند. از این رو، کاربیدهای MC دوباره منجمد شده نه تنها در امتداد مرز دانه‌ها توزیع می‌شوند، بلکه در داخل دانه‌ها نیز وجود دارند (شکل ۸)^[16].

با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که مورفولوژی و ویژگی‌های پراکندگی دانه‌ها و فازهای لاهه از عوامل اصلی تأثیرگذار بر خواص کششی می‌باشند. با توسعه کشش، فازهای لاهه در مرز دانه‌ها اولین فازهایی هستند که از زمینه آستنیت با زاویه تند جدا می‌شوند، که باعث ایجاد بیشترین تمرکز تنش در مرز

منابع

- 1- Kumar M, Sharma A, Mohanty UK, Kumar SS. Additive manufacturing with welding. In *Advances in Welding Technologies for Process Development 2019* Feb 22 (pp. 77-100). CRC Press.
- 2- Yap CY, Chua CK, Dong ZL, Liu ZH, Zhang DQ, Loh LE, Sing SL. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*. 2015 Dec 1;2(4).
- 3- Davis JR, editor. Nickel, cobalt, and their alloys. ASM international; 2000.
- 4- Sahin S, Toparli M, Ozdemir I, Sasaki S. Modelled and measured residual stresses in a bimaterial joint. *Journal of Materials processing technology*. 2003 Jan 10;132(1-3):235-41.
- 5- Zhao Y, Li K, Gargani M, Xiong W. A comparative analysis of Inconel 718 made by additive manufacturing and suction casting: Microstructure evolution in homogenization. *Additive Manufacturing*. 2020 Dec 1;36:101404.
- 6- Hu X, Xue Z, Zhao G, Yun J, Shi D, Yang X. Laser welding of a selective laser melted Ni-base superalloy: microstructure and high temperature mechanical property. *Materials Science and Engineering: A*. 2019 Feb 4;745:335-45.
- 7- Zhang Y, Hu X, Jiang Y. Study on the microstructure and fatigue behavior of a laser-welded Ni-based alloy manufactured by selective laser melting method. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020 May;29(5):2957-68.
- 8- Brunner-Schwer C, Simón-Muzás J, Biegler M, Hilgenberg K, Rethmeier M. Laser Welding of L-PBF AM components out of inconel 718. *Procedia CIRP*. 2022 Jan 1;111:92-6.
- 9- Jokisch T, Marko A, Gook S, Üstündag Ö, Gumenyuk A, Rethmeier M. Laser welding of SLM-manufactured tubes made of IN625 and IN718. *Materials*. 2019 Sep 12;12(18):2967.
- 10- Rautio T, Mäkilängas J, Kumpula J, Järvenpää A, Hamada AS. Laser welding of laser powder bed fusion manufactured inconel 718: Microstructure and mechanical properties. *Key Engineering Materials*. 2021 May 27;883:234-41.
- 11- Tabaie S, Rézaei-Aria F, Flipo BC, Jahazi M. Grain size and misorientation evolution in linear friction welding of additively manufactured IN718 to forged superalloy AD730™. *Materials Characterization*. 2021 Jan 1;171:110766.
- 12- Fanous IF, Younan MY, Wifi AS. 3D finite element modeling of the welding process using element birth and element movement techniques. In *ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2002* Jan 1 (Vol. 46539, pp. 165-172).
- 13- Hakeem AS, Patel F, Minhas N, Malkawi A, Aleid Z, Ehsan MA, Sharrofnah 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.
- 14- Nakhodchi S, Akbari Iraj S, Rezazadeh H. Numerical and experimental study of temperature and residual

ناهمگن فازهای لایه و زمینه آستنیت می‌شود. علاوه بر این، ترک-ها در فازهای لایه درشت و زنجیره بلند ظاهر می‌شوند. با ادامه بارگذاری، جدایش‌ها شروع به تبدیل شدن به ترک‌هایی می‌کنند که در امتداد محل اتصال مرز فازها و مرز دانه‌ها یا در داخل دانه‌ها گسترش می‌یابند، که باعث ایجاد حفره‌های مستقیم طولانی می‌شود. در حالی که فازهای لایه بلند در امتداد جهت ترک‌ها تحت تأثیر نیروی برشی بزرگ شکسته شده و تا حدی از ماتریس آستنیت جدا می‌شوند^[32].

۶- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری و آزمایش‌های تجربی بررسی‌های میکروساختار انجام گرفته را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- تطابق نسبتاً مناسبی بین نتایج آنالیز حرارتی عددی و تجربی مشاهده می‌شود. خطای مشاهده شده در نمودارهای دمایی می‌تواند ناشی از نحوه‌ی مدل‌سازی منبع دمایی و شرایط انتقال حرارت با محیط اطراف باشد.
- ۲- در حالت تجربی، بیشینه دما در ترموکوپل اول که نزدیک به خط جوش می‌باشد دما تا حدود ۱۳۷۰ سانتی‌گراد بالا می‌رود ولی در ترموکوپل دوم و سوم که دورتر از ناحیه جوش می‌باشند دما به ترتیب ۵۲۰ سانتی‌گراد و ۴۱۵ سانتی‌گراد می‌باشد. در محل مشابه ترموکوپل‌ها در شبیه‌سازی عددی نقطه اول دارای بیشینه دمایی ۱۳۴۰ سانتی‌گراد می‌باشد و نقاط دوم و سوم به ترتیب دارای بیشینه دمایی ۵۴۵ سانتی‌گراد و ۴۰۷ سانتی‌گراد می‌باشند.
- ۳- دانه‌های ستونی بزرگ در فلز پایه قابل مشاهده است. در منطقه متأثر از حرارت اندازه دانه‌ها نسبت به فلز پایه بسیار ریزتر می‌باشند. این تغییر در اندازه دانه‌ها نشان دهنده رخ دادن تبلور مجدد در این ناحیه می‌باشد.
- ۴- مشخصه‌های ریزساختاری منطقه ذوب شامل توزیع عناصر آلیاژی در امتداد مرز دانه‌های فرعی انجماد و تشکیل فازهای لایه و کاربرد می‌باشد.
- ۵- نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد که نمونه بدون جوش دارای حد تسلیم و شکل‌پذیری بالاتری است.

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 هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

- 27- Parimi LL, Ravi GA, Clark D, Attallah MM. Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718. *Materials Characterization*. 2014 Mar 1;89:102-11.
- 28- Sivaprasad K, Raman SG, Mastanaiah P, Reddy GM. Influence of magnetic arc oscillation and current pulsing on microstructure and high temperature tensile strength of alloy 718 TIG weldments. *Materials Science and Engineering: A*. 2006 Jul 25;428(1-2):327-31.
- 29- Manikandan SG, Sivakumar D, Rao KP, Kamaraj M. Effect of enhanced cooling on microstructure evolution of alloy 718 using the gas tungsten arc welding process. *Welding in the World*. 2016 Sep;60:899-914.
- 30- Ramkumar KD, Bhalodi AJ, Ashokbhai HJ, Balaji A, Aravind S, Aravind KM, Varma V. Effect of Mo-rich fillers in pulsed current gas tungsten arc welding of Inconel 718 for improved strength and hot corrosion resistance. *Journal of materials engineering and performance*. 2017 Nov;26:5620-40.
- 31- Manikandan SG, Sivakumar D, Muthuswamy K, Rao KP. Laves phase control in Inconel 718 weldments. *InMaterials Science Forum* 2012 Feb 9 (Vol. 710, pp. 614-619). Trans Tech Publications Ltd.
- 32- Wang Y, Liu W, Wang D, Yu C, Xu J, Lu H, Chen J. Simultaneously enhanced strength and ductility of TIG welds in Inconel 718 super-alloy via ultrasonic pulse current. *Materials Science and Engineering: A*. 2021 Mar 11;807:140894.
- stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having different thicknesses. *Modares Mechanical Engineering*. 2014 Dec 1;14(9).
- 15- Choi JP, Shin GH, Yang S, Yang DY, Lee JS, Brochu M, Yu JH. Densification and microstructural investigation of Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting. *Powder Technology*. 2017 Apr 1;310:60-6.
- 16- Liang L, Xu M, Chen Y, Zhang T, Tong W, Liu H, Wang H, Li H. Effect of welding thermal treatment on the microstructure and mechanical properties of nickel-based superalloy fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*. 2021 Jul 5;819:141507.
- 17- Raza T, Hurtig K, Asala G, Andersson J, Svensson LE, Ojo OA. Influence of heat treatments on heat affected zone cracking of gas tungsten arc welded additive manufactured alloy 718. *Metals*. 2019 Aug 10;9(8):881.
- 18- Sivakumar J, Naik KN. Optimization of weldment in bead on plate welding of nickel based superalloy using Activated flux tungsten inert gas welding (A-TIG). *Materials Today: Proceedings*. 2020 Jan 1;27:2718-23.
- 19- Sui S, Chen J, Fan E, Yang H, Lin X, Huang W. The influence of Laves phases on the high-cycle fatigue behavior of laser additive manufactured Inconel 718. *Materials Science and Engineering: A*. 2017 May 17;695:6-13.
- 20- Li S, Wei Q, Shi Y, Zhu Z, Zhang D. Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Science & Technology*. 2015 Sep 1;31(9):946-52.
- 21- Xu F, Lv Y, Liu Y, Shu F, He P, Xu B. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process. *Journal of Materials Science & Technology*. 2013 May 1;29(5):480-8.
- 22- Sonar T, Balasubramanian V, Malarvizhi S, Nagar A, Venkateswaran T, Sivakumar D. Microstructural characteristics and tensile properties of gas tungsten constricted arc (GTCA) welded Inconel 718 superalloy sheets for aeroengine components. *Materials Testing*. 2020 Nov 1;62(11):1099-108.
- 23- Wagner HJ, Hall AM. *Physical metallurgy of alloy 718*. Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute; 1965.
- 24- Ramirez AJ, Lippold JC. High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part I. Ductility and microstructural characterization. *Materials Science and Engineering: A*. 2004 Aug 25;380(1-2):259-71.
- 25- Sonar T, Balasubramanian V, Malarvizhi S, Venkateswaran T, Sivakumar D. An overview on welding of Inconel 718 alloy-Effect of welding processes on microstructural evolution and mechanical properties of joints. *Materials Characterization*. 2021 Apr 1;174:110997.
- 26- Deshpande AA, Tanner DW, Sun W, Hyde TH, McCartney G. Combined butt joint welding and post weld heat treatment simulation using SYSWELD and ABAQUS. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2011 Jan 1;225(1):1-0.