



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

محاسبه ضرایب نفوذ عناصر در اثر عملیات همگن سازی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ریختگی

محمد جواد سهرابی^۱، حامد میرزاده^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۱-۸۲۰۸۴۰۸۰، تهران، خیابان کارگر شمالی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد،
E-mail: h.mirzade@ut.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۳۱

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵

از آنجا که مطالعه نفوذ عناصر آلیاژی در نیکل به طور کلی بر مبنای زوج های نفوذی است و حضور عناصر دیگر در سوپرآلیاژ بر نفوذ هر عنصری تاثیرگذار است، نیاز به روش محاسباتی است که توسط آن بتوان ضرایب نفوذ را به شکل مستقیم در سوپرآلیاژ محاسبه کرد. در تحقیق حاضر، ریزساختار ریختگی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی شد و مشخص شد که این ریزساختار شامل دندریت های آستنیتی است که عناصر نیوبیم، مولیبدن، و تیتانیوم را به مناطق بین دندریتی پس زده‌اند. همچنین ساختار یوتکتیک فاز لاه/آستنیت و فازهای NbC و TiN در این مناطق شناسایی شدند. در ادامه، ریزجدایش عناصر نیوبیم، مولیبدن و تیتانیوم در این سوپرآلیاژ و کاهش اثرات آن در حین عملیات حرارتی همگن سازی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مفهوم شاخص جدایش باقی مانده، در طی عملیات همگن سازی، ضرایب نفوذ و انرژی فعال سازی برای نفوذ این عناصر در زمینه آستنیتی سوپرآلیاژ به دست آمد. انرژی فعال سازی برای نفوذ Nb، Mo، و Ti به ترتیب ۲۳۲، ۲۸۶ و ۲۵۶ کیلوژول بر مول تعیین شد. نتیجه این محاسبات، برای بررسی واکنش های رسوب گذاری، خزش دمای بالا و فرآیندهای ترمومکانیکی سوپرآلیاژها لازم است.

واژه‌های کلیدی:

سوپرآلیاژها،
شاخص جدایش باقیمانده،
ضریب نفوذ،
انرژی فعال سازی.

ارجاع به این مقاله:

محمد جواد سهرابی، حامد میرزاده، محاسبه ضرایب نفوذ عناصر در اثر عملیات همگن سازی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ریختگی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز ۱۳۹۸، جلد ۳، شماره ۳، صفحات ۱۲۳-۱۳۱.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2019.198934.1098

۱- مقدمه

[۷،۶]. علاوه بر این، کاربردهای نوع MC (M می‌تواند نیوبیم، تیتانیوم و مولیبدن و دیگر عناصر باشد) از جمله فازهای رایج در سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ هستند [۵]. بنابراین، درک نفوذ عناصر اصلی آلیاژی در زمینه آستنیت از اهمیت بالایی برای مطالعه فرآیندهای رسوب گذاری، همگن سازی ساختار ریختگی، کنترل فرآیندهای ترمومکانیکی و رفتار خزش دمای بالا برخوردار است. گزارش‌هایی در مورد نفوذ عناصر آلیاژی در نیکل وجود دارد که عمدتاً بر مبنای زوج نفوذی نیکل-نیوبیم [۹،۸]، نیکل-مولیبدن [۱۰] و نیکل-تیتانیوم [۱۱] است. اما حضور عناصر دیگر در سوپرآلیاژ بر نفوذ هر عنصری تاثیرگذار است که این مطلب را نمی‌توان با زوج نفوذی در نظر گرفت و نیاز به روش محاسباتی

سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بیش از ۵۰ درصد از تولید جهانی سوپرآلیاژها در سراسر جهان را در بر می‌گیرد [۱]. رسوب سختی در این آلیاژ تا حد زیادی مربوط به رسوب فاز تتراگونال γ' (Ni₃Nb) است [۳،۲]. همچنین فاز اورتورومبیک δ (Ni₃Nb) به دلیل تأثیر آن بر میزان رسوبات کوهیرنت^۲، جلوگیری از رشد دانه‌ها و تأثیرگذاری بر فرآیند تبلور مجدد در سوپرآلیاژها بسیار حائز اهمیت است [۴،۳]. لذا نیوبیم اهمیت زیادی دارد. دیگر عناصر آلیاژی مانند مولیبدن، تیتانیوم، کروم، آهن و کربن برای مقاصد خاصی اضافه شده و اهمیت زیادی برای سرویس‌دهی آلیاژ دارند [۵]. اما از سوی دیگر، عناصر نیوبیم، مولیبدن و تیتانیوم مسئول ریزجدایش شدید در هنگام فرآیند انجماد هستند

بر اساس رابطه (۱) و با توجه به قله‌ها (مناطق بین دندریتی حاوی عناصر جدایش‌یافته) و دره‌ها (وسط دندریت که عناصر جدایش‌یافته را پس‌زده است) در رابطه سینوسی، بیشترین (C_M) و کمترین (C_m) غلظت عنصر در حین همگن‌سازی و مقادیر اولیه آن‌ها در شمش ریختگی (C_{0M} و C_{0m}) به دست می‌آید که در رابطه (۲) نشان داده شده است:

$$\begin{aligned} C_M &= C_{avg} + \beta \exp(-4\pi^2 Dt / SDAS^2) \\ C_{0M} &= C_{avg} + \beta \\ C_m &= C_{avg} - \beta \exp(-4\pi^2 Dt / SDAS^2) \\ C_{0m} &= C_{avg} - \beta \end{aligned} \quad (2)$$

شاخص جدایش باقیمانده برای عملیات همگن‌سازی توسط رابطه‌ی (۳) بیان می‌شود:

$$\delta = (C_M - C_m) / (C_{0M} - C_{0m}) \quad (3)$$

رابطه‌ی (۳) بر اساس رابطه (۲) می‌تواند به شکل رابطه (۴) بیان شود:

$$\delta = \exp(-4\pi^2 Dt / SDAS^2) \quad (4)$$

در نهایت رابطه (۵) از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \ln \delta &= D(-4\pi^2 t / SDAS^2) \\ y &= \ln \delta \\ x &= -4\pi^2 t / SDAS^2 \end{aligned} \quad (5)$$

بر این اساس، شیب خط y برحسب x با عرض از مبدا صفر، مقدار D در هر دما را مشخص می‌کند. از طرف دیگر، با گرفتن لگاریتم طبیعی از رابطه ضریب نفوذ (رابطه ۶)، رابطه (۷) به دست می‌آید و در نتیجه، شیب و عرض از مبدا خط رسم شده بر نمودار y برحسب x ، به ترتیب مقادیر انرژی فعال سازی نفوذ (Q) و پارامتر $\ln D_0$ را می‌دهد که D_0 فاکتور فرکانس فرآیند نفوذ است:

$$D = D_0 \exp(-Q / RT) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \ln D &= \ln D_0 + Q(-1 / RT) \\ y &= \ln D \\ x &= -1 / RT \end{aligned} \quad (7)$$

دارد که ضرایب نفوذ را به شکل مستقیم از سوپرآلیاژ به دست آورد.

یک روش ساده و کارآمد برای مطالعه نفوذ در یک شمش ریختگی، مطالعه نفوذ در طی عملیات همگن‌سازی بر اساس شاخص جدایش باقیمانده^۱ است [۱۲]، که غلظت عناصر آلیاژی را در مرکز دندریت و در منطقه بین دندریتی در نظر می‌گیرد. با استفاده از آن می‌توان به راحتی نفوذ عناصر جدایش یافته در طی فرآیند همگن‌سازی شمش را مورد مطالعه قرار داد [۱۳، ۱۲]. بنابراین، در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن مفهوم شاخص جدایش باقی‌مانده، در نظر است که ضرایب نفوذ و انرژی‌های فعال‌سازی و ضریب تابع نمایی برای عناصر مهم آلیاژی محاسبه شود.

۲- مواد و روش تحقیق

شمش ریختگی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با ترکیب شیمیایی Ni-18.9Fe-17.5Cr-5Nb-2.9Mo-1Ti-0.02C (بر حسب درصد وزنی) توسط روش ذوب مجدد قوس الکتریکی تحت خلاء آماده شد. سپس در دماهای همگن‌سازی ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سلسیوس در محدوده ۱-۹ ساعت آنیل شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی جهت آنالیز ریزساختاری پس از الکترواچ در محلولی شامل ۳ میلی لیتر هیدروکلریک اسید - ۱ میلی لیتر نیتریک اسید و ۶ میلی لیتر گلیسرول در ولتاژ ۶ ولت به مدت ۱۰ ثانیه استفاده شد. میکروسختی تحت بار ۱۰ گرم بر روی سطوح پولیش شده گرفته شد.

برای آنالیز عنصری از روش طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه‌ی ایکس^۲ موجود در میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. سه نقطه مختلف برای آنالیز عنصری بررسی گردید و متوسط آنها در نظر گرفته شد. ریزجدایش عناصر آلیاژی و تغییرات آن در حین همگن‌سازی برای به دست آوردن ضریب نفوذ این عناصر در زمینه آستنیتی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در نظر گرفته شد [۱۲] که می‌تواند توسط رابطه‌ی (۱) بررسی شود [۱۵، ۱۴]:

$$C = C_{avg} + \beta \sin(\pi z / l) \exp(-4\pi^2 Dt / SADS^2) \quad (1)$$

در جایی که C غلظت عنصر جدایش یافته در زمان t است، C_{avg} غلظت میانگین عنصر جدایش یافته است، $SADS$ فاصله بازوی ثانویه دندریت^۳ است، و در نهایت، D ضریب نفوذ عنصر جدایش یافته در زمینه، β یک ثابت و z فاصله است.

³ Secondary dendrite arm spacing (SDAS)

¹ Residual segregation index

² Energy-dispersive spectroscopy (EDS)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار ریختگی

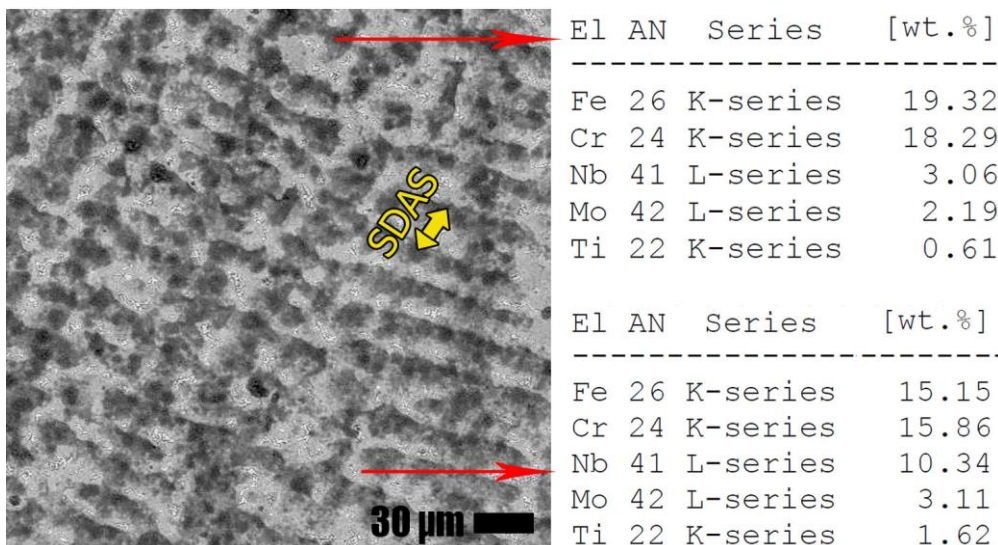
ساختار دندریتی شمش ریختگی حاصل از تصویر میکروسکوپ الکترونی از الکترون‌های بازگشتی در شکل (۱) نشان داده شده است. متوسط فاصله بازوی ثانویه دندریت برابر با ۱۵ میکرومتر به دست آمد. در شکل (۱) می‌توان مشاهده کرد که دندریت در مقایسه با مناطق بین‌دندریتی تیره‌تر به نظر می‌رسد. آنالیزهای عنصری نشان داده شده در شکل (۱)، آشکار می‌نماید که عناصر نیوبیم، مولیبدن و تیتانیوم به مناطق بین‌دندریتی جدایش یافته‌اند. مقادیر 180 ± 3 و 239 ± 4 ویکرز به ترتیب برای میکروسختی از مرکز دندریت و مناطق آستنیتی بین‌دندریتی به دست آمده است که با توجه به استحکام محلول جامد، تاییدی بر افزایش میزان عناصر آلیاژی در مناطق آستنیتی بین‌دندریتی است [۱۷، ۱۶]. اخیراً بررسی انجماد غیرتعدالی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با توجه به نمودار فازی Ni-Nb توسط سهرابی و همکاران [۱۸] انجام شد و مشخص شد که ریزجدایش عنصر نیوبیم در حین انجماد رخ می‌دهد و با گسترش منطقه یوتکتیک به مقادیر نیوبیم پایین‌تر امکان ایجاد یک مذاب غنی از نیوبیم را برای ترکیب ۵ درصد وزنی نیوبیم در مناطق بین‌دندریتی فراهم می‌آورد.

مشاهدات ریزساختاری در ناحیه جدایش یافته نشان داد که فازهای دیگری نیز حضور دارند. شکل (۲) آنالیز عنصری از دو فاز مشاهده شده را نشان می‌دهد که عبارتند از NbC و TiN. نقشه آنالیز عنصری نشان می‌دهد که فاز بزرگ نشان داده شده، حاوی مقادیر زیادی تیتانیوم و نیتروژن بوده و مقداری نیوبیم هم دارد. لذا این فاز TiN مشخصه‌یابی می‌شود. نقشه آنالیز عنصری همچنین نشان می‌دهد که ذرات کوچک‌تر حاوی مقادیر زیادی

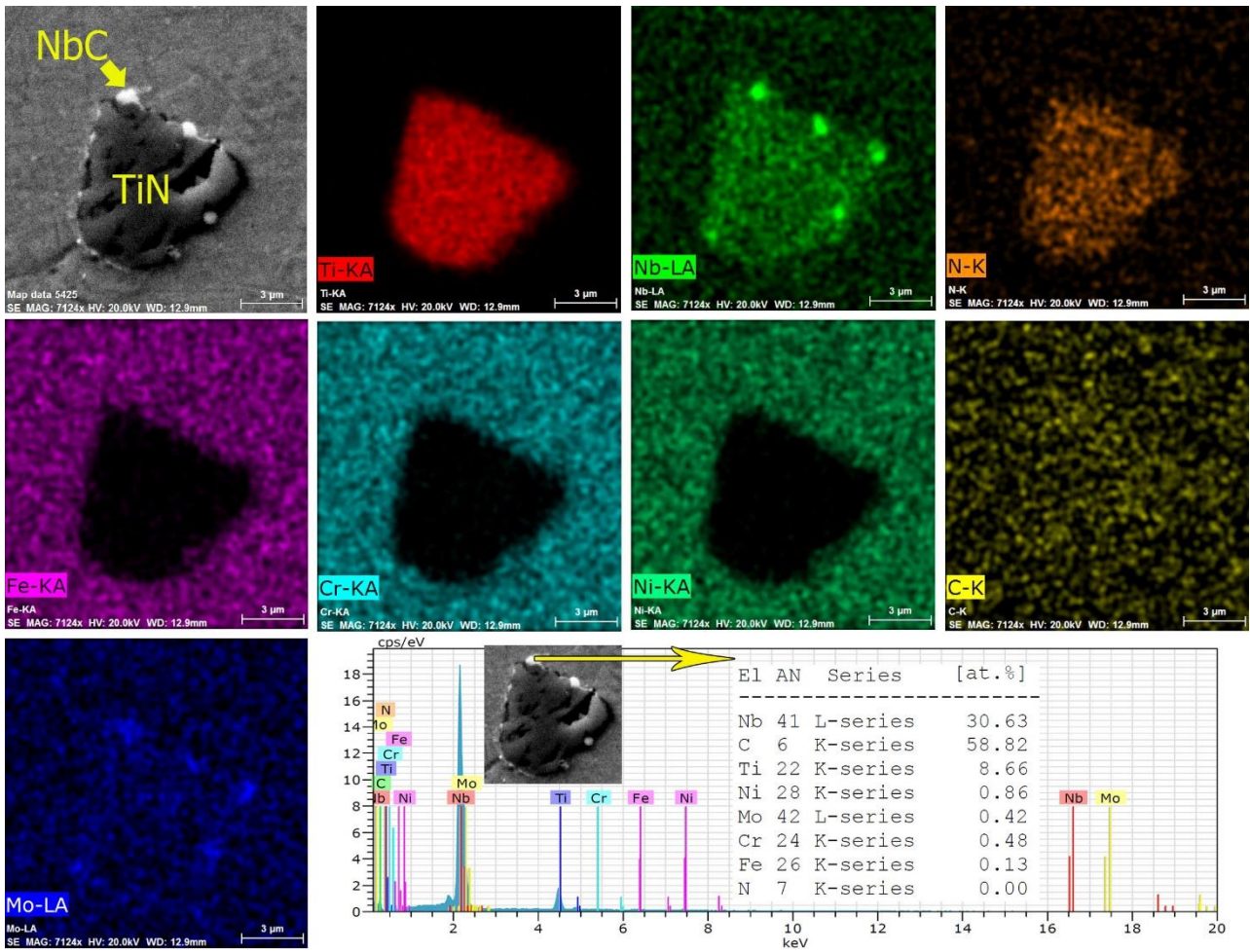
نیوبیم هستند و مقداری مولیبدن هم دارند. البته نقشه آنالیز عنصری مربوط به کربن چندان قابل استفاده نیست، در نتیجه، آنالیز عنصری نقطه‌ای از ذرات کوچک گرفته شد که نشان می‌دهد حدود ۵۸ درصد اتمی کربن وجود دارد و همچنین مقدار نیوبیم خیلی بالایی دارد. لذا این فاز، کاربید NbC است. شکل (۳)، آنالیز عنصری از یک ساختار یوتکتیک مشاهده شده را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که این ساختار درصد بالایی نیوبیم و مولیبدن دارد که با ساختار یوتکتیک فاز لاهه/آستنیت در تطابق است. آنالیز عنصری نقطه‌ای از فاز لاهه در شکل (۳) نشان داده شده است و مشاهده می‌شود این فاز بخش عمده‌ای از نیوبیم را مصرف کرده است و لذا حذف آن در پژوهش‌های پیشین مورد توجه قرار گرفته است [۱۸، ۶]. برای میکروسختی ساختار یوتکتیک فاز لاهه/آستنیت مقدار 297 ± 2 ویکرز به دست آمد که نشان دهنده حضور فاز بین فلزی لاهه و همچنین درصد بالای نیوبیم در ساختار یوتکتیک است.

۳-۲- همگن‌سازی

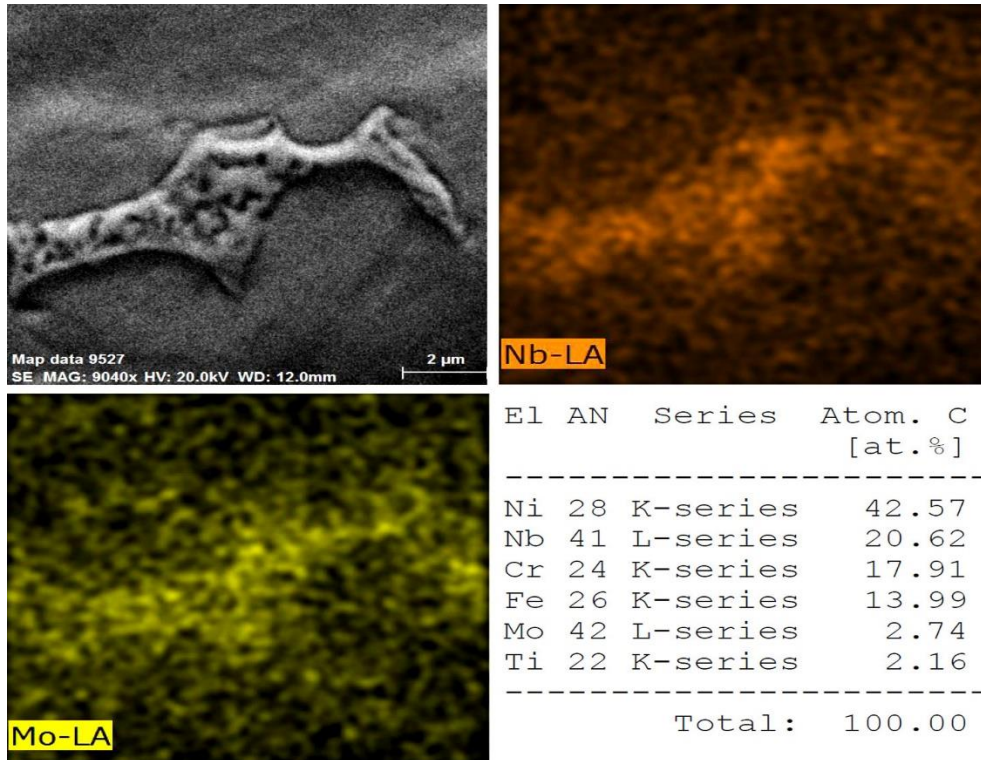
در حین همگن‌سازی، عناصر نفوذ می‌کنند تا ریزجدایش را از بین ببرند. نفوذ عناصر جدایش‌یافته نیوبیم، مولیبدن و تیتانیوم اهمیت زیادی دارد [۶]. مقادیر C_M و C_M (و در نتیجه δ) در طی همگن‌سازی تغییر می‌کند که این تغییرات همسو با کاهش ریزجدایش‌ها است [۲۰، ۱۹]. نتایج نهایی برای هر عنصر در جدول (۱) خلاصه شده است. دیده می‌شود که با افزایش دمای همگن‌سازی، این تغییرات سریع‌تر انجام می‌شوند که نشان دهنده‌ی افزایش سرعت نفوذ اتم‌ها با افزایش دما است. این اطلاعات می‌توانند برای محاسبات نفوذی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی و نتایج آنالیز عنصری گرفته شده از آلیاژ ریختگی.



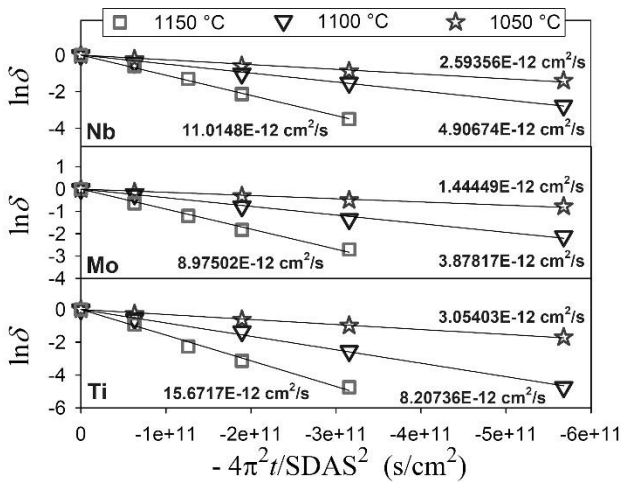
شکل ۲- آنالیز عنصری از NbC و TiN.



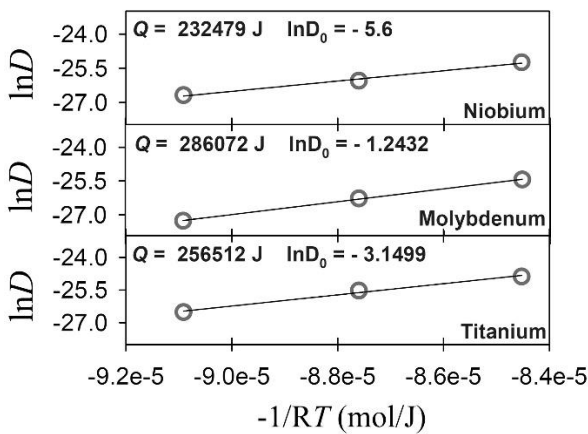
شکل ۳- آنالیز عنصری از ساختار یونکتیک فاز لاه/آستنیت.

جدول ۱- خلاصه آنالیز عنصری نقطه‌ای از آلیاژهای ریختگی و همگن‌سازی شده.

Temperature (°C)	Time (h)	Nb (wt.%)		Mo (wt.%)		Ti (wt.%)	
		C _M	C _m	C _M	C _m	C _M	C _m
As-Cast	0	10.34	3.06	3.61	2.11	1.73	0.58
1050	1	9.11	3.31	3.53	2.21	1.53	0.66
1050	3	7.93	3.91	3.39	2.30	1.36	0.74
1050	5	7.11	4.09	3.29	2.38	1.21	0.78
1050	9	6.15	4.35	3.18	2.49	1.03	0.82
1100	1	7.99	3.26	3.39	2.21	1.34	0.71
1100	3	6.83	4.2	3.21	2.52	1.14	0.84
1100	5	6.01	4.41	3.07	2.68	0.99	0.90
1100	9	5.26	4.80	2.91	2.73	0.94	0.93
1150	1	7.43	3.43	3.24	2.45	1.19	0.73
1150	2	6.25	4.27	3.07	2.62	1.01	0.89
1150	3	5.32	4.46	2.98	2.74	0.96	0.91
1150	5	5.05	4.83	2.91	2.81	0.94	0.93



شکل ۴- نمودارهای استفاده شده جهت محاسبه ضرایب نفوذ در سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸. ضرایب نفوذ به دست آمده در شکل نشان داده شده‌اند.



شکل ۵- نمودارهای استفاده شده جهت محاسبه پارامترهای نفوذی در سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸. مقادیر به دست آمده برای Q و ln D₀ در شکل نشان داده شده‌اند.

۳-۳- محاسبات نفوذی

برای محاسبه ضرایب نفوذ، شکل (۴) برای هر سه عنصر نیوبیم، مولیبدن و تیتانیوم با استفاده از جدول (۱) و بر اساس رابطه (۵) رسم شده است. همچنین، بر اساس رابطه (۷)، شکل (۵) برای هر سه عنصر نیوبیم، مولیبدن و تیتانیوم رسم شده است تا مقادیر Q و $\ln D_0$ به دست آیند که در شکل گزارش شده‌اند. انرژی فعال‌سازی برای نفوذ Nb، Mo، Ti در زمینه به ترتیب ۲۳۲، ۲۸۶ و ۲۵۶ کیلوژول بر مول محاسبه می‌شود. علاوه بر این، ضریب تابع نمایی (D_0) به ترتیب برابر با $۰/۰۰۳۷$ ، $۰/۲۸۸$ و $۰/۰۴۳$ سانتیمتر مربع بر ثانیه محاسبه می‌شود. برای نیوبیم، مقادیر Q برابر با ۲۰۲ کیلوژول بر مول [۵] و ۲۵۷ کیلوژول بر مول [۹] بر اساس زوج نفوذی Ni-Nb گزارش شده است که متوسط آن حدود ۲۳۰ کیلوژول بر مول می‌شود که با مقدار به دست آمده در تحقیق حاضر (۲۳۲ کیلوژول بر مول در شکل (۳)) هم‌خوانی دارد. برای مولیبدن مقدار Q برابر با ۲۸۵ کیلوژول بر مول [۱۰] بر اساس زوج نفوذی Ni-Mo گزارش شده است که با مقدار ۲۸۶ کیلوژول بر مول در تحقیق حاضر کاملاً تطابق دارد. اما مقدار D_0 برای مولیبدن در سوپر آلیاژ برابر با $۰/۲۸۸$ سانتیمتر مربع بر ثانیه به دست آمد که از مقدار $۲/۳۰۰$ سانتیمتر مربع بر ثانیه برای زوج نفوذی نیکل-مولیبدن [۱۰] کمتر است و نشان دهنده اثر عناصر آلیاژی دیگر بر نفوذ این عنصر است. برای تیتانیوم مقدار Q برابر با ۲۵۷ کیلوژول بر مول [۱۱] گزارش شده است که با مقدار محاسبه شده در تحقیق حاضر کاملاً در تطابق است.

رسوب‌گذاری، همگن‌سازی ساختار ریختگی، فرآیندهای ترمومکانیکی و خزش دمای بالای سوپرآلیاژها لازم است.

مراجع

- [1] Anderson M., Thielin A.L., Bridier F., Bocher P., Savoie J., δ phase precipitation in inconel 718 and associated mechanical properties, *Materials Science and Engineering A*, 2017, 679, 3409-3417.
- [2] Alam T., Chaturvedi M., Ringer S.P., Cairney J.M., Precipitation and clustering in the early stages of ageing in Inconel 718, *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527, 7770-7774.
- [3] Kaňetas P.P., Öztürk U., Calvo J., Cabrera J.M., Mata M.G., High-temperature deformation of delta-processed Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255, 204-211.
- [4] He D.G., Lin Y.C., et al., Influences of pre-precipitated δ phase on microstructures and hot compressive deformation features of a nickel-based superalloy, *Vacuum*, 2019, 161, 242-250.
- [5] Donachie M., Donachie S., *Superalloys a Technical Guide*, second ed., ASM International, 2002.
- [6] Miao Z.J., Shan A.D., et al., Quantitative analysis of homogenization treatment of INCONEL718 superalloy, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21, 1009-1017.
- [7] Chen Y., Guo Y., et al., Study on the element segregation and Laves phase formation in the laser metal deposited IN718 superalloy by flat top laser and Gaussian distribution laser, *Materials Science and Engineering A*, 2019, 754, 339-347.
- [8] Patil R.V., Kale G.B., Chemical diffusion of niobium in nickel, *Journal of Nuclear Materials*, 1996, 230, 57-60.
- [9] Karunaratne M., Reed R.C., Interdiffusion of niobium and molybdenum in nickel between 900-1300°C, *Defect and Diffusion Forum*, 2005, 237, 420-425.
- [10] Ugaste Y., Pimenov V.N., Mutual diffusion in the nickel-molybdenum and palladium-molybdenum systems, *Fiz. Metal. Metalloved*, 1972, 33(5), 1034-1039.
- [11] Jung S.B., Yamane T., Minamino Y., Hirao K., Araki H., Saji S., Interdiffusion and its size effect in nickel solid solutions of Ni-Co, Ni-Cr and Ni-Ti systems, *Journal of Materials Science Letters*, 1992, 11, 1333-1337.
- [12] Kramb R.C., Antony M.M., Semiatin S.L., Homogenization of a nickel-base superalloy ingot material, *Scripta Materialia*, 2006, 54(9), 1645-1649.
- [13] Sohrabi M.J., Mirzadeh H., Revisiting the diffusion of niobium in an as-cast nickel-based superalloy during annealing at elevated temperatures, *Metals and Materials International*, 2019, in press.
- [14] Porter D.A., Easterling K.E., Sherif M.Y., *Phase transformations in metals and alloys*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.
- [15] Semiatin S.L., Kramb R.C., Turner R.E., Zhang F., Antony M.M., Analysis of the homogenization of a nickel-base superalloy *Scripta Materialia*, 2004, 51(6), 491-495.
- [16] Antonov S., Chen W., et al., The effect of phosphorus on the formation of grain boundary laves phase in high-refractory content Ni-based superalloys. *Scripta Materialia*. 2019, 161, 44-48.
- [17] Ritter N.C., Sowa R., et al., Effects of solid solution strengthening elements Mo, Re, Ru and W on transition temperatures in nickel-based superalloys with high γ' -volume fraction: Comparison of experiment and CALPHAD calculations, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49, 3206-3216.

اهمیت ضرایب نفوذ به دست آمده در تحقیق حاضر این است که برای سوپرآلیاژ به دست آمده‌اند چرا که حضور عناصر دیگر بر نفوذ هر عنصری تاثیرگذار است که اثر آن در D_0 نمایان می‌شود. این مطلب را نمی‌توان با زوج نفوذی به دست آورد و روش محاسبه ضرایب نفوذ توسط همگن‌سازی می‌تواند کارگشا باشد. در دست داشتن ضرایب نفوذ می‌تواند مبنای خوبی برای مطالعه واکنش‌های رسوب‌گذاری، همگن‌سازی ساختار ریختگی، کنترل فرآیندهای ترمومکانیکی و رفتار خزش دمای بالا برای تحقیقات آینده فراهم کند. بر اساس مقادیر D_0 و Q ، ضرایب نفوذ در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس برای نیوبیم، مولیبدن و تیتانیم برابر با $۱/۰۹ \times ۱۰^{-۱۱}$ ، $۰/۹۱ \times ۱۰^{-۱۱}$ و $۱/۶۵ \times ۱۰^{-۱۱}$ سانتیمتر مربع بر ثانیه به دست می‌آید و نشان می‌دهد که نفوذ مولیبدن کندترین بوده و لذا کنترل‌کننده فرآیند همگن‌سازی است.

۴- نتیجه‌گیری

ریزساختار ریختگی و ریزجدایش عناصر نیوبیم، مولیبدن و تیتانیم در سوپرآلیاژ ریختگی اینکونل ۷۱۸ و کاهش اثرات آن در حین عملیات حرارتی همگن‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زیر از این تحقیق به دست می‌آید:

۱- ریزساختار ریختگی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ شامل دندریتهای آستنیتی است که عناصر نیوبیم، مولیبدن، و تیتانیم را به مناطق بین دندریتهای پس زده‌اند. همچنین ساختار یوتکتیک فاز لاهه/آستنیت و فازهای TiN و NbC در این مناطق شناسایی شدند. مقادیر ۱۸۰ ± ۳ و ۲۳۹ ± ۴ ویکرز به ترتیب برای میکروسختی از مرکز دندریتهای و مناطق آستنیتی بین دندریتهای به دست آمده است که تاییدی بر افزایش میزان عناصر آلیاژی در مناطق آستنیتی بین دندریتهای است. مقدار ۲۹۷ ± ۲ ویکرز برای میکروسختی ساختار یوتکتیک فاز لاهه/آستنیت به دست آمد که نشان دهنده حضور فاز بین فلزی لاهه و همچنین درصد بالای نیوبیم در ساختار یوتکتیک است.

۲- بر اساس مفهوم شاخص جدایش باقی‌مانده در طی عملیات همگن‌سازی، ضرایب نفوذ و انرژی فعال سازی و ضریب تابع نمایی برای نفوذ این عناصر در زمینه آستنیتی سوپرآلیاژ محاسبه شدند. انرژی فعال‌سازی برای نفوذ Nb، Mo و Ti به ترتیب ۲۳۲، ۲۸۶ و ۲۵۶ کیلوژول بر مول تعیین شد. علاوه بر این، ضریب تابع نمایی (D_0) برای Mo، Nb و Ti به ترتیب برابر با $۰/۰۳۷ \times ۱۰^{-۱۱}$ ، $۰/۲۸۸ \times ۱۰^{-۱۱}$ و $۰/۰۴۳ \times ۱۰^{-۱۱}$ سانتیمتر مربع بر ثانیه تعیین شد. نتیجه این محاسبات برای بررسی واکنش‌های

[20] Cieslak M.J., Headley T.J., Knorovsky G.A., Romig A.D., Kolliea T., A comparison of the solidification behavior of Incoloy 909 and Inconel 718, Metallurgical and Materials Transactions, 1990, 21, 479-488.

[18] Sohrabi M.J., Mirzadeh H., Rafiei M., Solidification behavior and Laves phase dissolution during homogenization heat treatment of Inconel 718 superalloy, Vacuum, 2018, 154, 235-243.

[19] Radavich J.F., Loria (Ed.) E.A., The physical metallurgy of cast and wrought alloy 718, superalloy 718 metallurgy and applications, The Minerals, Metals & Materials Society, 1989.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Calculating the Elemental Diffusivities during Homogenization of As-cast Inconel 718 Superalloy

Mohammad Javad Sohrabi¹, Hamed Mirzadeh^{2*}

1. M.Sc. Student, 2- Associate Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran

* **Corresponding Author:** P.O. Box 14174-66191, Tehran, Iran. Tel: +98 (21) 82084080, hmirzadeh@ut.ac.ir

Paper history:

Received: 22 August 2019

Accepted: 16 September 2019

Abstract:

Since the diffusion of alloying elements in nickel has been studied based on the diffusion couples and the presence of other alloying elements can alter the diffusion of a given element, there is need for a method for direct calculation of the diffusivities from the superalloys. In the present work, the as-cast microstructure of Inconel 718 superalloy was studied, where this microstructure was composed of austenitic dendrites that rejected alloying elements such as Nb, Mo, and Ti to the interdendritic regions. Moreover, the Laves phase/austenite eutectic structure and NbC and TiC phases were characterized in the interdendritic regions. Subsequently, the microsegregation of Nb, Mo, and Ti in the as-cast ingot and its amendment during homogenization heat treatment was studied. Based on the concept of residual segregation index, during homogenization treatment, the diffusivities and the corresponding activation energies for diffusion of these elements in the austenitic matrix were obtained. The activation energy for the interdiffusion of Nb, Mo, and Ti was determined as 232, 286, and 256 kJ/mol, respectively. The outcome of these calculations is important for the precipitation reactions, high-temperature creep, and thermomechanical processing of superalloys.

Keywords:

Superalloys,
Residual segregation index,
Diffusivity;
Activation energy.

Please cite this article using:

Mohammad Javad Sohrabi, Hamed Mirzadeh, Calculating the Elemental Diffusivities during Homogenization of As-cast Inconel 718 Superalloy, in Persian, Founding Research Journal, 2019, 3(3) 123-129.

DOI: 10.22034/frj.2019.198934.1098

Journal homepage: www.foundingjournal.ir