



## پژوهش نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

# اثر سرعت سرد کردن و نگهداری زیر صفر عمیق بر ریزساختار و سختی سوپر آلیاژ ریختگی IN738LC پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی کامل

محسن سمیعی<sup>۱</sup>، سید حسین رضوی<sup>۲\*</sup>، زهراسادات سیدرئوفی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران

\* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۱-۷۷۲۴۰۵۴۰، تهران، نارمک، صندوق پستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، E-mail: hrazavi@iust.ac.ir

### چکیده:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۹

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

در این تحقیق، نمونه‌هایی از جنس سوپر آلیاژ IN738LC در دمای  $1210^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ ساعت محلول‌سازی شدند. نمونه‌ها پس از انحلال در دو محیط هوا و نیتروژن مایع سرد شدند. یکی از نمونه‌های سرد شده در هوا، پس از هم دمایی با محیط به مدت ۲ ساعت در نیتروژن مایع نگهداری شد. برای بررسی تاثیرات نرخ سردایش بالا و عملیات زیر صفر عمیق روی ریزساختار و سختی، نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون سختی سنجی شناسایی شدند. نتایج مشاهدات میکروسکوپی نشان داد که با افزایش نرخ سرد کردن رسوبات باقیمانده  $\gamma'$  کاملاً کروی شده و اندازه و کسر حجمی آنها نسبت به نرخ سردایش پایین‌تر، کاهش می‌یابد. عملیات زیر صفر عمیق سبب کاهش اندازه رسوبات تا میزان ۱۱۷ نانومتر شد. در حالی که سرد شدن در نیتروژن مایع اندازه رسوبات را تا ۷۶ نانومتر کاهش داده بود. این موضوع نشان می‌دهد که سردایش در هوا فرصت رشد را در اختیار رسوبات گذاشته است. با افزایش نرخ سرمايش و نگهداری در صفر عمیق سختی نمونه‌ها کاهش یافت به طوری که کمینه سختی مربوط به نمونه نگهداری شده در نیتروژن مایع بود. نتایج این تحقیق می‌تواند برای پره‌های جدید پس از ریخته‌گری و همچنین تحت سرویس استفاده شود و به بهبود روند عملیات حرارتی کمک کند.

### واژه‌های کلیدی:

سوپر آلیاژ IN738LC،

عملیات حرارتی انحلال،

رسوبات  $\gamma'$ ،

سرعت سرد کردن،

صفر عمیق.

### ارجاع به این مقاله:

محسن سمیعی، سید حسین رضوی، زهراسادات سیدرئوفی، اثر سرد کردن و نگهداری زیر صفر عمیق بر ریزساختار و سختی سوپر آلیاژ ریختگی IN738LC پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی کامل، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار ۱۳۹۸، جلد ۳، شماره ۱، صفحات ۴۵-۵۲.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2019.184978.1081

### ۱- مقدمه

شرایط کاری دماهای بالا و تنش‌های نسبتاً زیاد سوپرآلیاژهای پایه نیکل پایدار سطحی بالایی دارند [۲]. اصلی‌ترین راه افزایش استحکام اکثر سوپرآلیاژها، توزیع رسوبات هم‌سیمی  $\gamma'$  با ترکیب  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  که در زمینه  $\gamma$  به صورت ذرات مکعبی ( $\gamma'$  اولیه) و کروی ( $\gamma'$  ثانویه) تشکیل می‌شوند، است. وجود این فاز علت اصلی مقاومت عالی سوپرآلیاژهای پایه نیکل در برابر گسیختگی و خزش است [۳، ۴]. یکی از پرکاربردترین سوپرآلیاژهای پایه نیکل، آلیاژ ریختگی IN738LC است. عملیات حرارتی رسوب‌سختی این آلیاژ شامل دو مرحله اصلی عملیات انحلال و پیرسازی است. عملیات انحلال به دو منظور انحلال فازهای رسوبی و همچنین همگن نمودن

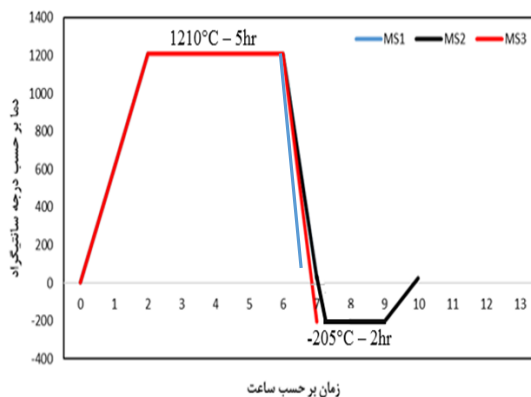
توربین‌های گازی از انواع تجهیزات تولید انرژی هستند که کاربرد زیادی در صنعت دارند. مهمترین کاربرد این تجهیزات در نیروگاه‌های برق، صنایع هوا فضا، دریانوردی و صنایع نفت (برای انتقال فرآورده‌های نفتی) است [۱]. پره‌های متحرک در توربین‌های گازی به دلیل دما و نیروهای گریز از مرکز زیاد دچار مشکلات زیادی می‌شوند. عوامل دیگری مثل خستگی کم‌دامنه، تنش‌های حرارتی و خستگی حرارتی نیز بر کاربرد پره‌ها تاثیر گذارند. از این رو، اغلب پره‌های متحرک توربین‌های گازی از جنس سوپر آلیاژهای پایه نیکل هستند. سوپرآلیاژها، مقاومت خوبی به خوردگی، اکسایش، خزش و شکست در دمای بالا دارند. در

به منظور بررسی اثر کوئنچ بعد از محلول‌سازی و زمان نگهداری در نیتروژن مایع بر تحولات ساختاری، نمونه‌ها در یک کوره باکسی مدل آمالگامز ساخت کشور ایران تحت گاز آرگون در دمای ۱۲۱۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۵ ساعت محلول‌سازی شدند که تصویر نمادین چرخه عملیات حرارتی در شکل (۱) نشان داده شده است. سپس نمونه‌ها در دو محیط هوا و نیتروژن مایع سرد شدند. یکی از نمونه‌های سرد شده در هوا، پس از هم‌دمایی به مدت دو ساعت در نیتروژن مایع نگهداری شد. به این نحو دو نمونه کوئنچ شده و یک نمونه نگهداری شده (سرد کاری شده) حاصل شد. در جدول (۲)، نام‌گذاری نمونه‌ها بر اساس شرایط مختلف سرد کردن ارائه شده است. برای هر حالت، یک نمونه جهت بررسی ریزساختاری انتخاب شد. مطالعات ریزساختاری نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی و سرد کردن، توسط SEM مدل VEGA/TESCAN ساخت کشور چک انجام شد. نمونه‌ها توسط محلول  $10\% \text{H}_3\text{PO}_4 + 90\% \text{H}_2\text{O}$  در زمان ۴ الی ۶ ثانیه تحت اختلاف پتانسیل ۳-۴۷ و شدت جریان  $120 \text{ mA/cm}^2$  مورد حکاکی الکتریکی قرار گرفتند [۱۲]. سختی‌سنجی نمونه‌ها توسط دستگاه کوپا مدل MH3 مطابق با استاندارد

ASTM E 82-16 تحت بار ۰/۱ کیلوگرم و زمان توقف ۱۵ ثانیه در مقیاس میکرو قبل و پس از محلول‌سازی انجام شد [۱۳]. برای اندازه‌گیری درصد حجمی و اندازه رسوب‌ها و نانورسوب‌ها از نرم‌افزار Clemex استفاده شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ IN738LC بر حسب درصد وزنی.

El.	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta
wt. %	Base	15.89	8.47	1.90	3.11	1.60
El.	Nb	Al	Ti	C	B	Zr
wt. %	0.88	3.19	3.10	0.13	0.02	0.09



شکل ۱- چرخه عملیات محلول‌سازی و سرد شدن.

ریزساختار از نظر توزیع عناصر آلیاژی انجام می‌شود. اگر عملیات انحلال در دمای بالا صورت گیرد به آن محلول‌سازی کامل یا همگن‌سازی می‌گویند. عملیات انحلال موجب کاهش جدایش‌های میکروسکوپی شده و به این طریق ریزساختار را همگن می‌کند [۸، ۷، ۶].

در خصوص تاثیر نرخ سرد کردن باید گفت که در سرعت‌های سردکردن بالا، احتمال وجود مرزهای دنداندار کمتر بوده اما ریزساختاری با رسوبات اولیه و ثانویه ریزتری ایجاد می‌کند. در حالی که سرعت‌های سرد کردن آرام‌تر، بوجود آمدن مرزهای دنداندار را ترغیب می‌کند و باعث بوجود آمدن رسوبات  $\gamma'$  درشت‌تری در ساختار می‌شود. دنداندهای ایجاد شده بر روی مرزدهانه‌ها از لغزش مرزها جلوگیری می‌کند و تغییر شکل درون دانه‌ای را فعال می‌کند و از انتشار ترک‌ها نیز جلوگیری می‌کند. در این میان، بهترین خصوصیات زمانی حاصل می‌شود که تعادل خوبی بین استحکام ناشی از رسوبات داخل دانه‌ای  $\gamma'$  و استحکام ناشی از مرزهای دنداندار حاصل می‌شود [۹]. شجری و همکاران [۱۰]، اثر محیط عملیات حرارتی انحلالی بر ریزساختار و سختی سوپر آلیاژ پایه نیکل IN738LC را مورد بررسی قرار داده‌اند که نتایج حاصل از آن نشان داد که با افزایش دما، زمان و نرخ گرمایش در انحلال، درصد حجمی رسوبات کاهش و پس از پیرسازی، افزایش می‌یابد.

یکی دیگر از راه‌های کنترل ساختار، استفاده از سردکاری عمیق است که به دلیل سرعت بالای سرد کردن فواصل اتمی در آن کاهش پیدا می‌کند. امینی و همکاران [۱۱]، تاثیر دمای عملیات زیر صفر بر ساختار و رفتار سایش فولاد سردکار ۱/۳۳۰۴ را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که در اثر آن سختی فولاد نسبت به عملیات حرارتی متداول افزایش یافته است.

در پژوهش حاضر، تاثیر زمان نگهداری در صفر عمیق بر ریزساختار و سختی نمونه‌ها در دو حالت قبل و بعد از نگهداری در زیر صفر عمیق، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۲- مواد و روش تحقیق

برای انجام این پژوهش از یک قطعه پره توربین گازی سوپر آلیاژ پایه نیکل IN738LC که شناسنامه‌ای از اطلاعات کاری آن وجود نداشت، استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ به وسیله طیف‌سنجی نشری نوری بر حسب درصد وزنی به دست آمد که نتایج آن در جدول (۱) نشان داده شده است. به این منظور، نمونه‌های مکعبی شکل به ابعاد ۵ میلیمتر با برش کاری به وسیله سیم با تخلیه الکتریکی آماده شدند.

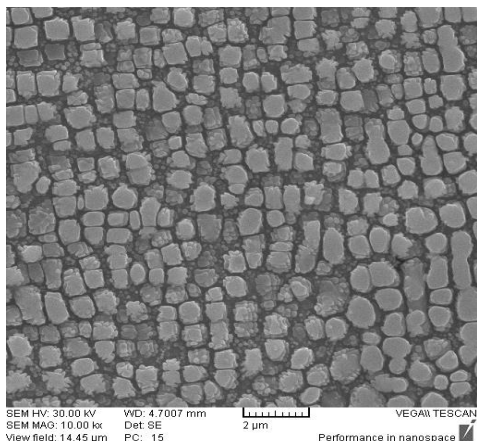
جدول ۲- نام‌گذاری نمونه‌ها بر اساس شرایط مختلف سرد کردن.

شرایط سرد شدن	شرایط انحلال	کد نمونه
---	بدون عملیات حرارتی (نمونه شاهد)	MS0
سرد شدن در هوا	۱۲۱۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ ساعت	MS1
سرد شدن در هوا سپس سرد شدن در نیتروژن مایع به مدت ۲ ساعت	۱۲۱۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ ساعت	MS2
سرد شدن در نیتروژن مایع	۱۲۱۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ ساعت	MS3

### ۳- نتایج و بحث

شکل (۲)، ریزساختار نمونه MS0 را نشان می‌دهد که در آن درصد حجمی بسیار زیادی از رسوبات  $\gamma'$  به صورت توده‌های فشرده و کشیده مشاهده می‌شود. با قرار گرفتن پره توربین در شرایط کاری به علت قرار گرفتن قطعه کار در دمای بالا و زمان طولانی، شرایط برای نفوذ مهیا می‌شود که در نتیجه رسوبات اولیه با مورفولوژی مکعبی با مصرف شدن رسوبات ریز، درشت می‌شوند و مورفولوژی آن‌ها از مکعبی به کروی تغییر شکل می‌دهند. رسوبات کروی شده پس از گذشت زمان عموماً در جهت اعمال تنش رشد می‌کنند (رشد ترجیحی)، بدین نحو که از کروی به شبه کروی، از شبه کروی به بیضی، از بیضی به بیضی کشیده و در نهایت به صورت الواری در می‌آیند. این تحولات مورفولوژیکی، افت استحکام و مقاومت در برابر گسیختگی را در پی دارد [۱۵، ۱۴]. پس با توجه به ریزساختار نمونه MS0 و نکات ذکر شده، می‌توان گفت که پره مورد استفاده از نوع کارکرده است که مدت قابل توجهی از ساعت کاری نگذشته یا ساختار از پایداری بالایی در برابر تحولات برخوردار بوده است.

در عملیات انحلالی چه در دماهای بالا و چه در دماهای پایین، انحلال از گوشه‌های رسوبات  $\gamma'$  اولیه مکعبی شکل آغاز می‌شود و گوشه‌ها گرد می‌شوند و تا کروی شدن رسوبات این روند ادامه پیدا می‌کند. تنش سطحی رسوبات کروی کوچک‌تر از تنش سطحی رسوبات مکعبی شکل است لذا رسوب تمایل به ایجاد شکل کروی دارد. این اتفاق برای هر دو اندازه رسوب مشاهده می‌شود. کروی شدن و کوچک شدن رسوبات  $\gamma'$  گاهی تا از بین رفتن کلی رسوبات و ایجاد محلول جامد فوق‌اشباع ادامه می‌یابد. این شرایط تا جایی ادامه دارد که تعادل بین اجزا در شرایط ترمودینامیکی حاکم، برقرار شده و پس از آن تغییر محسوسی در کسر حجمی و اندازه رسوبات اتفاق نیفتد [۱۶-۱۸]. یعنی با برقرار شدن تعادل میان ترسیب در حین انحلال و از بین رفتن رسوبات پس از صرف زمانی مشخص، دیگر تغییری در کسر حجمی و گاهی اندازه رسوبات  $\gamma'$  دیده نمی‌شود [۱۰].



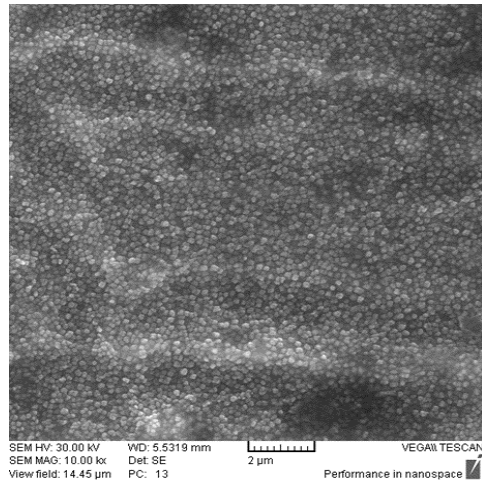
شکل ۲- تصویر SEM نمونه قبل از عملیات حرارتی آنیل انحلالی.

با توجه به نظریه اسوالد [۱۹] جریان نفوذی از ذرات ریز به سمت ذرات درشت، منجر به درشت‌شدن می‌شود و با کاهش انرژی آزاد سیستم، رشد  $\gamma'$  با مصرف  $\gamma'$ های کوچک‌تر آغاز می‌شود. حین سرویس یا عملیات حرارتی در درجه حرارت‌های بیش از  $0.6 T_m$  رسوبات درشت شده و در نتیجه این فرآیند خم شدن نابجایی‌ها از بین رسوبات راحت‌تر می‌شود. درشت شدن رسوبات و حرکت راحت‌تر نابجایی‌ها باعث افت استحکام خزشی می‌شود. هرگاه فصل مشترک یک ذره در فاز زمینه دارای انحنا باشند (یعنی تخت نباشند)، در این صورت، حلالیت این ذره متناسب با انحنای آن ( $1/R$ ) بیش از حالت تعادلی است. در حالت تعادلی، فصل مشترک تخت و در نتیجه، انحنا خیلی کم است ( $1/R \rightarrow 0$ ). ذرات کوچک‌تر دارای حلالیت بیشتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر هستند. بنابراین در دستگاه‌های حاوی ذرات با اندازه‌های مختلف، به دلیل حلالیت بیشتر عناصر، در اطراف ذرات کوچک غلظت عناصر انحلالی بیش از غلظت عناصر در اطراف ذرات بزرگ‌تر است. عناصر حل شده از سمت ذرات کوچک‌تر به سمت ذرات بزرگ نفوذ کرده، ذرات کوچک، کوچک‌تر و ذرات بزرگ، بزرگ‌تر می‌شوند. فرآیند اخیر، درشت شدن ذرات (رشد تحت فرآیند اوستوالد) نامیده می‌شود. در نتیجه درشت شدن، میانگین اندازه ذرات افزایش و تعداد ذرات کاهش پیدا می‌کند [۲۰، ۱۰].

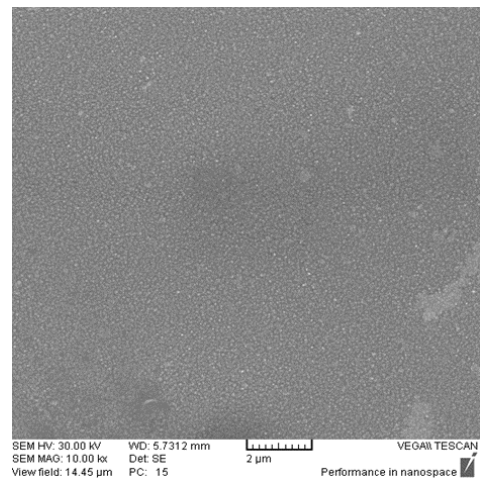
مورفولوژی‌های مختلف نیست که بر جهت رشد رسوبات  $\gamma'$ ، مورفولوژی آنها و خواص ناشی از آنها اثر گذار است [۲۱]. مقایسه تصویر شکل (۳) و تصویر شکل (۲) که مربوط به قبل از عملیات حرارتی است، نشان‌دهنده کاهش اندازه و کسر حجمی ذرات  $\gamma'$  است. به این صورت که رسوبات  $\gamma'$  خشن با قرار گرفتن در دمای ۱۲۱۰ درجه سانتیگراد در زمینه انحلال پیدا می‌کنند و با کاهش اندازه  $\gamma'$ ، ریزساختاری به صورت یک شکل با ذرات  $\gamma'$  کروی ایجاد می‌شود. در یک انحلال با دما و زمان یکسان، اندازه رسوبات حاصل از سرد کردن در هوا، کوچک‌تر است و رسوبات تقریباً کروی شکل هستند. با توجه به شکل، سرعت سرد کردن بر تعداد، اندازه و مورفولوژی رسوبات اثرگذار است. با کاهش سرعت سرد کردن، تحت تبرید کم شده و در نتیجه انرژی آزاد شیمیایی برای تشکیل رسوبات کاهش می‌یابد. به این ترتیب، اندازه جوانه بحرانی بزرگ‌تر شده و سد انرژی فعال‌سازی در برابر هسته‌گذاری بیشتر می‌شود. بنابراین رسوبات کمتری شانس تشکیل خواهند داشت. پس تعداد رسوباتی که جوانه می‌زنند کم و فاصله بین آنها زیاد است [۲۲-۲۴].

شکل (۴)، ریزساختار نمونه MS2 پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی و سرد شدن در هوا سپس نگهداری در نیتروژن مایع را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اندکی مکث سپس سرد کردن و نگهداری در نیتروژن مایع سبب کاهش درصد کسر حجمی و اندازه رسوبات  $\gamma'$  می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندکی مکث سبب جوانه‌زنی رسوبات شده و سپس سرد کردن در نیتروژن مایع سبب کاهش اندازه و کسر حجمی رسوبات شده است.

شکل (۵)، ریزساختار نمونه MS3 پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی و سرد شدن در نیتروژن مایع را نشان می‌دهد. همان‌طور که از مقایسه تصویر شکل (۵) با تصویر شکل (۴) مشخص است کسر حجمی و اندازه رسوبات در نمونه MS3 نسبت به MS2 کاهش یافته است. به دلیل اینکه اختلاف پارامتر شبکه  $\gamma$  و  $\gamma'$  کمتر از ۱٪ است و رسوبات  $\gamma'$  خیلی سریع و راحت جوانه‌زنی و رشد کرده و همچنین به دلیل فوق‌اشباع زیاد و در نتیجه نیروی محرکه بالای تشکیل رسوب، حتی با سرد کردن بسیار سریع نیز رسوباتی در زمینه تشکیل شده است و از آنجایی که در سرعت سرد کردن‌های بسیار بالا به جهت کاهش فواصل بین اتمی، فرصت کافی برای نفوذ و رشد رسوبات وجود ندارد؛ کسر حجمی و اندازه رسوبات کاهش می‌یابد [۲۵، ۲۶].



شکل ۳- تصویر SEM نمونه پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی و سرد کردن در هوا.

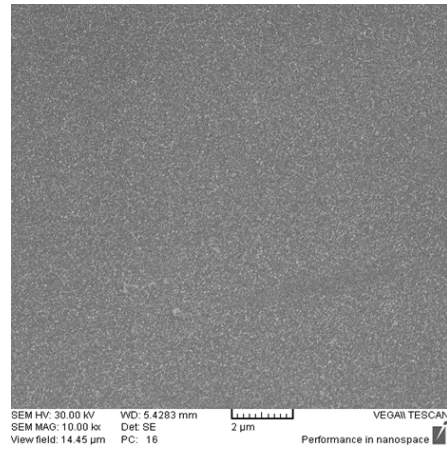


شکل ۴- تصویر SEM نمونه پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی و سرد کردن در هوا و سپس در نیتروژن مایع.

شکل (۳)، ریزساختار نمونه MS1 پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی و سرد شدن در هوا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کسر حجمی و اندازه رسوبات نمونه MS1 نسبت به نمونه MS0 کاهش پیدا کرده است. در حین سرد شدن در هوا به دلیل آن که فرصت کافی برای تشکیل رسوبات فراهم نشده است، رسوبات دارای کسر حجمی کمتر و اندازه رسوبات کوچک‌تر نسبت به نمونه MS0 هستند. به‌طور کلی، انرژی فصل مشترک فازهای  $\gamma/\gamma'$  و کرنش الاستیکی حاصل از میزان عدم انطباق شبکه‌های کریستالی  $\gamma/\gamma'$  بر مورفولوژی فاز  $\gamma'$  تأثیر می‌گذارند. مهمترین اثر عملیات حرارتی انحلالی، حل کردن  $\gamma'$  بزرگی است که در طول سرد شدن بعد از انجماد تشکیل می‌شوند. این رسوبات با سرد شدن از دمای انحلال، مجدد با ابعادی ریزتر پدید می‌آیند. هر کدام از مورفولوژی‌های فاز  $\gamma'$ ، حاصل عملیات حرارتی خاصی است و خواص منحصر به فردی را به دنبال دارند و این موضوع بی‌ارتباط با فاکتور عدم انطباق

کسر حجمی کلی در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در مقایسه با پره کارکرده به علت عملیات حرارتی آنیل انحلالی کامل، کاهش یافته است. با افزایش نرخ سرمایش، کسر حجمی رسوبات کوچک افزایش پیدا کرده است. در واقع رسوبات بزرگ با عملیات حرارتی آنیل انحلالی کامل به رسوبات کوچک تجزیه شده است و نمونه سرد شده در محیط نیتروژن مایع دارای کمترین کسر حجمی کلی و کوچک‌ترین اندازه رسوبات است [۱۰].

در اکثر سوپرآلیاژهای پایه نیکل، افزایش سختی از طریق رسوب‌سختی و توزیع رسوبات بین‌فلزی و کوهنت  $\gamma'$  در زمینه پدید می‌آید. با برخورد نابجایی‌ها با رسوبات و دیگر عیوب ساختاری، سختی این سوپرآلیاژها افزایش پیدا می‌کند. اندازه‌ی ذرات  $\gamma'$  تاثیر زیادی بر اندرکنش با نابجایی‌ها و افزایش سختی دارد [۳۳، ۳۲]. اگر این رسوبات، بزرگ‌تر از حد لازم باشند، آنگاه نابجایی‌ها با جفت‌شدن قوی، ذرات را برش داده که با کاهش سختی همراه است. اما اگر رسوبات  $\gamma'$  کوچک‌تر از حد مجاز باشند، آنگاه نابجایی‌ها با جفت‌شدن ضعیف از آنها عبور می‌کنند. در عملیات انحلال با کاهش کسر حجمی و اندازه رسوبات  $\gamma'$  سختی کاهش می‌یابد و نرخ کاهش سختی با افزایش دما و زمان انحلال افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۶)، مشاهده می‌شود که سختی نمونه‌ها در عملیات حرارتی آنیل انحلالی کامل به دلیل حل شدن رسوبات نسبت به نمونه کارکرده روند کاهشی دارد. از آنجایی که کسر حجمی و اندازه رسوبات در نمونه کارکرده نسبت به نمونه‌های همگن‌شده کاهش پیدا کرده است، می‌توان نتیجه گرفت که سختی نمونه‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند. با توجه به جدول (۳)، با افزایش نرخ سرمایش، رسوبات اولیه بزرگ مشاهده نمی‌شود، همچنین اندازه رسوبات اولیه کوچک، کاهش یافته است. با توجه به این نکته، می‌توان چنین عنوان کرد که انحلال به‌طور کامل انجام شده است و اثری از رسوبات بزرگ دیده نمی‌شود. با افزایش سرعت سرد کردن، به دلیل



شکل ۵- تصویر SEM نمونه پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی و سرد کردن در نیتروژن مایع.

کسر حجمی  $\gamma'$  تابعی از ترکیب شیمیایی است ولی در مرحله پیرسازی دمای رسوب گذاری و انحلال قبلی نیز بر روی اندازه  $\gamma'$  اثر می‌گذارند. در صورتی که همه رسوب‌های  $\gamma'$  حل شوند، در رسوب مجدد با افزایش زمان، کسر حجمی  $\gamma'$  و اندازه آن افزایش می‌یابد. در این صورت، ابتدا استحکام سوپرآلیاژ که با مقدار و اندازه رسوب مرتبط است، افزایش یافته و سپس مقدار آن افت خواهد کرد. در یک ترکیب شیمیایی ثابت، اندازه رسوب  $\gamma'$  تابعی از دما و زمان است [۲۸، ۲۷]. در جدول (۳)، مشخصات رسوبات  $\gamma'$  قبل و بعد از عملیات حرارتی آنیل انحلالی آورده شده است. دانسیته عددی رسوبات افزایش و اندازه آنها کاهش پیدا می‌کند [۳۰، ۲۹]. از طرف دیگر افزایش دانسیته عددی رسوبات  $\gamma'$  با سرعت سرد کردن نشان می‌دهد که تجزیه فاز  $\gamma'$  تحت اختلاف دمایی بسیار بالا اتفاق می‌افتد. تحت اختلاف دمایی بسیار بالا و زیر دمای ناپایداری تعادلی، نیروی محرکه برای جوانه‌زنی فاز  $\gamma'$  به سرعت افزایش می‌یابد و در نتیجه سرعت جوانه‌زنی رسوبات  $\gamma'$  در واحد افزایش پیدا می‌کند. در این صورت، در سرعت سرد کردن خیلی بالا، به دلیل نبود زمان کافی، نرخ رشد رسوبات کاهش می‌یابد در نتیجه کوچک‌ترین اندازه رسوبات مربوط به محیط نیتروژن است [۳۱].

جدول ۳- مشخصات رسوبات  $\gamma'$  قبل و بعد از عملیات حرارتی آنیل انحلالی.

کد نمونه	درصد حجمی کلی $\gamma'$	درصد حجمی نانو رسوبات	درصد حجمی رسوبات بزرگ	اندازه رسوبات کوچک (nm)	اندازه رسوبات بزرگ ( $\mu\text{m}$ )
MS0	۸۹/۴	۱۴/۸	۷۴/۶	۱۸۰	۱/۷
MS1	۸۶/۰۲	۸۶/۰۲	-	۱۲۵	-
MS2	۸۵/۱۹	۸۵/۱۹	-	۱۱۷	-
MS3	۸۱/۱۱	۸۱/۱۱	-	۷۶	-

۶- نگره‌داری نمونه‌ها در نیتروژن مایع، سبب کاهش نامحسوس اندازه و کسر حجمی رسوبات شد. به نظر می‌رسد که سردایش و نگره‌داری در زیر صفر عمیق به جهت افزایش انرژی سیستم و کاهش فواصل بین اتمی و ضریب نفوذ نقش به‌سزایی در مرحله پیرسازی داشته باشد.

۷- افزایش فوق‌اشباع از طریق فوق سردایش پس از عملیات انحلال، می‌تواند از طریق کاهش سد انرژی رسوب‌گذاری سبب کاهش دما و زمان پیرسازی شود.

### تقدیر و تشکر

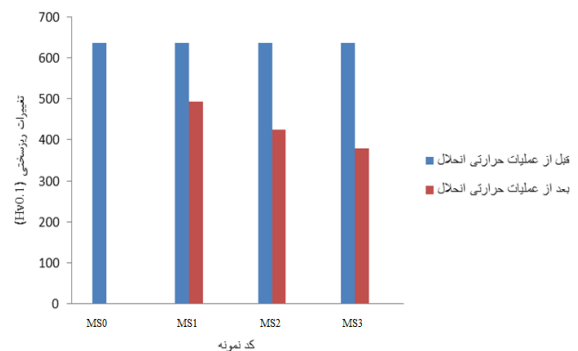
نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از زحمات آقای مهندس یزدان شجری به جهت مساعدت سخاوتمندانه ایشان در نگارش این مقاله تشکر به عمل آورند.

### مراجع

- [1] Colxn H., Roge G.F.C., Gas Turbine Theory, Longman Scientific and Technical, 1987.
- [2] Donachei M.J., Donachei S.J. Superalloys: A Technical Guide, Materials Park, OH, ASM International, 2002, 153-160.
- [3] Stoloff N.S., Fundamentals of Strengthening Superalloys II, John Wiley & Sons, 1967, 61-96.
- [4] Ross E.W., Sims C.T., Nickel-Base Superalloys Superalloys II, John Wiley & Sons, 1987, 97-133.
- [6] Shaw S.W.K., Response of IN939 to process variations, superalloys, in Superalloys 1980, (ed. J. K. Tien et al.) ASM, 1980, 275-284.
- [7] Delargy K.M., Shaw S.W.K., Smith G.D.W., Effects of heat treatment on mechanical properties of high-chromium nickel-base superalloy IN939, Materials Science and Technology, 1986, 2, 1031-1037.
- [8] Svensson I.L., Dunlop G.L., Growth of intergranular creep cavities, International Metals Reviews, 1981, 26(2) 109-131.
- [9] Baldan A., Rejuvenation procedures to recover creep properties of nickel-base superalloys by heat treatment and HIP techniques, Journal of Materials Science, 1991, 26(13) 3409-3421.
- [۱۰] شجری ی.، رضوی س.ح.، سیدرئوفی ز.س.، اثر محیط عملیات حرارتی انحلالی بر ریزساختار و سختی سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC، پژوهشنامه ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۲(۳)، ۱۶۱-۱۷۹.
- [۱۱] امینی ک.، ناطق س.، سفیعی ع.، رضائیان ا.، تاثیر دمای عملیات زیر صفر بر ساختار و رفتار سایش فولاد سردکار ۱/۲۳۰۴، علوم و مهندسی سطح، ۱۳۹۰، ۱۱، ۱۱-۲۴.
- [12] Khodabakhshi A., Mashreghi A., Shajari Y., Razavi S. H., Investigation of microstructure properties and quantitative metallography by different etchants in the service-exposed nickel-based superalloy turbine blade, Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71(4) 849-859.
- [13] E92-16, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, ASTM, Feb 2016.
- [14] Tawancy H., Al-Hadhrami L., On the service performance of refurbished turbine blades in a power station, in ASME Turbo Expo 2008: Power for land, sea, and air, 2008, American Society of Mechanical Engineers, 2008.

عدم زمان کافی برای تشکیل رسوبات و کاهش اندازه رسوبات سختی نمونه MS1 نسبت به نمونه MS0 کاهش یافته است. سختی نمونه MS1 نسبت به MS2 افزایش یافته است که دلیل این امر، بزرگ بودن اندازه رسوبات نمونه MS1 به دلیل سرد شدن نمونه در هوا است.

در نمونه MS2 اندکی مکث در هوا، باعث رشد بیشتر رسوبات شده و در نمونه MS3 به دلیل سرد شدن در دمای بسیار پایین (نیتروژن مایع)، زمان کافی برای رشد رسوبات وجود ندارد. در نتیجه سختی نمونه MS3 نسبت به MS2 کمتر است. لذا نمونه MS3 پس از انحلال کامل، دارای کمترین مقدار ریزسختی بین نمونه‌ها است که این امر در مجموع ناشی از نرخ سرمایش بالا و نبود زمان کافی برای رشد رسوبات اولیه است [۳۴-۳۷].



شکل ۶- تغییرات ریزسختی قبل و بعد از عملیات حرارتی آنیل انحلالی کامل.

### ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- با انجام عملیات حرارتی انحلالی کامل در دمای ۱۲۱۰ درجه سانتیگراد و زمان ۵ ساعت، انحلال به صورت کامل صورت می‌پذیرد.
- ۲- پس از محلول‌سازی و سردایش در نرخ سرمایش بالا، از آنجایی که رسوبات با ابعاد بزرگ مشاهده نمی‌شود، پس انحلال رسوبات مناسب است و سرعت سرد کردن بالا سبب عدم جوانه‌زنی رسوبات سرمایشی در حین سرد شدن می‌شود.
- ۳- با انحلال رسوبات، سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. پس از محلول‌سازی، هر چه اندازه رسوبات  $\gamma'$  بزرگ‌تر باشد، سختی بیشتر می‌شود.
- ۴- به دلیل نرخ سرمایش بالا و عدم فرصت کافی برای رشد و جوانه‌زنی رسوبات، نمونه MS3 دارای رسوبات ریزتری نسبت به باقی نمونه‌ها است.
- ۵- با افزایش سرعت سرد کردن، رسوبات با اندازه متوسط از بین می‌روند و فقط رسوبات نانومتری باقی می‌مانند.

- [27] Betteridge W., Franklin A.W., The effect of heat treatment and structure on the creep and stress rupture properties of Nimonic 80A, *Journal of the Institute of Metals*, 1975, 85, 473-479.
- [28] MacKay R.A., Dreshfield R.L., Maier R.D., Anisotropy of Nickel-base superalloy single crystals, in *Proceedings of the 4th International Symposium for Superalloys*, Seven Springs, Champion, 1982.
- [29] Grosdidier T., Hazotte A., Simon A., Precipitation and dissolution processes in  $\gamma/\gamma'$  single crystal nickel-based superalloys, *Materials Science and Engineering A*, 1998, 256, 183-196.
- [30] Mackay R.A., Ebert L.J., *Superalloys 1984*, Proceedings of 5th International conference on Superalloys, Gell M., AIME, New York, 1984, 135-138.
- [31] Mackay R.A., Nathal M.V., in *MICON86: Optimization of processing, properties and service performance through microstructure control*, ASTM STP 979, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1988, 222-221.
- [32] Wangyao P., Krongtong V., Tuengsook P., Hormkrajai W., Panich N., The relationship between reheat-treatment and hardness behaviour of cast nickel superalloy GTD-111, *Journal of Material and Mineral*, 2006, 16(1) 55-62.
- [33] Yun H.S., Park J.S., An S.U., Kim J.M., Effect of heat treatment on the microstructural characteristics of IN738 turbine blade, *Materials Science Forum*, 2011, 695, 405-408.
- [34] Porter D.A., Easterling K.E., *Phase Transformations in Metals and Alloys*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 1992.
- [35] Razavi S.H., Mirdamadi Sh., Arabi H., Szpunar J., An Improved Method for Age Hardening of Superalloy, US. Provisional Patent, No. 60/309,610., 2001.
- [36] Razavi S.H., Mirdamadi Sh., Szpunar J., Arabi H., Improvement of age Hardening Process of a Nickel-Base Superalloy, IN-738LC, By Induction Aging, *Materials Science*, 2002, 37, 1461-1471.
- [۳۷] شجری ی.، بررسی اثر شرایط انحلال بر ریزساختار نهایی حاصل از پیرسازی سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، ۱۳۹۵.
- [15] Wang J., Zhou L., Qin X.Z., Sheng L.Y., Primary MC decomposition and its effects on the rupture behaviors in hot-corrosion resistant Ni-based superalloy K444, *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 553, 14-21.
- [16] Monajati H., Jahazi B.M., Bahrami R., Yuec S., The influence of heat treatment conditions on  $\gamma'$  characteristics in Udimet (R) 720, *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 373 (1-2) 286-293.
- [17] Ojo O.A., Richards N.L., Chaturvedi M.C., Contribution of constitutional liquation of gamma prime precipitate to weld HAZ cracking of cast Inconel 738 superalloy, *Scripta Materialia*, 2004, 12(1) 641-646.
- [18] Aiming Y., Yuhua X., Lin L., Effect of cooling rate on the morphology of  $\gamma'$  precipitates in a nickel-base superalloy under directional solidification, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2001, 2(1) 105-107.
- [19] Shibata T., et al., Effect of stabilizing treatment on precipitation behavior of alloy 706 superalloys, *Proceeding of The Minerals, Metals and Materials Society*, 1996, 627-636.
- [20] Ges A., Fornaro O., Palacio H., Long term coarsening of  $\gamma'$  precipitates in a Ni-base superalloy, *Journal of Materials Science*, 1997, 32(14) 3687-3691.
- [21] Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C., *Superalloys II*, John Wiley & Sons, Chapter 7, 1987.
- [22] Donachie M.J., Donachie S.J., *Superalloys: A Technical Guide*, 2th Ed., ASM International, Materials Park OH, 2002.
- [۲۳] ساری صراف ا.، دیگران.، بررسی ریزساختاری پارامترهای موثر بر انحلال فاز  $\gamma'$  در سوپرآلیاژ IN738LC، دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ایران و جامعه ریخته‌گران ایران، کرج، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، ۱۳۸۷.
- [24] Saladi S., Menghani J.V., Prakash S., Characterization and evaluation of cyclic hot corrosion resistance of detonation-gun sprayed Ni-5Al coatings on Inconel-718, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, 24, 778-788.
- [25] DuPont J.N., Lippold J.C., Kiser S.D., *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009.
- [26] Baldan A., Rejuvenation procedures to recover creep properties of nickel-base superalloys by heat treatment and hot isostatic pressing techniques, *Journal of Materials Science*, 1991, 26, 3409-3421.

IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

*Research Paper:*

### The Effect of Cooling Rate and Cryogenic Treatment on Microstructure and Hardness of IN738LC Cast Superalloy after Full Solution Annealing

Mohsen Samiee<sup>1</sup>, Seyed Hossein Razavi<sup>2\*</sup>, Zahra Sadat Seyedraoufi<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University Karaj, Iran.

2. Associate Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Materials Engineering Karaj Branch, Islamic Azad University Karaj, Iran.

\* Corresponding Author: P.O. Box 16846-13114, Narmak, Tehran, Iran. Tel: +98 21 77240540/ Fax: +98 21 77240480.

#### Paper history:

Received: 09 May 2019

Accepted: 01 June 2019

#### Keywords:

IN738LC superalloy,  
Solution heat treatment,  
 $\gamma'$  precipitates,  
Cooling rate,  
Deep zero.

#### Abstract:

In this study, IN738LC super alloy samples were solutionized at 1210 °C for 5 hours. After solutionizing, the samples were cooled in both air and liquid nitrogen. One of the air-cooled samples after reaching the room temperature was stored in liquid nitrogen for 2 hours. To investigate the effects of high cooling rate and sub-zero operations on the microstructure and hardness, the samples were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and hardness test. Deeper sub-zero operations reduced the size of the sediment to 117 nm. While cooling in liquid nitrogen reduced the size of the sediment to 76 nm. This suggests that the cold weather in the air has provided the opportunity for growth to precipitate. By increasing cooling rate and keep at deep zero, the hardness of the samples decreased, so that the minimum hardness was related to the sample stored in liquid nitrogen. The results of this research can be applied to new blades after casting and also under service and to help improve the heat treatment process.

#### Please cite this article using:

Mohsen Samiee, Seyed Hossein Razavi, Zahra Sadat Seyedraoufi, The Effect of Cooling Rate and Cryogenic Treatment on Microstructure and Hardness of IN738LC Cast Superalloy after Full Solution Annealing, in Persian, Founding Research Journal, 2019, 3(1) 45-52.

DOI: 10.22034/FRJ.2019.184978.1081

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)