



## پژوهش نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

### اثر زمان نگهداری مذاب بر رسوبات $\gamma'$ و خواص تنش-گسیختگی سوپر آلیاژ Rene 80

سعید کوهی فایق دهکردی<sup>۱</sup>، معصومه سیفاللهی<sup>۲\*</sup>، سید مهدی عباسی<sup>۳</sup>، سید مهدی قاضی میرسعید<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد متالورژی، پژوهشکده مواد - دانشگاه صنعتی مالکاشتر،

۲- استادیار پژوهشکده مواد - دانشگاه صنعتی مالکاشتر،

۳- دانشیار پژوهشکده مواد - دانشگاه صنعتی مالکاشتر،

۴- کارشناس ارشد متالورژی، پژوهشکده مواد - دانشگاه صنعتی مالکاشتر،

\* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۱-۲۲۹۴۵۱۴۱، تهران، لویزان، صندوق پستی: ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵، ایمیل: m\_seifollahi@mut.ac.ir

#### چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱

در این پژوهش، تأثیر زمان نگهداری مذاب (۳ و ۲۰ دقیقه) در بوته آلومینایی و در کوره ذوب القایی تحت خلأ (VIM) بر میزان گازها، رسوبات  $\gamma'$  و خواص تنش-گسیختگی آلیاژ بررسی شده است. آنالیز ترکیب شیمیایی و گازهای اکسیژن و نیتروژن و ارزیابی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد و در نهایت رفتار تنش-گسیختگی در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته از ۳ به ۲۰ دقیقه، مقدار اکسیژن مذاب در اثر واکنش احیایی با بوته، از ۹۶ به ۱۶۵ppm افزایش می‌یابد. همچنین کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  پس از پیرسازی نهایی به دلیل کاهش مقدار آلومینیم در اثر واکنش با اکسیژن و تبخیر آن به میزان ۹٪ (از ۴۶٪ به ۳۷٪) نسبت به مقدار اولیه کاهش یافته و مورفولوژی آنها از شبه مکعبی به کامل مکعبی تغییر می‌یابد. نتایج خواص تنش-گسیختگی حاکی از کاهش عمر گسیختگی آلیاژ از ۲۲/۶ به ۱۹ ساعت، با افزایش زمان نگهداری مذاب است.

#### واژه‌های کلیدی:

زمان نگهداری مذاب،

کوره VIM،

رسوبات  $\gamma'$ ،

تنش-گسیختگی،

سوپر آلیاژ Rene 80

#### ارجاع به این مقاله:

سعید کوهی فایق دهکردی، معصومه سیفاللهی، سید مهدی عباسی، سید مهدی قاضی میرسعید، اثر زمان نگهداری مذاب بر رسوبات  $\gamma'$  و خواص تنش-گسیختگی سوپر آلیاژ Rene 80، پژوهش نامه ریخته‌گری، بهار ۱۳۹۸، جلد ۳، شماره ۱، صفحات ۲۹-۳۶.

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/FRJ.2019.176467.1074

#### ۱- مقدمه

سفر نیز به صورت ناخواسته در ترکیب وجود دارند که باید به حداقل (در حد چند ppm) برسند [۴،۳]. آلیاژسازی و ذوب مجدد این آلیاژ در کوره القایی تحت خلأ انجام می‌شود. واکنش نسوزهای مورد استفاده جهت ریخته‌گری سوپر آلیاژها تا حدی باعث آلودگی مذاب می‌شود. همچنین بوته باعث ایجاد درصد بالایی از آخال‌های اکسیدی در سوپر آلیاژهای پایه نیکل می‌شوند که مقدار و نوع آن به نوع بوته (آلومینا، زیرکونیا، منیزیا و ...) بستگی دارد. اکسیژن می‌تواند در اثر تجزیه بوته به مذاب وارد شده و با عناصر فعال مذاب مانند آلومینیم واکنش داده و ایجاد آخال  $Al_2O_3$  کند [۷-۵]. عواملی همچون میزان خلأ، زمان نگهداری مذاب در بوته، دمای ذوب، هم‌زدن

سوپر آلیاژ Rene 80، یک آلیاژ پایه Ni-Cr-Co ریخته‌گری است که به علت وجود عناصر آلومینیم و تیتانیوم در آن، فاز  $\gamma'$  به عنوان فاز رسوب سخت‌کننده تشکیل می‌شود. عناصر آلیاژی آلومینیم و تیتانیوم در حدود ۸ درصد وزنی آلیاژ را تشکیل می‌دهند که سبب تشکیل حدود ۴۸ درصد حجمی رسوبات  $\gamma'$  در آلیاژ و افزایش خواص استحکام دما بالا می‌شود [۱]. در این آلیاژ با حضور عنصر کروم، خواص مقاومت به اکسیداسیون حاصل شده و باعث ایجاد کاربیدهای  $M_{23}C_6$  می‌شود [۲]. همچنین عناصر کاربیدساز تنگستن، تیتانیوم، مولیبدن و کروم باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شوند. عناصر مضر مانند اکسیژن، نیتروژن، گوگرد و

(آنیل انحرالی در  $1204^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت، پیرسازی اولیه در  $1093^{\circ}\text{C}$  به مدت ۴ ساعت، پایداری سازی به مدت ۴ ساعت در  $1054^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد، پیرسازی در  $873^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۶ ساعت و سپس سرمایش در هوا تا دمای اتاق) بر روی شمش‌ها طبق سیکل استاندارد جنرال الکتریک [۱۷] صورت گرفت. بررسی‌های ریزساختاری پس از پیرسازی اولیه و ثانویه با میکروسکوپ نوری (OM) مدل Olympus BX51 و SEM مدل Vega3//Tescan ساخت کشور چک مجهز به آنالیزگر EDS مدل Rontec انجام شد. از محلول اچ ماربل برای بررسی‌های ریزساختاری مطابق با استاندارد ASTM E407-99 [۱۸] مورد استفاده قرار گرفت. استخراج فازی مطابق با استاندارد ASTM E963-95 [۱۹] با چگالی جریان  $0/1$  آمپر بر سانتی‌متر مربع و محلول  $10\%$  متانول-هیدروکلریک انجام شد. نوع و مقدار فازهای استخراج شده به روش آنالیز تفرق پرتو ایکس (XRD) توسط دستگاه مدل Equinox 6000 با آند مسی و ولتاژ  $40\text{kv}$  در محدوده زوایای  $5-90$  درجه انجام شد. نمونه‌های تنش-گسیختگی بر طبق استاندارد ASTM E21 [۲۰] آماده و آزمون در دمای  $980$  درجه سانتی‌گراد و تنش  $191$  مگاپاسکال انجام شد. قبل از انجام آزمون تنش-گسیختگی، نمونه‌ها توسط دستگاه اشعه از لحاظ آخال اکسیدی و عیوب ریخته‌گری کنترل شدند.

### ۳- نتایج و بحث

در جدول (۱)، نتایج ترکیب شیمیایی شمش اولیه و شمش‌های ذوب مجدد شده با زمان نگهداری مذاب ۳ و ۲۰ دقیقه که به روش کوانتومتری تعیین شده و همچنین شرایط استاندارد، آورده شده است.

با افزایش زمان نگهداری مذاب، میزان کربن و آلومینیم به ترتیب از  $0/191$  و  $2/94$  در شمش اولیه به  $0/157$  و  $2/92$  در ۳ دقیقه و  $0/098$  و  $2/80$  در ۲۰ دقیقه کاهش یافته است. کاهش عناصر موجود در ترکیب شیمیایی در اثر افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته، ناشی از تبخیر و خارج شدن آن از ترکیب مذاب به صورت تبخیر و یا واکنش با اکسیژن و تبدیل به آخال اکسیدی در مورد آلومینیم و همچنین واکنش با اکسیژن در مورد کربن است. کربن با اکسیژن ترکیب شده و به صورت گاز CO خارج می‌شود. به این ترتیب با افزایش زمان نگهداری مذاب، از میزان کربن و آلومینیم شمش کاسته شده است. اکسیژن مورد نیاز برای انجام این واکنش می‌تواند از سه منبع مواد اولیه، محفظه‌ی کوره و یا اکسیژن حاصل از احیا ماده‌ی اکسیدی بوته تأمین شود. با توجه به ذوب‌گیری در خلأ و اصل لوشاتلیه، واکنش‌هایی که حاصل آن

مذاب و ترکیب شیمیایی روی واکنش مذاب و بوته تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال، با افزایش دما و زمان، واکنش مذاب و بوته افزایش خواهند یافت [۱۰، ۹، ۸]. زمان‌های نگهداری طولانی‌تر علاوه بر کاهش بیشتر برای حذف نیتروژن، می‌تواند سبب تحلیل بوته و ایجاد آلودگی در مذاب از طریق سایش بوته شود. همچنین نیتروژن‌زدایی از مذاب بستگی به میزان عناصر فعال مانند گوگرد و اکسیژن دارد. نیتروژن‌زدایی از مذاب در آلیاژهایی که دارای میزان بالای عناصر گوگرد و اکسیژن و عناصری مانند آلومینیم، تیتانیوم و کروم هستند، مشکل است. این عناصر باعث کاهش اکتیویته نیتروژن می‌شوند. همچنین گزارش شده که با افزایش زمان نگهداری مذاب، با توجه به واکنش‌های مذاب و تشکیل برخی فازها نظیر کاربیدها، فاصله بازوهای دندریتی افزایش و فاز  $\gamma'$  در ناحیه بین دندریتی درشت شده است [۱۳-۱۱]. با توجه به گستردگی ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene 80 و همچنین متفاوت بودن درصد کربن و آلومینیم نسبت به دیگر آلیاژها، نوع و میزان واکنش‌ها در این آلیاژ نسبت به دیگر تحقیقات [۱۶-۱۴] تغییر خواهد داشت. از طرف دیگر، تأثیر این واکنش‌ها بر ریزساختار و خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در هنگام بارریزی در تولید انبوه، به دلایل مختلف نظیر افت خلأ، زمان نگهداری مذاب در بوته افزایش می‌یابد. افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته، باعث تغییر در مقدار واکنش مذاب-بوته می‌شود. تاکنون اثر زمان نگهداری مذاب در بوته روی واکنش مذاب و بوته در این آلیاژ مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در این تحقیق، هدف آن است که تأثیر زمان نگهداری مذاب در بوته بر ریزساختار و خواص تنش-گسیختگی سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene 80 مورد ارزیابی قرار گیرد.

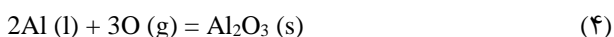
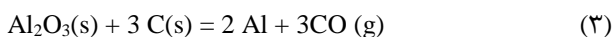
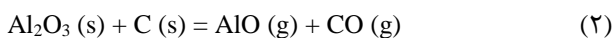
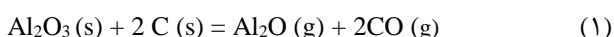
### ۲- مواد و روش تحقیق

آلیاژسازی اولیه شمش به وزن  $14$  کیلوگرم، مطابق با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول (۱)، در کوره VIM انجام شد. شمش حاصله به دو بخش تقسیم و مجدد به‌صورت جداگانه در کوره VIM با دمای ذوب  $1500$  درجه سانتی‌گراد و خلأ  $0/08$  میلی‌بار با مدت زمان نگهداری مذاب در بوته ۳ و ۲۰ دقیقه، ذوب مجدد شدند. شمش اولیه با کد IN-0M، شمش ذوب مجدد شده با زمان نگهداری ۳ دقیقه کد IN-3M و شمش ذوب مجدد شده با زمان نگهداری ۲۰ دقیقه با کد IN-20M در مقاله مشخص شده‌اند. آنالیز ترکیب شیمیایی پس از آماده‌سازی سطحی، توسط دستگاه آنالیز کوانتومتری ARL 3460 بررسی شد. آنالیز گازهای اکسیژن و نیتروژن به وسیله‌ی دستگاه آنالیز Leco مدل TC4600 انجام شد. سپس عملیات حرارتی انحلال و پیرسازی

جدول ۱- نتایج آنالیز کوانتومتری شمش‌های تولید شده (درصد وزنی)

Cr	Co	Ti	Al	Mo	W	C	B	Fe	Mg	Zr	عنصر	
											نمونه	شرایط استاندارد [۲۱]
۱۳/۹۷	۹/۳۱	۲/۰۵	۲/۹۴	۳/۷۸	۳/۹۴	۰/۱۹۱	۰/۰۱۱	۰/۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۲۴	IN-0M	حداقل
۱۳/۹۷	۹/۳۱	۲/۰۵	۲/۹۲	۳/۷۸	۳/۹۴	۰/۱۵۷	۰/۰۱۱	۰/۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۲۴	IN-3M	حداکثر
۱۴/۰۱	۹/۳۱	۲/۰۴	۲/۸۰	۳/۷۸	۳/۹۴	۰/۰۹۸	۰/۰۱۱	۰/۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۲۴	IN-20M	
۱۳/۷۰	۹/۰۰	۴/۸۰	۲/۸۰	۳/۷۰	۳/۷۰	۰/۱۵	۰/۰۲	-	-	۰/۰۲		
۱۴/۳۰	۱۰/۰۰	۵/۲۰	۳/۲۰	۴/۳۰	۴/۳۰	۰/۱۹	۰/۱۰	۰/۳۵	۰/۰۱	۰/۱۰		

[۲۲] نشان می‌دهد که در اثر واکنش مذاب-بوته، در بوته آلومینایی و زیرکونیایی، میزان اکسیژن مذاب افزایش یافته است. همان‌طور که در جدول (۱) نیز نشان داده شد، بررسی میزان آلومینیم در ترکیب شیمیایی شمش آلیاژسازی شده و شمش ذوب مجدد شده با زمان نگهداری مختلف نشان می‌دهد که درصد وزنی آلومینیم با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته کاهش یافته است. واکنش‌های (۱) الی (۳) در فصل مشترک مذاب و بوته آلومینایی و واکنش‌های (۴) و (۵) در داخل مذاب اتفاق می‌افتد [۷]:



با توجه به واکنش‌های (۱) و (۲)، مقداری از آلومینیم به صورت گازهای  $\text{Al}_2\text{O}(\text{g})$  و  $\text{AlO}(\text{g})$  مذاب را ترک می‌کند. با توجه به فشار بخار بالای آلومینیم، مقداری از این عنصر تبخیر شده و از ترکیب شیمیایی آلیاژ خارج شده است. بنابراین با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته، درصد آلومینیم کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به واکنش (۳) مقداری آلومینیم به مذاب وارد می‌شود؛ که کاهش ناچیز آلومینیم در مذاب می‌تواند ناشی از انجام این واکنش باشد. از طرف دیگر به دلیل واکنش بین مذاب و بوته و تجزیه بوته‌ی آلومینایی، مقدار اکسیژن موجود در مذاب نیز افزایش می‌یابد. به دلیل فعالیت شیمیایی بالای آلومینیم، آلومینیم در مذاب با اکسیژن ترکیب شده و به صورت آخال  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در مذاب باقی می‌ماند. آخال‌های اکسید آلومینیم به دلیل وزن مخصوص کمتر از مذاب، تمایل دارند که خود را به سطوح بالای مذاب برسانند.

جدول ۲- میزان اکسیژن و نیتروژن شمش اولیه و شمش‌های ذوب مجدد شده آلیاژ در بوته آلومینایی

N (ppm)	O (ppm)	شمش
۸۲/۹	۷۶/۸	IN-p
۷۹	۷۹/۱	IN-Al-3M
۳۵/۷	۱۶۵	IN-Al-20M

ایجاد فاز گازی و یا در جهت افزایش تعداد مول گازی در محصولات واکنش است، پیشرفت بیشتری داشته‌اند. به منظور مشخص شدن عامل ورود اکسیژن به مذاب جهت واکنش با کربن، مقدار گاز اکسیژن و نیتروژن موجود در شمش IN-0M و IN-3M و IN-20M اندازه‌گیری شد. نتایج آنالیز گاز اکسیژن و نیتروژن در جدول (۲) آورده شده است. مقایسه نتایج آنالیز گاز اکسیژن شمش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زمان نگهداری مذاب، میزان اکسیژن افزایش یافته است. افزایش میزان اکسیژن شمش ذوب مجدد شده با افزایش زمان نگهداری مذاب، فرضیه واکنش کربن با اکسیژن موجود در ترکیب شیمیایی آلیاژ را که از طریق مواد اولیه به ذوب وارد شده را رد می‌کند. زیرا در این صورت باید میزان اکسیژن موجود در شمش ذوب مجدد شده روند کاهشی داشته باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در شمش IN-0M نسبت به شمش IN-3M، میزان نیتروژن نیز کاهش یافته است که با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته، روند کاهش میزان نیتروژن حفظ شده است. پس می‌توان گفت که نیتروژن از طریق خلأ حذف شده ولی اکسیژن از منبع دیگری به مذاب وارد شده که حتی با وجود واکنش با کربن و حذف آن به صورت گاز  $\text{CO}$  باز هم میزان اکسیژن در شمش افزایش یافته است. این مسئله نشان‌دهنده‌ی عدم حذف کربن مذاب از طریق واکنش با اکسیژن موجود در محفظه ذوب است. بنابراین تنها راه ورود اکسیژن به مذاب برای حذف یا کاهش میزان کربن از ترکیب شیمیایی مذاب، احیای نسوز و خروج کربن به صورت حباب‌های گاز  $\text{CO}$  از مذاب است. تحقیق

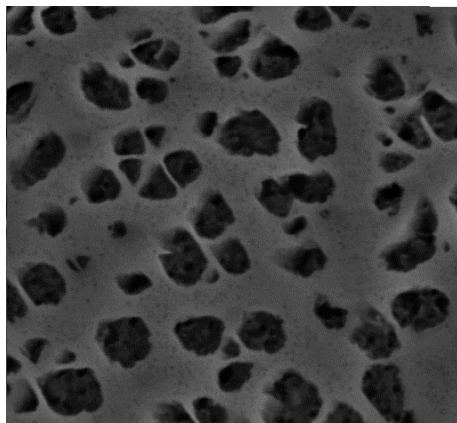
انتظار می‌رود که مقدار فاکتور عدم انطباق ( $\delta$ ) رسوبات  $\gamma'$  در شمش IN-20M نسبت به شمش IN-3M کمتر شود و با توجه به توضیحات پارامتر عدم تطابق شبکه (با افزایش عدم انطباق از ۰/۱ تا ۱/۵ شکل رسوبات از کروی به مکعبی و صفحه‌ای تغییر می‌کند) شکل رسوبات با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته آلومینایی از مکعبی به تقریباً مکعبی تغییر می‌کند [۲۱].

از طرف دیگر، با توجه به کاهش مقدار آلومینیم در شمش IN-20M نسبت به شمش IN-3M، میزان آلومینیم در رسوبات  $\gamma'$  ایجاد شده نیز می‌تواند کاهش یابد. با توجه به اختلاف کمتر اندازه پارامتر شبکه زمینه و رسوبات  $\gamma'$  با ترکیب  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  نسبت به رسوبات  $\gamma'$  با ترکیب شیمیایی  $[\text{Ni}_3\text{Al}]_{23}$ ، لذا می‌تواند سبب کاهش پارامتر عدم تطابق شبکه در شمش IN-20M نسبت به شمش IN-3M شده باشد. در نتیجه، مورفولوژی رسوبات از مکعبی به تقریباً مکعبی تغییر یافته است. همچنین با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته، مقدار اکسیژن موجود در شمش‌های

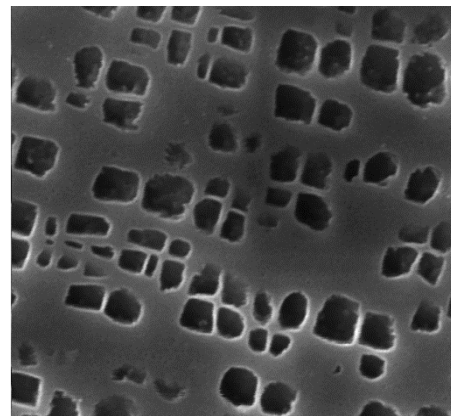
همچنین واکنش‌های (۱) الی (۳) نشان از حذف کربن به صورت فاز گازی، و افت میزان کربن در اثر پیشروی بیشتر واکنش‌ها با افزایش زمان نگهداری مذاب دارند.

با توجه به نتایج آنالیز کوانتومتری، بیشترین تغییرات در عناصر کربن و آلومینیم است. این دو عنصر نقش به‌سزایی در تشکیل رسوبات کاربیدی MC،  $\text{M}_6\text{C}$  و  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  و  $\gamma'$  در ریزساختار دارند. با توجه به اینکه بیشترین تأثیر در خواص دما بالای این آلیاژ تحت تأثیر رسوبات  $\gamma'$  است، لذا در این بخش به بررسی کسر حجمی، شکل و اندازه فازهای اشاره شده فوق بعد از عملیات پیرسازی اولیه و پیرسازی نهایی پرداخته می‌شود. در شکل (۱) تصویر الکترون ثانویه در میکروسکوپ SEM از رسوبات  $\gamma'$  در شرایط پیرسازی اولیه در دمای  $1093^\circ\text{C}$  و پیرسازی نهایی در دمای  $873^\circ\text{C}$  نشان داده شده است.

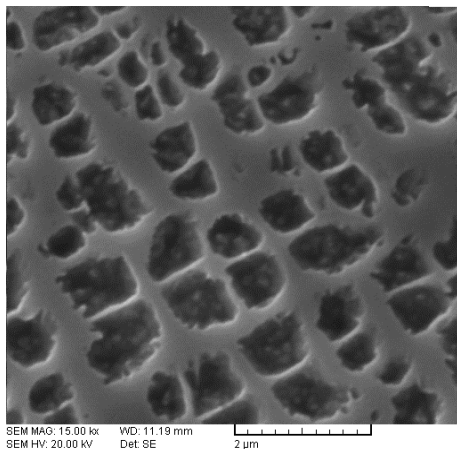
با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته، شیب حرارتی کاهش می‌یابد. در نتیجه، میزان کرنش شبکه‌ای الاستیک ایجاد شده در ساختار نمونه IN-20M نسبت به نمونه IN-3M کمتر است. لذا



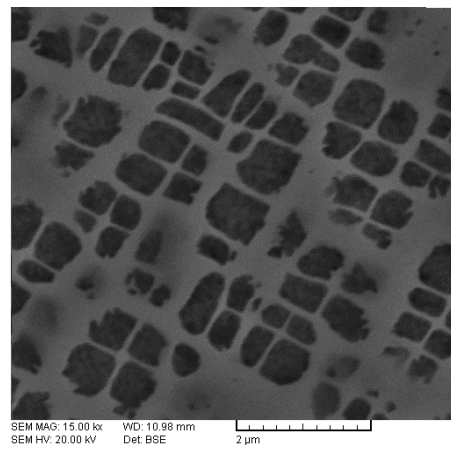
ب



الف



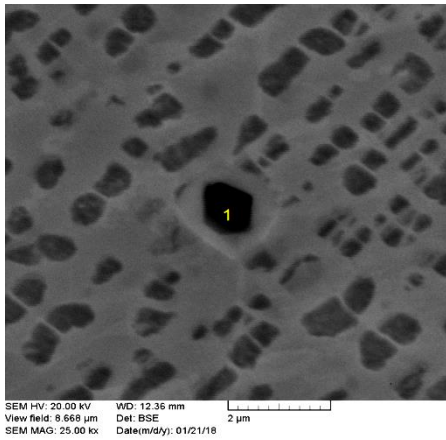
د



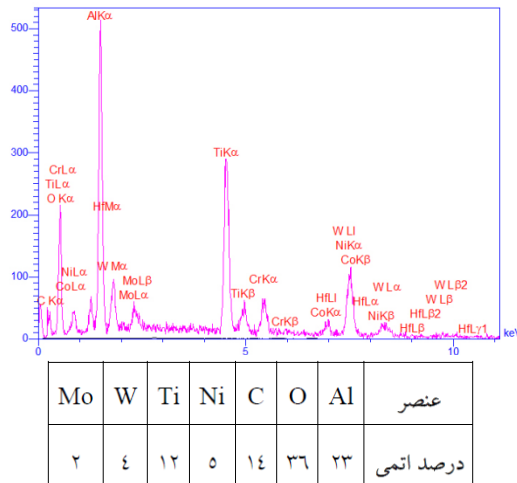
ج

شکل ۱- تصویر الکترون ثانویه میکروسکوپ SEM از رسوبات  $\gamma'$  در شرایط: الف و ب) پیرسازی اولیه در دمای  $1093^\circ\text{C}$  و زمان ۴ ساعت؛ ج و د) پیرسازی نهایی در دمای  $873^\circ\text{C}$  و زمان ۱۶ ساعت: الف و ج) شمش IN-3M؛ ب و د) شمش IN-20M.

پیرسازی نهایی در هر دو شمش به دلیل تبدیل بیشتر یوتکتیک‌های  $\gamma$ - $\gamma'$  به رسوبات  $\gamma'$  و تشکیل رسوبات  $\gamma'$  ثانویه در اثر انجام عملیات پیرسازی است.



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) تصویر الکترون ثانویه میکروسکوپ SEM و (ب) آنالیز EDS از آخال  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در شمش IN-20M.

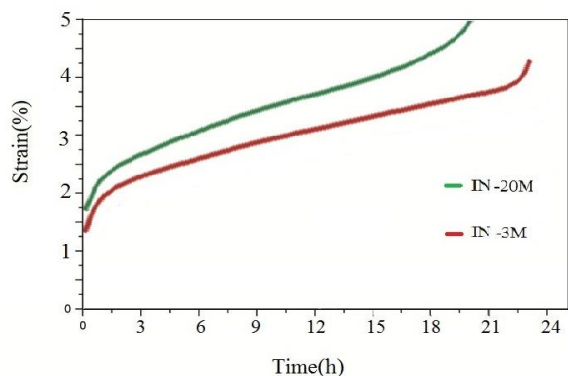
برای بررسی اثر زمان نگهداری مذاب در بوته آلومینایی بر کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  و تأیید مطالب ذکر شده فوق، استخراج فازی نیز بر روی نمونه‌های شمش‌های IN-20M و IN-3M در شرایط پیرسازی نهایی انجام شد. درصد وزنی استخراج فازی نمونه شمش‌های ذکر شده در جدول (۳) آورده شده است. همچنین نتیجه آنالیز تفرق اشعه ایکس در شکل (۳)، بیان‌گر آن است که با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته آلومینایی، شدت پیک کاهش و کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  کاهش می‌یابد.

تولیدی افزایش می‌یابد. به دلیل فعالیت شیمیایی بالای آلومینیم، مقداری از آلومینیم با حضور اکسیژن بیشتر به صورت آخال اکسیدی درمی‌آید. در شکل (۲)، تصویر الکترون ثانویه میکروسکوپ SEM و آنالیز EDS از آخال  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در شمش IN-20M آورده شده است. لذا می‌توان گفت، با افزایش زمان نگهداری مذاب، با توجه به کسر بالاتر آخال‌های اکسیدی، در ترکیب شیمیایی رسوبات  $\gamma'$  ایجاد شده، میزان آلومینیم کمتری خواهد داشت و مورفولوژی رسوبات  $\gamma'$  از مکعبی در شمش به تقریباً مکعبی تغییر می‌یابد. کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  برای شمش‌های IN-3M و IN-20M در شرایط پیرسازی اولیه و پیرسازی نهایی توسط نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری شد که به ترتیب پس از پیرسازی اولیه ۳۱ و ۲۶ و پس از پیرسازی نهایی ۴۶ و ۳۷ درصد حجمی است. با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته، کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  کاهش یافته است. همان‌طور که بیان شد، در اثر افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته، مقدار آلومینیم در ترکیب شیمیایی آلیاژ کاهش یافته است. همچنین به دلیل افزایش اکسیژن در شمش، بخشی از آلومینیم نیز به جای حضور در فاز گاماپرایم به صورت فاز اکسیدی درآمده و میزان آلومینیم مؤثر در تشکیل گاماپرایم و در نتیجه میزان گاماپرایم کاهش می‌یابد. با توجه به کاهش میزان آلومینیم در مذاب و در نهایت در قطعه ریخته‌شده طبیعتاً مکان‌های مستعد برای جوانه‌زنی رسوبات گاماپرایم کاهش می‌یابد و در نهایت منجر به کاهش کسر حجمی رسوبات گاماپرایم پس از پیرسازی و افزایش اندازه آنها می‌شود. ترکیب شیمیایی رسوبات  $\gamma'$  به صورت  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  است. لذا با کاهش مقدار وزنی آلومینیم جهت تشکیل رسوبات  $\gamma'$ ، کسر حجمی این رسوبات با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته، کاهش یافته است.

لازم به ذکر است که در پژوهش مجزا توسط نویسندگان، اندازه متوسط فاصله‌ی بین بازوهای دندریتی ثانویه (که با استفاده از رابطه  $L/n-1$ ؛ که  $L$ ؛ طول بازوهای دندریتی اولیه و  $n$  تعداد بازوهای دندریتی ثانویه بر خط  $L$  است؛ اندازه‌گیری شد) در حالت ریختگی در شمش IN-0M، IN-3M و IN-20M به ترتیب ۱۷/۵، ۱۸/۲ و ۴۱/۳ میکرومتر به دست آمد. علت تغییرات در فواصل دندریتی، تغییرات در رسوبات کاربیدی با افزایش زمان نگهداری مذاب است و توسط نویسندگان در پژوهشی مجزا در حال بررسی است. با توجه به افزایش متوسط فواصل بین دندریتی در ساختار شمش IN-20M نسبت به شمش IN-3M، نفوذ اتمی در مرحله پیرسازی نهایی به دلیل افزایش فاصله نفوذ مشکل‌تر می‌شود. لذا کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  در حین پیرسازی نهایی در شمش IN-3M نسبت به شمش IN-20M افزایش بیشتری داشته است. افزایش کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  در حین

بین موانع کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$ ، عرض کانال‌های زمینه در بین رسوبات  $\gamma'$  که همان شبکه‌های آستنیت است، کاهش می‌یابد. در نتیجه چگالی نابجایی‌ها در این کانال‌ها در حین خزش و اعمال نیرو، افزایش می‌یابد که باعث افزایش استحکام آلیاژ می‌شود.

در مقاله [۲۴] ذکر شده است که با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوتله به علت کاهش عناصر جزئی مضر با فشار بخار بالا نظیر نقره عمر گسیختگی افزایش می‌یابد. نتیجه در این پژوهش متفاوت است که علت آن کاهش کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  است. به علاوه، در این پژوهش با افزایش زمان نگهداری مذاب، میزان اکسیژن شمش و در نتیجه آخال‌های اکسیدی نیز افزایش یافته که منجر به افت خواص گسیختگی خزشی شده است. با توجه به تأثیر مفید افزایش زمان نگهداری در کاهش عناصر جزئی مضر با فشار بخار بالا، پیشنهاد می‌شود که کاهش عناصر تشکیل‌دهنده‌ی گامپرایم از طریق افزایش آلومینیم در ذوب جبران شود. همچنین افزایش اکسیژن مذاب از طریق تغییر جنس بوتله قابل کنترل است که توسط نویسندگان این مقاله در حال بررسی است.



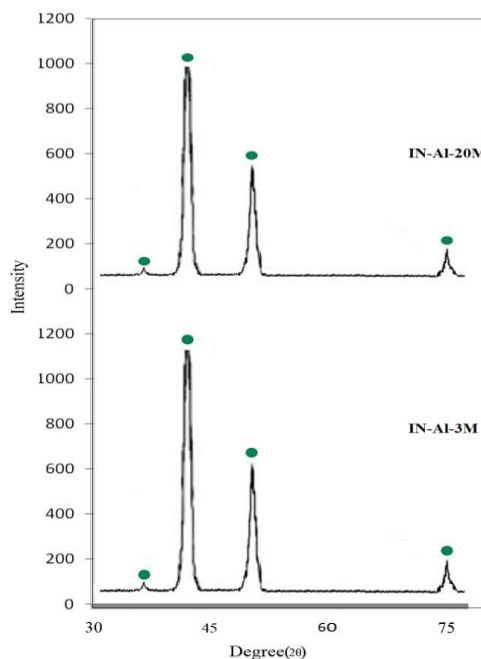
شکل ۴- نمودار تنش-گسیختگی در شرایط  $980^{\circ}\text{C}$  و تنش  $191\text{MPa}$  شمش‌های تولید شده پس از پیرسازی نهایی.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- در اثر افزایش زمان نگهداری مذاب در بوتله، میزان اکسیژن در مذاب افزایش و در مقابل میزان نیتروژن کاهش می‌یابد.
- ۲- با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوتله و افزایش واکنش بین مذاب و بوتله، درصد وزنی عناصر آلومینیم و کربن موجود در ترکیب شیمیایی شمش تولید شده کاهش می‌یابد.
- ۳- به دلیل کاهش درصد وزنی عنصر آلومینیم به صورت محلول در ترکیب شیمیایی شمش تولیدشده در اثر افزایش زمان نگهداری مذاب در بوتله، کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  از ۴۶ به ۳۷ درصد کاهش یافته و مورفولوژی از شبه مکعبی به کامل مکعبی تغییر کرده است.

جدول ۳- درصد وزنی استخراج فازي نمونه شمش‌های IN-20M و IN-3M در شرایط پیرسازی نهایی

شمش	وزن اولیه نمونه (گرم)	وزن نمونه باقیمانده (گرم)	وزن رسوب (گرم)	درصد وزنی استخراج فازي
IN-AI-20M	۴۲/۹	۲۱/۱	۲/۷	۱۲/۳۸
IN-AI-3M	۵۵/۳	۴۸/۶	۲/۰	۲۹/۸۵



شکل ۳- آنالیز تفرق اشعه ایکس رسوبات  $\gamma'$  در شمش‌های IN-20M (الف) و IN-3M (ب).

با توجه به شکل (۳)، مشاهده شده است که پهنای پیک  $\gamma'$  در شمش IN-20M نسبت به شمش IN-3M اندکی کاهش می‌یابد و در نتیجه، اندازه‌ی این رسوبات افزایش یافته است. با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوتله، تعداد بیشتری از هسته‌های جوانه‌زنی اولیه در مذاب حل می‌شود. با انحلال بیشتر این هسته‌ها، و ایجاد شیب غلظتی در مذاب، دیگر هسته‌ها و رسوبات  $\gamma'$  رشد بیشتری داشته و با انجام عملیات پیرسازی، اندازه رسوبات  $\gamma'$  افزایش یافته است.

آزمایش تنش-گسیختگی در شرایط  $980^{\circ}\text{C}$  و تنش  $191\text{MPa}$  روی آلیاژهای پیرسازی نهایی شده انجام گرفت. منحنی‌های کرنش برحسب زمان حاصل از این آزمون در شکل (۴) نشان داده شده است.

ارتباط بین افزایش زمان شکست به مقدار زیادی ناشی از افزایش کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$  در ریزساختار آلیاژ است. با افزایش کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$ ، موانع جلوی حرکت نابجایی‌ها بیشتر و فاصله

- [12] Yin F.S., Zheng Q., Sun X.F., Effect of melt treatment on carbides formation in a cast Nickel-base superalloy M963, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183, 440-444.
- [13] Li G., Bo C., Yang Y., Du Z., Kui L., Effect of N content on microsegregation, microstructure and mechanical property of cast Ni-base superalloy K417G, *Materials Science and Engineering A*, 2017, 701, 20-26.
- [۱۴] ماهروی م.، بررسی تأثیر میزان خلأ و مدت زمان نگهداری بر واکنش‌های مذاب و بوته و کاهش اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن و کربن فولاد پرالیاژ نیکل-تنگستن در کوره VIM، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، ۱۳۸۷.
- [۱۵] ملاکی‌فرد م.، بررسی اثر میزان خلأ و مدت زمان نگهداری در آلیاژسازی تحت خلأ فولاد ماریچینگ T300 و تأثیر آنها بر خواص مکانیکی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵.
- [16] Bian W., Zhang H., Gao M., Li Q., Li J., Tao T., Zhang H., Influence of yttrium and vacuum degree on the purification of K417 superalloy, *Vacuum*, 2018, 152, 57-64.
- [17] Safari J., Nategh S., On the heat treatment of Rene 80 nickel base superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 176, 240-250.
- [18] ASTM E407-99, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, 1999.
- [19] ASTM E963-95, Standard Practice for Electrolytic Extraction of Phases from Ni and Ni-Fe Base Superalloys Using a Hydrochloric-Methanol Electrolyte, ASTM International, 1995.
- [20] ASTM E21, Standard Test Methods for Tension Testing Metallic Materials, ASTM International, 2017.
- [21] AMS-C50TF28, Aerospace Materials Society.
- [22] Gusching D., Inclusions in Vacuum Induction Melted Nickel Base Alloys, PhD Thesis, University of Arizona, 1981.
- [23] Tan X.P., Liu J.L., Song X.P., Measurement of  $\gamma'/\gamma$  lattice misfit and  $\gamma'$  volume fraction for a Ru-containing nickel based single crystal superalloy, *Journal of Material Society Technology*, 2011, 27, 899-905.
- [24] Sinha O.P., Chatterjee M., Jha S.N., Effect of residual elements on high performance nickel base superalloys for gas turbine and strategies for manufacture, *Indian Academy of Sciences*, 2005, 28, 379-382.

۴- با افزایش زمان نگهداری مذاب در بوته علی‌رغم کاهش احتمالی عناصر جزئی مضر با فشار بخار بالا، به دلیل کاهش کسر حجمی رسوبات  $\gamma'$ ، عمر تنش-گسیختگی سوپرالیاژ پایه نیکل Rene 80 کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Pridgeon J.W., *Superalloys Source Book*, American Society for Metals, 1984.
- [2] Deker R.F., Strengthening mechanisms in nickel base superalloys, *Symposium Steel Strengthening Mechanisms*, 1970, 147-170.
- [3] Donachie M.J., Donachie S.J., *Superalloys a Technical Guide*, ASM International, Second Edition, 2002.
- [4] Yang C., Xu Y., Nie H., Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of rene80, *Materials and Design*, 2013, 43, 66-73.
- [5] Shamblen C.E., Chang D.R., Corrado J.A., *Superalloy melting and cleanliness evaluation*, General Electric Company, 1984, 509-520
- [6] Qifan You Q. Yuan H., Zhao L., Li J., Ding X., Removal of inclusions from nickel-based superalloy by induced directional solidification during electron beam smelting, *Vacuum*, 2018, 156, 39-47.
- [7] Gusching D., Inclusions in vacuum induction melted nickel base alloys, Department of Metallurgical Engineering, PhD Thesis, University of Arizona, 1981.
- [8] Kuang J.P., Harding R.A., Campbell J., A study of refractories as crucible and mould materials for melting and casting  $\gamma$ -TiAl alloys, *International Journal of Cast Metals Research*, 2001, 1364-0461.
- [9] Yin F.S., Sun X.F., Li G., Effects of melt treatment on the cast structure of M963 superalloy, *Scripta Materialia*, 2003, 48, 425-429.
- [10] Zou M.M., Soton J., Li B., Effect of melt overheating history on the microstructure of Ni-base single crystal superalloy, *Advanced Materials Research*, 2011, 217, 692-696.
- [11] Zhongye P., Minoghan Z., Yanwen T., Effect of melt superheating treatment on the cast structure of K465 nickel based superalloy, *Rare Metals*, 2009, 28(2) 193-196.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Research Paper:

### Effect of Melt Holding Time on $\gamma'$ Precipitates and Stress Rupture Properties of Rene 80 Superalloy

Saeed Kouhi Faeigh Dehkordi<sup>1</sup>, Masumeh Seifollahi<sup>2\*</sup>, Seyed Mahdi Abbasi<sup>3</sup>, Seyed Mahdi Ghazi Mirsaeed<sup>4</sup>

1. M.Sc., Materials Department, Malek Ashtar University of Technology.
2. Assistant Professor, Materials Department, Malek Ashtar University of Technology.
3. Associate Professor, Materials Department, Malek Ashtar University of Technology.
4. M.Sc., Materials Department, Malek Ashtar University of Technology.

\* **Corresponding Author:** P.O. Box 15875-1774, Lavizan, Tehran, Iran. Tel/Fax: +98 21 22945141. E-mail: m\_seifollahi@mut.ac.ir

#### Paper history:

Received: 17 March 2019  
Accepted: 11 May 2019

#### Abstract:

The purpose of this investigation is to study the effect of melt holding time (3 , 20 min) in vacuum induction melting furnace (VIM) with alumina crucible on the amount of gases,  $\gamma'$  precipitates and stress rupture properties of Rene 80 superalloy. For this purpose, the amount of O, N gasses and chemical composition were analyzed. The microstructure was assessed by scanning electron microscopy (SEM) and stress rupture properties was performed at 980°C. The results showed that with increasing the melt holding time from 3 to 20 min,  $\gamma'$  volume fraction reduced from 46 to 37% and also, oxygen level of the alloys increased from 79 to 165 ppm because of the alumina reduction. The morphology of  $\gamma'$  changed from semi-cubic to cubic one. The result of mechanical test showed that the stress-rupture life of samples reduced from 22.6 to 19 hours by increasing melt holding time because of reducing  $\gamma'$  volume fraction.

#### Keywords:

Melt holding time,  
VIM furnaces,  
 $\gamma'$  precipitates,  
Stress rupture properties,  
Rene 80 superalloy.

#### Please cite this article using:

Kouhi Faeigh Dehkordi S., Seifollahi M., Abbasi S.M., Ghazi Mirsaeed S.M., Effect of melt holding time on  $\gamma'$  precipitates and stress rupture properties of Rene 80 superalloy, in Persian, Founding Research Journal, 2019, 3(1) 29-36.  
DOI: 10.22034/FRJ.2019.176467.1074

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