



پژوهش نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

اثر مدت زمان نگهداری مذاب و فشار خلأ حین ذوب بر عمر خستگی دمابالای سوپر آلیاژ پایه نیکل Hastelloy X

معصومه سیفاللهی^{۱*}، نیما کچویی^۲، سیدمهدی عباسی^۳، سیدمهدی قاضی میرسعید^۴

- ۱- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی؛ مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
- ۲- کارشناس ارشد متالورژی مهندسی مواد و متالورژی، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی؛ مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
- ۴- کارشناس ارشد متالورژی مهندسی مواد و متالورژی، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۹۸ ۲۱ ۲۲۹۳۶۴۹۴ | پست الکترونیکی: m_seifollahi@mut.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹

هدف از این پژوهش، کاهش عناصر مضر و بهبود خواص خستگی آلیاژ از طریق کنترل میزان خلأ و زمان نگهداری مذاب در کوره است. در این پژوهش مقدار خلأ ۰.۱ و ۰.۰۱ میلی‌بار در کوره القایی تحت خلأ اعمال شد و مذاب در زمان‌های ۳ و ۳۰ دقیقه در بوته نگه داشته شد. نتایج نشان داد با افزایش خلأ از ۰.۱ به ۰.۰۱ میلی‌بار، اندازه دانه در نمونه‌های با زمان نگهداری ۳ دقیقه، به ترتیب از ۴۴ به ۶۶ میکرومتر و در زمان نگهداری ۳۰ دقیقه نیز از ۷۱ به ۷۸ میکرومتر افزایش یافت و رشد دانه اتفاق افتاده است. در زمان ۳۰ دقیقه، با افزایش میزان خلأ، رشد دانه‌ی چندانی اتفاق نیفتاده و اندازه دانه تقریباً ثابت مانده است. با افزایش خلأ میزان کاربیدها در نمونه نگهداری شده به مدت ۳ دقیقه، از ۶.۹ درصد به ۸.۰۵ درصد کاهش یافت. همچنین با گذشت زمان از ۳ به ۳۰ دقیقه، کسر حجمی رسوبات کاربیدی کاهش یافته است. نمونه‌ها تحت آزمایش خستگی کم چرخه‌ی کرنش کنترل (دامنه‌ی کرنش ثابت ۰/۶ درصد) و دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در زمان نگهداری ۳ دقیقه با کاهش خلأ اعمالی از ۰.۱ به ۰.۰۱ میلی‌بار، میزان چرخه‌های قابل تحمل در نمونه قبل از شکست در حدود ۲۶ درصد افزایش یافت. همچنین در زمان ۳۰ دقیقه، با افزایش میزان خلأ، تعداد چرخه‌های خستگی در حدود ۱۵ درصد ارتقا یافته است. برای حالتی که میزان خلأ اعمالی به کوره القایی تحت خلأ ثابت باشد با کاهش یافتن زمان نگهداری مذاب در بوته، تعداد چرخه‌های مفید خستگی افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

Hastelloy X

زمان نگهداری مذاب،

خلأ اعمالی در کوره VIM،

عمر خستگی،

ریزساختار.

ارجاع به این مقاله:

معصومه سیفاللهی، نیما کچویی، سیدمهدی عباسی، سیدمهدی قاضی میرسعید، اثر مدت زمان نگهداری مذاب و فشار خلأ حین ذوب بر عمر خستگی دمابالای سوپرآلیاژ پایه نیکل Hastelloy X، پژوهش نامه ریخته‌گری، پاییز ۱۴۰۰، جلد ۵، شماره ۳، صفحات ۲۰۵-۲۱۳.

شناسه دیجیتال: (DOI) FRJ.2022.341770.1155/10.22034

۱- مقدمه

آستنییتی است که با افزودن عناصر کروم، مولیبدن و تنگستن می‌توان آن را از طریق مکانیسم محلول جامد، استحکام بخشید [۱]. سوپرآلیاژ Hastelloy X، در همه‌ی دماها دارای ساختار FCC است. شبکه‌ی FCC سوپرآلیاژهای پایه نیکل قابلیت انحلال وسیعی برای بعضی عناصر آلیاژی دارد و رسوب فازهای استحکام‌بخش، انعطاف‌پذیری بسیار عالی آلیاژ را به همراه دارد [۲]. طبق مطالعات صورت گرفته برای حذف عناصر

فلز Hastelloy X از سوپرآلیاژهای پایه نیکل استحکام یافته با محلول جامد است که از استحکام دما بالا، شکل‌پذیری عالی، قابلیت ساخت آسان و مقاومت خوب در برابر اکسیداسیون تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، برخوردار بوده و کاربردهای بسیاری در ساخت محفظه احتراق موتور توربین‌های گازی و صنایع هوا-فضا دارد. این فلز اساساً یک آلیاژ تک فاز با زمینه‌ی

درصد، با افزایش دمای انجام آزمون از دمای اتاق تا دماهای بالاتر، نمونه در تعداد سیکل کمتری گسیخته می‌شود. این در حالی است که با گذشت سیکل‌های اعمالی تا لحظه شکست نمونه، دامنه تنش کششی مورد نیاز افزایش یافته و نوعی کار سختی حین چرخه رخ داده است. آلیاژ در دمای اتاق دوره کوتاهی از سخت شدن سیکلی را نشان می‌دهد (حدود ۱۰۰ سیکل) و پس از آن به تدریج دچار نرم شدن سیکلی شده تا زمانی که افت سریع تنش ناشی از رشد ماکرو ترک اتفاق بیفتد. در مقابل، با انجام آزمون در دماهای بالا، سخت شدن سیکلی به‌طور پیوسته تا لحظه شکست ادامه دارد. یک ویژگی بارز که تغییر شکل سیکلی آلیاژ Hastelloy X در محدوده دمایی ۴۵۰-۶۵۰°C را از دماهای ۲۷ و ۷۵۰°C متمایز می‌سازد، یک سخت شدن سیکلی خطی با شیب دوگانه است که یک ناحیه انتقال بین آنها به وجود می‌آورد. به عبارت دیگر در محدوده‌ی دمایی ۴۵۰-۶۵۰°C، یک ناحیه انتقالی در بین دو منطقه خطی ۱ و ۲ برای بحث سخت شدن وجود داشته و کارسختی به‌صورت یک خط دو شیبی، پیوسته در حال افزایش است. برای این محدوده دمایی، افزایش چشم‌گیر در سخت شدن سیکلی را می‌توان در ناحیه ۲ و همچنین در ناحیه سخت شدن غیرخطی پس از آن هم مشاهده کرد. البته برای این دماها در ناحیه غیرخطی، نرخ کارسختی سیکلی کاهش می‌یابد [۸]. افزایش استحکام ماده در ناحیه انتقالی و بالاتر از آن می‌تواند به دلیل تغییر شکل ناشی از سخت شدن ریزساختار باشد. فرآیندهای ریزساختاری متنوعی که ناشی از سخت شدن سیکلی در این آلیاژ هستند به‌صورت زیر گزارش شده است [۹]: افزایش چگالی نابیایی‌ها و در نتیجه افزایش برخورد نابیایی‌ها با یکدیگر (وقوع قفل‌های لومرکاترل و یا تشکیل جاگ در نابیایی‌های پیچشی و نهایتاً ایجاد نابیایی‌های غیرمتحرک)؛ رسوب کاربیدها (M_6C و $M_{23}C_6$) و قفل شدن نابیایی توسط کاربیدها؛ پیر کرنشی دینامیکی (کشیده شدن نابیایی به‌وسیله اتم‌های حل شونده و تشکیل اتمسفر کاترل و باندهای لودرز). از آنجا که Hastelloy X یک سوپرآلیاژ استحکام یافته با محلول جامد و نیز دارای رسوبات کاربیدی است، مستعد فرآیندهای فوق بوده و این سه پدیده به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند، لذا تعیین اثرات هر یک از این مکانیسم‌ها به‌صورت مجزا، دشوار است. بررسی‌ها نشان می‌دهد [۱۱، ۱۰، ۹] که در حین تغییر شکل پلاستیک ناشی از خستگی کم چرخه‌ی آلیاژ Hastelloy X، پدیده پیر کرنشی دینامیکی در محدوده دمایی ۲۰۰-۶۵۰°C اتفاق می‌افتد. به‌علاوه گزارش شده که در اثر رخ دادن این پدیده و نیز برخورد نابیایی‌ها با یکدیگر، که منجر به

مضر یکی از بهترین کوره‌ها، کوره تحت خلأ القایی، VIM، است [۴، ۳]. استفاده از این کوره به دلیل وجود خلأ باعث کاهش ورود گازهای مضر به آلیاژ می‌شود. در این کوره گذشت زمان نیز میزان عناصر مضر و ناخالصی‌ها را به‌شدت کاهش می‌دهد. به‌طور مثال ذوب مجدد آلیاژ نیکل کروم در این کوره به مدت ۳۵ دقیقه مقدار اکسیژن را از ۲۷ ppm به حدود ۱۳ ppm می‌رساند.

حذف ناخالصی‌های شبه‌فلزی به‌وسیله تبخیر در طی ذوب شدن در خلأ توسط کرمیشیو، شلاتر، توریلون، چرنوف، آگیو و شرور مورد بحث قرار گرفته است. این واکنش‌ها وابسته به زمان هستند و تحت تأثیر دمای حمام، فشار کوره و فشار بخار ناخالصی قرار می‌گیرند و همچنین ماهیت و مقدار افزودنی‌های آلیاژ، درجه جوش و برخی از واکنش‌های کوره بر آن تأثیر می‌گذارد [۳].

سه راهکار متمایز را می‌توان به‌عنوان گام‌های ممکن در کنترل حذف شبه فلزات شناسایی کرد که عبارتند از نفوذ در ذوب، تبخیر-فرار در سطح ذوب، انتقال بخار و تغلیظ عناصر. نرخ تبخیر را می‌توان با کاهش فشار بالای ذوب افزایش داد، اما تنها تا زمانی که شبه‌فلز شروع به تقطیر یا انحلال می‌کند. این اتفاق زمانی می‌افتد که مسیر آزاد متوسط اتم‌های تبخیرشده بیش از فاصله به دیوار محفظه کوره و یا مناطق دیگر که در آن بخار می‌تواند متراکم شود [۵].

وچرنوف و آگیو [۶] اثرات فشار کوره را بررسی کردند و دریافتند که فشارهای کمتر از ۱۰۰ mmHg برای کاهش مقادیر سرب و بیسموت در ذوب نیکل ضروری است. در فشار ۰/۰۵ تا ۰/۰۰۱ mmHg، میزان سرب و بیسموت از مقادیر اولیه ۰/۱٪ تا کمتر از ۰/۰۰۰۱٪ بعد از حدود ۱/۵ ساعت در ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت.

آزمون خستگی کم چرخه برای تعیین کارایی مواد کاربردی مانند پره‌ها و دیسک‌های توربین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. در مطالعه‌ی انجام شده [۸]، آلیاژ Hastelloy X در دمای ۱۱۷۷°C و به مدت ۱۰۰ دقیقه تحت عملیات آنیل انحلالی قرار گرفته و نمونه‌های استوانه‌ای شکل با طول ۲۵mm و قطر ۱۰ mm آماده شده و در محدوده دمایی ۲۷-۷۵۰°C، محدوده‌ی کرنش ۱ - ۰/۲۵ درصد و نرخ کرنش $3 \times 10^{-2} S^{-1}$ تحت آزمون خستگی کم چرخه قرار گرفتند. میانگین اندازه دانه حدود ۲۰۰ μm بوده و در ریزساختار نمونه‌های آنیل شده کاربیدهای M_6C غنی از Mo و $M_{23}C_6$ غنی از Cr وجود داشت که اغلب کاربیدهای $M_{23}C_6$ به‌وسیله کاربیدهای M_6C احاطه شده‌اند. در این تحقیق، در محدوده‌ی کرنش ثابت ۰/۶

کیلوگرم و توان ۱۰ کیلو وات ساخت ایران موجود در مجتمع مواد دانشگاه مالک اشتر تهران استفاده شد. ابعاد قالب این کوره $200 \times 40 \times 60$ میلی‌متر بوده است. جنس بوته مورد استفاده در این کوره آلومینای اسپینلی ($85\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{MgO}$) بود. در طول آلیاژسازی و ذوب‌گیری؛ دما، زمان نگهداری مذاب و خلأ به‌دقت کنترل شد. چهار شمش از آلیاژ Hastelloy X با شرایط بیان شده در جدول (۲) در کوره VIM ذوب و ریخته‌گری شدند. همچنین شمش‌های تولید شده جهت سهولت در بررسی و تحلیل نتایج حاصله مطابق با جدول (۲) کدگذاری شدند.

به‌منظور کاهش جدایش‌ها و ناخالصی‌ها و نیز حذف انقباضات و حفرات، آلیاژهای ریخته شده در کوره تصفیه سرباره الکتریکی (ESR)، تصفیه شدند. کوره مورد استفاده دارای ظرفیت ۱۰ کیلوگرم است. حداکثر جریان این کوره ۱۸۰۰ آمپر و ولتاژ این کوره ۱۹ ولت است. جهت انجام عملیات تصفیه از قالب‌های آبگرد مسی، با ابعاد $20 \times 8 \times 6$ سانتیمتر و سرباره‌سازی با ترکیب ۳۰ درصد Al_2O_3 و ۷۰ درصد CaF_2 استفاده شد. پس از مرحله تصفیه‌سازی، شمش Hastelloy X بر اساس مرجع [۱۲] به‌منظور همگن‌سازی به مدت ۴ ساعت در دمای 1200°C قرار گرفته و سپس در هوا سرد شده است. پس از عملیات همگن‌سازی، شمش در دمای 1150°C به میزان ۸۰ درصد نورد گرم شد. عملیات آنیل انحلالی در دمای 1175°C و به مدت یک ساعت انجام و نمونه‌ها در آب سرد شدند. ترکیب شیمیایی شمش‌های تولید شده در شرایط مختلف با استفاده از روش کوانتومتری (Belec Vario Lab) و ICP (Optima 8000 ICP OES) بررسی شده است.

افزایش مقاومت در برابر حرکت نابجایی‌ها می‌شوند، تنها سخت شدن خطی با یک شیب ثابت ایجاد می‌گردد [۹]. بنابراین در محدوده دمایی $450^\circ\text{C} - 650^\circ\text{C}$ که با افزایش تعداد سیکل‌ها تا لحظه شکست، دامنه تنش کششی افزایش یافته، ناحیه اول کارسختی، ناشی از برخورد نابجایی‌ها با یکدیگر و نیز پیرکرنشی دینامیکی است، چرا که به‌منظور حفظ نرخ کرنش اعمالی، نیاز است تا تنش سیلان جهت رهایی نابجایی‌ها از موانع موجود با تولید نابجایی‌های جدید، افزایش یابد و این امر منجر به افزایش چگالی نابجایی‌های متحرک شده و از این‌رو زمینه آلیاژ را سخت کرده و ناحیه‌ی سخت شدن اول با شیب تقریباً خطی و ثابت را به وجود می‌آورد [۸]. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در بانک‌های اطلاعاتی مختلف، راجع به تأثیر افزایش میزان خلأ و مدت زمان نگهداری مذاب در کوره، مشخص شده است که اغلب تحقیقات پیرامون بررسی تأثیر خلأ بر سوپرآلیاژهای IN-718، Rene-80 و فولاد ماریچینگ T300 و فولادهای پر آلیاژ حاوی نیکل و تنگستن و غیره بوده و در زمینه تأثیر میزان خلأ و مدت زمان نگهداری بر ریزساختار و خواص خستگی سوپرآلیاژ استحکام یافته با محلول جامد Hastelloy X مطالبی گزارش نشده است. لذا پژوهش حاضر به‌منظور دستیابی به هدف بررسی تأثیر میزان خلأ و زمان نگهداری مذاب بر عمر خستگی (تحت کرنش و دمای ثابت) سوپرآلیاژ Hastelloy X انجام شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از سوپرآلیاژ Hastelloy X با ترکیب شیمیایی استاندارد مندرج در جدول (۱) استفاده شد. به‌منظور تهیه مذاب و آلیاژسازی، از کوره القایی تحت خلأ با ظرفیت ۵

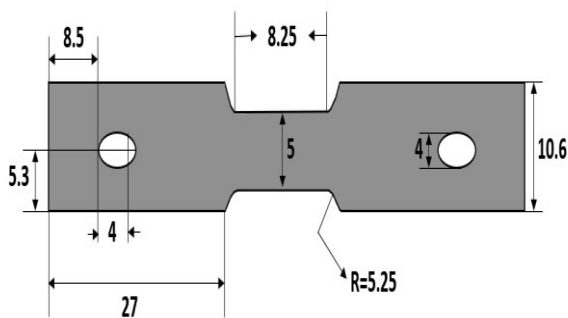
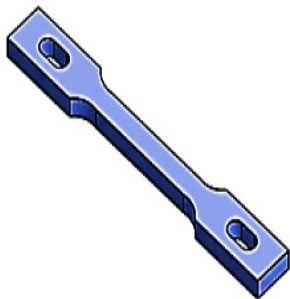
جدول ۱ - محدوده ترکیب شیمیایی استاندارد سوپرآلیاژ Hastelloy X مورد استفاده (wt.%)

Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	Si	C	Mn	Al	Ti	B
Bal	۲۰/۵-۲۳	۱۷-۲۰	۸-۱۰	۰/۵-۰/۵	۰/۲-۱	<۱	۰/۱۵-۰/۰۵	<۱	<۰/۰۵	<۰/۱	<۰/۰۱

جدول ۲ - مشخصات ذوب‌های ریخته شده در کوره VIM

ردیف	شماره نمونه	میزان خلأ اولیه (میلی بار)	زمان نگهداری	ولتاژ (ولت)	جریان (آمپر)
۱	H-1-3	$10^{-1}/5$	۳ دقیقه	۳۸۰	۹۵
۲	H-3-3	$10^{-2}/4$	۳ دقیقه	۳۲۰	۹۵
۳	H-3-30	$10^{-2}/4$	۳۰ دقیقه	۳۲۰	۹۵
۴	H-1-30	$10^{-1}/1$	۳۰ دقیقه	۱۵۰	۵۰

بنابراین از نقطه نظر مربوط به پارامترهای ذوب می‌توان بیان نمود، با ثابت ماندن زمان نگهداری مذاب در بوته و افزایش میزان خلأ، توانایی آلیاژ برای تحمل میزان سیکل‌های اعمالی افزایش یافته است. در شرایطی که زمان نگهداری مذاب ۳ دقیقه و میزان خلأ اعمالی در کوره‌ی VIM از 10^{-1} میلی‌بار به 10^{-3} میلی‌بار برسد، میزان چرخه‌های قابل تحمل در نمونه قبل از شکست در حدود ۲۶ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین برای حالتی که میزان نگهداری مذاب در بوته ۳۰ دقیقه بوده است با افزایش میزان خلأ فوق، تعداد چرخه‌های خستگی در حدود ۱۵ درصد ارتقا یافته است. برای حالتی که میزان خلأ اعمالی به کوره‌ی VIM ثابت باشد با کاهش یافتن زمان نگهداری مذاب در بوته، تعداد چرخه‌های مفید خستگی افزایش پیدا می‌کند. برای حالتی که میزان خلأ در حدود 10^{-1} میلی‌بار باشد با کاهش یافتن میزان نگهداری مذاب در بوته از ۳۰ دقیقه به ۳ دقیقه، تعداد سیکل‌های خستگی در حدود ۸ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین برای حالتی که میزان خلأ اعمالی به کوره‌ی VIM در حدود 10^{-3} میلی‌بار باشد کاهش فوق در مدت زمان نگهداری مذاب در بوته منجر به افزایش ۱۹ درصدی در تعداد چرخه‌های قابل تحمل آلیاژ Hastelloy X قبل از شکست می‌گردد.



شکل ۱- شکل و ابعاد نمونه آزمایش خستگی کم چرخه بر اساس استاندارد ASTM-E606 (ابعاد به میلی‌متر)

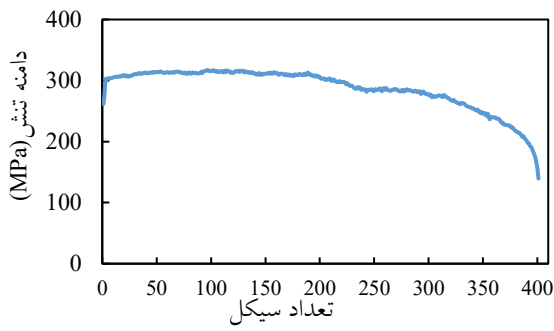
برای بررسی‌های ریزساختاری از محلول Kalling's Waterless، که شامل ۵ گرم CuCl_2 ، ۱۰۰ میلی‌لیتر HCl و ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول است، استفاده شد. ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus بررسی و اندازه‌دانه‌ها و رسوبات با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر کلمکس و با توجه به استاندارد ASTM E112 اندازه‌گیری شد.

آزمون سختی‌سنجی ویکرز توسط دستگاه شرکت Easyway با بار ۱۰ کیلوگرم و مطابق استاندارد ASTM-E18 انجام گرفت. نتایج گزارش شده حاصل میانگین تعداد ۵ اندازه‌گیری است. آزمایش خستگی کم چرخه در دمای بالا مطابق استاندارد ASTM-E606 [۱۳] به صورت چرخه‌های کشش-کشش متوالی با سرعت حرکت فک ۲ میلی‌متر بر دقیقه و در حالت کرنش کنترل‌شده (دامنه کرنش ثابت)، در محدوده کرنش ۰/۶ درصد و دمای 750°C و نرخ کرنش $3 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$ در اتمسفر محیط انجام گرفت.

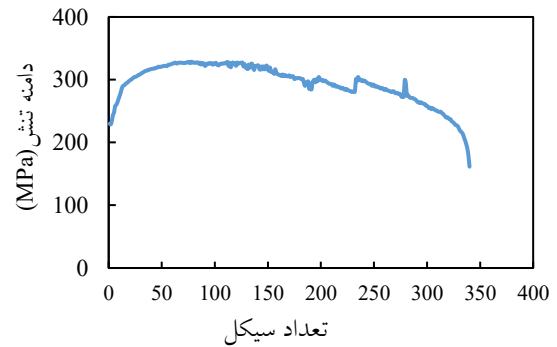
هر چرخه، شامل کرنش بالاتر از حد کرنش الاستیک در دمای 750°C و برگشت به کرنش صفر در نظر گرفته شد. چرخه‌ها تا شکست نمونه ادامه می‌یابد. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش بدون شیار و به صورت ورقی و مسطح با ابعاد نشان داده شده در شکل (۱) بوده که از ورق با ضخامت ۲۵/۱mm بریده شده و تحت آزمایش خستگی تحت شرایط فوق قرار گرفتند. جهت انجام آزمایش خستگی کم چرخه از دستگاه Zwick استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک کوره‌ی دو منطقه‌ای است و شمارش چرخه را نیز به صورت خودکار انجام می‌دهد. داده‌های حاصل از این دستگاه شامل نمودار نیرو بر حسب تغییر طول است و استخراج بقیه نمودارها و داده‌ها با توجه به نمودار نیرو بر حسب تغییر طول انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

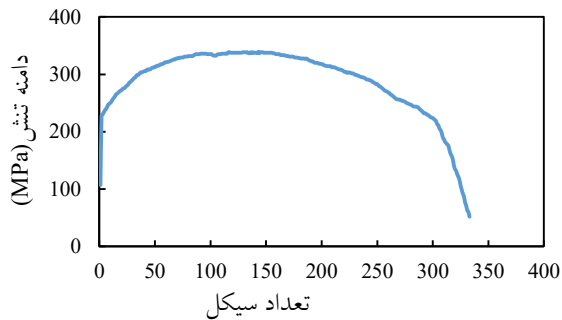
در نمودارهای شکل (۲) تأثیر میزان خلأ اعمال شده بر مذاب و زمان نگهداری مذاب در بوته بر خواص خستگی کم چرخه‌ی سوپرآلیاژ Hastelloy X نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که پارامترهای ذوب تأثیر قابل توجهی بر رفتار خستگی آلیاژ دارد. به طوری که نمونه‌های H-3-3 و H-1-3 به ترتیب ۳۲۱ و ۴۰۷ چرخه قبل از شکست تحمل نموده‌اند. همچنین تعداد چرخه‌های آزمایش خستگی برای نمونه‌های H-3-30 و H-1-30 به ترتیب برابر با ۳۴۲ و ۲۹۶ چرخه بوده است.



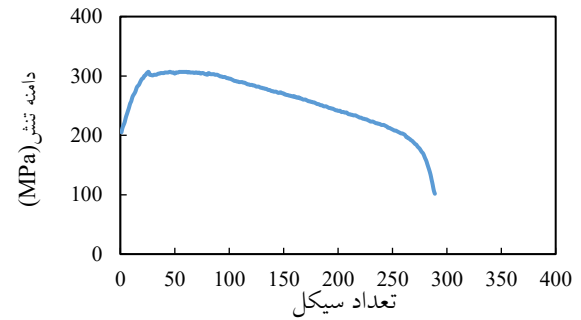
ب



الف



د



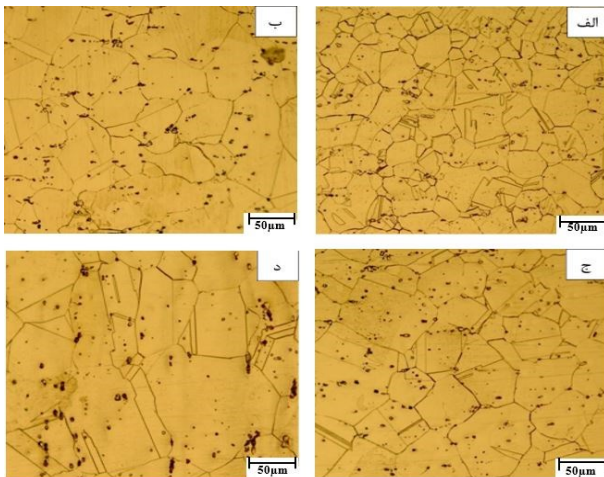
ج

شکل ۲- تأثیر میزان خلأ و زمان نگهداری مذاب در بوته بر رفتار خستگی آلیاژ Hastelloy X (میزان کرنش = ۰.۶ درصد و دما = ۷۵۰ °C):
 (الف) H-1-3؛ (ب) H-3-3؛ (ج) H-3-30؛ (د) H-3-30

دانه‌های ریز در ساختار و همچنین کاربیدهای M_6C و $M_{23}C_6$ مانع از اشاعه‌ی ترک‌های حاصل از فرآیند خستگی در آلیاژ شده و باعث افزایش عمر خستگی آلیاژ بر اساس شکل (۱) می‌گردد. تأثیر مرزدانه بر رشد ترک‌های خستگی در آلیاژ Hastelloy X توسط ابوزنید و همکاران [۱۴] بررسی شده است که دارای همخوانی مناسب با نتایج حاصل از این پژوهش است. در فرآیند خستگی، عمر خستگی آلیاژ توسط دو مرحله‌ی اصلی شامل مرحله‌ی جوانه‌زنی ترک‌های خستگی و مرحله‌ی رشد ترک کنترل می‌شود. وجود دانه‌های درشت در ساختار منجر به افزایش غیر همگنی توزیع کرنش در حین بارگذاری چرخه‌ای در آلیاژهای مهندسی و به‌ویژه آلیاژ Hastelloy X می‌گردد. لیو و همکاران [۱۵] مدل اسمت-واتسون-تاپر را بهینه نموده‌اند تا تأثیر اندازه‌ی دانه بر رفتار خستگی کم چرخه سوپرآلیاژهای پایه نیکل را بررسی نمایند. نتایج حاصل همانند این پژوهش نشان می‌دهد در شرایطی که دانه‌های درشت در ساختار وجود داشته باشد، افزایش غیر همگنی کرنشی منجر به افت استحکام خستگی و تعداد سیکل‌های مفید قبل از شکست در سوپرآلیاژ پایه نیکل می‌گردد.

در مدل فیزیکی طراحی شده توسط ژانگ و همکاران [۱۶] نیز با دقت بالا پیش‌بینی شده است که با افزایش اندازه‌ی دانه در

مقایسه داده‌های مربوط به رفتار خستگی آلیاژ Hastelloy X نشان می‌دهد اثر زمان نگهداری مذاب در بوته بر رفتار خستگی آلیاژ در حین ذوب ریزی سوپرآلیاژهای پایه نیکل (Inconel 550) و سوپرآلیاژهای پایه کبالت (S-816) منجر به بهبود رفتار خستگی دما بالا و افزایش تنش گسیختگی در این آلیاژها می‌گردد. در ادامه به تحلیل رفتار خستگی بر اساس پارامترهای ریزساختاری و ترکیب شیمیایی پرداخته می‌شود. در شرایطی که در حین ذوب ریزی آلیاژ Hastelloy X، میزان خلأ پایین باشد (فشار اعمالی در حدود 10^{-1} میلی بار)، اندازه متوسط دانه برای نمونه‌های H-1-3 و H-3-30 بر اساس شکل ۲ اندازه‌گیری شده که به ترتیب برابر با 44 ± 7 و 71 ± 10 میکرومتر خواهد بود. بنابراین با افزایش یافتن زمان نگهداری مذاب در بوته از ۳ دقیقه به ۳۰ دقیقه، رشد دانه رخ داده و کسر حجمی کاربیدهای موجود در ساختار کاهش پیدا می‌کند. کسر حجمی کاربیدها در جدول ۲ گزارش شده است. با تشکیل دانه‌های درشت در آلیاژ Hastelloy X، میزان استحکام کششی نهایی و سختی آلیاژ نیز بر طبق رابطه‌ی هال-پیچ افت پیدا می‌کند. همچنین نتایج مربوط به آزمایش خستگی کم چرخه در شکل (۱) نشان‌دهنده‌ی کاهش یافتن تعداد چرخه‌های مفید در آلیاژ قبل از پدیده‌ی شکست است. وجود



شکل ۳- ریزساختار اولیه سوپرآلیاژ Hastelloy X در خلأ ۱۰^{-۱} میلی‌بار و به مدت زمان ۳ دقیقه، (ب) خلأ ۱۰^{-۳} میلی‌بار و به مدت زمان ۳ دقیقه، (ج) خلأ ۱۰^{-۱} میلی‌بار و به مدت زمان ۳۰ دقیقه، (د) خلأ ۱۰^{-۳} میلی‌بار و به مدت زمان ۳۰ دقیقه (برخی از دوقلویی‌ها با پیکان روی شکل نشان داده شده است)

در رابطه‌ی $\sigma_f(1)$ و H_v و area به ترتیب استحکام خستگی، سختی و سطح مؤثر در ریزساختار است. جزئیات و روابط ریاضی مربوط به نحوه‌ی محاسبه سطح مؤثر آخال و کاربردها در منابع مربوط ذکر شده است [۱۸]. کوبایشی و همکاران [۱۹] با استفاده از مدل موراکامی و با در نظر گرفتن آخال و کاربردهای موجود در سوپرآلیاژهای پایه نیکل، رفتار خستگی کم چرخه و دما بالا در آلیاژ Inconel 718 بررسی نموده‌اند. در این پژوهش نیز رفتار خستگی آلیاژ Hastelloy X با استفاده از مدل موراکامی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد در شرایطی که آلیاژ Hastelloy X در خلأ بالا (فشار اعمالی به کوره‌ی VIM = ۱۰^{-۳} میلی‌بار) تولید شده باشد از مدل موراکامی تبعیت می‌کند. همچنین کسر حجمی کاربرد مربوط به آلیاژهای H-3-3 و H-3-30 به ترتیب برابر با ۸/۰۵ و ۵/۲ درصد است (جدول ۲). میزان سختی برای آلیاژ H-3-3 و H-3-30 به ترتیب برابر با ۱۸۰ و ۱۷۲ ویکرز به‌دست آمده است. بررسی‌های ریزساختاری نیز نشان می‌دهد که با وجود کاهش یافتن آخال و کاربردها در آلیاژ H-3-30 در مقایسه با آلیاژ H-3-3، کاربردهای درشت با توزیع غیرهمگن در آلیاژ H-3-30 تشکیل شده است. (شکل ۲ ب و د). بنابراین سطح مؤثر مربوط به کاربردها برای آلیاژ H-3-30 در مقایسه با H-3-3 بزرگ‌تر است. بنابراین طبق رابطه‌ی (۱) می‌توان بیان نمود که کاهش سختی در آلیاژ H-3-30 و افزایش سطح مؤثر کاربردها در آلیاژ H-3-30 در مقایسه با آلیاژ H-3-3 منجر به کاهش یافتن استحکام خستگی در آلیاژ H-3-30 شده است.

سوپرآلیاژهای پایه نیکل تعداد سیکل‌های خستگی افت پیدا می‌کند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد در شرایطی که میزان خلأ موجود در حین ذوب ریزی در کوره‌ی VIM افزایش یافته و فشار اعمالی در حدود ۱۰^{-۳} میلی‌بار گردد، در این حالت نیز با افزایش یافتن زمان نگهداری مذاب در بوته، اندازه دانه از ۶۶ میکرومتر (نمونه‌ی H-3-3) تا ۷۸ میکرومتر (نمونه‌ی H-1-30) افزایش یافته است. تشکیل دانه‌های درشت برای نمونه‌های H-1-30 در مقایسه با نمونه‌ی H-3-3 منجر به افت سختی و استحکام کششی نیز بر اساس رابطه‌ی هال-پچ می‌شود و همچنین به دلیل افزایش غیرهمگنی توزیع کرنش در حین بارگذاری چرخه‌ای، تعداد چرخه‌های خستگی برای نمونه‌ی H-1-30 در مقایسه با نمونه‌ی H-3-3 کاهش یافته است. فورنیر و همکاران [۱۷] تأثیر کسر حجمی دوقلویی بر رفتار خستگی کم‌چرخه در سوپرآلیاژهای پایه نیکل در دمای محیط و دما بالا را بررسی نموده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد فصل مشترک مابین دوقلویی‌ها مکان‌های مرجح برای جوانه‌زنی و رشد ترک‌های خستگی محسوب می‌شوند. همچنین تأثیر دوقلویی بر رفتار خستگی سوپرآلیاژهای پایه نیکل در دمای بالا در مقایسه با دمای محیط تأثیر بیشتری دارد [۱۷]. با این وجود به دلیل این که در آلیاژ مورد مطالعه کسر حجمی دوقلویی‌ها در آلیاژهای H-1-3 و H-3-3 در مقایسه با آلیاژهای H-1-30 و H-1-30 بالا است. همچنین این آلیاژها (آلیاژ H-1-3 و H-3-3) در مقایسه با آلیاژهای H-1-30 و H-3-30 در مقایسه با آلیاژهای H-1-30 و H-3-30 دانه‌ریز هستند. بنابراین می‌توان بیان نمود که ظهور دانه‌های ریز در آلیاژهای فوق بر میزان دوقلویی (برخی از دوقلویی‌ها با پیکان روی شکل ۳) نشان داده شده است) تشکیل یافته شده در ساختار غلبه کرده و منجر به بهبود رفتار خستگی در آلیاژ H-1-3 (دانه‌ریز همراه با کسر حجمی بالا از دوقلویی) در مقایسه با آلیاژ H-1-30 (دانه‌درشت همراه با کسر حجمی پایین از دوقلویی) شده است. نتایج مشابه در مورد رفتار خستگی آلیاژهای H-3-3 و H-3-30 نیز مشاهده شده است. علاوه بر اندازه دانه و کسر حجمی دوقلویی، یکی دیگر از مشخصات ریزساختار که تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار خستگی آلیاژهای مهندسی و به‌ویژه آلیاژ Hastelloy X دارد اندازه، کسر حجمی و نحوه‌ی توزیع آخال غیرفلزی و کاربردها در ساختار است. تأثیر آخال غیرفلزی و سختی بر رفتار خستگی آلیاژهای مهندسی توسط موراکامی تعریف شده است [۱۸] (رابطه‌ی ۱):

$$\sigma_f = 1.41 \cdot (H_v + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \quad (1)$$

نظر قابلیت انحلال پذیری مناسب با نیکل دارد [۲۰]. بنابراین Ti و Al با تشکیل ترکیب‌های Ni₃X با ساختار D024 و L12 منجر به افزایش استحکام زمینه می‌گردند. نتایج حاصل از آزمایش سختی و کششی برای نمونه‌های H-1-3، H-3-3 و H-3-30 هم‌خوانی مناسبی با میزان تیتانیوم موجود در نمونه‌ها دارد افزایش میزان تیتانیوم و زمینه سخت‌تر شده در نتیجه حرکت نابجایی‌ها در حین تغییر شکل پلاستیک نیاز به تنش بحرانی بالاتر خواهد داشت که منجر به افزایش سطح تسلیم آلیاژ Hastelloy X می‌گردد. عنصر تیتانیوم بر رفتار مکانیکی نمونه‌های H-1-3 و H-3-30 تأثیر قابل‌توجهی دارد. نتایج حاصل از ICP نشان می‌دهد میزان تیتانیوم برای نمونه های H-1-3 و H-3-30 به ترتیب برابر با ۴۹۹ppm و ۱۶۹ppm است. بالا بودن میزان تیتانیوم برای نمونه‌ی H-1-3 نشان‌دهنده‌ی تشکیل زمینه‌ی سخت با استحکام بالا برای این نمونه در مقایسه با نمونه‌ی H-3-30 است. بنابراین در حین بارگذاری چرخه‌ای، در نمونه‌ی H-3-30، نابجایی‌ها به‌راحتی و به ازای تنش برشی پایین‌تر حرکت می‌کنند. درحالی‌که در حین آزمایش خستگی، تجمع نابجایی برای نمونه‌ی H-1-3 بالاتر بوده و جوانه‌زنی ترک به ازای چرخه‌های پایین رخ خواهد داد. بنابراین انتظار می‌رود در حین آزمایش خستگی، شکست در نمونه‌ی H-1-3 در مقایسه با نمونه‌ی H-3-30 در چرخه های پایین‌تر رخ دهد (شکل ۱). تأثیر تیتانیوم بر سختی زمینه ی سوپرآلیاژهای پایه نیکل توسط هولت و والاس نیز گزارش شده است [۲۱]. مطالعه‌ی تأثیر عناصر Pb، Te و Bi بر رفتار خستگی آلیاژ Hastelloy X نشان می‌دهد در شرایطی که میزان نگهداری مذاب در بوت‌ه برابر با ۳ دقیقه باشد با افزایش میزان خلأ موجود در کوره‌ی VIM میزان تلفات این عناصر افزایش خواهند یافت (نمونه‌ی H-1-3 و H-3-3). با کاهش یافتن میزان این عناصر، استحکام و سختی آلیاژ افت پیدا می‌کند. در نتیجه، در حین بارگذاری چرخه‌ای تعداد قابل‌توجهی از سیکل‌ها، صرف فرآیند سخت شدن در نمونه‌ی H-3-3 در مقایسه با نمونه‌ی H-1-3 شده و باعث افزایش عمر خستگی برای این نمونه می‌گردد. بنابراین می‌توان بیان نمود که پارامترهای مربوط به ذوب‌ریزی (میزان خلأ کوره‌ی VIM و زمان نگهداری مذاب در بوت‌ه) و همچنین مشخصات ریزساختاری (اندازه‌ی دانه، عناصر آلیاژی، کسر حجمی دوقلوبی و اندازه و نحوه‌ی توزیع کاربیدها در ریزساختار) تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار خستگی آلیاژ Hastelloy X دارد. در حالت کلی تشکیل دانه‌های درشت منجر به غیرهمگنی توزیع کرنش در حین بارگذاری چرخه شده در نتیجه خواص خستگی با

جدول ۲- تغییرات کسر حجمی کاربید سوپرآلیاژ Hastelloy X نورد گرم شده

در خلأها و مدت زمان‌های نگهداری مختلف

کد نمونه	H-1-3	H-1-30	H-3-3	H-3-30
کسر حجمی کاربیدها (%)	۹/۶±۰/۶	۵/۵±۰/۴	۸/۱±۰/۵	۵/۲±۰/۴

در ادامه، تأثیر عناصر آلیاژی بر رفتار خستگی آلیاژ Hastelloy X مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در جدول ۳ نشان داده شد که با افزایش یافتن زمان نگهداری مذاب در بوت‌ه به دلیل ادامه پیدا کردن فرآیند نفوذ، میزان تلفات عناصر آلیاژی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش میزان خلأ موجود در کوره‌ی VIM منجر به افزایش میزان تلفات عناصر آلیاژی می‌گردد. بر اساس مطالعات انجام شده توسط جنا و همکاران [۲۰] عناصر آلیاژی موجود در سوپرآلیاژهای پایه نیکل بر اساس اندازه و میزان انحلال‌پذیری آن با نیکل به چهار گروه طبقه‌بندی می‌شوند که عبارتند از:

- (۱) تشکیل‌دهنده‌ی محلول جامد،
- (۲) تشکیل‌دهنده‌ی رسوب،
- (۳) تشکیل‌دهنده‌ی کاربید،
- (۴) پایدارکننده‌ی سطح.

جدول ۳- تغییرات عناصر جزئی با افزایش زمان نگهداری و میزان خلأ

کد نمونه	Pb (ppm)	Bi (ppm)	Te (ppm)	Al (ppm)	Ti (ppm)
H-1-3	۷/۸	۶۷/۳	۲۴۸	۳۳۲۷	۴۹۹
H-3-3	۴/۶	۲۸/۱	۶۵/۶	۳۱۷۹	۱۹۴
H-3-30	۳/۶	۶/۸	۸۷/۷	۳۴۹۹	۱۶۹

عناصر آلیاژی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت عبارتند از: Al، Ti، Bi، Pb و Te. با استفاده از محاسبه‌ی فاکتور اندازه می‌توان میزان انحلال‌پذیری این عناصر با نیکل را تعیین نمود. فاکتور اندازه با استفاده از رابطه‌ی (۲) قابل محاسبه است:

$$\text{size factor} = \frac{d_i - d_{Ni}}{d_{Ni}} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق d_i و d_{Ni} به ترتیب نشان‌دهنده‌ی قطر اتمی عنصر (i) و نیکل است. نتایج حاصل از رابطه‌ی فوق نشان می‌دهد فاکتور اندازه مربوط به عناصر Ti و Al با نیکل در حدود ۱۵ درصد است درحالی‌که مقدار این فاکتور اندازه برای عناصر Bi، Te و Pb بیشتر از ۲۰ درصد است. در شرایطی که فاکتور اندازه کمتر در محدوده‌ی ۱۵-۱۵ درصد باشد، عنصر مورد

۵- رفتار خستگی کم چرخه‌ی آلیاژ Hastelloy X در دمای 750°C از مدل موراکامی تبعیت می‌کند به طوری که افزایش سختی آلیاژ و تشکیل کاربیده‌های ریز با توزیع یکنواخت در ساختار منجر به بهبود رفتار خستگی آن می‌گردد.

۶- فشار خلأ در حدود 10^{-3} میلی‌بار و زمان نگهداری مذاب، ۳ دقیقه بهترین شرایط برای رسیدن به بالاترین عمر خستگی در این پژوهش به دست آمد. از دلایل بهبود عمر خستگی می‌توان به کاهش اندازه دانه، کاهش کاربیده‌ها و توزیع یکنواخت آن در ساختار و کاهش میزان عناصر شبه‌فلزی Bi، Te، و Pb اشاره کرد.

مراجع

- [1] Hastelloy X alloy brochure H-3009, Haynes International Inc., 1997, 1-16.
- [2] Reed R.C., The Superalloys: fundamentals and applications, Cambridge University Press, 2008.
- [3] Turillon P., Evaporation of elements from 80.20 Nickel-Chromium during vacuum induction melting, Intransactions of Vacuum Metallurgy Conference, 1963.
- [4] Gao Sh., et al., Behavior of Nitrogen in GH4169 superalloy melt during vacuum induction melting using returned materials, Metals, 2021, 11 1-16.
- [5] Sutton W., Progress in the vacuum (VIM, VAR) melting of high performance alloys, High Temperature Technology, 1983, 1(5) 267-273.
- [6] Chernov B., Ageev P., Behaviour of lead, Bismuth, Antimony, Tin, and Arsenic in Iron and Nickel in heats in a vacuum induction furnace, Stal, Nov. 1968, 11, 1003-1004.
- [7] Srivastava S., Klarstrom D., The LCF behavior of several solid solution strengthened alloys used in gas turbine engines, International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, ASME 1990.
- [8] Reddy G.P., et al., On dual-slope linear cyclic hardening of Hastelloy X, Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(16-17) 3848-3851.
- [9] Mughrabi H., Dislocations and properties of real materials, Book 323, London, The Institute of Metals, 1985 244.
- [10] Obrtlík K., et al., Isothermal fatigue behavior of cast superalloy inconel 792-5A at 23 and 900 C, Journal of Materials Science, 2009, 44(12) 3305-3314.
- [11] Zhao L., et al. Fatigue performance of Hastelloy X at elevated temperature via small punch fatigue test, Journal Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 116 Suppl .C, 103-118
- [12] ASM Handbook, Vol. 4: Heat treating, ASM International, 1991.
- [13] ASTM E606: Standard practice for strain-controlled fatigue testing, Annual Book of ASTM Standards, 1998, 3.
- [14] Abuzaid W., et al., Fatigue crack initiation in hastelloy X the role of boundaries, Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 2013, 36(8) 809-826.
- [15] Liu L., et al., Effect of grain size on low cycle fatigue life in compressor disc superalloy GH4169 at 600 C, Procedia Structural Integrity, 2017, 7, 174-181.
- [16] Zhang P., et al., Grain size based low cycle fatigue life prediction model for Nickel-Based superalloy,

افزایش اندازه‌ی دانه افت پیدا می‌کند. در مقابل توزیع همگن کاربیده‌ها با اندازه‌ی دانه‌ی کوچک منجر به بهبود سختی و خستگی آلیاژ Hastelloy X می‌شود. در شرایطی که فرآیند ذوب ریزی و تولید آلیاژ منجر به افزایش تلفات عناصر آلیاژی (مانند Bi، Pb، Te و ...) گردد، استحکام کششی آلیاژ در دمای محیط و همچنین خواص خستگی کم چرخه‌ی آلیاژ در دمای بالا بهبود می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- با افزایش زمان نگهداری مذاب در خلأ 10^{-1} میلی‌بار میزان تیتانیوم از 0.499% به 0.27% درصد وزنی و در خلأ بالاتر 10^{-3} میلی‌بار، از 0.194% به 0.169% کاهش یافته است. تیتانیوم فشار بخار نسبتاً بالایی دارد؛ لذا در اثر ذوب در خلأ بخار شده و وارد فاز گازی شده و از طریق سیستم خلأ حذف می‌شود.

۲- با بالا بردن خلأ از 10^{-1} میلی‌بار به 10^{-3} میلی‌بار، میزان اتلاف عناصر Pb، Bi و Te به ترتیب برابر با ۴۱، ۵۸ و ۷۳ درصد است که این میزان اتلاف با میزان فشار بخار این عناصر در دمای 1350°C هم‌خوانی دارد؛ به این صورت که با افزایش فشار بخار، میزان اتلاف عنصر نیز افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش خلأ از 10^{-1} به 10^{-3} میلی‌بار، اندازه دانه در نمونه‌های با مدت زمان نگهداری ۳ دقیقه، به ترتیب از ۴۴ به ۶۶ میکرومتر و در زمان نگهداری ۳۰ دقیقه نیز از ۷۱ به ۷۸ میکرومتر افزایش یافت و رشد دانه اتفاق افتاده است. در نمونه‌های با مدت زمان نگهداری ۳ دقیقه، رشد دانه قابل توجه است ولی در زمان ۳۰ دقیقه، با افزایش میزان خلأ، رشد دانه‌ی چندانی اتفاق نیفتاده و اندازه دانه تقریباً ثابت مانده است.

۴- نمونه‌های H-1-3 و H-3-3 به ترتیب ۳۲۱ و ۴۰۷ چرخه قبل از شکست تحمل نموده‌اند. همچنین تعداد چرخه‌های آزمایش خستگی برای نمونه‌های H-3-30 و H-1-30 به ترتیب برابر با ۳۴۲ و ۲۹۶ چرخه بوده است. در شرایطی که زمان نگهداری مذاب ۳ دقیقه و میزان خلأ اعمالی در کوره‌ی VIM از 10^{-1} به 10^{-3} میلی‌بار برسد، میزان چرخه‌های قابل تحمل در نمونه قبل از شکست در حدود ۲۶ درصد افزایش خواهد یافت. برای حالتی که میزان خلأ در حدود 10^{-3} میلی‌بار باشد با کاهش یافتن میزان نگهداری مذاب در بوته از ۳۰ دقیقه به ۳ دقیقه، تعداد سیکل‌های خستگی در حدود ۱۹ درصد افزایش پیدا کرده است.

- [19] Kobayashi K., et al., Grain size effect on high-temperature fatigue properties of Alloy718, *Materials Letters*, 2005, 59(2-3) 383-386.
- [20] Jena A., Chaturvedi M., The role of alloying elements in the design of Nickel-base superalloys, *Journal of Materials Science*, 1984, 19(10) 3121-3139.
- [21] Holt R.T., Wallace W., Impurities and trace elements in Nickel-Base superalloys, *International Metals Reviews*, 1976, 21(1) 1-24.
- Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(10) 2102-2106.
- [17] Fournier D., Pineau A., Low cycle fatigue behavior of inconel 718 at 298k and 823k, *Metallurgical Transactions A*, 1977, 8(7) 1095-1105.
- [18] Murakami Y., Beretta S., Small defects and inhomogeneities in fatigue strength: experiments, models and statistical implications, *Extremes*, 1999, 2(2) 123-147.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

The Effect of Melt Holding Time and Vacuum Pressure on the High Temperature Fatigue Life of Ni Based Hastelloy X Superalloy

Masumeh Seifollahi^{1*}, Nima Kachuee², Seyed Mahdi Abbasi³, Seyed Mahdi Ghazi Mir Saeed²

1. Assistant professor, 2. M.Sc. Researcher, 3. Professor

Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

*Corresponding author: 22936494, m_seifollahi@mut.ac.ir

Paper history:

Received: 10 May 2022

Accepted: 20 Aug. 2022

Keywords:

Hastelloy X,
Melt holding time,
Vacuum pressur
Fatigue life
Microstructure.

Abstract:

The aim of this study is the improvement of fatigue properties via controlling the vacuum pressure and melt holding time. The vacuum pressure of 0.1 and 0.001 mbar were applied during melting in VIM and the melt were kept for 3 and 30 minutes. The results show that with increasing the pressure from 0.1 to 0.001 mbar at 3 and 30 min, the grain size increase from 44 to 66 μm and from 71 to 78 μm , respectively. Also, the volume fraction of carbides at 3 min decrease from 9.6 to 8.05 vol.% with increasing the pressure and it also decrease with increasing time as well. High temperature low cycle fatigue test was carried out at strain of 0.6% and temperature of 750°C. At 3 and 30 min with increasing pressure, the cycling life increase 26% and 15%, respectively. At constant pressure, with decreasing time, the cycling lives also increase.

Please cite this article using:

Masumeh Seifollahi, Seyed Mahdi Abbasi, Nima Kachuee, Seyed Mahdi Ghazi Mir Saeed, The Effect of Melt Holding Time and Vacuum Pressure on the High Temperature Fatigue Life of Ni Based Hastelloy X Superalloy, in Persian, *Founding Research Journal*, 2021, 5(3) 205-213.

DOI: 10.22034/FRJ.2022.341770.1155

Journal homepage: www.foundingjournal.ir