

تأثیر افزودن جزئی منیزیم بر ریزساختار و خواص مکانیکی دما بالای سوپرآلیاژ Hastelloy X

آفاق پناهی مقدم، معصومه سیف اللهی*، سید مهدی عباسی و سید مهدی قاضی میرسعید

پژوهشکده مواد فلزی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳)

چکیده- هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی تأثیر افزودن جزئی منیزیم بر رفتار مکانیکی دما بالا و تغییرات ریزساختاری سوپرآلیاژ Hastelloy X است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش منیزیم از صفر تا ۴۷ ppm، اندازه دانه از ۶۴ به ۳۸ میکرومتر کاهش و میزان کسر حجمی کاربیدها از ۲/۲ به ۴/۶ درصد افزایش یافته است. همچنین منیزیم توزیع ذرات کاربیدی در زمینه را از درشت و پیوسته به صورت مجزا تغییر داده است. منیزیم با مکانیزم جدایش در مرز دانه و در مرز کاربید/ زمینه منجر به تغییر ترکیب شیمیایی کاربیدها شده و خواص مکانیکی آلیاژ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش منیزیم از صفر تا ۴۷ ppm باعث افزایش استحکام کششی از ۳۰۹ به ۳۴۵ مگاپاسکال، کاهش داکتیلیته و افزایش عمر گسیختگی از ۱۶ به ۳۰ ساعت شده است. اندازه دانه و میزان کاربیدها عوامل تأثیرگذاری در میزان عمر گسیختگی است و در این پژوهش افزایش میزان کاربیدها در اثر افزودن منیزیم مکانیزم غالب بر افزایش عمر گسیختگی است.

واژه‌های کلیدی: سوپرآلیاژ Hastelloy X، منیزیم، کسر حجمی کاربید، خواص کششی، خواص تنش - گسیختگی.

The Effect of Mg on Microstructure and High Temperature Mechanical Properties of Hastelloy X Superalloy

A. Panahi Moghadam, M. Seifollahi, S. M. Abbasi and S. M. Ghazi Mirsaeed*

Metallic Materials Research Center (MMRC_MA), Malek Ashter University of Technology Tehran, Iran.

Abstract: This paper was concerned with the effect of Mg on the temperature mechanical behavior and evaluation of the microstructure. The results showed that with increasing Mg from 0 to 47 ppm, the grain size was reduced from 64 to 38 μm and the carbides volume fraction was raised from 2.2 to 4.6 vol%. Mg changed the morphology of the carbide from a coarse and continuous one to a separate one. Mg with the mechanisms of grain boundary and matrix/carbide boundary led to changing the carbide composition and also, the mechanical properties. Mg increment from 0 to 47 ppm caused the enhancement of yield strength and rupture life from 309 to 345 MPa and from 16h to 30h, respectively. Grain size and the amount of carbide were the main factors contributing to the rupture of life properties in this study. The increment of the carbide volume fraction was the main mechanism of rupture life enhancement.

Keywords: Hastelloy X Superalloy, Mg, Carbide Volume Fraction, Tensile Properties, Rupture Properties.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m_seifollahi@alumni.iust.ac.ir

تجزیه آستنیت کمک کرده و منجر به اصلاح ریزساختار می‌شود. همچنین منیزیم باعث تشکیل ساختار با دانه‌های هم‌محور می‌شود. منیزیم یک عنصر فلزی قلیایی خاکی است که با اکسیژن، گوگرد، فسفر و غیره واکنش‌پذیری قوی دارد. بنابراین افزودن جزئی منیزیم در تصفیه ناخالصی‌ها مفید است. با توجه به اثرات مثبت منیزیم بر خواص فولادها و سوپرآلیاژها و اینکه تاکنون در زمینه بررسی تأثیر افزودن جزئی منیزیم بر خواص مکانیکی سوپرآلیاژ Hastelloy X، تحقیقاتی صورت نگرفته است؛ لذا هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر افزودن منیزیم روی تغییرات ریزساختار، و خواص مکانیکی دما محیط و دما بالای این سوپرآلیاژ است.

۲- مواد و روش تحقیق

شمش‌هایی از جنس سوپرآلیاژ Hastelloy X با ترکیب ذکر شده در جدول (۱) و مقادیر صفر، ۱۷، ۳۳ و ۴۷ ppm منیزیم توسط فرایندهای ذوب القایی تحت خلأ (VIM) و ذوب مجدد تحت سرباره الکتریکی (ESR) تهیه شدند. فرایند ذوب به این صورت انجام شد که عناصر مورد نیاز جهت تولید سوپرآلیاژ پایه نیکل Hastelloy X، با درصدهای وزنی استاندارد آنها در کوره القایی (۱۷ آمپر - ۴۳۰ ولت - ۳۰۰۰ هرتز) ذوب شده و شمش اولیه در قالب به ابعاد $۴۰ \times ۶۰ \times ۲۰$ تهیه شد. سپس از شمش اولیه، به تعداد پنج نمونه کوچک برش زده شد. به هر یک از شمش‌ها به ترتیب برای رسیدن منیزیم به مقادیر صفر، ۱۷، ۳۳ و ۴۷ ppm در شمش نهایی، منیزیم به صورت شمش Ni-Mg در مرحله ذوب مجدد در کوره ذوب القایی تحت خلأ^۱ (VIM) افزوده شد و در داخل قالب فلزی ریخته‌گری شد. تصفیه و ذوب مجدد، در کوره ذوب مجدد سرباره^۲ (ESR) با ظرفیت حدود ۱۰ کیلوگرم، جریان ۳۵۰۰ آمپر و ولتاژ ۴۰-۲۵ ولت و قالب $۱۵۰ \times ۸۰ \times ۶۰$ میلی‌متر انجام شد.

سپس شمش‌ها تحت عملیات همگن‌سازی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت چهار ساعت قرار گرفته و سپس در آب سرد شدند. پس از آن عملیات نورد گرم در دمای ۱۱۰۰

سوپرآلیاژ پایه نیکل Hastelloy X یک سوپرآلیاژ استحکام یافته با محلول جامد است که به دلیل خواص استحکام دما بالا و قابلیت شکل‌پذیری عالی، کاربردهای زیادی در محفظه احتراق موتور توربین‌های گازی دارد [۱ و ۲]. تاکنون بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته [۱، ۳ و ۴] روی سوپرآلیاژ Hastelloy X، به منظور افزایش خواص مکانیکی دما بالای آن، به کمک تغییر شکل سرد و عملیات حرارتی آنیل انجام شده است. از طرفی با توجه به منابع مطالعاتی افزودن برخی از عناصر آلیاژی به میزان چند ppm نیز تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی سوپرآلیاژهای پایه نیکل دارد؛ از جمله عناصر جزئی می‌توان به عنصر منیزیم اشاره کرد. تحقیقات [۷-۵] نشان داده که افزودن ۱-۳۵ ppm منیزیم به سوپرآلیاژ IN718، ۰-۱۶۰ ppm به IN690 و ۳۰-۶۰ ppm به MAR-M247 باعث افزایش خواص مکانیکی این قبیل سوپرآلیاژهای پایه نیکل می‌شود. علاوه بر این، در تحقیقات به تأثیر منیزیم در افزایش چسبندگی مرزدانه اشاره شده است [۸]. مطالعات مختلفی [۵ و ۹-۱۳] درباره جدایش منیزیم در مرزدانه صورت گرفته است. نتایج آنالیز AES بر سوپرآلیاژ پایه نیکل GH36 جدایش منیزیم در مرزدانه را نشان می‌دهد. بهبود خواص مکانیکی در اثر جدایش منیزیم در منطقه فصل مشترک کاربرد/زمینه، به واسطه کاهش انرژی فصل مشترک و نیز جلوگیری از رشد کاربیدهاست. منیزیم حل شده در زمینه و کاربیدها باعث تغییر ترکیب شیمیایی آنها و افزایش میزان تنگستن و مولیبدن موجود در کاربید شده و بنابراین منجر به تغییر ثابت شبکه فاز زمینه و کاربید می‌شود [۶]. در سوپرآلیاژ Hastelloy X وجود کاربیدهای درشت MC در زمینه و مرزدانه باعث افت خواص می‌شود. به منظور به حداقل رساندن اثرات مضر کاربیدهای درشت MC، انجام عملیات حرارتی مناسب و نیز افزودن جزئی عناصر مؤثر است [۷]. در منابع دیگر [۱۴ و ۱۵] افزودن منیزیم به فولادهای زنگ‌نزن نیز بررسی شده است. در فولاد زنگ‌نزن، ناخالصی حاوی منیزیم به جوانه‌زنی ناهمگن فریت در طی

جدول ۱- نتایج آزمون ICP سوپرآلیاژ X Hastelloy با مقادیر مختلف منیزیم (درصد وزنی)

شمش	S	Mn	C	W	Co	Mo	Fe	Cr	Ni
آلیاژ ۱	۰/۰۰۹۴	۰/۳۲	۰/۰۴	۰/۷۹	۱/۷۷۱	۸/۴۲	۱۹/۲	۱۸/۰۴	Bal
آلیاژ ۲	۰/۰۰۹۰	۰/۳۸	۰/۰۴	۰/۸۲	۱/۶۷	۹/۲۴	۲۰/۲۴	۱۸/۹	Bal
آلیاژ ۳	۰/۰۰۸۸	۰/۳۷	۰/۰۴	۰/۸۰	۱/۶۴	۹/۲۴	۲۰/۲	۱۸/۹	Bal
آلیاژ ۴	۰/۰۰۰۷	۰/۳۶	۰/۰۴	۰/۸۲	۱/۶۴	۹/۲۵	۲۱/۳	۱۸/۹	Bal

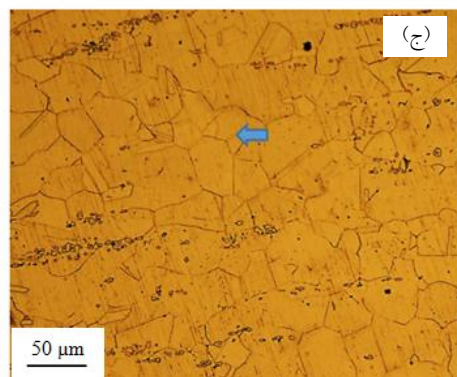
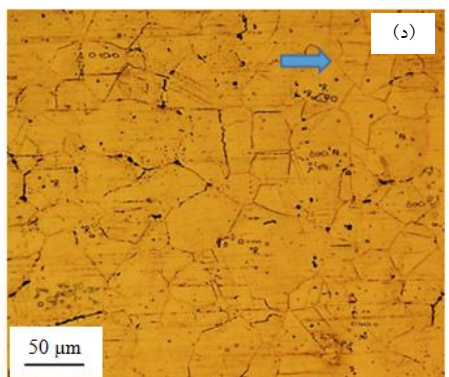
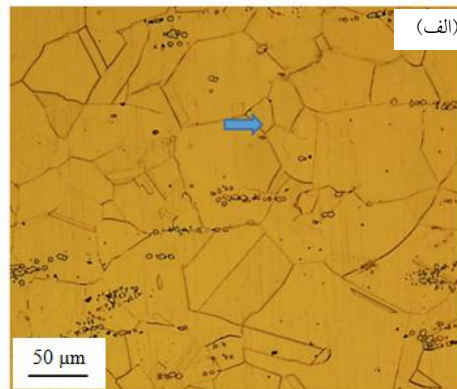
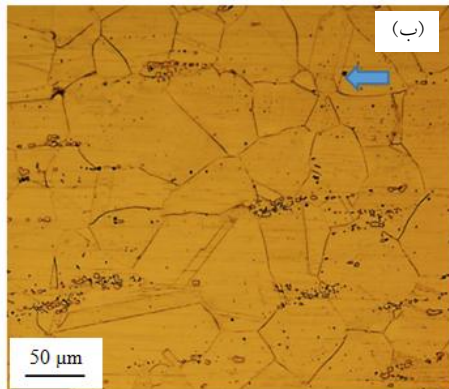
درجه سانتی‌گراد با ۸۳ درصد کاهش ضخامت انجام شد. پس از برش کاری از نمونه‌های نورد گرم، آلیاژها طی سه مرحله عملیات نورد سرد قرار گرفته و پس از هر مرحله، آنیل میانی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8 و با استفاده از دستگاه کشش مدل INSTRON 8502 انجام و سرعت کرنش، 10^{-3} بر ثانیه در نظر گرفته شد. جهت بررسی خواص تنش-گسیختگی، آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از استاندارد ASTM E139 انجام و در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و تنش ۱۳۰ مگاپاسکال صورت گرفت. برای بررسی ریزساختاری نیز از میکروسکوپی نوری^۳ مدل Olympus BX51 و میکروسکوپی الکترونی روبشی^۴ (SEM) مدل VEGA/TESCAN مجهز به دستگاه طیف‌سنجی توزیع انرژی^۵ (EDS) استفاده شد. به این منظور نمونه‌ها پس از سمباده زنی و پولیش، توسط محلول کالینگ با ترکیب شیمیایی ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک، ۱۰ میلی‌لیتر اتانول و ۰/۵ گرم کلرید مس $CuCl_2 \cdot II$ ، حکاکی شدند.

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) ریزساختار نوری آلیاژ فاقد منیزیم و آلیاژهای حاوی ۱۷، ۱۳ و ۴۷ ppm منیزیم تحت شرایطی که نمونه‌ها پس از نورد گرم تحت عملیات حرارتی آنیل در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفتند را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود با افزایش منیزیم از صفر تا ۴۷ ppm اندازه دانه زمینه از ۶۴ به ۳۸ میکرومتر کاهش یافته است. افزودن منیزیم باعث تغییر اندازه دانه فاز

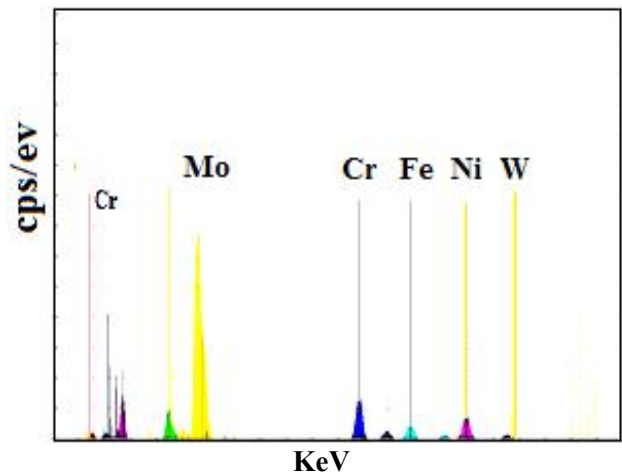
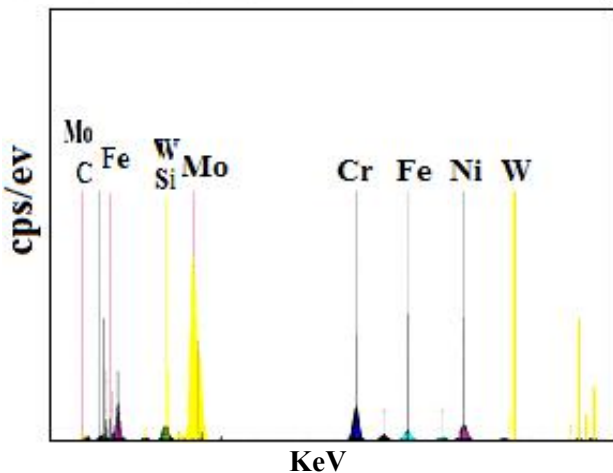
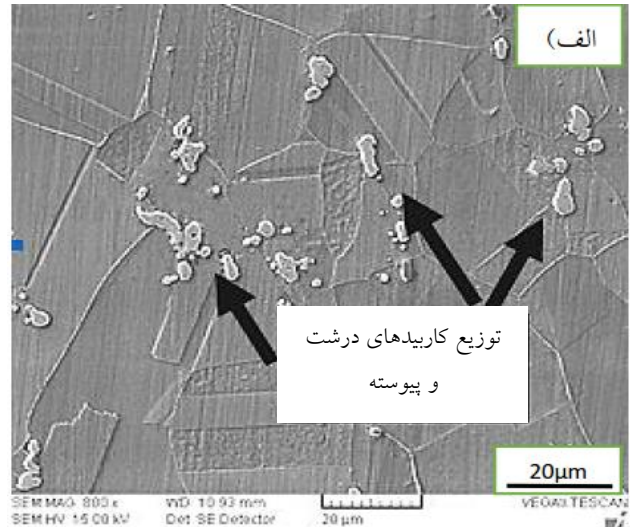
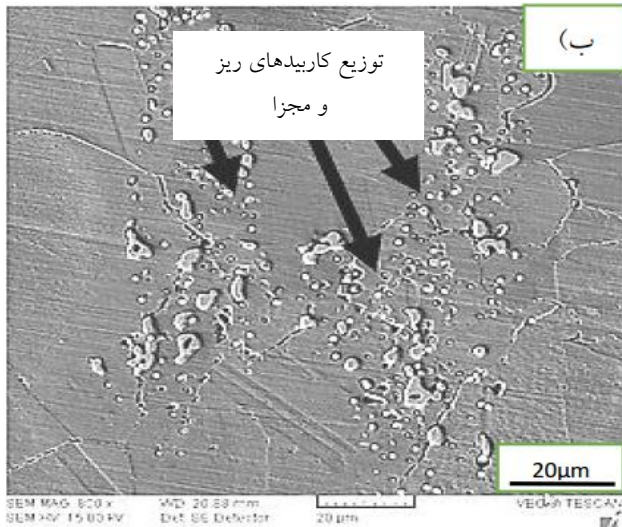
زمینه شده و در نتیجه کاهش اندازه دانه، مساحت کل مرزدانه افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد افزودن منیزیم باعث کاهش انرژی تشکیل مرزدانه شده و در نتیجه، کاهش اندازه دانه می‌شود. شکل (۲)، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) از توزیع کاربیدها در نمونه فاقد منیزیم و نمونه حاوی ۴۷ ppm منیزیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در حضور منیزیم توزیع کاربیدها به صورت پراکنده است اما در نمونه فاقد منیزیم رسوبات کاربیدی به صورت پیوسته در مرزدانه تجمع یافته‌اند. مرزدانه به‌عنوان مانعی در برابر حرکت ناب‌جایی‌ها بوده و در نتیجه در استحکام ماده مؤثر است. از طرفی با افزایش منیزیم میزان کاربیدها از ۲/۱ به ۴/۶ درصد افزایش یافته است. از تصاویر ریزساختاری می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حضور منیزیم در ترکیب شیمیایی باعث کاهش اندازه ذرات می‌شود؛ به‌نظر می‌رسد جدایش منیزیم در فصل مشترک کاربید/زمینه رخ داده و همین امر از رشد کاربیدها ممانعت کرده است. هنگام انجماد و در دماهای بالاتر از دمای انجماد آلیاژ، ابتدا کاربیدها تشکیل شده و چون در حضور منیزیم این کاربیدها ریز و مجزا هستند مراکز جوانه‌زنی افزایش و اندازه دانه کاهش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد منیزیم باعث افزایش سطح مرزدانه و بنابراین منجر به کاهش اندازه دانه می‌شود. علاوه بر این با توجه به اختلاف اندازه اتمی منیزیم با زمینه، منیزیم در مرزدانه‌ها جدایش می‌یابد و بنابراین جلوی حرکت مرزدانه را در شرایط نورد گرم شده گرفته و کاهش اندازه دانه را به همراه دارد. جدایش منیزیم در فصل مشترک کاربید-زمینه در سوپرآلیاژ MAR-M247 در مرجع [۱۲] گزارش شده است.



شکل ۱- ریزساختار Hastelloy X تحت عملیات حرارتی آیل در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد: الف) فاقد منیزیم، ب) حاوی ۱۷ ppm، ج) حاوی ۳۳ ppm و د) حاوی ۴۷ ppm منیزیم

M_۶C افزایش یافته است. با توجه به تحقیقاتی [۶] که در این زمینه صورت گرفته است علت تغییر ترکیب شیمیایی به حل شدن منیزیم در کاربید نسبت داده شده است. با توجه به تئوری جدایش، انحلال‌پذیری هر عنصر در زمینه به تمایل آن عنصر به جدایش نسبت داده شده است؛ هر چه انحلال‌پذیری عنصری کمتر باشد تمایل به جدایش آن بیشتر است. انحلال‌پذیری منیزیم در زمینه نسبت به مولیبدن کمتر است. از طرفی شعاع اتمی منیزیم نسبت به مولیبدن بیشتر بوده و به همین دلیل منیزیم تمایل به جدایش در مرزدانه را دارد. با جدایش منیزیم در مرزدانه، حضور منیزیم در کاربیدهایی که حین عملیات حرارتی تشکیل شده‌اند افزایش می‌یابد. از طرف دیگر نفوذ در زمینه کند شده و محل جوانه‌زنی کاربیدها افزایش یافته و مورفولوژی کاربیدها از حالت پیوسته به حالت مجزا تغییر کرده است. حضور منیزیم به صورت اتمی در مرزدانه و یا با ایجاد کاربیدهای مجزا جلوی رشد مرزدانه را گرفته و ساختار ریز

در شکل (۲-ج) و (۲-د) نتایج آنالیز طیف‌سنجی توزیع انرژی برای ترکیب شیمیایی کاربیدهای موجود در ریزساختار در مناطق مختلف برای نمونه فاقد منیزیم و نمونه حاوی ۴۷ ppm منیزیم نشان داده شده و ترکیب فازها در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج آنالیز طیف‌سنجی توزیع انرژی ترکیب شیمیایی فازها تغییر یافته است. در هر دو نمونه با توجه به اینکه میزان مولیبدن در کاربید نسبت به بقیه عناصر بیشتر است می‌توان گفت که کاربید از نوع M_۶C است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه حاوی منیزیم، کاربید M_۶C غنی از مولیبدن بوده که نسبت به نمونه فاقد منیزیم، میزان مولیبدن موجود در کاربید آن افزایش یافته است. عناصری نظیر مولیبدن و کروم از طریق تشکیل کاربید در مرزدانه‌ها سبب بهبود خواص مکانیکی سوپرآلیاژ پایه نیکل می‌شوند [۱۱]. از مقایسه نتایج میکروسکوپی الکترونی روبشی می‌توان دریافت که در حضور منیزیم، میزان فاز درشت MC کاهش و میزان فاز کاربید



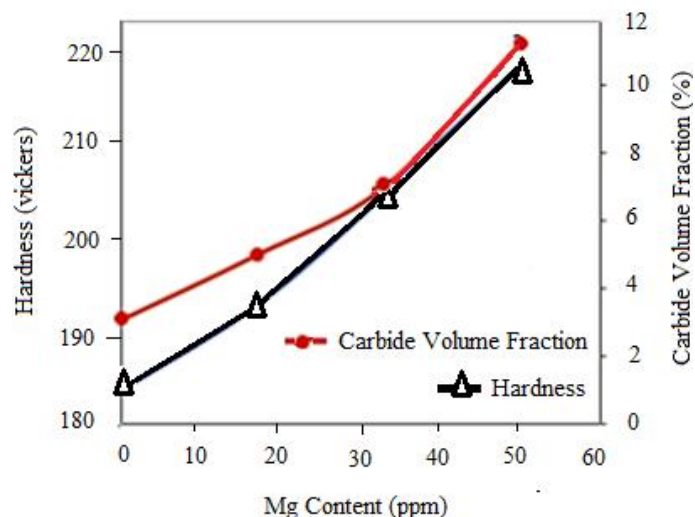
شکل ۲- ریزساختار میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز طیفسنجی توزیع انرژی سوپرآلیاژ Hastelloy X تحت عملیات حرارتی آنیل در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت: الف) فاقد منیزیم، ب) حاوی ۴۷ ppm منیزیم

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فاز زمینه و کاربید در سوپرآلیاژ Hastelloy X با مقادیر مختلف منیزیم

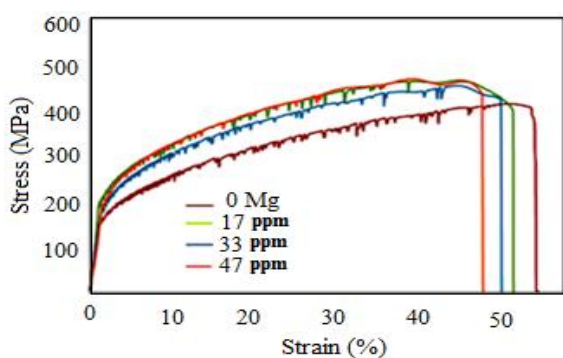
عناصر	آلیاژ	نیکل	کروم	مولیبدن	تنگستن	کربن	آهن
منطقه ۱ (زمینه)	نمونه فاقد منیزیم	۴۵/۰۰	۲۱/۹۰	۸/۰۵	۱۹/۴۰	۰/۸۳	۱/۰۹
	نمونه حاوی ۴۷ ppm منیزیم	۴۶/۲۰	۱۹/۳۱	۱۳/۳۲	۱۸/۷۱	۰/۸۳	۰/۹۰
منطقه ۲ (کاربید)	نمونه فاقد منیزیم	۲۰/۸۶	۱۸/۶۶	۴۳/۰۹	۸/۲۶	۰/۱۰	۵/۰۱
	نمونه حاوی ۴۷ ppm منیزیم	۱۹/۰۹	۱۷/۴۸	۵۴/۵۵	۲۰/۵۳	۸/۰۹	۸/۳۱

کاربید برحسب میزان منیزیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش منیزیم میزان سختی تقریباً ۲۰ ویکرز افزایش یافته است. کاربیدها یک نقش اساسی در قفل کردن مرزدانه‌ها و جلوگیری از لغزش یا مهاجرت آنها ایفا

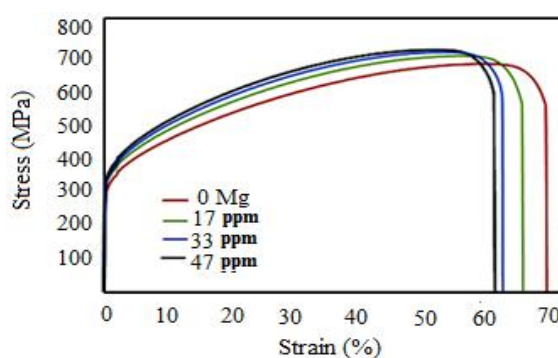
می‌شود. در تحقیق جی و همکاران [۸] و لیو و همکاران [۹] نیز گزارش شده که منیزیم منجر به کوچک‌تر شدن و کروی‌تر شدن کاربیدهای MC می‌شود. شکل (۳) نمودار تغییرات سختی و تغییرات کسر حجمی



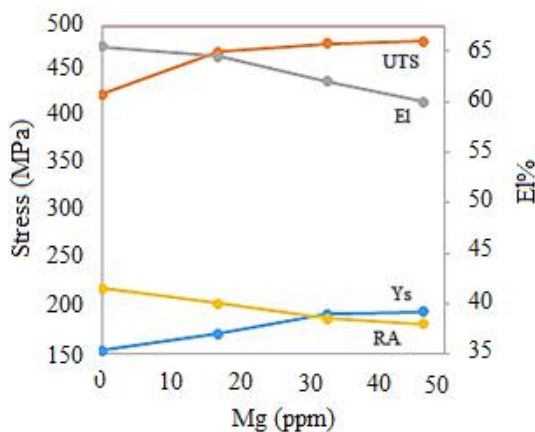
شکل ۳- تغییرات سختی در اثر افزودن منیزیم



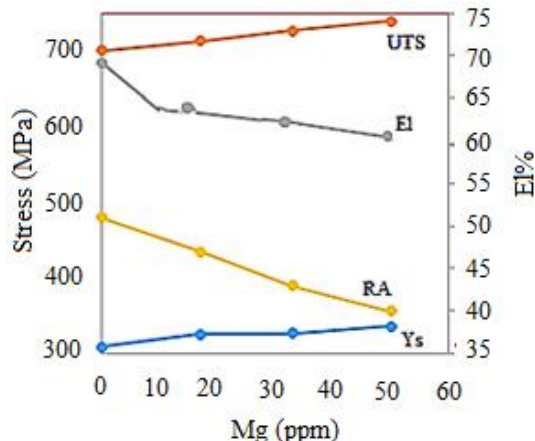
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴- نمودار تنش- کرنش و تغییرات خواص کششی با میزان منیزیم برای سوپرآلیاژ Hastelloy X: الف و ج) دما محیط،

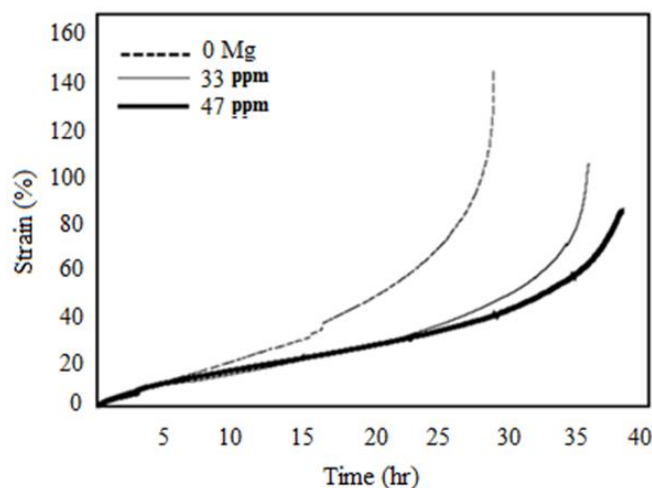
ب و د) دمای ۶۶۰ درجه سانتی گراد

شکل (۴) نتایج آزمون کششی دمای محیط سوپرآلیاژ Hastelloy X برای دو نمونه با مقادیر مختلف منیزیم را نشان

می‌کند و از این طریق و همچنین کاهش اندازه دانه باعث افزایش استحکام (سختی) می‌شود.

جدول ۳- خواص کششی دما محیط سوپرآلیاژ Hastelloy X بر حسب میزان منیزیم

شماره شمش	استحکام کششی (مگاپاسکال)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	ازدیاد طول (درصد)
آلیاژ ۱	۶۸۸	۳۰۶	۵۵
آلیاژ ۲	۷۳۱	۳۳۳	۵۳
آلیاژ ۳	۷۳۸	۳۳۵	۵۰
آلیاژ ۴	۷۴۵	۳۳۸	۵۰



شکل ۵- منحنی کرنش- زمان آزمایش تنش گسیختگی سوپرآلیاژ Hastelloy X تحت شرایط نورد گرم و آنیل شده در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی گراد

افزایش می‌یابد. بور و همکاران [۱۳] در سوپرآلیاژ پایه نیکل MAR-M247 گزارش کرده‌اند که افزودن ۲۰ ppm منیزیم منجر به افزایش استحکام تسلیم از ۵۷۶ به ۶۵۲ مگاپاسکال و استحکام کششی از ۷۸۸ به ۸۰۳ مگاپاسکال شده است. همچنین الوی و همکاران [۱۴] در مورد یک فولاد کم‌آلیاژ پر استحکام گزارش کرده‌اند که افزودن ۲۶ ppm منیزیم منجر به افزایش ۳۸ مگاپاسکال در استحکام تسلیم و ۷۰ مگاپاسکال در استحکام کششی شده است.

در شکل (۵) نتایج آزمایش تنش- گسیختگی سوپرآلیاژ Hastelloy X نورد گرم و آنیل شده در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی گراد حاوی مقادیر مختلف منیزیم تحت شرایط ۸۱۵ درجه سانتی گراد و ۱۳۰ مگاپاسکال ارائه شده است. بررسی نتایج حاصل از آزمایش تنش- گسیختگی نشان می‌دهد که ساختارهای با اندازه دانه ریزتر (نمونه حاوی ۴۷ ppm منیزیم)

می‌دهد. در جدول (۳) نتایج حاصل از آزمون کشش شامل استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول گردآوری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش منیزیم، استحکام تسلیم از ۳۰۶ به ۳۳۸ مگاپاسکال و استحکام کششی از ۶۸۸ به ۷۴۵ مگاپاسکال افزایش یافته است، اما انعطاف‌پذیری از ۵۵ درصد به ۵۰ درصد کاهش یافته است. با افزایش منیزیم با توجه به شکل (۲)، میزان رسوبات کاربیدی افزایش یافته و در نتیجه باعث افزایش استحکام کششی و تنش تسلیم شده است. از طرفی در اثر حضور منیزیم، میزان کاربیدها به‌خصوص کاربیدهای مرزدانه‌های افزایش یافته و با توجه به اینکه این فازها دارای فصل مشترک غیرکوهرنه با زمینه و مرزدانه هستند محل‌های مناسبی برای آغاز و پیشرفت ترک بوده و در نتیجه انعطاف‌پذیری کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با توجه به رابطه هال- پچ، هرچه اندازه دانه ریزتر باشد استحکام

گزارشات [۱۶ و ۱۷] نشان می‌دهد که افزایش منیزیم در سوپرآلیاژ GH220 از صفر تا ۱۲۵ ppm منجر به افزایش عمر شکست از ۷۵ به ۱۲۵ ساعت شده است. همچنین در مورد سوپرآلیاژ GH33 نیز افزایش منیزیم از صفر تا ۸۰ ppm عمر شکست آلیاژ را از ۲۴۳ به ۵۵۰ ساعت افزایش می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی افزودن منیزیم روی ریزساختار، خواص کششی دمای محیط و سختی سوپرآلیاژ پایه نیکل Hastelloy X است. نتایج به دست آمده به شرح ذیل است:

- با افزودن منیزیم از رشد دانه جلوگیری شده و باعث کاهش میانگین اندازه دانه می‌شود.
 - در حضور منیزیم کاربیدها کروی و توزیع آنها یکنواخت می‌شود و در نتیجه باعث افزایش خواص مکانیکی از جمله خواص کششی دما محیط می‌شود.
 - منیزیم باعث افزایش کسر حجمی کاربیدها شده و از این طریق باعث افزایش سختی شده است اما از آنجا که کاربیدها دارای فصل مشترک ناهم سیما با زمینه هستند، میزان ترک‌های مرزانه‌ای را افزایش داده و در نتیجه باعث کاهش انعطاف‌پذیری می‌شوند.
- در حضور منیزیم میزان فاز کاربید MC کاهش یافته و کاربرد M_۶C غنی از مولیبدن بیشتر شده و در نتیجه خواص بهبود یافته است.

نسبت به ساختار درشت دانه (نمونه فاقد منیزیم) عمر گسیختگی بالاتری دارند. مطابق با رابطه هال-پچ کاهش اندازه دانه باعث افزایش استحکام کششی و تنش تسلیم ماده می‌شود در حالی که طبق نظریه نابارو-هرینگ کاهش اندازه منجر به کاهش استحکام خزشی می‌شود؛ بنابراین انتظار می‌رود با کاهش اندازه دانه عمر خزشی کاهش یابد. از طرفی همان‌طور که در شکل (۲-ج) و (۲-د) مشاهده شد در حضور منیزیم کسر حجمی کاربید افزایش یافته و افزایش کاربیدها در نمونه حاوی ۳۳ ppm منیزیم می‌تواند دلیل افزایش عمر گسیختگی باشد. بنابراین مکانیزم غالب در افزایش عمر گسیختگی، افزایش کسر حجمی کاربید است. با توجه به شکل (۵) مرحله اول خزش برای تمام نمونه‌ها یکسان است اما با افزایش میزان منیزیم، زمان مرحله دوم و سوم خزش افزایش یافته است؛ به طوری که آهنگ حداقل خزش برای نمونه فاقد منیزیم برابر $10^{-4} \times 0/60$ میلی‌متر بر ثانیه است که نسبت به آهنگ حداقل خزش نمونه حاوی ۴۷ ppm منیزیم ($10^{-4} \times 0/22$ میلی‌متر بر ثانیه) بیشتر است. خزش مرحله سوم و در نهایت گسیختگی نمونه همراه با جوانه‌زنی و رشد ریزترک‌ها از تخلخل‌های موجود است. در برخی گزارشات [۴] مشاهده شده که عناصر جزئی از ترک مرزانه‌ای جلوگیری می‌کند. منیزیم به دلیل شعاع اتمی بزرگ‌تر، باعث کاهش غلظت جاهای خالی در سطح مرزانه شده و در نتیجه ضریب نفوذ جاهای خالی را کاهش می‌دهد. آغاز و اشاعه حفرات خزشی در اثر کاهش ضریب نفوذ جاهای خالی کاهش یافته و بنابراین جدایش منیزیم باعث تأخیر در اشاعه ترک اولیه شده و در نتیجه عمر شکست را افزایش می‌دهد.

واژه‌نامه

1. vacuum induction melting
2. electro slag remelting
3. optical microscopy
4. scanning electron microscopy
5. energy dispersive spectroscopy

مراجع

1. Baek, E. R., Park, S. S., Sihotang, R., and Choi, S., "Heat Treatment of the Degraded Hastelloy-X for

High Cycle Fatigue Properties", 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids, pp. 9-

- 13, 2013.
2. Zhao, J. C., Larsen, M., and Ravikumar, V., "Phase Precipitation and Time-Temperature-Transformation Diagram of Hastelloy X", *Material Science and Engineering: A*, Vol. 293, pp. 112-119, 2000.
 3. Aghaie-khafri, M., and Golarzi, N., "Dynamic and Metadynamic Recrystallization of Hastelloy X Superalloy", *Journal of Material Science*, Vol. 43, pp. 3717-3724, 2008.
 4. Matthey, L., "Main Technical Properties and Features of Alloy X", *Lamineries Matthey*, pp. 1-3, 2013.
 5. Banerjee, K., "The Role of Magnesium in Superalloys-A Review", *Materials Sciences and Applications*, Vol. 2, pp. 1243-1255, 2011.
 6. Bor, H., Chao, C., and Ma, C., "The Effects of Mg Microaddition on the Mechanical Behavior and Fracture Mechanism of MAR-M247 Superalloy at Elevated Temperatures", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30, pp. 551-561, 1999.
 7. Xie, X., Xu, Z., Qu, B., Chen, G., and Radich, J., "The Role of Mg on Structure and Mechanical Properties in Alloy 718", *Superalloys*, pp. 635-642, 1988.
 8. Ge, H., Youdelis, W., Chen, G., and Zhu, Q., "Interfacial Segregation of Magnesium in Nickel Base Superalloy: Carbide Morphology and Properties", *Materials Science and Technology*, Vol. 5, pp. 985-990, 1989.
 9. Liu, X., Dong, J., Xie, X., and Chang, K. M., "The Appearance of Magnesium and its Effect on the Mechanical Properties of Inconel 718 with Low Sulfur Content", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 303, pp. 262-266, 2001.
 10. Dong, J., Xie, X., and Thompson, R., "The Influence of Sulfur on Stress-Rupture Fracture in Inconel 718 Superalloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31, pp. 2135-2144, 2000.
 11. Bor, H., Ma, C., and Chao, C., "The Influence of Mg on Creep Properties and Fracture Behaviors of Mar-M247 Superalloy under 1255 K/200 Mpa", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31, pp. 1365-1373, 2000.
 12. Bor, H., Chao, C., and Ma, C., "The Influence of Magnesium on Carbide Characteristics and Creep Behavior of the Mar-M247 Superalloy", *Scripta Materialia*, Vol. 38, pp. 329-335, 1997.
 13. Debarbadillo, J., "Effect of Uncombined Calcium and Magnesium on the Malleability of Nickel Alloys", *Superalloys: Metallurgy and Manufacture*, pp. 95-107, 1976.
 14. Lv, M., Li, X., Min, Y., Liu, C., Jiang, M. and Wang, B., "Effect of Trace Magnesium Addition on the Characteristics of Mechanical Properties in High Strength Low Alloy Steel", *5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering*, pp. 492-498, 2015.
 15. Kimura, K., Fukumoto, S., Shigesato, G. i., and Takahashi, A., "Effect of Mg Addition on Equiaxed Grain Formation in Ferritic Stainless Steel", *ISIJ International*, Vol. 53, pp. 2167-2175, 2013.
 16. Chen, G., Wang, D., Xu, Z., Fu, J., Ni, K. and Xie, X., "The Role of Small Amounts of Magnesium in Nickel-Base and Iron-Nickel-Base Superalloys after High Temperature Long Time Exposures", *Superalloys*, pp. 611-620, 1984.
 17. Ma, P., Yuan, Y., and Zhong, Z., "Creep Behavior of Magnesium Microalloyed Wrought Superalloys", *Superalloys*, pp. 625-633, 1988.