

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

آفاق پناهی مقدم، معصومه سیف اللهی*، سید مهدی عباسی و سید مهدی قاضی میرسعید یژوهشکده مواد فلزی ، دانشگاه صنعتی مالکاشتر، تهران

(دریافت مقاله: ۰/۱۰/۱۳۹۵ – 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 ppm ۴۷، 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 بهصورت مجزا تغییر داده است. منیزیم با مکانیزم جدایش در مرزدانه 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 pp ۴۷ باعث افزایش استحکام کششی از ۳۰۹ به ۳۶۵ 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، کسرحجمی کاربید، خواص کششی، خواص تنش- گسیختگی.

The Effect of Mg on Microstructure and High Temperature Mechanical Properties of Hasteloy 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 μ m and the carbides volume fraction was raised from 2.2 to 4.6 vot%. 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.

m_seifollahi@alumni.iust.ac.ir : ه. مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي *

۱ – مقدمه

سوير آلياژ يايه نيكل Hastelloy X يك سوير آلياژ استحكام يافته با محلول جامد است که بهدلیل خواص استحکام دما بالا و قابلیت شکل یذیری عالی، کاربردهای زیادی در محفظه احتراق موتور توربین، ای گازی دارد [۱ و ۲]. تاکنون بیشتر پ_ژوهش ه_ای ص_ورت گرفت_ه [۱، ۳ و ۴] روی س_وپر آلیاژ Hastelloy X، بەمنظور افزایش خواص مکانیکی دما بالای آن، بهکمک تغییر شکل سرد و عملیات حرارتی آنیـل انجـام شـده است. از طرفي با توجـه بـه منـابع مطالعـاتي افـزودن برخـي از عناصر آلیاژی به میزان چنـد ppm نیـز تـأثیر قابـل تـوجهی بـر خواص مکانیکی سوپرآلیاژهای پایه نیکل دارد؛ از جمله عناصر جزئی می توان به عنصر منیزیم اشاره کرد. تحقیقات [۷-۵] نشان داده که افزودن I-۳۵۰ ppm منیزیم به سوپر آلیاژ IN718، IN690 و IN690 به ۱۶۰ ۳۰-۳۰ به MAR-M247 باعث افزایش خواص مکانیکی این قبیل سوپر آلیاژهای پایه نیکل می شود. علاوه بر این، در تحقیقات به تأثیر منیزیم در افزایش چسبندگی مرزدانه اشاره شده است [۸]. مطالعات مختلفی [۵ و ۱۳-۱۹] درباره جدایش منیزیم در مرزدانه صورت گرفته است. نتايج آناليز AES بر سوپرآلياژ پايه نيكل GH36 جدايش منيزيم در مرزدانه را نشان میدهد. بهبود خواص مکانیکی در اثر جدایش منیزیم در منطقه فصل مشترک کاربید/ زمینه، بهواسطه کاهش انرژی فصل مشترک و نیز جلوگیری از رشد کاربیدهاست. منیزیم حل شده در زمینه و کاربیدها باعث تغییـر ترکیب شیمیایی آنها و افزایش میزان تنگستن و مولیبدن موجـود در کاربید شده و بنابراین منجر به تغییر ثابت شبکه فاز زمینـه و کاربید میشود [۶]. در سوپر آلیاژ Hastelloy X وجود کاربیدهای درشت MC در زمینه و مرزدانه باعث افت خواص می شود. به منظور به حداقل رساندن اثرات مضر کاربیدهای درشت MC، انجام عملیات حرارتی مناسب و نیز افزودن جزئی عناصر مؤثر است [٧]. در منابع دیگر [١۴ و ١٥] افزودن منیـزیم به فولادهای زنگنزن نیز بررسی شده است. در فولاد زنگنـزن، ناخالصي حاوى منيزيم به جوانهزني ناهمگن فريت در طي

تجزیه آستنیت کمک کرده و منجر به اصلاح ریزساختار می شود. همچنین منیزیم باعث تشکیل ساختار با دانه های هم محور می شود. منیزیم یک عنصر فلزی قلیایی خاکی است که با اکسیژن، گوگرد، فسفر و غیره واکنش پذیری قوی دارد. بنابراین افزودن جزئی منیزیم در تصفیه ناخالصی ها مفید است. با توجه به اثرات مثبت منیزیم بر خواص فولادها و سوپر آلیاژها و اینکه تاکنون در زمینه بررسی تأثیر افزودن جزئی منیزیم بر خواص مکانیکی سوپر آلیاژ X Hastelloy، 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 سوپر آلیاژ است.

۲– مواد و روش تحقیق

شمشهایی از جنس سویر آلیاژ Hastelloy X با ترکیب ذکر شده در جدول (۱) و مقادیر صفر، ۱۷، ۳۳ و ۴۷ ppm منیزیم توسط فرايندهاي ذوب القايي تحت خلأ (VIM) و ذوب مجدد تحت سرباره الكتريكي (ESR) تهيه شدند. فرايند ذوب به اين 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 شـده و شمش اولیه در قالب به ابعاد ۴۰× ۶۰×۲۰۰ تهیه شد. سـپس از شمش اولیه، به تعداد پنج نمونه کوچک برش زده شـد. بـه هـر یک از شمش ها بهترتیب 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 خلاء' (VIM) افزوده شد و در داخل قالب فلـزى ريختـه گـرى شد. تصفیه و ذوب مجدد، در کوره ذوب مجدد سرباره^۲ (ESR) با ظرفیت حدود ۱۰ کیلوگرم، جریان ۳۵۰۰ آمیر و ولتاژ ۴۰-۲۵ ولت و قالب ۶۰×۸۰×۱۵۰ میلیمتر انجام شد.

سپس شمش ها تحت عملیات همگن سازی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد به مدت چهار ساعت قرار گرفته و سپس در آب سرد شدند. پس از آن عملیات نورد گرم در دمای ۱۱۰۰

	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,			J			. 340		<u>ت</u>	• •
Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	С	Mg	Mn	S	شمش
Bal	۱۸/۰۴	۱۹/۲	۸/۴۲	۱/VV۱	۰/۷۹	•/•¥	٥	۰/۳۲	٥/٥٥٩۴	آلياژ ۱
Bal	١٨/٩	7 •/74	9/74	1/9V	۰/۸۲	•/•¥	۰/۰۰۱۷	• /۳۸	• / • • ٩ •	آلياژ ۲
Bal	۱۸/۹	۲ • / ۲	٩/٢۴	1/94	۰/۸۰	۰/۰۴	•/• •m	•/٣٧	•/••AA	آلياژ ۳
Bal	١٨/٩	۲۱/۳	٩/٢۵	1/84	•/٨٢	۰/۰۴	•/••¥V	۰/۳۶	•/••V	آلياژ ۴

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

زمینه شده و در نتیجه کاهش اندازه دانه، مساحت کـل مرزدانـه افزایش می یابد. به نظر می رسد افزودن منیزیم باعث کاهش انرژی تشکیل مرزدانه شده و در نتیجه، کاهش اندازه دانه می شود. شکل (۲)، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) از توزیع کاربیدها در نمونه فاقد منیزیم و نمونه حاوی ۴۷ ppm منیزیم را نشان میدهد. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود در حضور منیزیم توزیع کاربیدها بـهصـورت پراکنده است اما در نمونه فاقد منیزیم رسوبات کاربیدی بهصورت پیوسته در مرزدانه تجمع یافتهاند. مرزدانه بهعنوان مانعی در برابر حرکت نابهجاییها بوده و در نتیجه در استحکام ماده مؤثر است. از طرفی با افـزایش منیـزیم میـزان کاربیـدها از ۲/۱ به ۴/۶ درصد افزایش یافته است. از تصاویر ریزساختاری می توان نتیجه گیری کرد که حضور منیزیم در ترکیب شیمیایی باعث كاهش اندازه ذرات مي شود؛ به نظر ميرسد جدايش 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 شـده و چـون 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 منجـر بـه کـاهش اندازه دانه می شود. علاوه بر این با توجه به اختلاف اندازه اتمی منیزیم با زمینه، منیزیم در مرزدانهها جدایش می یابد و بنابراین جلوی حرکت مرزدانه را در شرایط نورد گرم شده گرفته و کاهش اندازه دانه را به همـراه دارد. جـدایش منیـزیم در فصـل مشترک کاربیـد- زمینـه در سـوپر آلیاژ MAR-M247 در مرجع [۱۲] گزارش شده است.

درجه سانتی گراد با ۸۳ درصد کاهش ضخامت انجام شـد. پـس از برشکاری از نمونه های نورد گرم، آلیاژها طبی سه مرحله عملیات نورد سرد قرار گرفته و پس از هر مرحله، آنیل میانی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی گراد انجام شد. آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8 و با استفاده از دستگاه کشش مـدل INSTRON 8502 انجام و سرعت کرنش، ^۳-۱۰ برثانیـه درنظـر گرفته شد. جهت بررسی خواص تنش- گسیختگی، آمادهسازی نمونهها با استفاده از استاندارد ASTM E139 انجام و در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد و تنش ۱۳۰ مگایاسکال صورت گرفت. برای بررسی ریزساختاری نیـز از میکروسکوپی نـوری^۳ مـدل Olympus BX51 و میکروسکوپی الکترونے روبشی[†] (SEM) مدل VEGA/TESCAN مجهز به دستگاه طیفسنجی توزیع انرژی^۵ (EDS) استفاده شـد. بـه ايـن منظـور نمونـههـا پـس از سمبادهزنی و یولیش، توسط محلول کالینگ با ترکیب شیمیایی ۱۰ میلی لیتر اسید کلریدریک، ۱۰ میلی لیتر اتانول و ۵/۰ گرم کلرید مس CuCl_۲ II، حکاکی شدند.

۳– نتايج و بحث

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

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می شود 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



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

M₉C 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 منیزیم در زمینه نسبت به مولیبدن کمتر است. از طرفی شعاع تمایل به جدایش در مرزدانه را دارد. با جدایش منیزیم در تمایل به حمایش مییابد. از طرف دیگر نفوذ در زمینه کند شده و محل جوانهزنی کاربیدهایی که حین عملیات حرارتی شده و محل جوانهزنی کاربیدها افزایش یافته و مورفولوژی خصور منیزیم به صورت اتمی در مرزدانه را گرفته و ساختار ریز 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 ppm ما 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 می توان گفت که کاربید از نوع Cها است. همان طور که مشاهده می شود در نمونه حاوی منیزیم، کاربید Cها خنی از مولیبدن بوده که نسبت به نمونه فاقد منیزیم، میزان مولیبدن و کروم از طریق تشکیل کاربید در مرزدانه ها سبب بهبود خواص مکانیکی سوپرآلیاژ پایه نیکل می شوند [۱۱]. از مقایسه نتایج میکروسکوپی الکترونی روبشی می توان دریافت که در



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

1 -		-			• •		-	
آهن	كربن	تنگستن	موليبدن	كروم	نيكل	آلياژ	عناصر	
١/٥٩	•/٨٣	۱۹/۴۰	$\Lambda / \circ \Delta$	۲۱/۹ ۰	۴۵/۰۰	نمونه فاقد منيزيم	منطقه۱ (زمینه)	
۰/ ٩ ۰	۰/۸۳	Λ/V	137/37	19/31	46/20	نمونه حاوی ۴۷ ppm منیزیم		
$\mathfrak{d}/\circ \mathfrak{l}$	۰/۱۰	۸/۲۶	۴۳/۰۹	۱۸/۶۶	۲۰/۸۶	نمونه فاقد منيزيم	(1 (5) ¥."1.	
Λ/Υ)	٨/ • ٩	۲۰/۵۳	۵۴/۵۵	١٧/۴٨	١٩/٥٩	نمونه حاوی ۴۷ ppm منیزیم	منطقة (كاربيد)	

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

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 کوچـکتـر شـدن و کـرویتـر شدن کاربیدهای MC میشود.

شکل (۳) نمودار تغییرات سختی و تغییرات کسر حجمی

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۷، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۷



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 سانتیگراد

شـکل (۴) نتـایج آزمـون کششـی دمـای محـیط سـوپرآلیاژ Hastelloy X برای دو نمونه با مقادیر مختلف منیـزیم را نشـان

میکنند و از این طریق و همچنـین کـاهش انـدازه دانـه باعـث افزایش استحکام (سختی) میشود.

ىيزان منيز	ابرحسب ه	آلياژ Hastelloy X	ی دما محیط سوپر	۳- خواص کشش	
ل	ازدياد طو	استحكام تسليم	استحكام كششى	شماره شمش	
((درصد)	(مگاپاسکال)	(مگاپاسکال)		
	۵۵	۳۰۶	۶۸۸	آلياژ ۱	
	03	٣٣٣	VT 1	آلياژ ۲	
	۵۰	870	$\vee \tilde{r} \wedge$	آلياژ ۳	
	۵۰	TT A	V40	آلياژ ۴	



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

افزایش می یابد. بور و همکاران [۱۳] در سوپر آلیاژ پایه نیکل MAR-M۲۴۷ گزارش کردهاند که افزودن ۲۰pm ۲۰ منیزیم منجر به افزایش استحکام تسلیم از ۵۷۶ به ۶۵۲ مگاپاسکال و استحکام کششی از ۷۸۸ به ۳۰۸ مگاپاسکال شده است. همچنین الوی و همکاران [۱۴] در مورد یک فولاد کم آلیاژ پر استحکام گزارش کردهاند که افزودن ۲۶ppm 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. همان طور که مشاهده می شود با افزایش منیزیم، استحکام تسلیم از ۳۰۶ به ۳۳۸ مگاپاسکال و استحکام کششی از ۸۸۸ به ۷۴۵ مگاپاسکال افزایش یافته است، اما انعطاف پذیری 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 به خصوص کاربیدهای مرزدانه های افزایش یافته و با توجه به به نحصوص کاربیدهای مرزدانه های افزایش یافته و با توجه به اینکه این فازها دارای فصل مشترک غیر کوهرنت با زمینه و مرزدانه هستند محل های مناسبی برای آغاز و پیشرفت ترک بوده و در نتیجه انعطاف پذیری کاهش می یابد. از سوی دیگر با توجه به رابطه هال پچ، هرچه اندازه دانه ریزتر باشد استحکام

نسبت به ساختار درشت دانه (نمونه فاقد منيزيم) عمر گسیختگی بالاتری دارند. مطابق با رابطه هال- یچ کاهش اندازه دانه باعث افزایش استحکام کششی و تنش تسلیم ماده میشود درحاليكه طبق نظريه نابارو- هرينگ كاهش اندازه منجر به كاهش استحكام خزشي مي شود؛ بنابراين انتظار ميرود با كاهش اندازه دانه عمر خزشی کاهش یابد. از طرفی همانطور که در شکل (۲- ج) و (۲- د) مشاهده شد در حضور منیزیم کسر حجمي كاربيد افزايش يافته و افزايش كاربيدها در نمونه حاوي ۳۳ ppm منیزیم می تواند دلیل افزایش عمر گسیختگی باشد. بنابراین مکانیزم غالب در افزایش عمر گسیختگی، افزایش کسر حجمي كاربيد است. با توجه به شكل (۵) مرحك اول خـزش برای تمام نمونه ها یکسان است اما با افزایش میزان منیزیم، زمان مرحله دوم و سوم خزش افزایش یافته است؛ بهطوری که آهنگ حداقل خـزش بـراي نمونـه فاقـد منيـزيم برابـر ۴-۱۰ × ۴۰/۰ میلیمتر بر ثانیه است که نسبت به آهنگ حداقل خـزش نمونـه حاوی ۴۷ ppm منیزیم (۲۰^{-۴} c) میلیمتر بر ثانیه) بیشـتر است. خزش مرحله سوم و درنهایت گسیختگی نمونه همراه با جوانهزنی و رشد ریزترکها از تخلخل های موجود است. در برخی گزارشات [۴] مشاهده شده که عناصر جزئی از ترک مرزدانهای جلوگیری میکند. منیزیم بهدلیل شعاع اتمی بزرگتر، باعث کاهش غلظت جاهای خالی در سطح مرزدانه شده و درنتیجه ضریب نفوذ جاهای خالی را کاهش میدهـد. أغـاز و اشاعه حفرات خزشي در اثر كاهش ضريب نفوذ جاهاي خالي کاهش یافته و بنابراین جدایش منیزیم باعث تأخیر در اشاعه ترک اولیه شده و در نتیجه عمر شکست را افزایش میدهد.

واژەنامە

- 4. scanning electron microscopy
- 5. energy dispersive spectroscopy

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-

- 3. optical microscopy

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 تــا ۸۰ ppm عمـر

هــدف از پــژوهش حاضــر، بررســي افــزودن منيــزيم روي

ریزساختار، خواص کششی دمای محیط و سختی سوپرآلیاژ پایه

نیکل Hastelloy X است. نتایج بهدست آمده به شرح ذیل است:

با افزودن منیزیم از رشد دانه جلوگیری شده و باعث کاهش

• در حضور منیزیم کاربیدها کروی و توزیع آنها یکنواخت

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 مرزدانهای را افزایش داده و در نتیجه باعث

در حضور منیزیم میزان فاز کاربید MC کاهش یافته و

کاربید MsC غنی از مولیبدن بیشتر شده و در نتیجه خواص

میشود و درنتیجه باعث افزایش خواص مکانیکی از جملـه

شکست آلیاژ را از ۲۴۳ به ۵۵۰ ساعت افزایش می دهد.

۴- نتىچەگىرى

میانگین اندازه دانه میشود.

خواص کششی دما محیط میشود.

كاهش انعطاف پذيري مي شوند.

٣۶

بهبود يافته است.

1. vacuum induction melting

- 2. electro slag remelting

13, 2013.

- 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.
- Aghaie-khafri, M., and Golarzi, N., "Dynamic and Metadynamic Recrystallization of Hastelloy X Superalloy", *Journal of Material Science*, Vol. 43, pp. 3717-3724, 2008.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- Ma, P., Yuan, Y., and Zhong, Z., "Creep Behavior of Magnesium Microalloyed Wrought Superalloys", *Superalloys*, pp. 625-633, 1988.