تأثیر عملیات همگن‌سازی بر ریزساختار و سختی ساختار ریختگی سوپرآلیاژ GTD111

مهرداد توکلی، معصومه سیف اللهی*، سید مهدی عباسی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۶/۵/۱، **تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح‌شده:** ۱۳۹۶/۹/۸، **تاریخ پذیرش قطعی:** ۱۳۹۶/۹/۲۱

چکیده هدف از این پژوهش، تحقیق اثر عملیات همگن‌سازی بر ریزساختار ریختگی و سختی سوپرآلیاژ پلی‌کریستال GTD111 است. انجام عملیات همگن سازی در شرایط بهینه، پارامتری تأثیرگذار بر انجام صحیح عملیات حرارتی آنیل جزئی و پیرسازی آلیاژ است. این سوپرآلیاژ به روش ذوب القایی تحت خلاء ریخته‌گری شد و سپس در دمای ۱۲۰۰ و ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های مختلف تحت عملیات همگن‌سازی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری شامل بررسی جدایش‌ها، فازهای کاربیدی، یوتکتیک و رسوبات گاماپرایم اولیه به روش میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که جدایش عناصر آلومینیوم و تیتانیوم در مناطق بین دندریتی و تنگستن در مرکز دندریت در حالت ریختگی وجود داشته که پس از همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت به‌طور تقریبی حذف شده است. کسر حجمی کاربیدها، یوتکتیک و گاماپرایم اولیه به‌ترتیب از ۶٪، ۱۰٪ و ۲۸٪ در حالت ریختگی به ۴٪، ۷٪ و ۴۱٪ پس از همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت کاهش یافته است. سختی سوپرآلیاژ GTD111، در شرایط بهینه همگن‌سازی به مقدار ۴۴۰ ویکرز رسیده که مقدار مطلوبی برای این آلیاژ است.

کلمات کلیدی: سوپرآلیاژ GTD-111، همگن‌سازی، رسوبات 'γ، کاربید، یوتکتیک.

The Effects of Homogenizing on the casting microstructure and hardness of GTD111 superalloy

Mehrdad Tavakoli, Masumeh Seifollahi* and Seyed Mahdi Abbasi

Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract In this research, the effect of homogenizing treatment on the microstructure and hardness of polycrystalline GTD 111 Ni-based superalloy was assesed. Homogenizing is one of the key parameters on the efficiency of annealing and ageing of the alloy. The superalloy was melted in a vacuum induction melting furnace and homogenized at 1200 and 1220°C for different times. Microstructure evolution by optical and scanning electron microscopy showed that the segregation of Al and Ti at interdendritic region and W at the core of the dendrite eliminates after homogenizing at 1220°C for 2 hr. volume fraction of carbides, eutectic and gamma prime of the cast alloy was 6%, 10% and 28% respectively that reach to 4%, 7% and 41% after homogenizing at 1220°C for 2 hr. The hardness of the alloy at this condition was 440Hv which is favorable for the homogenized alloy.

Keywords: GTD-111 superalloy, Homogenizing, γ', cardide, eutectic.

***عهده دار مکاتبات**

نشانی: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، **تلفن:** ۲۲۹۳۵۱۴۱، **پیام نگار:** m_seifollahi@alumni.iust.ac.ir

۱– مقدمه

سوپرآلیاژ پایه نیکل GTD-111 آلیاژی است که استحکام خود را علاوه بر استحکام ناشی از محلول جامد از ایجاد رسوبات سخت در حین عملیات حرارتی پیرسازی به دست می‌آورد. این آلیاژ دارای خواص خوردگی و مکانیکی مطلوبی در دمای بالا است و به همین دلیل امروزه به یکی از پرکاربردترین سوپرآلیاژهای موجود در صنعت تبدیل شده است [۴-۱].

ریزساختار سوپرآلیاژ GTD-111 شامل فاز زمینه γ، رسوبات پراکنده فاز γ' و کاربیدها و ساختار یوتکتیک γ/γ' است. فرآیند تشکیل فازهای رسوبی در سوپرآلیاژ GTD-111 به این صورت است که فاز γ' اولیه مکعبی‌شکل با طول ضلع میانگین برابر با ۰٫۸ میکرومتر در حین انجماد در کمتر از دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد و فاز γ' ثانویه کروی‌شکل با قطر میانگین در حدود ۰٫۱ میکرومتر در حین عملیات حرارتی پیرسازی تشکیل می‌شود.[۳،۱].

کاربیدها در ریزساختار سوپرآلیاژ GTD-111 بیشتر در مرزهای دانه پراکنده شده‌اند؛ هم‌چنین به‌طور یکنواخت در درون دانه‌ها نیز وجود دارند. کاربیدهای تشکیل‌شده در درون دانه‌ها بیشتر از نوع MC هستند که در آن حرف M جایگزینی برای عناصر تیتانیوم، تنگستن و تانتالیم است. کاربیدهایی که در مرزدانه‌ها وجود دارند از نوع $M_{23}C_6$ هستند که در آن حرف M جایگزینی برای عناصر کروم و مولبیدن است[۴].

به دلیل پیچیده بودن ترکیب شیمیایی، این آلیاژ به شدت غیریکنواخت است و میکروجدایش‌های زیادی در آن دیده می‌شود. به همین دلیل نیاز به عملیات حرارتی همگن‌سازی در دمای بالا پس از ریختگی دارد که تا حد مطلوبی میزان جدایش‌ها را کاهش می‌دهد. جدایش‌ها به صورت ساختار دندریتی مشاهده می‌شوند. هدف از عملیات همگن‌سازی، انحلال فاز دوم و همگن‌کردن هر چه بیشتر ریزساختار جهت دست‌یابی به ریزساختاری بهینه قبل از کارگرم است. دما و زمان عملیات همگن‌سازی بستگی به ترکیب آلیاژ و ریزساختار به‌دست آمده از فرآیند ریخته‌گری دارد. فرآیند همگن‌سازی فرآیندی زمان‌بر است که در دمای بالا انجام می‌شود. بنابراین بهینه‌سازی این فرآیند علاوه بر بحث متالورژیکی از نظر اقتصادی نیز ضروری است [۵ و ۱].

در تحقیق انجام‌شده توسط بالیکی و همکاران او [۶] تأثیر دماها و زمان‌های مختلف عملیات حرارتی همگن‌سازی بر ریزساختار سوپرآلیاژ IN738LC که شباهت زیادی به ریزساختار سوپرآلیاژ GTD-111 دارد، مورد بررسی قرار گرفته است و این نتیجه حاصل شده است که انجام عملیات همگن سازی به مدت چهار ساعت در دمای ۱۲۳۵ درجه سانتی‌گراد سبب دست‌یابی به ساختار تک‌فاز γ و رفع ریزجدایش‌ها می شود.

در تحقیقات معدود انجام‌شده در زمینه عملیات حرارتی سوپرآلیاژ GTD-111، دما و زمان مطابق با شرایط استاندارد عملیات حرارتی این سوپرآلیاژ انتخاب شده است. برای مثال تحقیق دلفان و همکاران او [۷] بر روی عملیات حرارتی پوشش‌دهی سوپرآلیاژ GTD-111 انجام شده است، دمای عملیات همگن‌سازی ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و زمان آن دو ساعت بوده است و هم‌چنین در تحقیقی که توسط اصفهانی و همکاران او [۸] در زمینه تأثیر سرعت سرمایش پس از آنیل انحلالی بر ریزساختار سوپرآلیاژ GTD-111 انجام شده است؛ از دما و زمان مشابهی برای انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی استفاده شده است. البته در این شرایط، ریزساختار به همگنی صددرصد دست نیافته است. هر چه ریزساختار ریختگی همگن‌تر شده و میزان جدایش و یوتکتیک‌ها کمتر شود، پتانسیل زمینه برای تشکیل رسوبات گاماپرایم افزایش یافته و منجر به ارتقای خواص مکانیکی آلیاژ می‌گردد [۹]. لذا در این پژوهش امکان دست‌یابی به ریزساختاری با همگنی بیشتر در مرحله همگن‌سازی بررسی شده است.

با توجه به این که کاربردهای سوپرآلیاژ GTD-111 در سال‌های اخیر افزایش یافته و عملیات همگن‌سازی فراهم آورنده ریزساختار مطلوب جهت فرآیند آنیل و پیرسازی بعدی است و هم‌چنین اطلاعات اندکی از عملیات همگن‌سازی این آلیاژ در منابع موجود است، بررسی تأثیر دما و زمان همگن‌سازی این آلیاژ بر ریزساختار آن و بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند منجر به توسعه زمینه‌های کاری این آلیاژ شود. در پژوهش حاضر به بررسی عملیات حرارتی همگن‌سازی از طریق بررسی‌های ریزساختاری و سختی

پرداخته شده است. در این پژوهش دست‌یابی به توزیع یکنواخت از رسوبات گاماپرایم و توزیع یکنواخت عناصر تیتانیوم، آلومینیوم و تنگستن مبنای دست‌یابی به شرایط همگن‌سازی بهینه قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

شمش پلی‌کریستال سوپرآلیاژ GTD-111 به روش ذوب القایی در خلاء (VIM) با خلاء 10^{-3} پاسکال، ذوب و ریخته‌گری شد. شمش در شرایط هم‌محور منجمد شده و در محفظه خلاء سرد شد.

ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ تهیه شده، با استفاده از دستگاه کوانتومتر (مدل Vario lab شرکت Benek) اندازه‌گیری شد و نتایج آن در مقایسه با ترکیب استاندارد [۱۰] در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ترکیب مطابقت با ترکیب استاندارد دارد.

نمونه‌هایی به ابعاد ۱٫۵×۱٫۵×۱٫۵ سانتی‌مترمکعب تحت بررسی‌های همگن‌سازی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو و چهار ساعت و ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت قرار گرفتند و در هوا سرد شدند. (نمونه‌ها پس از به دما رسیدن کوره ودر اتمسفر هوا در داخل کوره قرار داده شدند). بعد از اتمام همگن‌سازی، ریزساختارها از لحاظ توزیع، اندازه، درصد حجمی و مورفولوژی فاز γ' و حضور فاز یوتکتیک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

به منظور بررسی ریزساختار، نمونه‌ها پس از سنباده‌زنی و پولیش با محلول سوسپانسیون آلومینای ۰٫۳ میکرون، با محلول‌های اچ مختلف معرفی‌شده در جدول ۲ حکاکی شدند. در برخی موارد نیاز به الکترواچ بود که شرایط آن در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی استاندارد سوپرآلیاژ GTD-111 و ترکیب شمش پروژه (برحسب درصد وزنی).

عنصر آلیاژی	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	C	B	Ni
آلیاژ تهیه شده در این پژوهش	۱۳٫۵	۹٫۹	۱٫۳	۴٫۰	۳٫۲	۴٫۸	۲٫۹	۰٫۱	۰٫۰۱	Balanced
ترکیب استاندارد	۱۴٫۱	۹٫۵	۱٫۵	۳٫۸	۳٫۰	۵٫۰	۳٫۱۵	۰٫۱	۰٫۰۱	Balanced

جدول ۲. محلول‌های اچانت مورداستفاده.

نحوه اچ	ترکیب محلول	توضیحات
اچ شیمیایی	ماربل: 50 ml $CuSO_4$, 50ml H_2O_{10} ml HCl	زمان اچ ۱۵–۱۰ ثانیه
اچ الکتروشیمیایی	56 ml glycerol, 7mL H_2O_{37} mL H_3PO_4,	۶ ولت –۸ ثانیه

جهت انجام الکترواچ از یک دستگاه مولد جریان مستقیم آزمایشگاهی با نام تجاری Megatak مدل ۳۰۰۵ – MP با دقت تنظیم ولتاژ ۰٫۱ ولت و چگالی جریان ۰٫۰۱ آمپر بر سانتی‌متر مربع استفاده شد.

ریزساختار نمونه‌های آماده‌سازی‌شده از طریق میکروسکوپ نوری مدل Olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Vega-Tescan بررسی شده است. تحلیل کمی تصاویر متالوگرافی براساس استاندارد و با نرم‌افزار Celemex صورت گرفت. برای اندازه‌گیری رسوبات مکعبی، طول ضلع مربع و برای رسوبات کروی قطر دایره اندازه‌گیری شد. به طوری‌که برای هر مورد حداقل اندازه ۱۰۰ ذره از آن نمونه اندازه‌گیری و بررسی‌شده است.

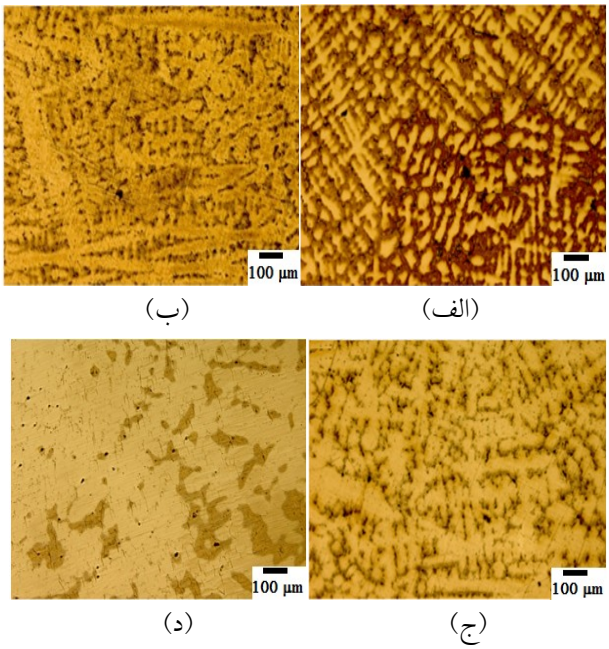
۳- نتایج و بحث

۳-۱ اثر عملیات همگن سازی بر ریزساختار

در شکل ۱ ریزساختار نوری از شمش GTD111 پس از ریخته‌گری و هم‌چنین پس از همگن‌سازی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو و چهار ساعت و ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت نشان داده شده است. ریزساختار نمونه ریختگی پس از انجماد و سردشدن در هوا، به صورت دندریتی با دندریت های بسیار خشن است. دندریت‌ها در جهات نامنظم رشد کرده

و توزیع شده‌اند و به‌صورت کامل متمایز و مشخص از یکدیگر در ریزساختار آلیاژ ریختگی قرار گرفته‌اند. در مقایسه با ساختار ریختگی که مرزهای کامل متمایز بین نواحی دندریتی و بین‌دندریتی دارد، در ساختار نمونه‌ها پس از همگن‌سازی فاصله بین بازوهای دندریتی کاهش یافته و برخی از مرزهای دندریتی در حال محوشدن هستند.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود با افزایش دما و زمان همگن‌سازی، بازوهای دندریتی در حال نزدیک‌شدن به یکدیگر هستند و این امر سبب کوچک‌شدن مناطق بین‌دندریتی و ایجاد ساختار یکپارچه‌تر در مناطق دندریتی و بین‌دندریتی و رفع نسبی جدایش‌ها شده است.

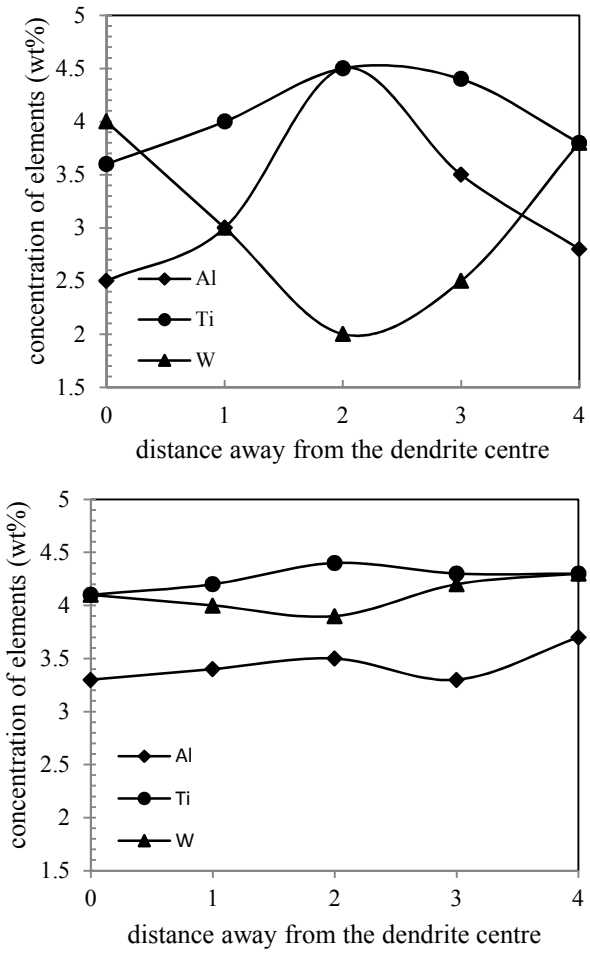


(ب) (الف)

(د) (ج)

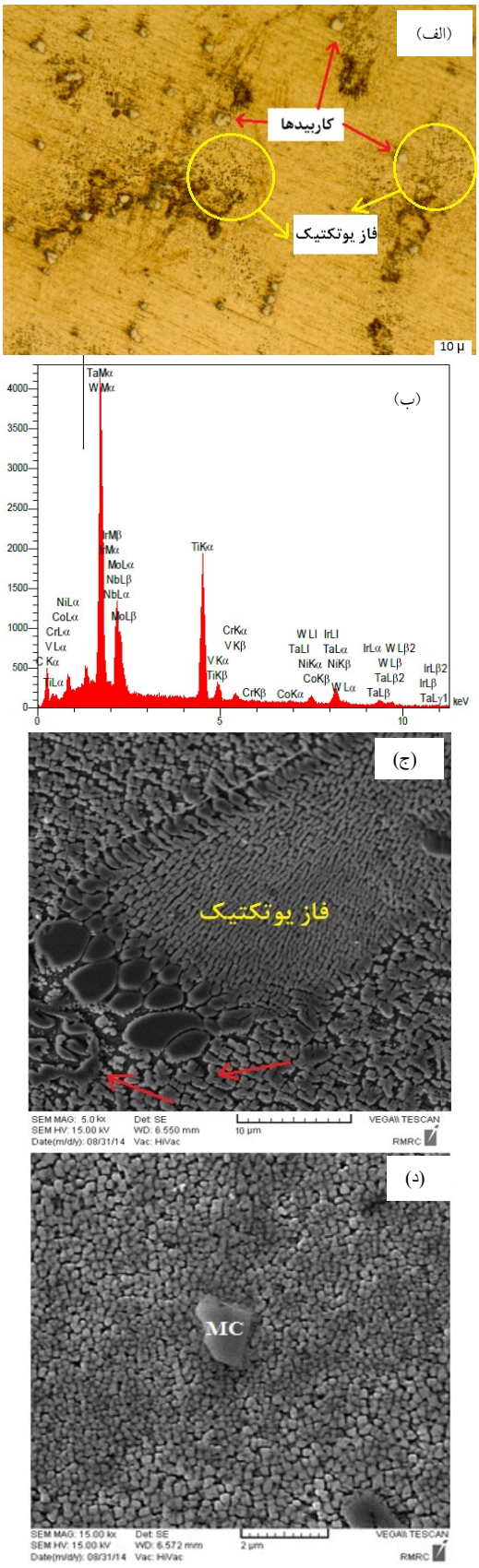
شکل ۱. ریزساختار نوری از شمش سوپرآلیاژ GTD111؛ الف) ریختگی؛ ب) همگن‌سازی شده در ۱۲۰۰ به مدت دو ساعت؛ ج) چهار ساعت و د) ۱۲۲۰ و دو ساعت.

به منظور بررسی جدایش‌ها، آنالیز عنصری با فاصله گرفتن از مرکز یک دندریت تا مرکز دندریت بعدی در نمونه ریختگی و نمونه همگن‌سازی شده در دمای ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت به روش EDS انجام شد. با توجه به این‌که بیشترین تغییرات مربوط به عناصر آلومینیوم، تیتانیوم و تنگستن است؛ تغییرات میزان این عناصر برحسب فاصله از مرکز دندریت برای آلیاژ ریختگی و آلیاژ همگن‌سازی شده در دمای ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت به ترتیب در شکل ۲ الف و ب رسم شده است. مشاهده می‌شود که تیتانیوم و آلومینیوم در فواصل بین دندریتی و تنگستن در مرکز دندریت جدایش می‌یابد. پس از همگن‌سازی، جدایش‌های مربوط به عناصر تیتانیوم، آلومینیوم در مناطق بین‌دندریتی و تنگستن در مرکز دندریت تا حدود زیادی از بین رفته است. تنگستن عنصری دیرذوب است که در ابتدای فرآیند انجماد و در مرکز دندریت منجمد می‌شوند و عناصر با نقطه ذوب پائین‌تر در انتهای فرآیند انجماد، منجمد می‌شوند.



شکل ۲. تغییرات عناصر تنگستن، تیتانیوم و آلومینیوم در فاصله مرکز دو دندریت مجاور.(الف) آلیاژ ریختگی و (ب) آلیاژ همگن‌سازی شده در دمای دمای ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت.

جدایش عناصر در مناطق دندریتی منجر به تشکیل فازهای یوتکتیک و کاربیدها می‌گردد. تشکیل این فازها به همراه آنالیز EDS از فاز کاربید MC در شرایط مختلف در شکل ۳ نشان داده شد و مقادیر آن در نمودار شکل ۴ رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ با افزایش دما و زمان عملیات همگن‌سازی، کسر حجمی فاز یوتکتیک و کاربیدها کاهش می‌یابد.

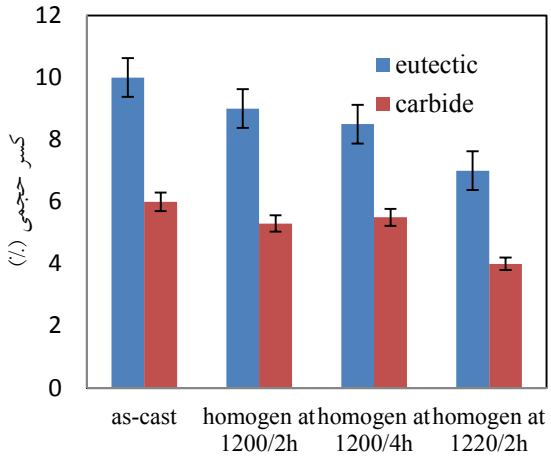


شکل ۳. (الف) وجود کاربیدها و فاز یوتکتیک در ریزساختار آلیاژ همگن‌سازی شده در زمان چهار ساعت در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ب) الگوی دندریتی و فاز یوتکتیک در آلیاژ ریختگی ج) کاربید MC پس از عملیات همگن‌سازی در زمان چهار ساعت در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و سرمایش در هوا.

با توجه به اثر مضر یوتکتیک بر خواص آلیاژ که علاوه بر مشخصات فاز یوتکتیک (مورفولوژی نامناسب و نقطه ذوب پایین) با توجه به شکل ۲ عناصر فاز استحکام‌بخش گاماپرایم (آلومینیوم و تیتانیوم) را نیز مصرف می‌کند؛ هر چه درصد این فاز کمتر باشد اثر مثبتی بر خواص مکانیکی خواهد داشت.

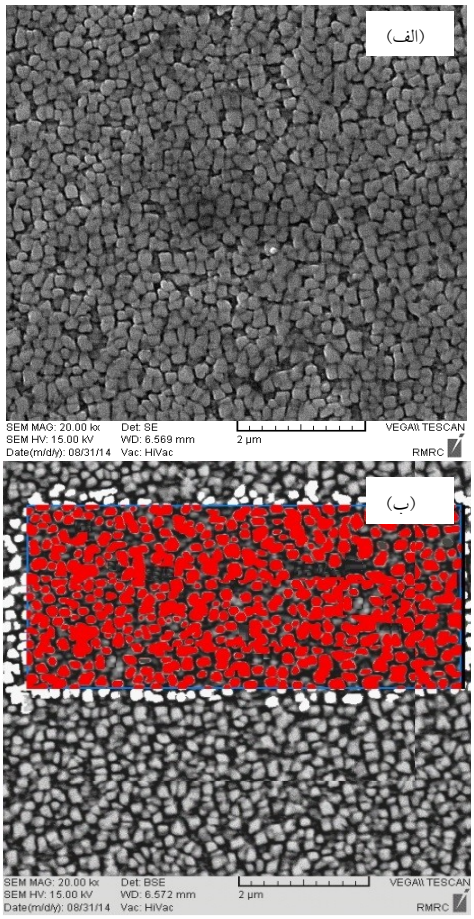
کاهش کسر حجمی فاز کاربید همراه با کاهش اندازه آن است به‌طوری‌که اندازه این فاز در حالت ریختگی هشت میکرومتر است و پس از همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت به مقدار پنج میکرومتر کاهش می‌یابد.

همگن‌سازی بر اندازه و توزیع ذرات γ' نیز موثر است. توزیع ذرات γ' در نمونه ریختگی و نمونه همگن‌سازی شده در دمای ۱۲۰۰ به مدت چهار ساعت و در دمای ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت به‌ترتیب در شکل‌های ۳–ج و ۳–د و شکل ۵ نشان داده شده است. اندازه فاز γ' در ساختار ریختگی دارای مقدار مشخص و یکنواختی نیست و دارای رسوبات ریز و درشت فاز γ' است که اندازه رسوبات ریز حدود ۰٫۲ میکرومتر و اندازه رسوبات درشت حدود ۰٫۷ میکرومتر است و مورفولوژی این فاز در شرایط ریختگی نیز مورفولوژی نامنظم و شبه‌دندریتی است. علت این مساله، جدایش عناصر تشکیل دهنده γ' یعنی تیتانیوم و آلومینیوم بر طبق شکل ۴ در مرکز دندریت است. اندازه فاز γ' که پس از عملیات همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت (شکل ۵) و در حین سرمایش در هوا ایجاد می‌شود، در حدود ۰٫۳ میکرومتر است و اندازه اکثر ذرات نیز با یکدیگر مشابه است و در سراسر ریزساختار آلیاژ یکنواخت است که این موضوع نشان‌دهنده مناسب‌بودن فرآیند انحلال در شرایط همگن‌سازی و رسوب‌گذاری بعدی است. مقایسه کیفی شکل‌های ۳–ج و ۵ نیز حاکی از مناسب‌تر بودن عملیات همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت است. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که با توجه به شکل ۳–ج و ۵ می‌توان دید که پس از عملیات همگن‌سازی اثری از فاز γ' ثانویه مشاهده نمی‌شود. فاز γ' ثانویه در مرحله پس از آنیل انحلالی جزئی و پیرسازی تشکیل می‌شود. در صورتی‌که مرحله‌ی همگن‌سازی در شرایط مناسب انجام شود؛ مراحل بعدی عملیات حرارتی نیز به‌درستی انجام خواهد شد. لذا تعیین شرایط بهینه عملیات همگن‌سازی که از اهداف این مقاله است، ضروری می‌باشد.



شکل ۴. تغییرات کسر حجمی کاربید و یوتکتیک در آلیاژ ریختگی و همگن‌سازی شده.

درصد حجمی فاز γ' در آلیاژ سردشده در هوا پس از عملیات همگن‌سازی که با استفاده از تصاویر تهیه‌شده در حالت الکترون‌های برگشتی (شکل ۵) تعیین‌شده، حدود ۴۱ درصد است.



شکل ۵. توزیع رسوبات γ' در آلیاژ همگن‌سازی شده در دمای ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت. الف) تصویر الکترون ثانویه؛ ب) تصویر الکترون برگشتی.

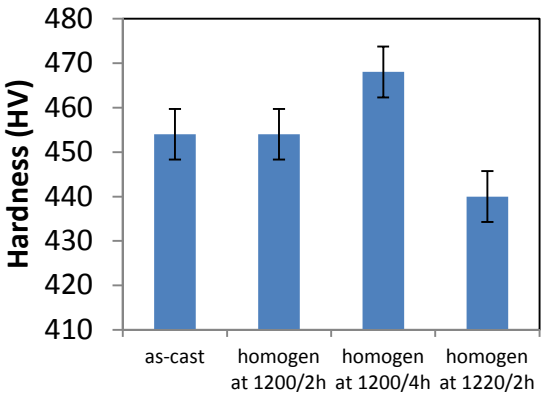
مقدار فاز γ' در شرایط ریختگی ۲۸ درصد تعیین شده است که البته اندازه و توزیع مطلوبی ندارد. در تحقیقی که توسط دلفان و همکاران او [V] در مورد عملیات حرارتی مناسب برای پوشش‌دهی آلیاژ GTD-111 انجام شده است، اندازه فاز γ' پس از عملیات همگن‌سازی حدود ۰٫۴ میکرومتر و درصد حجمی این فاز حدود ۴۴ درصد گزارش شده است؛ همچنین در تحقیقی که توسط باگوری و همکاران او [۱۴] روی سوپرآلیاژ مشابه IN738LC انجام شده است، اندازه فاز γ' پس از عملیات همگن‌سازی در حدود ۰٫۳۵ میکرومتر گزارش شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این بخش، مشخص شد که بهترین ریزساختار از نظر حذف یوتکتیک و جدایش‌ها و همچنین اندازه و کسر حجمی فاز γ'؛ ریزساختار نمونه همگن‌سازی شده در دمای ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت است.

۳-۲ اثر عملیات همگن‌سازی بر سختی آلیاژ

در شکل ۶ نتایج آزمون سختی‌سنجی نمونه ریختگی و نمونه‌های همگن‌سازی شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو و چهار ساعت و ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت مشاهده می‌شود. سختی آلیاژ پس از انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی به مدت دو ساعت در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد با سختی آلیاژ پس از ریختگی برابر می‌باشد، درحالی‌که سختی آلیاژ با افزایش زمان همگن‌سازی به چهار ساعت در این دما افزایش یافته است و بیشتر از سختی نمونه ریختگی است. دست‌یابی به مقدار سختی بالاتر پس از افزایش زمان همگن‌سازی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت چهار ساعت به این دلیل است که دمای عملیات همگن‌سازی برای انحلال کامل فاز γ' و کاربیدها که از عوامل بالابردن سختی در آلیاژ هستند، کافی نبوده است و عملیات حرارتی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد علاوه بر اینکه سبب انحلال کامل فاز γ' نشده است، شاید سبب رسوب بیشتر فازهایی نظیر γ' و کاربیدها پس از سرمایش و در نتیجه افزایش مقدار سختی آلیاژ شده است.

پس از افزایش دمای عملیات حرارتی همگن‌سازی به دمای ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و انجام عملیات حرارتی به مدت دو ساعت در این دما، میزان سختی به‌دست‌آمده کاهش یافته

است که این امر نشان‌دهنده انحلال نسبی کاربیدها و مناسب بودن این دما برای انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی می باشد. با توجه به ریزساختار به‌دست‌آمده و بررسی مقادیر جدایش‌ها و نیز آزمون‌های سختی‌سنجی، می‌توان گفت که عملیات حرارتی همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت، سیکل مناسب عملیات حرارتی همگن سازی برای آلیاژ پلی‌کریستال ریختگی GTD-111 می‌باشد.



شکل ۶. نمودار تغییرات سختی نمونه ریختگی و همگن‌سازی شده در شرایط مختلف.

۴ - نتیجه گیری

۱- در آلیاژ ریختگی، تیتانیوم و آلومینیوم در فواصل بین دندریتی و تنگستن در مرکز دندریت جدایش می‌یابد. پس از همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت، جدایش‌های مربوط به عناصر تیتانیوم و آلومینیوم در مناطق بین‌دندریتی و تنگستن در مرکز دندریت تا حد مطلوبی از بین رفته است.

۲- با افزایش دما و زمان عملیات همگن‌سازی، کسر حجمی فاز یوتکتیک و کاربیدها کاهش می‌یابد.

۳- کاهش کسر حجمی فاز کاربید همراه با کاهش اندازه آن است به طوری‌که اندازه این فاز در حالت ریختگی هشت میکرومتر است و پس از همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت به مقدار پنج میکرومتر کاهش می‌یابد.

۴- همگن‌سازی بر اندازه، مورفولوژی و توزیع ذرات γ' نیز موثر است. اندازه فاز γ' با مورفولوژی نامنظم و شبه‌دندریتی در ساختار ریختگی دارای توزیع متفاوتی است به‌طوری‌که دارای رسوبات فاز γ' ریز (۰٫۲ میکرومتر) و درشت (۰٫۷ میکرومتر) است. اندازه فاز γ' که پس از عملیات همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ به مدت دو ساعت و در حین سرمایش در هوا ایجاد می‌شود، در حدود ۰٫۳ میکرومتر است و اندازه اکثر ذرات نیز با یکدیگر مشابه است و در سراسر ریزساختار آلیاژ یکنواخت است.

۵- پس از عملیات همگن‌سازی اثری از فاز γ' ثانویه مشاهده نمی‌شود. فاز γ' ثانویه در مرحله پس از آنیل انحلالی جزئی و پیرسازی تشکیل می‌شود. در صورتی‌که مرحله‌ی همگن‌سازی در شرایط مناسب انجام شود؛ مراحل بعدی عملیات حرارتی نیز به درستی انجام خواهد شد.

۶- با توجه به ریزساختار به‌دست‌آمده و بررسی مقادیر جدایش‌ها و نیز آزمون‌های سختی‌سنجی، می‌توان گفت که عملیات حرارتی همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت، سیکل مناسب عملیات حرارتی همگن‌سازی برای آلیاژ پلی‌کریستال ریختگی GTD-111 می‌باشد.

مراجع

1. Sajjadi, S., Nategh, S. and Guthrie, R., Study of microstructure and mechanical properties of high performance Ni-base superalloy GTD-111, *Materials Science and Engineering: A*, 325 (1) (2002) 484-489.
2. Yang, C., Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of Rene 80, *Materials & Design,* 43 (2013) 66-73.
3. Reed, R., The superalloys: fundamentals and applications, Cambridge university press, (2006).
4. Donachie, M.J. and Donachie, S.J., Superalloys: a technical guide, *ASM International,* (2002) 110-128.
5. Lakner, J., Gyorok, G., Kovats, R., Varga, V. and Olah, Z., Calculation of homogenization Degree in Aluminium Alloys Using the Diffusion Parameter Approximation, 10th IEEE Jubilee International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, (2012).
6. Balikci, E., Raman, A. and Mirshams, R.A., Influence of various heat treatments on the microstructure of polycrystalline IN738LC, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28(10) (1997) 1993-2003.
۷. محسن دلفان و حسین عربی، تأثیر ترتیب اعمال سیکل پوشش دهی و عملیات حرارتی بر ریزساختار پره‌های متحرک توربین‌های گازی ساخته‌شده از جنس سوپرآلیاژ GTD-111، نوزدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۳، تهران.
۸. محمد مهدی اصفهانی، سید حسین رضوی و شمس‌الدین میر دامادی، تأثیر تنش حرارتی در سیکل عملیات حرارتی رسوب سختی بر ریزساختار و سختی سوپرآلیاژ GTD111، دومین

همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی و جامعه ریخته‌گران ایران، ۱۳۹۰، تهران.

9. Hosseini, S.A., Zangeneh Madar, K. and Abbasi, S.M., Effect of Homogenization Heat Treatments on the Cast Structure and Tensile properties of Nickel-base Superalloy ATI 718Plus in the Presence of Boron and Zirconium Additions, *Materials Science and Engineering: A*, 689 (2017) 103-114.
10. Epishin, A., Svetlov, I., Petrushin, N., Loshchinin, Y. and Link, T., Segregation in Single-Crystal Nickel-Base Superalloys, *Defect and Diffusion Forum*, 309-310 (2011) 121-126.
11. Choi, B.G., Kim, I.S., Kim, D.H. and Jo, C.Y., Temperature dependence of MC decomposition behavior in Ni-base superalloy GTD 111, *Materials Science and Engineering: A,* 478 (2008) 329-335.
12. García-Suárez, E.J., Tristany, M., García, A.B., Collière, V. and Philippot, K., Carbon-supported Ru and Pd nanoparticles: Efficient and recyclable catalysts for the aerobic oxidation of benzyl alcohol in water, *Microporous and Mesoporous Materials,* 153 (2012) 155–162.
13. Caldwell, E.C., Fela, F.J. and Fuchs, G.E., The Segregation of Elements in High-Refractory-Content Single-Crystal Nickel-Based Superalloys, *Journal of Materials*, 56 (2004) 44-48.
14. El-Bagoury, N., Waly, M. and Nofal, A., Effect of various heat treatment conditions on microstructure of cast polycrystalline IN738LC alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 487 (2008) 152-161.