

تأثیر عملیات حرارتی انحلالی بر خواص مکانیکی و ریزساختار

ابرآلیاژ پایه کبالت *Co-Cr-Mo*

جمشید آقازادهⁱ، عمادالدین هراتی فرⁱⁱ، قاسم عوض پورⁱⁱⁱ

چکیده

برای تولید ابرآلیاژ پایه کبالت ویتالیوم (*Co-Cr-Mo*) با استاندارد ASTM F75-87 ابتدا قالبی از جنس سیلیکون- رابر تهیه و سپس عملیات آلیاژسازی و ذوبریزی انجام شد. آلیاژسازی در این روش به کمک کوره القائی مجهز به سیستم ایجاد خلأ (Vacuum Induction Melting) انجام می‌شود. پس از تهیه نمونه‌های ریختگی و آزمایش کشش، مشاهده شد که آلیاژ به دست آمده تمام خواص مکانیکی مورد نیاز در استاندارد بجز انعطاف‌پذیری را برآورده ساخته است؛ بدین منظور عملیات حرارتی انحلالی بر روی نمونه‌های ریخته شده اجرا شد. نمونه‌های آزمایش کشش در دمای 1130°C به مدت نیم ساعت پیش‌گرم شده و سپس در دمای 1230°C به مدت زمان‌های مختلف تحت عملیات انحلالی قرار گرفتند. پس از سپری شدن هر یک از زمان‌های مذکور نمونه‌ها از کوره خارج و به سرعت در آب سرد شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که انعطاف‌پذیری پس از عملیات حرارتی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. به نظر می‌رسد عامل اصلی استحکام‌دهنده در آلیاژ، ایجاد محلول جامد و رسوب‌های کاربید است. عملیات انحلالی موجب انحلال کاربیدها به ویژه کاربیدهای مضر مرزدانه‌ای گشته و ضمن افزایش انعطاف‌پذیری موجب کاهش نسبی در میزان سختی می‌شود.

کلمات کلیدی

ابرآلیاژ- کبالت- ویتالیوم- عملیات انحلالی

Effect of Solution Heat Treatments on Mechanical Properties of Cobalt-base Superalloys Co-Cr-Mo

J. Aghazadeh, E. Haratifar, G. Avazpour

ABSTRACT

For the purpose of manufacturing of the Cobalt-base superalloy of *Co-Cr-Mo* (ASTM F75-87) an appropriate mold has been made from silicon-rubber, and subsequently melting and alloying procedure was carried out. For alloying in this study a vacuum induction melting (VIM) was used. After conducting tensile test on produced specimen, it was observed that mechanical properties of superalloy except ductility are in the standard range; therefore, solution treatments were carried out on the specimens. Specimens were preheated at 1130°C and afterward those were subjected to solution heat treatments at 1230°C for several times. When heat treatments completed, specimens were discharged from furnace and were quenched in water. As a result of heat treatment, elongation was enhanced considerably. It seems that the main strengthening mechanism stems from the solid-solution and carbide precipitates. Heat treatments cause the dissolution of carbides specially grain boundary carbides, thus increasing ductility and reducing hardness.

ⁱاستاد دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: agazad@yahoo.com

ⁱⁱکارشناس مهندسی مواد متالورژی استخراجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: em_harati@yahoo.com

ⁱⁱⁱکارشناس ارشد مهندسی بیومواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

برخی دیگر با روش ذوب مجدد سرباره‌ای و یا ترکیبی از دو فرآیند به دست می‌آیند. از جمله نکات مهم در شیمی- فیزیکی ذوب تحت خلأ مسأله تبخیر عناصر آلیاژی است. منحنی‌های فشار- بخار در درجه حرارت‌های ذوب راهنمای مناسبی برای تعیین پتانسیل عناصر ناپایدار محسوب می‌شوند. با توجه به منحنی‌های فشار- بخار مشاهده می‌شود که منگنز و کروم فشار بخار بالایی دارند و به میزان قابل توجهی از مذاب کبالت تبخیر می‌شوند [۱].

در دهه ۱۹۳۰، Erdel و Prang [۲] ریخته‌گری دقیق آلیاژهای Co-Cr-Mo با عنوان ویتالیوم را برای کاربردهای دندان، توسعه دادند. بعد از مدتی آنها آلیاژهای Co-Cr-Mo-C، مشابه آلیاژ قبلی ویتالیوم را برای برخی مقاصد مورد نیاز ارائه کردند. در سال ۱۹۳۶ آلیاژ Co-Cr-Mo-C با توجه به نتایج آزمون‌های عملی انجام شده به وسیله Zierold در سال ۱۹۲۴، که نشان دهنده سازگاری این آلیاژها با بافت های زنده داشت [۳] به وسیله Venable و Stuck به طور موفقیت‌آمیزی در ایمپلنت‌های جراحی اورتوپدی استفاده شد. در اکثر موارد، انتخاب این آلیاژها با توجه به یافته‌های Haynes در مورد آلیاژهای Co-Cr که او آنها را Stellite نامید، صورت می‌گرفت [۴]. این آلیاژها نسبت به خوردگی و سایش از خود مقاومت نشان می‌دادند.

استحکام اکثر ابرآلیاژهای پایه کبالت از فاز کاربیدی موجود در زمینه و مرزخانه‌ها ناشی می‌شود. در آلیاژهای پایه کبالت شماری از کاربیدهای مختلف می‌توانند ایجاد شوند که به طور حساسی به ترکیب شیمیایی آلیاژ وابسته هستند. کاربیدهای ایجاد شده به تاریخچه عملیات حرارتی ماده نیز بستگی دارند. عناصر تشکیل‌دهنده کاربید از گروه IV (Hf, Zr, Ti)، گروه V (Cb, Ta) و گروه VI (W, Mo, Cr) می‌باشند. انواع کاربیدهایی که تشکیل می‌شوند عبارتند از [۲]:

- ۱) $(\text{Rhombic}) \text{M}_3\text{C}_2$: کاربید با مقدار کروم زیاد که در نسبت Cr/C پایین ایجاد می‌شود.
- ۲) $(\text{Trigonal}) \text{M}_7\text{C}_3$: کاربید با مقدار کروم بالا که در نسبت Cr/C کمی بالاتر ایجاد می‌شود.
- ۳) $(\text{Cubic}) \text{M}_{23}\text{C}_6$: کاربید با مقدار کروم زیاد که در نسبت بالاتر Cr/C ایجاد می‌شود. این کاربید زمانی که میزان کروم بیشتر از ۵٪ وزنی آلیاژ باشد تشکیل می‌شود.
- ۴) $(\text{Complex cubic}) \text{M}_6\text{C}$: فاز کاربیدی که نسبت حجمی آن با افزایش عنصر آلیاژی (فلزات دیرگاز) افزایش می‌یابد.

تحولات روز افزون در علم پزشکی و در کنار آن نیاز به مواد ترمیمی، بشر را بر آن داشت که به رفع نیازهای خود برای ترمیم و اصلاح عیوب جسمی خود بپردازد. در این میان پیدایش علم مهندسی پزشکی او را در دستیابی به این مقصود شدت بخشید. امروزه ما شاهد آن هستیم که مواد مختلفی در زمینه پزشکی استفاده می‌شود که در زمینه های ابزار جراحی، ایمپلنت‌های اورتوپدی، عروق، پوست و غیره کاربرد دارند. در این میان آلیاژ ریختگی Co-Cr-Mo به دلیل خواص سایشی، خوردگی و زیست‌سازگاری عالی مورد توجه خاصی قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که در زمینه‌های دندان و اورتوپدی از پرمصرف‌ترین آلیاژها به شمار می‌رود. در واقع بالغ بر نیم قرن است که از آلیاژ ریختگی Co-Cr-Mo-C به عنوان مواد اصلی ایمپلنت‌های جراحی و دندان‌سازی استفاده می‌شود. این آلیاژ به دلیل مزایای ویژه‌ای نظیر قیمت ارزان‌تر و خواص مکانیکی برتر؛ مانند استحکام و مدول الاستیسیته، چگالی کمتر و قابلیت انطباق زیستی بالا، جایگزین مناسبی برای آلیاژهای طلا در ساخت دندان‌های مصنوعی شناخته شده است. علاوه بر این، یکی از مهم‌ترین آلیاژهای اصلی مورد استفاده در ساخت مفاصل زانو، لگن، در کنار آلیاژهای تیتانیوم و فولاد زنگ نزن است [۱].

ابرآلیاژهای اولیه کبالت در اتمسفر معمولی ریخته‌گری می‌شدند؛ اما دستیابی به خواص مطلوب این آلیاژها باعث توسعه روش‌های تولید شده است؛ اساساً ذوب القایی در خلأ بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به فرآیند ذوب مجدد سرباره‌ای ESR (Electro Slag Remelting) برای تولید ابرآلیاژهای کار شده (wrought alloys) توجه شد. اخیراً از ذوب مجدد سرباره‌ای در خلأ VESR برای تولید انواع بسیار مرغوب این آلیاژها استفاده شده است [۱].

امروزه در صنعت برای مصارف تجاری، دو روش ذوب در محدوده ابرآلیاژهای پایه کبالت یا نیکل به کار گرفته می‌شود. یکی از این روش‌ها، فرآیند ذوب القایی تحت خلأ (VIM) و دیگری روش ذوب مجدد قوس الکتریکی تحت خلأ (VAR) است. افزایش کیفیت ذوب تحت خلأ در مقایسه با ذوب در هوا با مزایایی چون افزایش تمیزی، کاهش میزان گاز، کاهش نقایص و عیوب و بهبود خواص مکانیکی مرتبط می‌باشد. ویژگی‌های فوق در برخی از آلیاژها با روش ذوب القایی و در

MC (ساختار fcc نمک طعام): کاربرد متشکل از فلزات گروه (M و C) به ترتیب بیانگر اتم‌های یک یا چند فلز و اتم کربن می‌باشند). این کاربردها به ترتیب افزایش پایداری یا افزایش IV و VI.

جدول (۱): آنالیز آلیاژ تهیه شده در این تحقیق

عناصر	Cr	Mo	C	Ni	Si	Mn	Fe	Co
%وزنی	۲۹/۳	۶	۰/۳۳	۰/۸	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۶۵	باقیمانده

همگی به صورت پودر به ابرآلیاژ اضافه شدند. کبالت به صورت قطعات $4 \times 4 \times 0.5$ Cm، کروم کلوخه‌ای شکل و مولیبدن به شکل سیم مصرف شدند.

برای تهیه مدل فلزی نمونه آزمایش کشش ابتدا بر طبق استاندارد ASTM E8 ابعاد نمونه آزمایش کشش مشخص و سپس نمونه فولادی اولیه ساخته شد. پس از تراشکاری نمونه فولادی، قالبی از جنس سیلیکون-رابر سخت شده با رزین، ساخته شد. در این مرحله، پس از فروبردن نیمه اول افقی نمونه فولادی بر روی صفحه گچی، سیلیکون رابر مایع، با هاردنر مخصوص مخلوط و بر روی آن ریخته شد، پس از خودگیری نیمه اول قالب، برای تهیه نیمه دوم آن از نمونه قرار گرفته در نیمه اول به عنوان پایه استفاده و پس از آغستن سطح آن با الکل، سیلیکون رابر مخلوط شده با هاردنر بر روی آن ریخته می‌شود. پس از تهیه قالب دو تکه‌ای سیلیکونی قالب‌ها کنار هم چفت شد و سپس موم مذاب با دمای 70°C به داخل آن ریخته می‌شود. پس از تهیه نمونه‌های مومی، آنها به یک راهگاه مخروطی شکل تحت زاویه 45° درجه متصل شدند.

برای بررسی تأثیر عملیات حرارتی انحلالی بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ Co-Cr-Mo نمونه‌های آزمایش کشش در دمای 1130°C به مدت نیم ساعت پیش‌گرم و سپس در دمای 1230°C و به مدت زمان‌های ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ دقیقه در داخل کوره لوله‌ای شکل تحت اتمسفر گاز آرگون مورد عملیات انحلالی قرار گرفتند. پس از سپری شدن زمان‌های مذکور نمونه‌ها سریعاً از کوره خارج و در آب سرد شدند؛ سپس نمونه‌ها تحت آزمایش کشش قرار گرفت. برای بررسی‌های متالوگرافی قطعه‌هایی از ته نمونه‌های آزمایش کشش بریده شدند. به منظور آزمایش استحکام کششی نمونه ریختگی، از دستگاه کشش با علامت تجاری Instron استفاده شد و سرعت فک 1 mm/min در نظر گرفته شد. پس از آزمایش کشش، انتهای نمونه‌ها بریده شده (قسمت دمبلی شکل) و برای انجام متالوگرافی ابتدا نمونه‌ها مانت شد و پس از سمباده‌زنی و پولیش، بررسی متالوگرافی شدند. برای اچ کردن نمونه‌ها دو روش وجود دارد: یکی الکترواچ در محیط ۱۰ درصد HCl و دیگری با استفاده از محلول اچ $90\% \text{HCl} + 5\% \text{H}_2\text{O}_2$. در این تحقیق محلول دومی به کار برده

انرژی آزاد تشکیل در بالا فهرست شده‌اند. عناصر کاربردهای بکار گرفته شده، تمایل زیادی به ایجاد کاربردهای M_6C و MC دارند. نوع کاربردهایی که ایجاد می‌شوند به تاریخچه عملیات حرارتی و ترکیب آلیاژ بستگی دارند.

کمیت F-4 (مواد جراحی) جامعه آزمون و مواد آمریکا، ترکیب شیمیایی و خواص مهم مکانیکی برای ایمپلنت‌های جراحی ساخته شده از آلیاژهای ریختگی Co-Cr-Mo-C را مشخص کرده است [۴]. اگرچه حصول به میزان خواص کششی مشخص شده به وسیله ASTM برای آلیاژهای ریختگی Co-Cr-Mo-C مشکل نیست، ویژگی شماری از قطعات ریخته‌گری مطابق با استاندارد فوق نمی‌باشد و غالباً در برآوردن حداقل انعطاف‌پذیری رد می‌شوند. این موضوع نه تنها می‌تواند به کنترل نادرست پارامترهای ذوب و ریختگی مربوط باشد، بلکه به تکنیک ریخته‌گری دقیق به کار برده شده نیز وابسته است. امروزه روش‌هایی برای ریخته‌گری و عملیات بعد از ریخته‌گری وجود دارد که می‌تواند استحکام و انعطاف‌پذیری محصولات را بهبود بخشد.

Hollander و Wulff [۵] نشان دادند که عملیات حرارتی انحلالی به مدت تقریباً یک ساعت در محدوده دمایی 1200°C – 1230°C به طور بارزی موجب افزایش استحکام و انعطاف‌پذیری ایمپلنت‌های H.S.21 یا ویتالیوم می‌شود. عملیات بیش از یک ساعت می‌تواند به کاهش استحکام کششی و استحکام تسلیم نمونه‌ها منجر شود، که بازیابی آن بسیار مشکل است.

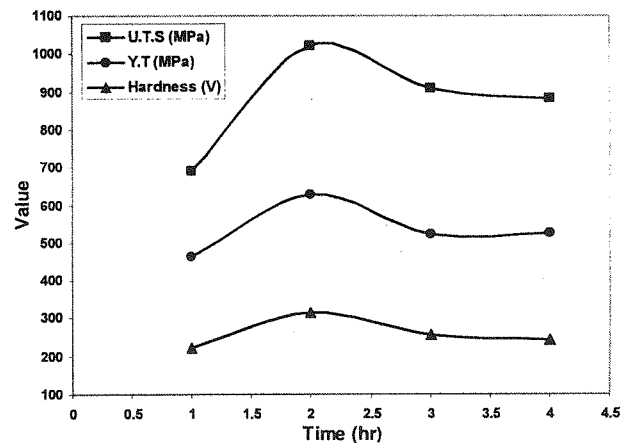
با وجود اینکه ابرآلیاژهای پایه کبالت از استحکام خوبی برخوردار هستند ولی انعطاف‌پذیری خوبی ندارند؛ در این تحقیق ابتدا به تولید ابرآلیاژ پایه کبالت Co-Cr-Mo پرداخته شد. سپس با عملیات حرارتی انحلالی در دماها و زمان‌های مختلف شرایط بهینه از نظر استحکام و انعطاف‌پذیری بررسی شد.

۲- آزمایش

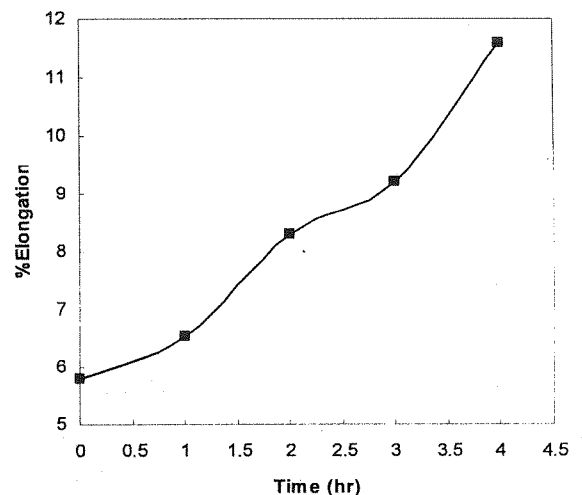
آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق بر اساس استاندارد F75-87 تعریف شده است که ترکیب آلیاژ تهیه شده در جدول (۱) آمده است. عناصر آلیاژی به جز کبالت، کروم و مولیبدن

۳- نتایج

تغییرات تنش تسلیم، مقاومت کششی و سختی نمونه ها در زمان های مختلف عملیات انحلالی در شکل (۱) و تأثیر زمان عملیات انحلالی بر انعطاف پذیری در شکل (۲) ارائه شده است. همان طور که در شکل (۱) ملاحظه می شود با افزایش زمان انحلال، مقاومت کششی و تنش تسلیم ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است و در ادامه به مقدار ثابتی می رسد. مقدار سختی نمونه ها نیز با افزایش زمان، رفتار مشابهی از خود نشان می دهد. میزان انعطاف پذیری یا درصد ازدیاد طول با افزایش زمان انحلال زیاد می شود (شکل (۲)).



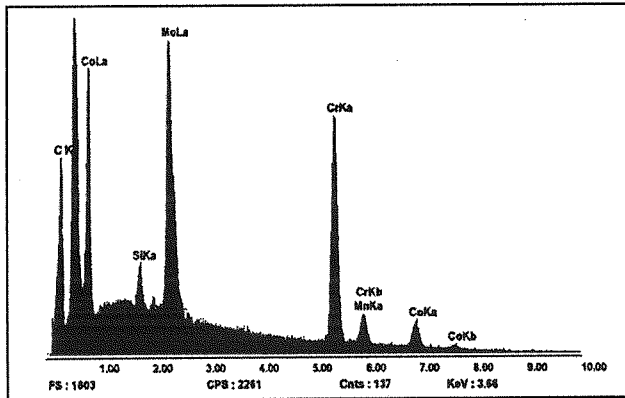
شکل (۱): تغییرات میزان تنش کششی ماکزیمم، تنش تسلیم و سختی حاصل از عملیات انحلالی در زمان های مختلف



شکل (۲): تغییرات میزان انعطاف پذیری حاصل از عملیات انحلالی ۱، ۲، ۳ و ۴ ساعت

شکل (۳) به صورت کیفی آنالیز EDX را که از کاربیده های مرزدانه ای گرفته شده است، نشان می دهد. همان طور که در این

شکل مشخص است، بیشترین عناصری که در کاربید یافت می شوند عبارتند از: کروم، کبالت و مولیبدن. درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در کاربیده های مرزدانه ای در جدول (۲) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود بالاترین درصد موجود در کاربید به کروم مربوط است (۴۷/۵۴ %A). با توجه به میزان بالای کروم در ترکیب آلیاژ (۲۹/۳ %Wt) که بیشترین عنصر آلیاژی در ابرآلیاژ به حساب می آید (جدول (۱))، این عنصر نقش بسیار مهمی به عنوان عامل تشکیل دهنده کاربید بازی می کند. دیگر عناصر از قبیل سیلیسیوم و منگنز نیز در کاربید مشاهده می شوند؛ ولی با توجه به میزان کمی که دارند، نقش تعیین کننده ای در تشکیل کاربید ندارند.

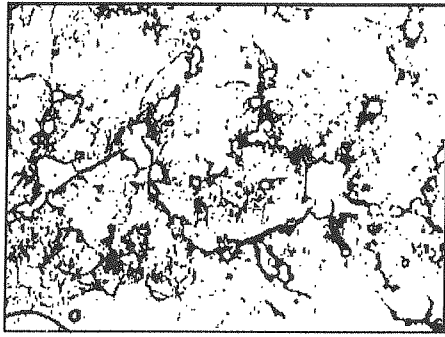


شکل (۳): آنالیز EDX گرفته شده از کاربیده های مرزدانه ای.

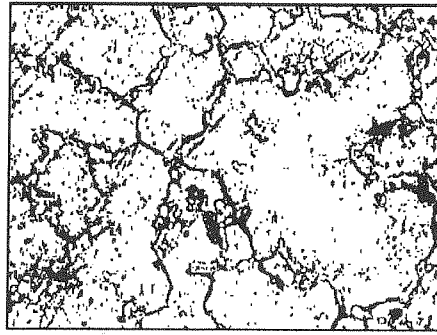
ریزساختار نمونه های عملیات انحلالی شده در دمای ۱۲۳۰ °C برای مدت زمان های ۱، ۲، ۳ و ۴ ساعت در شکل (۴) نشان داده شده است. همان طور که از این تصاویر مشخص است با افزایش زمان نگهداری مورفولوژی کاربیدها از شکل اولیه و جزایری به شکل تقریباً کروی تغییر شکل داده اند. در تمام حالات کاربیده های مرزدانه ای انحلال یافته و درصد و اندازه کاربیدها در درون دانه ها کاهش یافته است.

جدول (۲): درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در کاربیده های مرزدانه ای حاصله از آزمون EDX

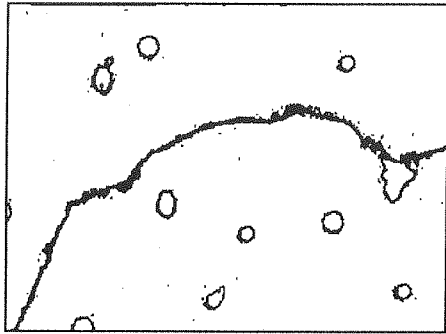
Element	Wt %	At %
C	4.84	20.84
Si	1.43	2.63
Mo	33.6	18.13
Cr	47.75	47.54
Mn	0.0525	0.05
Co	12.33	10.81
Total	100.00	100.00



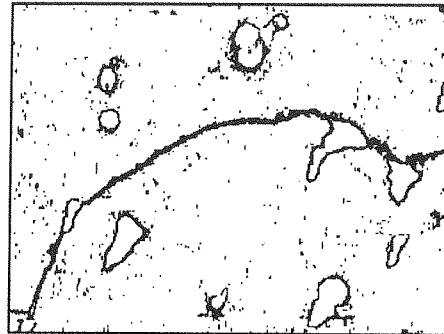
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۴): ریزساختار نمونه عملیات انحلالی یافته در دمای 123°C به مدت (الف) ۱ ساعت، (ب) ۲ ساعت، (ج) ۳ ساعت، و (د) ۴ ساعت.

محلول اچ: $[\text{H}_2\text{O}_2 + 95\% \text{HCl}]$ ، بزرگنمایی $\times 500$

ترک می‌گردد. در مقایسه ریزساختارها چنین به نظر می‌رسد که مورفولوژی کاربیدها یا رسوبها برای زمان‌های ۳ و ۴ ساعت بهتر است؛ اما استحکام کمتری نسبت به عملیات محلولی ۲ ساعته دارد. علت این است که با گذشت زمان انحلال، دانه‌ها شروع به رشد می‌کند و اندازه آنها بزرگ می‌شود. بزرگ شدن دانه‌ها باعث کاهش استحکام می‌گردد؛ اما از طرفی کروی شدن رسوبها نیز می‌تواند متقابلاً استحکام را افزایش دهد؛ چون هرچه رسوبها کروی‌تر و توزیع ریزتری داشته باشند از pile up نابجایی جلوگیری می‌کند. همچنین این رسوبات ریز باعث کند شدن حرکت نابجایی‌ها می‌شوند [۸]. مجموعه این عوامل باعث می‌شود استحکام این ابرآلیاژ پس از عملیات انحلالی به مدت ۲ ساعت، به بیشینه مقدار خود برسد.

نتایج تحقیقات قبلی نشان دادند که در این ابرآلیاژ چون نسبت کروم به کربن بالا است و همچنین میزان کروم در این ابرآلیاژ بیشتر از ۵٪ وزنی است؛ لذا انتظار می‌رود که کاربیدهای درشت موجود در ریزساختار؛ که پس از عملیات انحلالی نیز مشهودتر می‌شوند، از نوع M_{23}C_6 باشند (M ترکیبی از اتمهای Cr، Mo، Co است). نتایج تحقیقات دیگر نشان داده است [۳] که در ابرآلیاژهای با کروم بالا (بیش از ۲۰ درصد) معمولاً فازهای M_7C_3 و M_{13}C_2 در ریزساختار به ندرت یافت می‌شوند و یا اگر وجود داشته باشند در اثر عملیات

ع- بحث

همان‌طور که در شکل (۱) و (۲) ملاحظه می‌شود زمان عملیات انحلالی بهینه، ۲ ساعت است که طی آن استحکام تسلیم، مقاومت کششی و سختی آلیاژ به حداکثر مقدار خود می‌رسد و انعطاف‌پذیری به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. از آنجا که بر طبق نتایج ارائه شده قبلی، اکثر قطعات ریختگی از این نوع آلیاژ انعطاف‌پذیری پایین‌تر از حد استاندارد برخوردار هستند [۶]، [۸] لذا این عملیات بسیار سودمند است. در خصوص علت این پدیده باید اشاره کرد که استحاله تک‌دمای (ایزوترمال) نمونه‌های عملیات انحلالی شده در دمای 106°C و 95°C به تشکیل رسوب از نوع لایه‌ای پرلیتی، Cr_{23}C_6 و یا M_6C منجر می‌شوند؛ و همچنین شواهدی دال بر تشکیل فاز σ که یک فاز بین فلزی است، وجود دارد [۷]. تشکیل فاز سیگما در زمان‌های اولیه عملیات انحلالی به علاوه تشکیل رسوبات ریز ایجاد شده، باعث افزایش مقاومت کششی و استحکام تسلیم می‌شود و به نظر می‌رسد ازدیاد انرژی نقص در چیدن (stacking fault energy) باعث افزایش انعطاف‌پذیری می‌شود. توزیع کاربیدها در این مرحله بسیار ریز است و موجب افزایش استحکام می‌شود، بر خلاف کاربیدهای درشت مرزخانه‌ای؛ که باعث کاهش شدید انعطاف‌پذیری به علت جوانه‌زنی زود هنگام

۶- تقدیر و تشکر

در پایان لازم است از جناب آقای دکتر نعیمی به خاطر راهنمایی و همفکری‌هایی که برای انجام پروژه به مولفان دادند، کمال تشکر و قدردانی را داشت. همچنین از پژوهشگاه نیرو و پژوهشکده عصر انقلاب؛ که در انجام آزمایش‌ها همکاری کردند، سپاسگزاری می‌شود.

۷- مراجع

- [۱] ASM HANDBOOK, Vol 15 p p 811-814, The Materials Information Society, 1992
- [۲] R.W. Erdle and C. H. Prang US patent No.1,956,278
- [۳] Sims, C. T; "Cobalt-base alloys", *The Superalloys*, C. T. Sims and W. C. Hagel, Page 145, John Wiley and Sons, New York, 1982
- [۴] J.T. Scales, "Examination of implants removed from patients", proceeding and reports of councils and associations, British, journal of bone and joint surgery, V. 53B, p.p 344, 1971
- [۵] J.R. Coke, "Heat treatment of cast Co-Cr-Mo surgical implant alloys", 1975
- [۶] M.J. Donachie, "Superalloys Source Book"; p p 170-173 1984
- [۷] R.N.J. Taylor ; R. B. Waterhouse, "The metallography of a cobalt - based implant alloy after solution treatment and aging", *Journal of material science*, V. 21 1990
- [۸] W.H. Jaing ; H.R. Guan ; Z.Q. Hu, "Effects of heat treatment on microstructures and mechanical properties of a directionally solidified cobalt-base superalloy", *Journal of material science*, V. 271, p.p 101-108, 1999
- [۹] C.R. Brooks, "heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys", ASM, 1982
- [۱۰] A.J.T. Clemow ; B.L. Daniell, "The influence of microstructure on the adhesive wear resistance of a Co-Cr-Mo alloy", *Journal of material science*, V. 61, p.p 219-231, 1980
- [۱۱] Japanese industrial standard (JIS) . JIS-T-6115 , 1985

محلولی از بین می‌روند. برای تعیین ترکیب شیمیایی کاربید $M_{23}C_6$ می‌توان از آنالیز EDX کمک گرفت. با مراجعه به جدول (۲)، درصد عناصر کروم، مولیبدن و کبالت را می‌توان در کاربید تعیین کرد که به ترتیب ۶۲٪، ۲۴٪ و ۱۴٪ می‌باشد؛ بنابراین به نظر می‌رسد که ترکیب شیمیایی کاربید به صورت $(Cr_{0.62}Mo_{0.24}Co_{0.14})_{23}C_6$ است که با ضرب درصد هر یک از اتم‌های Cr، Mo و Co در عدد بیرون پرانتز، به طور تقریب به ترکیب شیمیایی $(Cr_{14}Mo_6Co_3)C_6$ تبدیل می‌شود که این نتایج با دستاوردهای تحقیقات قبلی مطابقت دارد [۹].

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود بیشتر کاربیدها در مرزخانه قرار گرفته‌اند و هنگامی که نمونه‌ها به مدت یک ساعت تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند، مورفولوژی کاربیدها تغییر چندانی پیدا نمی‌کند؛ اما با گذشت زمان‌های بیشتر، کاربیدها شروع به انحلال کرده و به شکل کروی در می‌آیند. در نهایت پس از گذشت ۴ ساعت از عملیات انحلالی، کاربیدهای مرزخانه‌ای تقریباً به صورت کامل حل شده و کاربیدهای داخل دانه به حالت کروی درآمده‌اند. نتایج بررسی‌های متالوگرافی نشان می‌دهد با افزایش زمان عملیات انحلالی، اندازه دانه‌ها بزرگ می‌شود. Daniell و Clemow [۱۰] نشان دادند که کاربید $M_{23}C_6$ که در ابتدا در آلیاژ ریختگی حضور دارد، تمایل به تبدیل به کاربید M_6C در آلیاژ ویتالیوم (F-75) در دماهای ۱۴۲۸، ۱۴۸۳ و ۱۵۰۳K دارد. هم‌زمان با استحاله کاربیدی، مورفولوژی کاربیدها نیز به طور کلی تغییر می‌یابد. شواهد موجود در این راستا نشان می‌دهد که انحلال کاربیدها در درجه حرارت $1230^{\circ}C$ توسط نفوذ عناصر آلیاژی نظیر مولیبدن و کروم کنترل می‌شود [۱۱].

۵- نتیجه‌گیری

از آنجا که مقدار کربن در آلیاژ ریخته شده در حد بالا و نزدیک به میزان بیشینه مجاز در استاندارد است و با توجه به اینکه از مهم‌ترین مکانیزم‌های استحکام‌دهی آلیاژهای پایه کبالت، کاربیدها می‌باشند؛ حضور کاربیدها موجب افزایش سختی و استحکام و کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود. کاربیدهای درشت موجود در ساختار میکروسکوپی اغلب از نوع کاربیدهای $M_{23}C_6$ است که M ترکیبی از Cr، Mo و Co است. این کاربیدها در اثر عملیات انحلالی، به تدریج شروع به حل شدن کرده و مورفولوژی آنها به حالت کروی درمی‌آید. در واقع علت افزایش انعطاف‌پذیری (شکل (۲)) حل شدن کاربیدهای مرزخانه‌ای است که از گسترش ترک در مرزخانه جلوگیری می‌کند.