



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

ارزیابی اثر کربن و آنیل انحلالی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ پایه کبالت ریختگی ASTM F75

شاهین ترکمانی^۱، مریم مرکباتی^{۲*}، معصومه سیفاللهی^۳، ادلی آخوندزاده^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
- ۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
- ۳- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
- ۴- پژوهشگر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

* نویسنده مکاتبه کننده: Email: m_morakabati@mut.ac.ir

چکیده:

آلیاژ پزشکی پایه کبالت کروم مولیبدن ASTM F75 به صورت ریختگی در ایمپلنت‌های ارتوپدی مانند مفاصل مصنوعی لگن و زانو استفاده می‌شود. این آلیاژ به دلیل وجود عیوبی نظیر ناهمگنی شیمیایی و اندازه دانه بالا، تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر، تأثیر عملیات حرارتی آنیل انحلالی بر تحولات ساختاری و خواص مکانیکی دو آلیاژ ASTM F75 (یک نمونه بدون کربن و دیگری حاوی کربن به مقدار ۰/۲۱ درصد وزنی) مورد ارزیابی قرار گرفت. عملیات حرارتی آنیل انحلالی در سه دمای ۱۱۷۵، ۱۲۲۵ و ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ ساعت انجام شد. سپس نمونه‌ها در آب کواتچ شدند. نتایج نشان داد در نمونه بدون کربن، رسوبات σ تشکیل شد. اگرچه، در نمونه حاوی کربن، فازهای σ و کاربید $M_{23}C_6$ تشکیل شد. همچنین با افزودن کربن، کسر حجمی کاربیدها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت و به مقدار ۶/۵۵ درصد رسید که سبب افزایش استحکام نمونه شد. با افزایش دمای آنیل از ۱۱۷۵ به ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد و زمان آن از ۰/۵ به ۴ ساعت، کسر حجمی رسوبات و همچنین اندازه آن‌ها کاهش یافت. در نمونه‌ی حاوی کربن با آنیل در دمای ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت رسوبات توزیع همگن‌تری در ساختار یافتند. همچنین اغلب کاربیدهای موجود در مرزدانه که در حالت ریختگی مشاهده شد، با عملیات حرارتی حذف شدند. در نهایت در نمونه حاوی کربن عملیات حرارتی شده، خواص مکانیکی مانند استحکام کششی نهایی تا ۱۹ درصد و انعطاف‌پذیری تا دو برابر نسبت به نمونه ریختگی افزایش یافت.

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

واژه‌های کلیدی:

آلیاژ پایه کبالت کروم مولیبدن، آنیل انحلالی، ریزساختار، کاربید، خواص کششی.

ارجاع به این مقاله:

شاهین ترکمانی، مریم مرکباتی، معصومه سیفاللهی، ادلی آخوندزاده، ارزیابی اثر کربن و آنیل انحلالی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ پایه کبالت ریختگی ASTM F75. پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار و تابستان ۱۴۰۱، جلد ۶، شماره ۱، صفحات ۲۵-۴۴.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2023.351831.1159

۱- مقدمه

پیچیدگی شکل پروتزها، استفاده از فن‌های ریخته‌گری دقیق به منظور تولید قطعاتی که ابعاد آن نزدیک به نمونه‌های نهایی است، هزینه‌های بالای عملیات ماشین‌کاری را کاهش می‌دهد. باین‌حال، این روش ساخت منجر به خواص مکانیکی ضعیف‌تر در مقایسه با سایر فرآیندهای تولید مانند متالورژی پودر یا آهن‌گری می‌شود [۴]. معایب اصلی موجود در حالت ریختگی عبارت‌اند از: تخلخل، ناهمگنی شیمیایی، اندازه دانه بالا و

آلیاژ ریختگی پزشکی پایه کبالت کروم مولیبدن تحت عنوان ASTM F75 با ترکیب شیمیایی کروم ۳۰-۲۷، مولیبدن ۷-۵ و مقدار متعادل شده از کبالت (برحسب درصد وزنی)، به دلیل استحکام بالا در اثر تشکیل کاربید، مقاومت در برابر سایش بالایی دارد و از این رو به طور گسترده برای ساخت ایمپلنت‌های ارتوپدی استفاده می‌شود [۱-۳]. به دلیل کارپذیری سخت این آلیاژها و

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش دو شمش مختلف از آلیاژ ASTM F75، یکی حاوی بدون کربن محصول (۱) و دیگری حاوی کربن محصول (۲) تولید شد. تهیه ذوب هر دو محصول در کوره القایی با ظرفیت یک کیلوگرم تحت گاز آرگون و ریخته‌گری در قالبی از جنس آلومینا و به شکل Y Block با ضخامت ۱۵، پهنای ۱۱۰ و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر انجام شد. نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی محصولات به روش کوانتومتری با استفاده از دستگاه کوانتومتری مدل Spectro2004 در جدول (۱) ارائه شده است. چنانکه مشاهده می‌شود آنالیز ترکیب شیمیایی هر دو محصول تولید شده در محدوده استاندارد مطابق مرجع [۱۴] قرار دارد.

به‌منظور انجام عملیات حرارتی آنیل انحلالی، مکعب‌هایی با ابعاد $7 \times 7 \times 7$ میلی‌متر از هر محصول توسط برش با سیم تهیه شد و در دماهای ۱۱۷۵، ۱۲۲۵ و 1275°C در زمان‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ ساعت تحت آنیل و سپس سرمایش در آب قرار گرفتند. مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام بررسی‌های ریزساختاری، شامل سنباده‌زنی مش ۶۰ تا ۳۰۰، پولیش توسط خمیر الماسه سه میکرومتر و سپس اچ الکترولیتی در محلول ۹۰٪ اسید سولفوریک - متانول با ولتاژ ۶ ولت به مدت ۳۰ تا ۲۴۰ ثانیه است.

جهت تصویربرداری از میکروسکوپ نوری مدل OlymPusDP25 استفاده شد. همچنین مشاهدات دقیق‌تر برخی از ریزساختارها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA3 Tescan توسط Scanning electron microscopy انجام و عناصر موجود توسط آنالیز EDS شناسایی شدند. محاسبه کسر حجمی فازها و عدد اندازه دانه طبق استاندارد [۱۵] با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصاویر متالوگرافی Image J انجام شد. شناسایی فازها از طریق پراش اشعه ایکس (XRD) و با استفاده از دستگاه Rigaku SmartLab تحت ولتاژ ۴۰kV، شدت جریان ۳۰mA و اشعه تک‌رنگ Cu-K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) صورت گرفت. زاویه آنالیز پرتو از 20° تا 100° تنظیم شد و روبش اشعه در هر ۰/۵ درجه و با زمان توقف ۴ ثانیه صورت گرفت. به‌منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، آزمایش کشش دما محیط روی نمونه‌های ریختگی و آنیل شده در دماهای ۱۱۷۵، ۱۲۲۵ و 1275°C به مدت ۱ ساعت، انجام شد. آزمایش کشش دما محیط توسط دستگاه Instron 8502 با ظرفیت ۱۰ تن نیرو و طبق استاندارد ASTM E8 [۱۶] انجام شد.

ریزساختار حاوی رسوب‌های سخت در نواحی بین دندریتی است. علاوه بر این، ناهمگنی در مورفولوژی کربید، اندازه و توزیع آن به علت فرآیند ریخته‌گری منجر به شکل-پذیری و استحکام خستگی پایین می‌شود. با این وجود، خواص مکانیکی را می‌توان با استفاده از عملیات حرارتی از طریق انحلال شبکه‌های کربیدی بزرگ و ایجاد ساختار همگن‌تر بهبود بخشید [۵].

بسیاری از تولیدکنندگان، آلیاژهای کبالت کروم مولیبدن را به‌منظور از بین بردن نقایص ریختگی و بهبود خواص مکانیکی، تحت عملیات حرارتی نظیر آنیل انحلالی و پیرسازی قرار می‌دهند. کنترل میزان کربن محلول، مورفولوژی و نحوه توزیع کربیدهای تشکیل‌شده در آلیاژهای کبالت کروم مولیبدن به‌منظور بهبود خواص مکانیکی این آلیاژها از اهمیت بالایی برخوردار است [۷ و ۶]. ریزساختار آلیاژ ASTM F75 در شرایط ریخته‌گری شده شامل زمینه γ دندریتی از کبالت FCC، کربیدهای ثانویه C_{23}M_6 با مورفولوژی بلوکی و لایه‌ای که در مرزهای دانه جدایش می‌یابند، فاز σ و فاز C_6M است. تشکیل و انحلال رسوبات کربیدی در آلیاژ ASTM F75 علاوه بر ترکیب شیمیایی تحت تأثیر عملیات حرارتی قرار دارد.

تشکیل کربیدهای C_{23}M_6 به‌عنوان مکانیزم اصلی استحکام‌بخشی در این آلیاژ به‌حساب می‌آید. افزودن کربن باعث افزایش پایداری فاز γ و منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شود؛ اما افزودن بیش از حد آن منجر به افزایش تشکیل کربید C_{23}M_6 می‌شود [۸-۱۰]. زمانی که کربیدهای درشت C_{23}M_6 در امتداد مرزهای دانه رسوب کنند به‌عنوان مکان‌های ترجیحی اشاعه ترک خستگی عمل می‌کنند؛ بنابراین حصول ریزساختار بهینه از طریق توزیع همگن رسوب‌ها، مورفولوژی، اندازه و کسر حجمی آن‌ها در فاز زمینه به‌منظور بهبود خواص مکانیکی از طریق عملیات حرارتی آنیل انحلالی و پیرسازی صورت می‌گیرد [۱۱-۱۳].

اغلب مطالعات صورت گرفته به بررسی اثر عناصر آلیاژی نظیر کروم، نیتروژن، نیکل، سیلیسیم و منگنز بر ریزساختار آلیاژ ASTM F75 پرداخته‌اند و مطالعات اندکی در زمینه اثر کربن بر ریزساختار و خواص مکانیکی این آلیاژ انجام شده است و کمتر به موضوع بهبود خواص مکانیکی از طریق عملیات حرارتی اشاره شده است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تحولات ساختاری آلیاژ ASTM F75 بدون کربن و حاوی کربن با تغییر سیکل عملیات حرارتی آنیل انحلالی است تا خواص مکانیکی ضعیف این آلیاژ در حالت ریختگی نظیر استحکام و انعطاف‌پذیری اندک آن در حالت ریختگی جبران شود.

جدول ۱- نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی محصولات ۱ و ۲ در قیاس با استاندارد (درصد وزنی).

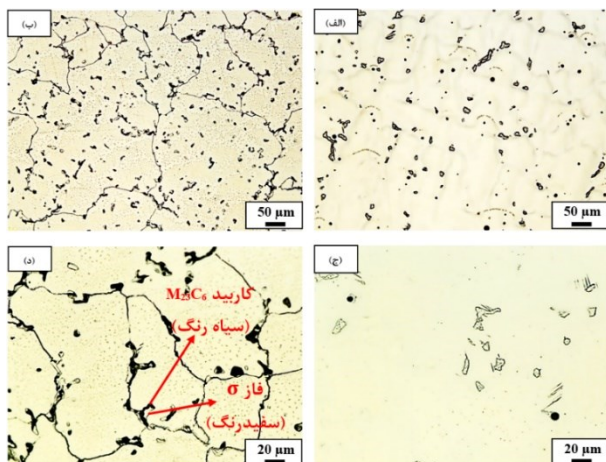
عنصر	Co	Cr	Mo	Si	Mn	Fe	Al	C
ASTM F75 [۱۴] استاندارد	Bal.	۲۷-۳۰	۵-۷	<۱	<۱	<۰/۷۵	<۰/۱	<۰/۳۵
محصول ۱	Bal.	۲۸/۱۶	۵/۴۹	۰/۳۵	۰/۵۳	۰/۳	۰/۰۱۶	۰/۰۱
محصول ۲	Bal.	۲۸/۲۴	۵/۶۳	۰/۳۲	۰/۴۳	۰/۲۴	۰/۰۷۷	۰/۲۱

۳- نتایج و بحث

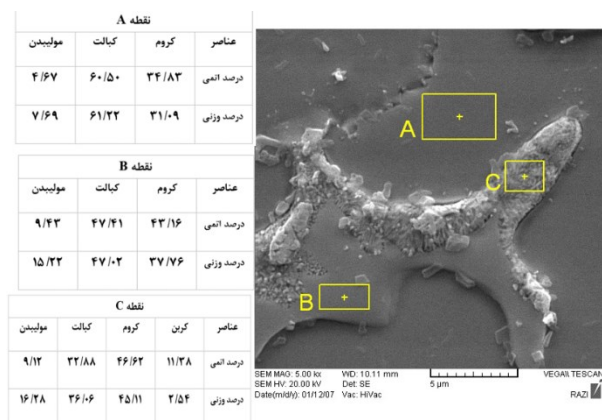
۳-۱ اثر کربن بر ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ در حالت ریختگی

ریزساختار نمونه‌های ASTM F75 بدون کربن و حاوی کربن در حالت ریخته‌گری شده در شکل (۱) نشان داده شده است. مقایسه ریزساختار نمونه بدون کربن با مرجع [۱۷] نشان‌دهنده شباهت فازها و مورفولوژی فازهای تشکیل شده است. لذا بر اساس آن مطالعه می‌توان بیان نمود که ریزساختار نمونه بدون کربن در شرایط ریخته‌گری شده شامل یک زمینه دندریتی از فاز HCP-ε به همراه رسوبات بین دندریتی از نوع فاز σ است. با اضافه شدن کربن به ترکیب شیمیایی نمونه و با توجه به آنکه کربن پایدارکننده فاز FCC-γ است، انتظار می‌رود که باعث پایداری این فاز شده و ریزساختار شامل زمینه از نوع γ با شبکه FCC [۱۷] و همچنین رسوبات مرزدانه‌ای از نوع کاربیدهای $M_{23}C_6$ با مورفولوژی لایه‌ای (سیاه‌رنگ) و فاز σ (سفیدرنگ) باشد. تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک رسوب ایجاد شده در نمونه حاوی کربن به همراه نتایج آنالیز EDS در شکل (۲) نشان داده شده است. این رسوب حاوی دو فاز مختلف است. با بررسی درصد اتمی عناصر در نقطه C، درصد عناصر کروم، مولیبدن و کبالت را می‌توان در کاربید تعیین کرد که به ترتیب ۵۲٪، ۱۰٪ و ۳۷٪ است؛ بنابراین به نظر می‌رسد که ترکیب شیمیایی کاربید به صورت $(Co/۳۷ Mo/۰/۱ Cr/۰/۵۲)_{۲۳}C_۶$ است که با ضرب درصد هر یک از اتم‌های Cr، Mo و Co در عدد بیرون پرانتز، به‌طور تقریبی به ترکیب شیمیایی $(Cr_{۱۲} Mo_۲ Co_۹)_{۲۳}C_۶$ نزدیک است که دارای مورفولوژی لایه‌ای است. همچنین با بررسی آنالیز نقاط دیگر، به نظر می‌رسد فاز موجود در نقطه B از نوع σ (با توجه به بالا بودن مقادیر کبالت و کروم) و نقطه A نیز شامل عناصر کبالت، کروم و مولیبدن به‌عنوان عناصر اصلی پایه آلیاژ هستند.

با بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری شکل (۱) مشاهده می‌شود که با افزوده شدن کربن به ترکیب آلیاژ، رسوبات جدیدی در ساختار آلیاژ ایجاد می‌شوند. اثر دیگری که با اضافه شدن کربن مشاهده می‌شود، کاهش کسر حجمی رسوبات سفیدرنگ یعنی فاز σ (جدول (۲) است. فاز σ دارای یک ساختار تتراگونال است



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار نمونه ASTM F75 بدون کربن (الف) و حاوی کربن (ب-د) در حالت ریخته‌گری شده در بزرگنمایی مختلف.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی رسوب ایجاد شده در محصول حاوی کربن در حالت ریختگی به همراه نتایج آنالیز EDS.

که از ترکیب بین‌فلزی Co-Cr تشکیل شده است که سبب شکستگی ترد و تضعیف استحکام کششی می‌شود [۷]. این فاز به علت ماهیت ترد و شکننده‌ای که دارد، یک فاز مضر شناخته می‌شود و با تشکیل آن در مرزهای دانه خواص مکانیکی افت پیدا می‌کند. با افزودن کربن، کاربیدهای $M_{23}C_6$ طبق معادله (۱) تشکیل می‌شوند که می‌تواند نقش مهمی در افزایش استحکام آلیاژ از طریق مکانیسم استحکام‌بخشی رسوبی داشته باشد [۱۲]:



جدول ۳- نتایج آزمایش کشش سرد محصول تولید شده در قیاس با استاندارد

نمونه	YS (MPa)	UTS (MPa)	EI (%)	RA (%)
استاندارد ASTM F75 [۱۴]	۴۵۰ <	۶۵۵ <	۸ <	۸ <
محصول ۱ (بدون کربن)	۲۶۷	۶۰۷	۱۴	۱۲/۵
محصول ۲ (حاوی کربن)	۴۱۵	۷۶۴	۹/۹۲	۹/۶

همچنین مشاهده می‌شود استحکام تسلیم آلیاژ نیز با تشکیل کاربیدهای $M_{23}C_6$ افزایش یافته اما به حد استاندارد نرسیده است. علت آن را می‌توان به بزرگ بودن اندازه دانه در حالت ریخته‌گری شده نسبت به حالت آنیل شده و همچنین وجود احتمال نقایص ریخته‌گری نظیر انقباضات و جدایش‌ها نسبت داد. مقادیر درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع در نمونه بدون کربن به ترتیب ۱۴ و ۱۲/۵ درصد و در نمونه حاوی کربن به ترتیب برابر با ۹/۹۲ و ۹/۶ درصد شد که بالاتر از حد استاندارد است اما نسبت به نمونه بدون کربن، مقداری کاهش یافته است که علت آن افزایش کسر حجمی رسوب به‌ویژه در مرزهای دانه است که مکان‌های مناسبی برای رشد و اشاعه ترک هستند.

۳-۲- اثر کربن بر ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی

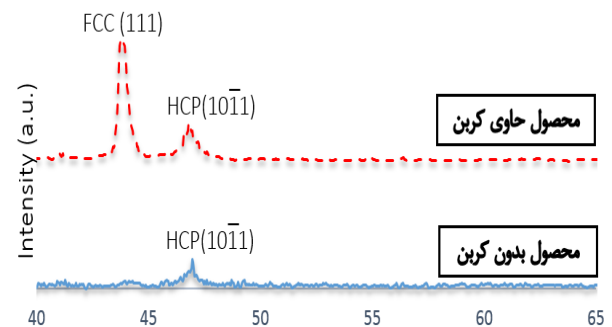
کسر حجمی رسوب‌های ایجاد شده برحسب زمان آنیل که توسط نرم‌افزار ImageJ محاسبه شده است در شکل (۴) ارائه شده است. مطابق با شکل (۴)، با انجام آنیل در دمای $1175^{\circ}C$ و در زمان ۱ ساعت، کسر حجمی فاز σ در محصول (۱) و فاز $M_{23}C_6$ در محصول (۲) به حداکثر خود رسیده است. در واقع با انجام آنیل در این دما، نه تنها انحلال رسوب مشاهده نشد، بلکه کسر حجمی رسوب‌ها افزایش پیدا کرد. علت آن است که با توجه به آنکه دمای آنیل پایین‌تر از دماهای انحلال فازهای σ ($1283^{\circ}C$) و $M_{23}C_6$ ($1220^{\circ}C$ تا $1230^{\circ}C$) است [۱۹]، لذا همچنان شرایط جهت نفوذ عناصر و تشکیل رسوب فراهم است. ریزساختار میکروسکوپ نوری در حالت آنیل شده در دمای $1175^{\circ}C$ به مدت ۱ ساعت در شکل (۵) برای نمونه‌های بدون کربن و حاوی کربن ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، رسوب‌های ثانویه ریزتر در اطراف رسوب اولیه تشکیل شده‌اند. به نظر می‌رسد در نمونه حاوی کربن این رسوب‌ها از نوع کاربید $M_{23}C_6$ و در نمونه بدون کربن این رسوب‌ها از نوع فاز σ باشد. با انجام آنیل انحلالی در دمای $1225^{\circ}C$ مطابق با دیگرام

جدول ۲- کسر حجمی رسوب‌های ایجاد شده از نوع σ و $M_{23}C_6$ به ترتیب در محصولات (۱) و (۲) در حالت ریختگی.

نوع آلیاژ	کسر حجمی رسوب (%)
محصول ۱ (بدون کربن)	۳/۶۵٪ فاز σ
محصول ۲ (حاوی کربن)	۱/۷۲٪ فاز σ ۶/۵۵٪ فاز $M_{23}C_6$

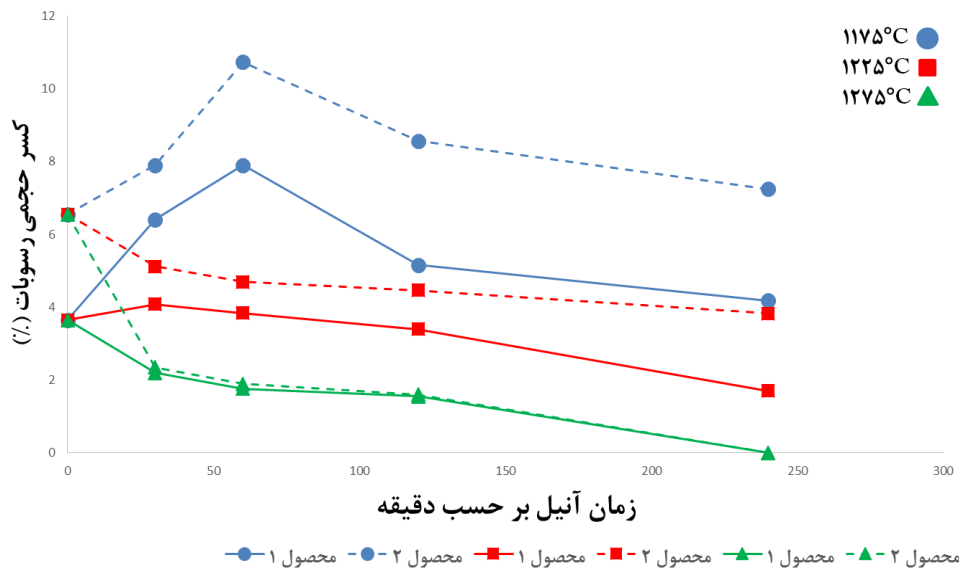
نتایج آنالیز XRD از نمونه‌های بدون کربن و حاوی کربن در شرایط ریختگی در شکل (۳) ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، در نمونه بدون کربن و در حالت ریخته‌گری شده، فاز ϵ با ساختار کریستالوگرافی HCP به‌عنوان فاز غالب زمینه است. در حالت ریختگی زمینه نمونه حاوی کربن شامل فاز γ با ساختار کریستالوگرافی FCC به‌عنوان فاز غالب زمینه و همچنین مقداری فاز ϵ است. گزارش شده است [۱۳] با افزودن کربن به آلیاژ پایه کبالت کروم مولیدن، انرژی نقص چیدمان افزایش و چگالی نقص‌های چیدمان کاهش می‌یابد که منجر به پایداری فاز γ می‌شود.

نتایج آزمایش کشش سرد هر دو نمونه از نمونه‌های بدون کربن محصول (۱) و حاوی کربن محصول (۲) در حالت ریختگی در جدول (۳) ارائه شده است. در نمونه بدون کربن، با توجه به وجود کسر حجمی بالایی از فاز σ (در حدود ۳/۶۵٪) و تردی آلیاژ، افت خواص در آلیاژ مشاهده شده و مقادیر استحکام تسلیم و استحکام کششی کمتر از حد استاندارد شده‌اند. در نمونه حاوی کربن، با تشکیل کاربیدهای $M_{23}C_6$ در فاز زمینه و افزایش کسر حجمی رسوبات، استحکام کششی آلیاژ از طریق مکانیسم استحکام‌بخشی رسوبی افزایش می‌یابد و به بالاتر از حد استاندارد می‌رسد. گزارش شده است [۱۸] ذرات کاربید موانع سختی را بر سر راه لغزش نابجایی‌ها ایجاد کرده و از این طریق استحکام آلیاژ را افزایش می‌دهد.

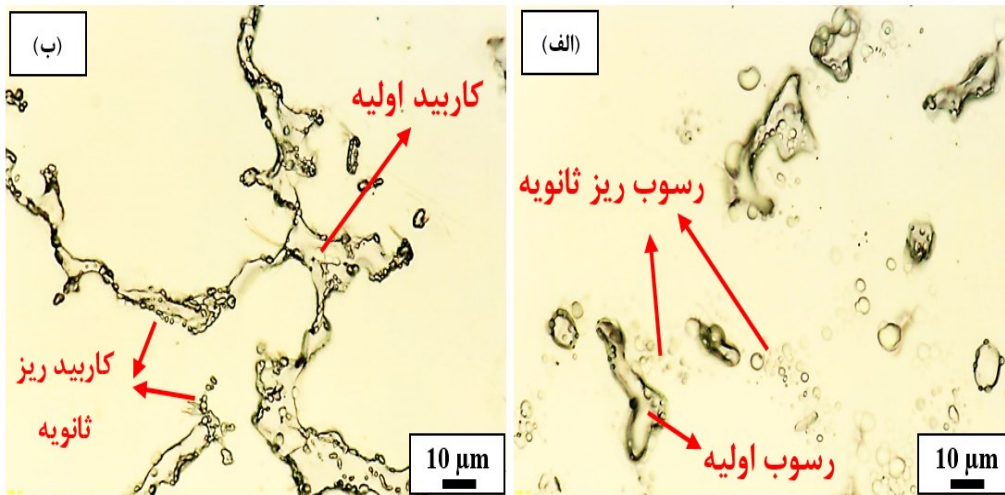


2θ

شکل ۳- الگوی پراش اشعه X از نمونه‌های بدون کربن و حاوی کربن در حالت ریخته‌گری شده



شکل ۴- کسر حجمی رسوب بر حسب زمان آنیل در دماهای مختلف برای محصولات (۱) و (۲) آلیاژ ASTM F75. (رسوب‌های محاسبه‌شده محصولات (۱) و (۲) به ترتیب از نوع σ و $M_{23}C_6$ است)



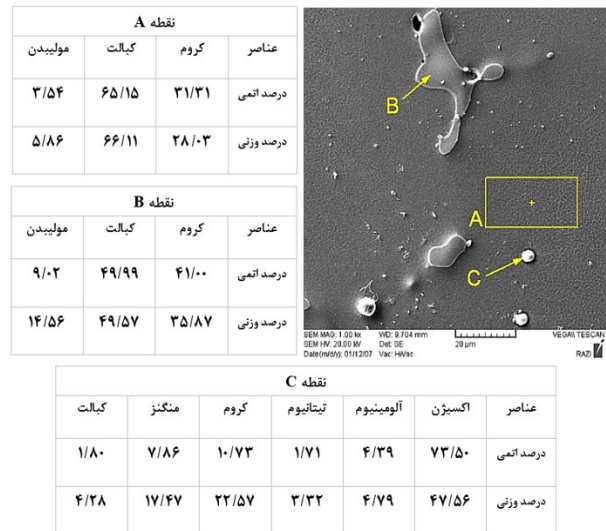
شکل ۵- ریزساختار میکروسکوپ نوری در حالت آنیل شده در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت: الف) محصول بدون کربن ب) محصول حاوی کربن.

که همان فاز σ است ترکیب شیمیایی حاوی کبالت و کروم نزدیک به هم و همچنین مولیبدن است. در نقطه C نیز یک آخال مشاهده می‌شود که شامل عناصری نظیر اکسیژن، آلومینیوم، تیتانیوم، کروم، کبالت و منگنز است. در نمونه حاوی کربن با توجه به قرارگیری دمای آنیل در محدوده دمایی انحلال کاربید، انحلال در این دما رخ می‌دهد. با توجه به شکل (۴)، کسر حجمی کاربیدها تا زمان ۳۰ دقیقه آنیل انحلالی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش و پس‌از آن با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. علت این افت شدید در کاهش مقدار رسوب در زمان کوتاه آنیل را می‌توان به وجود کاربیدهای لایه‌ای در حالت ریختگی نسبت داد؛ زیرا کاربید لایه‌ای با توجه به بالاتر بودن انرژی سطحی آن سریع‌تر از کاربید بلوکی شکل، انحلال می‌یابد [۲۰].

شکل (۴) مشاهده می‌شود که با افزایش زمان آنیل، مقدار بیشتری از رسوبات موجود در هر دو محصول انحلال یافته و از کسر حجمی آن کاسته می‌شود. در نمونه بدون کربن مطابق شکل (۴) برخلاف نمونه حاوی کربن، ابتدا یک افزایش جزئی در زمان ۳۰ دقیقه آنیل مشاهده می‌شود. علت این افزایش می‌تواند فراهم بودن شرایط نفوذ عناصری نظیر کروم، کبالت و مولیبدن جهت تشکیل فاز σ باشد؛ اما پس‌از آن روند کاهش مقدار رسوب با توجه به قرارگیری در محدوده دمایی انحلال آن آغاز می‌شود. نوع رسوب موجود در ریزساختار نمونه بدون کربن، همانند حالت ریختگی آن از نوع σ است. تصویر میکروسکوپ الکترونی این رسوب به همراه نتایج آنالیز EDS در نمونه بدون کربن در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج EDS مشخص است، فاز زمینه در نقطه A شامل عناصر پایه آلیاژ یعنی کبالت، کروم و مولیبدن است. در نقطه B

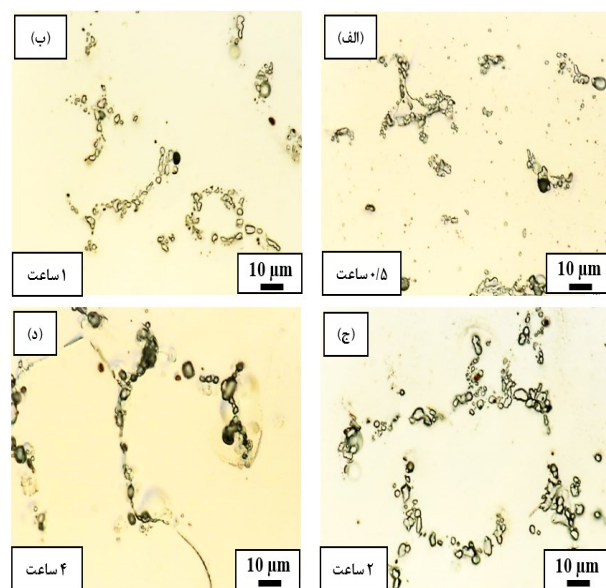
در نقطه A زمینه شامل عناصر پایه آلیاژ یعنی کبالت، کروم و مولیبدن است. همچنین با بررسی درصد اتمی عناصر در نقطه B، به نظر می‌رسد کاربرد از نوع $M_{23}C_6$ است. با بررسی نقشه آنالیز عناصر مشخص است که این رسوب دارای کبالت کمتر نسبت به فاز زمینه و همچنین غنی از کروم و مولیبدن است. نتیجه آنالیز XRD از نمونه حاوی کربن در شرایط آنیل شده در دمای 1225°C درجه سانتی‌گراد در شکل (۹) ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، فاز غالب زمینه در حالت آنیل شده γ است؛ زیرا دمای آنیل در محدوده دمای پایداری فاز γ است. مقدار فاز ϵ نیز نسبت به حالت ریختگی آن کاهش یافته است. با بررسی ساختارهای آنیل شده هر دو نمونه در این دما، با توجه به قرارگیری در محدوده دمای انحلال کاربرد و همچنین فاز σ ، نرخ انحلال این رسوبات با افزایش زمان آنیل، افزایش یافت. در زمان های ۱ و ۲ ساعت آنیل، این رسوبات توزیع مناسب‌تر و یکنواخت تری در زمینه پیدا کردند و غالب کاربیدهای مرزدانه‌ای مشاهده شده در حالت ریختگی از بین می‌روند. پیش‌بینی می‌شود عملیات آنیل انحلالی در دمای 1225°C درجه سانتی‌گراد در زمان ۱ ساعت با توجه به کسر حجمی رسوبات موجود در زمینه و توزیع مناسب آنها در زمینه، خواص مکانیکی را بهبود دهد. با انجام آنیل انحلالی در بالاترین دما یعنی دمای 1275°C درجه سانتی‌گراد، به نظر می‌رسد، انحلال رسوبات نسبت به دمای قبلی بیشتر صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شد، پس از گذشت زمان ۴ ساعت، افت قابل‌ملاحظه‌ای در کسر حجمی رسوب رخ می‌دهد. لذا انتظار نمی‌رود که بتوان خواص مکانیکی مناسبی در این شرایط کسب کرد. تصاویر ریزساختار نوری از نمونه‌های بدون کربن و حاوی کربن در شرایط آنیل شده در دمای 1275°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، انحلال کامل رسوبات در هر دو نمونه رخ داده است و تنها آخال-های اکسیدی باقی‌مانده‌اند.

نتایج آزمایش کشش سرد نمونه‌های آنیل انحلالی شده برای هر دو نمونه با و بدون کربن در شکل (۱۱) ارائه شده است. با توجه به شکل (۱۱) قسمت‌های الف و ب، در محصول (۱) مشاهده می‌شود که انجام عملیات حرارتی آنیل انحلالی تأثیر چندانی بر استحکام آن ایجاد نکرده است و هر دو مقادیر استحکام تسلیم و استحکام کششی نسبت به حالت ریختگی کاهش یافته‌اند. انحلال رسوبات فاز σ با ماهیت ترد با افزایش دمای آنیل بر کاهش استحکام بی‌تأثیر نیست. در شکل (۱۱-ج) انعطاف‌پذیری محصول (۱) با انجام آنیل انحلالی به دلیل کاهش کسر حجمی

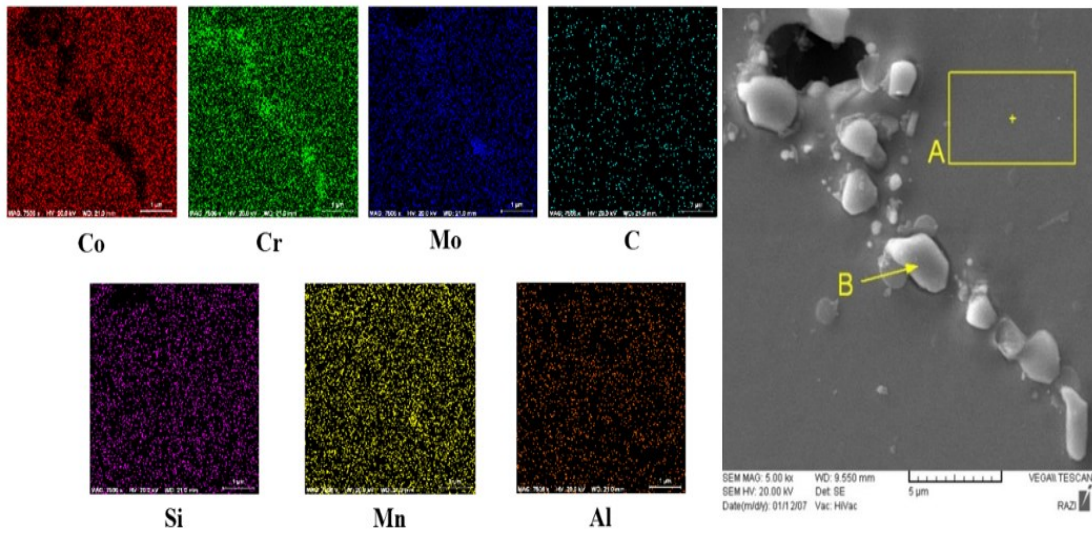


شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی رسوب ایجاد شده در محصول بدون کربن در حالت آنیل شده در دمای 1225°C به مدت ۱ ساعت به همراه نتایج آنالیز EDS.

با توجه به تصویر شکل (۷)، روند انحلال کاربرد و همچنین تغییر مورفولوژی کاربیدها از حالت اولیه و بلوکی شکل خود به ذرات کروی کاملاً مشخص است. با افزایش زمان در دمای 1225°C درجه سانتی‌گراد، تمایل به کاهش انرژی سطحی سبب تغییر مورفولوژی رسوبات کاربیدی می‌شود. لذا کاربیدها کوچک‌تر شده و توزیع همگن‌تری در ساختار پیدا می‌کنند. مقدار زیادی از کاربیدهای مرزدانه‌ای که سبب افت خواص می‌شوند در این دما از بین می‌روند. تصویر میکروسکوپ الکترونی از کاربرد ایجاد شده در نمونه حاوی کربن در شرایط آنیل شده به مدت ۱ ساعت در دمای 1225°C درجه سانتی‌گراد به همراه نتایج آنالیز EDS و نقشه توزیع عناصر موجود در ساختار در شکل (۸) نشان داده شده است.

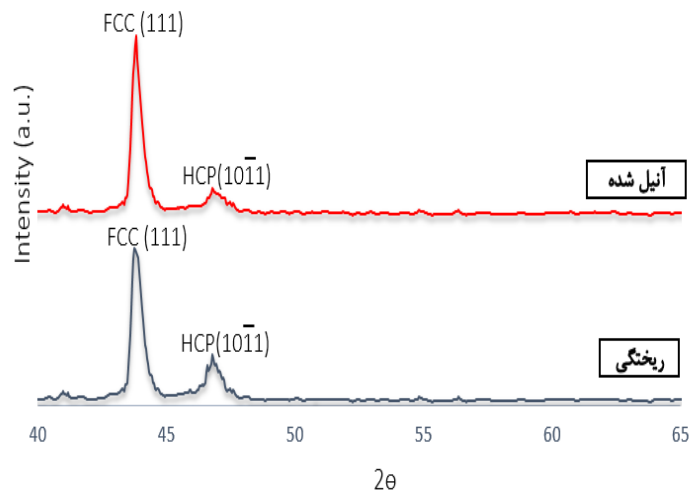


شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ نوری محصول حاوی کربن آنیل شده در دمای 1275°C در زمان‌های مختلف.

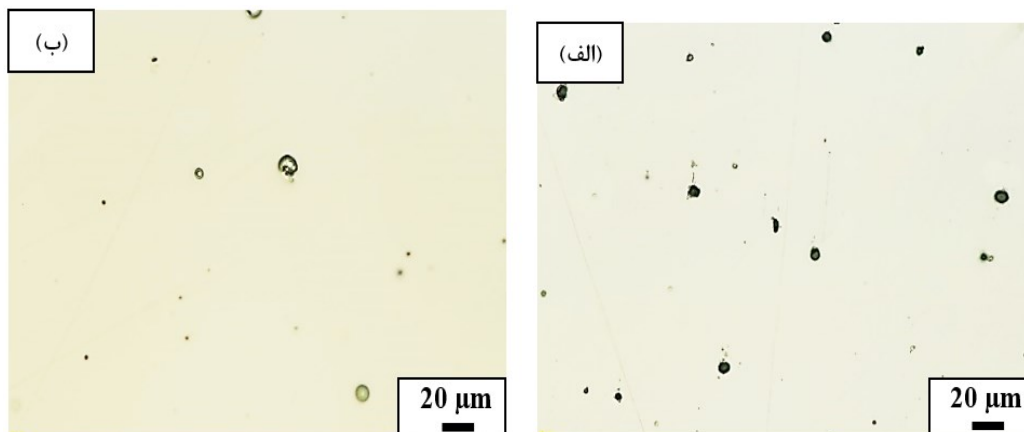


نقطه B					نقطه A				
مولیبیدن	کربالت	کروم	کربن	عناصر	مولیبیدن	کربالت	کروم	عناصر	
۷/۴۴	۱۲/۸۵	۶۹/۳۱	۱۰/۴۰	درصد اتمی	۴/۹۳	۶۰/۵۳	۳۴/۵۴	درصد اتمی	
۱۳/۷۲	۱۴/۵۶	۶۹/۳۲	۲/۴۰	درصد وزنی	۸/۱۱	۶۱/۱۲	۳۰/۷۷	درصد وزنی	

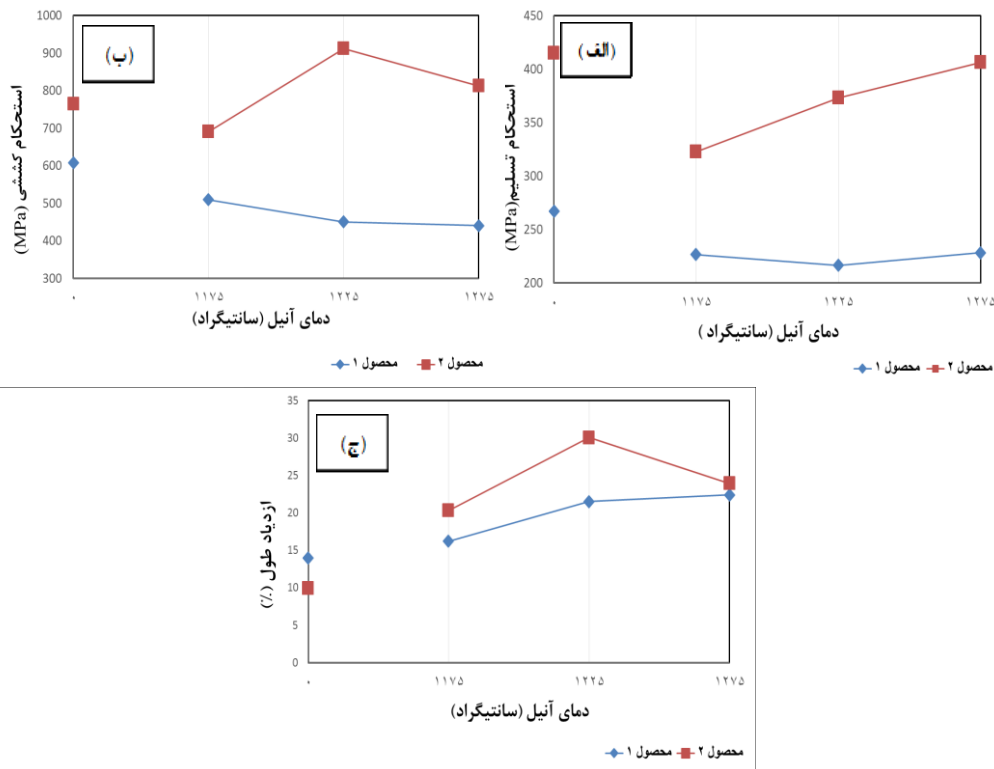
شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی رسوب ایجاد شده در آلیاژ حاوی کربن در حالت آنیل شده در دمای ۱۲۲۵°C به مدت ۱ ساعت به همراه نتایج آنالیز EDS.



شکل ۹- الگوی پراش اشعه X از نمونه حاوی کربن در شرایط ریخته‌گی و آنیل شده در دمای ۱۲۲۵°C به مدت ۱ ساعت.



شکل ۱۰- ریزساختار میکروسکوپ نوری در حالت آنیل شده در دمای ۱۲۲۵°C به مدت ۴ ساعت: (الف) محصول بدون کربن، (ب) محصول حاوی کربن



شکل ۱۱- تغییرات خواص کششی برحسب دمای آنیل برای محصولات (۱ و ۲): الف) استحکام تسلیم ب) استحکام کششی و ج) انعطاف‌پذیری (مقادیر نشان داده شده روی محور عمودی، مقادیر خواص مکانیکی در شرایط ریختگی برای هر نمونه است).

۱۲۲۵°C، احتمالاً افزایش کسر حجمی فاز ϵ با توجه به بالا رفتن دمای آنیل باشد؛ زیرا با افزایش دمای آنیل انحلالی، با توجه به انحلال بیشتر کاربیدها در فاز زمینه و یکنواخت‌تر شدن ترکیب زمینه، عناصر تثبیت‌کننده فاز ϵ در زمینه افزایش می‌یابد و مقدار فاز ϵ تشکیل شده پس از کوئنچ افزایش می‌یابد [۲۱]. با انجام آنیل انحلالی در دمای ۱۱۷۵°C، پیوستگی و اندازه رسوبها با افزایش زمان آنیل تا ۲ ساعت افزایش می‌یابد که همین امر سبب افت شدید درصد ازدیاد طول و کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود. در نمونه‌ی حاوی کربن رسوبات توزیع همگن‌تری در ساختار به‌خصوص در دمای آنیل ۱۲۲۵°C در زمان ۱ ساعت می‌یابند و غالب کاربیدهای موجود در مرزدانه که در حالت ریختگی مشاهده شد، از بین می‌روند. این تغییرات در نهایت منجر به بهبود خواص مکانیکی نمونه حاوی کربن از جمله افزایش استحکام کشش نهایی تا ۱۹٪ و انعطاف‌پذیری تا حدود دو برابر نسبت به حالت ریختگی شد.

نتیجه‌گیری

۱. ریزساختار آلیاژ ASTM F75 بدون کربن در حالت ریختگی شامل فاز زمینه ϵ و رسوبهای فاز σ است. در نمونه حاوی کربن علاوه بر فاز σ ، کاربید $M_{23}C_6$ نیز وجود دارد و فاز زمینه آن γ است. با اضافه شدن کربن به ترکیب شیمیایی آن، با تشکیل کاربیدهای $M_{23}C_6$ ، استحکام کشش نهایی از طریق

رسوبها به‌خصوص رسوبات σ نسبت به حالت ریختگی خود افزایش می‌یابد. در محصول (۲) با توجه به افزوده شدن عنصر کربن به ترکیب شیمیایی آن، تغییرات خواص کششی آن با توجه به نوع رسوب ایجاد شده در آن (کاربید $M_{23}C_6$) فراوان‌تر است. همان‌طور که در شکل (۱۱-الف و ب) نشان داده شده است، مقادیر استحکام تسلیم آلیاژ با افزایش دمای آنیل افزایش می‌یابد. مقدار استحکام کششی نیز در دمای ۱۱۷۵°C با توجه به افزایش کسر حجمی کاربیدها و به‌هم‌پیوستگی آنها در مرزدانه، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شد، سبب افت استحکام کششی در این دما نسبت به حالت ریختگی شده است. در دمای ۱۲۲۵°C همان‌طور که پیش‌تر پیش‌بینی شده بود با توجه به ایجاد کسر حجمی مناسب و توزیع همگن‌تر کاربیدها در ریزساختار آلیاژ، استحکام کششی در این دما به حداکثر مقدار خود رسیده است؛ اما در دمای ۱۲۷۵°C به علت انحلال کاربیدها و کاهش کسر حجمی آن‌ها مقدار استحکام کششی کاهش یافته است.

در شکل (۱۱-ج) با انجام آنیل انحلالی، به‌جز دمای ۱۱۷۵°C مقدار انعطاف‌پذیری آلیاژ نسبت به حالت ریختگی افزایش یافته است و در دمای ۱۲۲۵°C به حداکثر رسیده است؛ علت این افزایش در مقدار انعطاف‌پذیری مربوط به کاهش کسر حجمی کاربید نسبت به حالت ریختگی آن است؛ اما علت کاهش ایجاد شده در مقدار انعطاف‌پذیری در دمای ۱۲۷۵°C در نسبت به

- [5] Dobbs H.S., Robertson J.L.M., Heat treatment of cast Co-Cr-Mo for orthopedic implant use, *Journal of Materials Science*, 1983, 18, 391-401.
- [6] Mineta S., Namba S., Yoneda T., Ueda K., Narushima T., Precipitates in as-cast and heat-treated ASTM F75 Co-Cr-Mo-C alloys containing Si and Mn, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42, 1941-1949.
- [7] Mineta S., Namba S., Yoneda T., Ueda K., Narushima T., Changes in microstructure of biomedical Co-Cr-Mo-C alloys with solution treating and aging. In *Advanced Materials Research*, 2010, 89, 377-382.
- [8] Lee S.H., Nomura N., Chiba A., Significant improvement in mechanical properties of biomedical Co-Cr-Mo alloys with combination of N addition and Cr-enrichment, *Materials Transactions*, 2008, 49(2) 260-264.
- [9] Chauhan M., Microstructural characterization of cobalt chromium (ASTM F75) cubes produced by EBM technique (Master of Science Thesis), 2017.
- [10] Giacchi J.V., Fornaro O., Palacio H., Microstructural evolution during solution treatment of Co-Cr-Mo-C biocompatible alloys, *Materials Characterization*, 2012, 68, 49-57.
- [11] Mineta S., Namba S., Yoneda T., Ueda K., Narushima T., Heat treatment of ASTM F75 Co-Cr-Mo-C-Si-Mn alloys, *Materials Science Forum*, 2010, 654, 2180-2183.
- [12] Mori M., Yamanaka K., Kuramoto K., Ohmura K., Ashino T., et al., Effect of carbon on the microstructure, mechanical properties and metal ion release of Ni-free Co-Cr-Mo alloys containing nitrogen, *Materials Science and Engineering C*, 2015, 55, 145-154.
- [13] Lee S.H., Takahashi E., Nomura N., Chiba A., Effect of carbon addition on microstructure and mechanical properties of a wrought Co-Cr-Mo implant alloy, *Materials Transactions*, 2006, 47, 287-290.
- [14] ASTM F75-12, Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants (UNS R30075), West Conshohocken. PA: ASTM International, 2012.
- [15] Allen R.F., Standard test methods for determining average grain size (F112), *Annual Book of ASTM Standards, Metal-Mechanical Testing; Elevated and Low Temperature Tests; Metallography*, 1999.
- [16] ASTM E8/E8M. Standard test methods for tension testing of metallic material, ASTM International, 2010.
- [17] Lee S.H., Takahashi E., Nomura N., Chiba A., Effect of carbon addition on microstructure and mechanical properties of a wrought Co-Cr-Mo implant alloy, *Materials Transactions*, 2006, 47, 287-290.
- [18] Yamanaka K., Mori M., Chiba A., Effects of nitrogen addition on microstructure and mechanical behavior of biomedical Co-Cr-Mo alloys, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2014, 29, 417-426.
- [19] Erfanian Nazif Toosi H.R., The Effect of rapid solidification and heat treatment on microstructure and electrochemical properties of advanced biomaterial Co-Cr-Mo-C Alloy, Master of Science Thesis, 2019.
- [20] Herrera M., Espinoza A., Méndez J., Castro M., López J., et al., Effect of C content on the mechanical properties of solution treated as-cast ASTM F-75 alloys, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2005, 16, 607-611.
- [21] Zangeneh S., Erisir E., Abbasi M., Ramazani A., Evaluation of the aging effect on the microstructure of Co-28Cr-6Mo-0.3C alloy: experimental characterization and computational thermodynamics. *Metals*, 2019, 9, 581.

مکانیسم استحکام‌بخشی رسوبی افزایش می‌یابد و به مقدار $764/1 \text{ MPa}$ می‌رسد.

۲. در حالت ریختگی، مقادیر درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع در نمونه بدون کربن به ترتیب ۱۴ و $12/5$ درصد و در نمونه حاوی کربن به ترتیب برابر با $9/92$ و $9/6$ درصد شد که بالاتر از حد استاندارد است اما نسبت به نمونه بدون کربن، مقداری کاهش یافته است که علت آن افزایش کسر حجمی رسوب به‌ویژه در مرزهای دانه است که مکان‌های مناسبی برای رشد و اشاعه ترک هستند.

۳. در نمونه حاوی کربن با افزایش دمای آنیل از 1175 به 1225°C مورفولوژی کاربیدها تغییر یافت و توزیع آنها در ساختار همگن‌تر شد. همچنین مقدار زیادی از کاربیدهای مرزدانه‌ای حذف شدند که در نهایت منجر به بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری نمونه حاوی کربن شد. مقادیر مربوط به استحکام کشش نهایی و درصد ازدیاد طول در این نمونه به ترتیب برابر با $911/7 \text{ MPa}$ و $30/07$ درصد به دست آمد.

۴. در نمونه بدون کربن با توجه به نقش اساسی کاربیدها در استحکام‌بخشی آن از طریق مکانیسم استحکام‌بخشی رسوبی، عدم وجود کربن و به تبع آن عدم تشکیل کاربید در فاز زمینه این نمونه، افت خواص مکانیکی در شرایط مختلف ریختگی و آنیل انحلالی مشاهده شد.

۵. نمونه حاوی کربن در شرایط آنیل انحلالی در دمای 1225°C به مدت ۱ ساعت، دارای خواص مکانیکی بهینه نسبت به نمونه بدون کربن و نمونه‌های دیگر آنیل انحلالی شده در دماهای 1175 و 1275°C است.

مراجع

- [1] Park J. B., Jung K.H., Kim K.M., Son Y., Lee J.I., et al., Microstructure of as-cast Co-Cr-Mo alloy prepared by investment casting, *Journal of the Korean Physical Society*, 2018, 72, 947-951.
- [2] Bedolla-Gil Y., Juarez-Hernandez A., Perez-Unzueta A., Garcia-Sanchez E., Mercado-Solis R., Influence of heat treatments on mechanical properties of a biocompatibility alloy ASTM F75, *Revista Mexicana De Fisica*, 2009, 55, 1-5.
- [3] Gaytan S.M., Murr L.E., Martinez E., Martinez J.L., Machado B.I., et al., Comparison of microstructures and mechanical properties for solid and mesh cobalt-base alloy prototypes fabricated by electron beam melting, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2010, 41, 3216-3227.
- [4] Li Y., Yamashita Y., Tang N., Liu B., Kurosu S., et al., Influence of carbon and nitrogen addition on microstructure and hot deformation behavior of biomedical Co-Cr-Mo alloy, *Materials Chemistry and Physics*, 2012, 135, 849-854.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Evaluation of the Effect of Carbon and Solution Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of ASTM F75 Cast Co Based Alloy

Shahin Torkamani¹, Maryam Morakabati^{2*}, Masoumeh Seifollahi³, Adly Akhoundzadeh⁴

1. M.Sc. Student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
4. Researcher, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding author: m_morakabati@mut.ac.ir

Paper history:

Received: 16 July 2022
Accepted: 25 April 2023

Abstract:

The medical cast CoCrMo ASTM F75 alloy is used in orthopedic implants such as artificial toggle and knee. In this alloy, due to the existence of defects such as chemical inhomogeneities and large grain size, heat treatment is performed. In this research the effect of solution annealing heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of two ASTM F75 alloy (the free of carbon specimen and the specimen containing 0.21 wt% carbon) was investigated. The solution treatment done at 1175, 1225 and 1275°C for 0.5, 1, 2 and 4 hours. Subsequently the specimens quenched in water. The results show that in the specimen without carbon, the σ precipitates were formed. However, in the specimen containing carbon, the $M_{23}C_6$ carbides and σ were formed. Besides, by adding carbon the volume fraction of carbides increased and reached to 6.55 % leads to increase in strength. By increasing annealing temperature from 1175 to 1275°C and the time from 0.5 to 4 hours, the volume fraction and the size of carbides have been decreased. In the specimen containing carbon, by annealing at 1225°C for 1 hours the distribution of precipitates became homogenous in the microstructure. Besides, most of carbides at the grain boundaries in the cast condition were disappeared by heat treatment. Finally, in the specimen containing carbon in the heat-treated condition, the mechanical properties such as the ultimate tensile strength raised up to 19% and the ductility increased twice in comparison to the one in the cast condition.

Keywords:

Cobalt Chromium
Molybdenum alloy,
Solution annealing,
Microstructure,
Carbide,
Tensile properties

Please cite this article using:

Shahin Torkamani, Maryam Morakabati, Masoumeh Seifollahi, Adly Akhoundzadeh., Evaluation of the Effect of Carbon and Solution Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of ASTM F75 Cast Co Based Alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2022, 6(1) 35-44.

DOI: 10.22034/FRJ.2023.351831.1159

Journal homepage: www.foundingjournal.ir