

Evaluation of the Effect of Temperature, Time, and Cooling Rate Parameters of Solution Annealing on the Microstructure and Secondary Phases of Co-Cr-Mo Alloy

Mohammad Hasan Ashrafi¹, Ali Shafiei^{1*}, Mostafa Milani² and Mahdi Mirzaaghaei³

1- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Advanced Materials and Renewable Energies Department, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran

3- Faculty of Metallurgical and Materials Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

* Corresponding author, Email: shafyei@iut.ac.ir

ABSTRACT

Introduction and Objectives: Cobalt–chromium–molybdenum (Co–Cr–Mo) alloy, owing to its favorable mechanical properties and biocompatibility, is widely used in medical and aerospace industries. Solution annealing plays a crucial role in improving the microstructure and mechanical properties of this alloy. The aim of this study is to investigate the effect of temperature, holding time, and cooling rate during solution annealing on the microstructure and secondary phases of Co–Cr–Mo alloy.

Materials and Methods: Solution annealing was performed at 1125, 1175, and 1225 °C for 1 and 3 hours. After annealing, the samples were cooled in furnace, air, and water environments. The microstructure was examined using optical microscopy, field-emission scanning electron microscopy, and X-ray diffraction analysis. The volume fraction of secondary phases was determined by image analysis. In addition, tensile and microhardness tests were conducted to evaluate the mechanical properties.

Results: Increasing the annealing temperature and time enhanced the dissolution of secondary phases and led to a more homogeneous microstructure. Rapid cooling in water significantly reduced the volume fraction of secondary phases from 19.46±1.07% to 1.03±0.02%. In contrast, slow cooling in the furnace resulted in grain growth and re-precipitation of some phases. Mechanical tests revealed that the hardness of the samples reached its minimum value under water and air cooling conditions.

Conclusion: Solution annealing at 1225°C for 3 hours, followed by rapid cooling in water or air, had the most pronounced effect on dissolving secondary phases and improving microstructural homogeneity. This condition enhanced the mechanical properties of the Co–Cr–Mo alloy and can be considered as the optimal heat treatment parameters for improving the performance of this alloy.

Keywords: Co–Cr–Mo alloy, Solution annealing, Annealing temperature, Holding time, Secondary phases, Microstructure, Cooling rate.

How to Cite: Ashrafi MH, Shafiei A, Milani M, Mirzaaghaei M. Evaluation of the effect of temperature, time, and cooling rate parameters of solution annealing on the microstructure and secondary phases of Co-Cr-Mo alloy. *J Adv Mater Eng.* 2026;46(2):1–19. <https://doi.org/10.47176/jame.46.2.1155>

ارزیابی تأثیر پارامترهای دما، زمان و نرخ سرمایش عملیات آنیل انحلالی بر ریزساختار و فازهای ثانویه آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن

محمدحسن اشرفی^۱، علی شفیعی^{۱*}، مصطفی میلانی^۲ و مهدی میرزاآقایی^۳

۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- بخش مواد پیشرفته و انرژی‌های تجدیدپذیر، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: shafyei@iut.ac.ir

چکیده

مقدمه و اهداف: آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن به دلیل خواص مکانیکی مطلوب و زیست‌سازگاری، در صنایع پزشکی و هوافضا کاربرد گسترده‌ای دارد. آنیل انحلالی، نقش مهمی در بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی این آلیاژ ایفا می‌کند. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر دما، زمان و نرخ سرمایش آنیل انحلالی بر ریزساختار و فازهای ثانویه آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن می‌باشد.

مواد و روش‌ها: آنیل انحلالی در دماهای ۱۱۲۵، ۱۱۷۵ و ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های یک و سه ساعت انجام شد. پس از آنیل، نمونه‌ها تحت سردسازی در محیط‌های کوره، هوا و آب قرار گرفتند. ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی و آنالیز پراش پرتو ایکس مورد مطالعه قرار گرفت. کسر حجمی فازهای ثانویه با تحلیل تصاویر تعیین شد. همچنین برای ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون کشش و میکروسختی استفاده گردید.

یافته‌ها: با افزایش دما و زمان، میزان انحلال فازهای ثانویه افزایش یافته و ریزساختار یکنواخت‌تر شد. سرمایش سریع در آب موجب کاهش چشمگیر کسر حجمی فازهای ثانویه از $19/4 \pm 1/07$ درصد به $1/0 \pm 0/2$ درصد گردید. در مقابل، سرمایش کند در کوره سبب رشد دانه‌ها و تشکیل مجدد برخی فازها شد. نتایج مکانیکی نشان داد که سختی نمونه‌ها در شرایط سرمایش در آب و هوا به حداقل مقدار خود رسید.

نتیجه‌گیری: عملیات آنیل انحلالی در دمای ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت سه ساعت، همراه با سرمایش سریع در آب یا هوا، بیشترین اثر را در انحلال فازهای ثانویه و بهبود یکنواختی ریزساختار داشت. این شرایط موجب ارتقاء خواص مکانیکی آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن گردید و می‌تواند به‌عنوان شرایط بهینه برای بهبود عملکرد این آلیاژ معرفی شود.

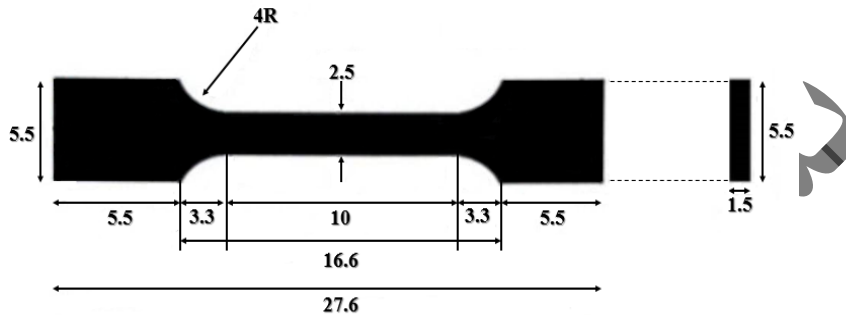
واژه‌های کلیدی: آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن، آنیل انحلالی، دمای آنیل، زمان نگهداری، فازهای ثانویه، ریزساختار، نرخ سرمایش.

در نتیجه خواص آلیاژ را در برخی کاربردها محدود سازد. افزون‌براین، فازهایی نظیر σ و M_6C نیز بسته به شرایط فرآیند تولید در ساختار مشاهده می‌شوند. حضور کروم می‌تواند از یک‌سو با افزایش پایداری فاز σ موجب بهبود برخی خواص مکانیکی شود، اما از سوی دیگر باعث افزایش تشکیل کاربیدهای $M_{23}C_6$ نیز گردد (۸ و ۹). یکی از فرآیندهای اصلی برای بهبود ریزساختار و خواص این آلیاژها، عملیات حرارتی آنیل انحلالی است که هدف آن حل کامل یا جزئی فازهای ثانویه نظیر کاربیدها، یکنواخت‌سازی ترکیب شیمیایی و کاهش تنش‌های باقیمانده است (۱۴). تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش دما یا زمان نگهداری در این فرآیند، باعث افزایش میزان انحلال فازهای ثانویه و بهبود یکنواختی ساختار می‌شود (۱۵). علاوه‌براین، نرخ سرمایش پس از انجام آنیل انحلالی تأثیر زیادی بر بازسازی فازها، اندازه دانه‌ها و توزیع فازهای ثانویه دارد. سرمایش سریع (به‌عنوان مثال در آب یا هوا) می‌تواند ساختار حل‌شده را سریعاً ثابت کرده و از تشکیل فازهای ناخواسته جلوگیری کند، درحالی‌که سرمایش کند (مانند کوره) به فازها اجازه می‌دهد تا رشد کرده و ته‌نشین شوند. با توجه به مطالعات گذشته، سرمایش سریع همراه با آنیل انحلالی می‌تواند باعث دستیابی به ریزساختار یکنواخت‌تر و توزیع مناسب‌تری از فازهای ثانویه شود (۱۶). با وجود این چالش‌ها، آلیاژهای Co-Cr-Mo به دلیل مقاومت بالای آن‌ها در برابر سایش و خوردگی، همچنان گزینه‌ای مطلوب برای صنایع هوافضا (مانند تولید پره‌های موتور و نازل‌های سوخت) و نیز مهندسی پزشکی (مانند ساخت کاشتنی‌های جراحی و مفاصل مصنوعی زانو و لگن) محسوب می‌شوند (۱۷-۱۹). در تحقیقات پیشین، تأثیرات این پارامترها به‌طور جداگانه بررسی شده است و هیچ مطالعه جامع و منظم که تأثیر هم‌زمان این متغیرها را بر ساختار کاربیدها و فازهای ثانویه تحلیل کند، وجود ندارد. نوآوری اصلی این پژوهش بررسی تأثیر هم‌زمان دما، زمان و نرخ سرمایش بر ریزساختار آلیاژ Co-Cr-Mo و تغییرات ساختاری فازهای ثانویه، به‌ویژه تبدیل فازهای ترد به فازهای کروی‌شکل و تأثیرات آن بر خواص مکانیکی، مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد فلزی مورد استفاده در کاربردهای زیست‌پزشکی به دلیل افزایش مداوم تعداد کاشتنی‌های مانند ارتوپدی، قلبی-عروقی، دندان‌پزشکی و چشمی، اهمیت روزافزونی پیدا کرده‌اند. در این میان، آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن (Co-Cr-Mo) در کنار آلیاژهای تیتانیوم و فولاد زنگ‌نزن، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مواد در کاربردهای ارتوپدی، به‌ویژه در تعویض کامل مفصل ران، شناخته می‌شود (۱ و ۲). آلیاژهای پایه Co-Cr-Mo به دلیل ترکیب منحصربه‌فردی از استحکام مکانیکی بالا، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی، به‌طور گسترده در حوزه‌های پزشکی و زیست‌پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳-۵). این آلیاژها معمولاً دارای دو نوع ساختار بلوری هگزاگونال فشرده^۱ و مکعبی با وجوه مرکزدار^۲ می‌باشند. در دمای اتاق، فاز HCP از نظر ترمودینامیکی پایدار است؛ اما تبدیل فاز از FCC به HCP در شرایط سرد شدن طبیعی بسیار کند بوده و در نتیجه ساختار FCC که در دماهای بالا پایدار است، غالباً در آلیاژ باقی می‌ماند (۶ و ۷). آلیاژهای کبالت-کروم-مولیبدن (ASTM F75) معمولاً با روش ریخته‌گری دقیق^۳ ساخته می‌شوند که می‌تواند باعث بروز عیوبی نظیر تخلخل، رشد دانه‌ها، تشکیل رسوبات سخت، کاهش شکل‌پذیری و افت مقاومت به خستگی شود. این مشکلات به‌ویژه ناشی از ریزساختار ریخته‌گری هستند که تحت تأثیر پارامترهایی مانند دمای مذاب و سرعت سرد شدن قرار می‌گیرند (۸-۱۲). ساختار فازی و ریزساختار آلیاژهای Co-Cr-Mo به‌طور مستقیم بر ویژگی‌های مکانیکی، دوام و زیست‌سازگاری آن‌ها تأثیرگذار است (۱۳). در شرایط ریخته‌گری، ریزساختار آلیاژ ASTM F75 عمدتاً شامل ساختاری دندریتی با شبکه بلوری از نوع FCC و فاز γ است. در این ساختار، کاربیدهای ثانویه $M_{23}C_6$ با اشکال بلوکی یا لایه‌ای عمدتاً در مرز دانه‌ها تجمع می‌یابند. کاربیدهای $M_{23}C_6$ که در مرز دانه‌ها و نواحی بین‌دندریتی رسوب می‌کنند، از اصلی‌ترین عوامل استحکام‌بخشی به این آلیاژ محسوب می‌شوند. با این حال، تمرکز آن‌ها در مرز دانه‌ها می‌تواند به‌عنوان مناطق مستعد برای آغاز ترک‌های خستگی عمل کرده و

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ Co-Cr-Mo اندازه‌گیری شده توسط دستگاه طیف‌سنج جرقه‌ای (۱۸)

Co	Cr	Mo	Mn	Si	Fe	C	Ni	(wt.%) ترکیب شیمیایی
بقیه	۲۹/۸۳	۵/۴۴	۰/۵۳	۰/۳۵	۰/۲۴	۰/۱۷	۰/۱۳	اندازه‌گیری شده (SES)
بقیه	۲۷-۳۰	۵-۷	≤۱	≤۱	≤۰/۷۵	≤۰/۳۵	≤۰/۵	استاندارد



شکل ۱- ابعاد نمونه آزمون کشش برحسب میلی‌متر.

تهیه گردید. ابعاد نمونه‌های آزمون کشش در شکل (۱) نمایش داده شده است. دماهای ۱۱۲۵، ۱۱۷۵، ۱۲۲۵°C به‌عنوان دماهای عملیات آنیل انحلالی، زمان‌های یک و سه ساعت به‌عنوان زمان نگهداری و محیط‌های کوره، هوا و آب به‌عنوان محیط‌های سردشوندگی انتخاب شدند. این شرایط براساس بهینه‌سازی گزارش شده در پژوهش‌های پیشین تعیین گردید (۲۴-۲۰). عملیات آنیل انحلالی، در کوره بدون اتمسفر کنترل‌کننده با نرخ گرمایش تقریبی ۱۰°C/min انجام گرفته است. در این مطالعه، چرخه‌های مختلف عملیات حرارتی به‌صورت کدهای Txxxx-Hy-ZC مشخص شده‌اند، به‌طوری‌که T نشان‌دهنده دما (درجه سانتی‌گراد)، H زمان نگهداری (ساعت) و C نوع محیط سردکننده (F: کوره A: هوا W: آب) می‌باشد. به‌طور مثال، T1125-H1-FC بیانگر انجام عملیات آنیل انحلالی در دمای ۱۱۲۵°C زمان نگهداری یک ساعت و در محیط سردکننده کوره است. به‌منظور شفاف‌سازی بهتر، شماتیکی از چرخه‌های حرارتی اعمال شده روی نمونه‌ها در شکل (۲) ارائه شده است.

۲-۳- روش‌های مشخصه‌یابی و آزمون‌ها

نمونه‌های آلیاژ Co-Cr-Mo (در حالت ریختگی و عملیات

این تحقیق با ارائه رویکردی جامع و سازمان‌یافته، خلاهای موجود در بهینه‌سازی شرایط عملیات حرارتی این آلیاژها را پر کرده و به‌طور مستقیم به بهبود فرآیندهای صنعتی در تولید قطعات با خواص مکانیکی بهینه، به‌ویژه در کاربردهایی همچون پروتزهای زانو، کمک خواهد کرد.

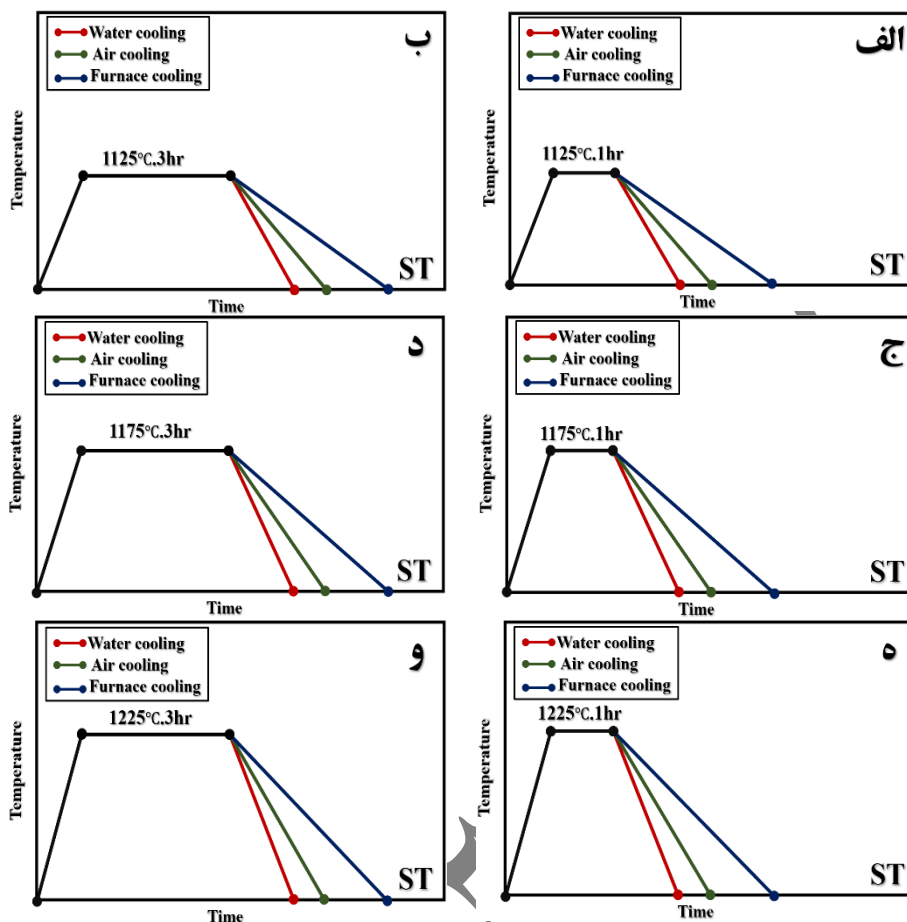
۲-۲- مواد و روش تحقیق

۱-۲- ترکیب شیمیایی و مواد اولیه

آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش، آلیاژ Co-Cr-Mo (مطابق استاندارد ASTM F75) است که به روش ریخته‌گری دقیق تهیه شده است. ترکیب شیمیایی استاندارد این آلیاژ و ترکیب شیمیایی حاصل از انجام آزمون طیف‌سنج جرقه‌ای^۴ با دستگاه OXFORD مدل Spectro 4 در جدول (۱) نمایش داده شده است.

۲-۲- عملیات حرارتی

به‌منظور انجام عملیات حرارتی روی آلیاژ Co-Cr-Mo، نمونه‌هایی با ابعاد ۱۰×۱۰×۵ mm^۳ با استفاده از دستگاه برش سیمی از نمونه اولیه جدا شدند. همچنین براساس استاندارد آزمون کشش (ASTM E8/E8M)، نمونه‌های استخوانی شکل



شکل ۲- طرحواره‌ای از نمودار دما-زمان چرخه‌های حرارتی: الف) دمای ۱۱۲۵°C و زمان ۱ ساعت، ب) دمای ۱۱۲۵°C و زمان ۳ ساعت، ج) دمای ۱۱۷۵°C و زمان ۱ ساعت، د) دمای ۱۱۷۵°C و زمان ۳ ساعت، ه) دمای ۱۲۲۵°C و زمان ۱ ساعت، و) دمای ۱۲۲۵°C و زمان ۳ ساعت. (ST): عملیات حرارتی آنیل انحلالی.

شد. محاسبات بر اساس روش سیج و کیلو (۲۵) و مطابق با استاندارد ASTM E975، با استفاده از شدت نسبی پیک‌های تصحیح‌شده هر فاز انجام گرفت. کسر حجمی هر فاز با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$P_{ct\ hcp} = \left\{ \frac{I_{(10\bar{1}1)hcp}}{I_{(10\bar{1}1)hcp} + 1.5I_{(200)fcc}} \right\} \times 100 \quad (1)$$

$$P_{ct\ fcc} = 1 - P_{ct\ hcp} \quad (2)$$

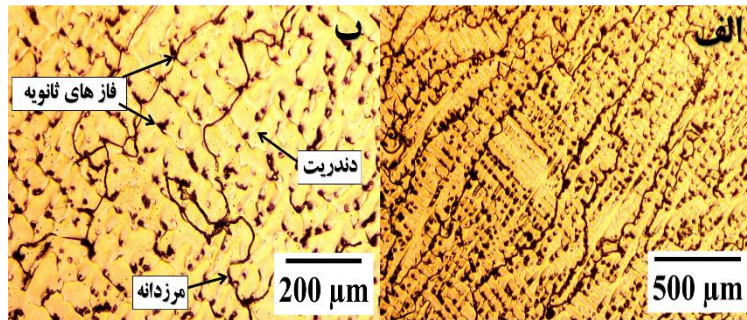
در رابطه (۱) و (۲)، p_{ct} کسر حجمی فاز ϵ و γ و $I_{(hcp)}$ شدت پیک صفحه (10 $\bar{1}1$) و $I_{(fcc)}$ شدت پیک صفحه (۲۰۰) می‌باشد.

ضریب ۱/۵ همان ضریب مرجع برای فاز (FCC) γ است.

جهت بررسی دقیق‌تر ریزساختار، از میکروسکوپ الکترونی

حرارتی‌شده)، ابتدا با سنباده اولیه شماره ۸۰ آماده‌سازی و به‌منظور انتقال جریان، سیم‌کشی شدند. عملیات متالوگرافی با سنباده‌های کاربید سیلیسیم در محدوده زبری ۱۸۰ تا ۲۴۰۰ و سپس پولیش با سوسپانسیون آلومینا با اندازه ذرات ۰/۳ میکرومتر انجام گرفت. حکاکی الکترولیتی با محلول متانول (CH₃OH)/اسید سولفوریک (H₂SO₄) تحت ولتاژ ۶ ولت و به مدت ۶۰ تا ۲۴۰ ثانیه انجام گرفت. تصاویر میکروسکوپی توسط میکروسکوپ نوری^۵ Nikon Epiphot 300 با بزرگنمایی ۵۰ تا ۱۰۰۰ برابر تهیه و به وسیله نرم‌افزار ImageJ تحلیل شدند.

برای تعیین کسر حجمی فازهای ثانویه، علاوه بر تحلیل تصاویر میکروسکوپی، از الگوی پراش پرتو ایکس نیز استفاده



شکل ۳- ریزساختار آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن ریختگی در بزرگنمایی‌های متفاوت:
الف) بزرگنمایی ۵۰۰ میکرومتر ب) بزرگنمایی ۲۰۰ میکرومتر.

همزمان و در دمای ثابت شروع به کریستالیزه شدن می‌کنند (۱۲).
نمایی از ریزساختار آلیاژ ریخته‌گری شده در شکل (۳) ارائه شده است. به منظور تعیین کسر حجمی فازهای ثانویه^{۱۲} در آلیاژ ریخته‌گری شده Co-Cr-Mo، تعداد ۲۰ تصویر میکروسکوپی با بزرگنمایی ثابت تهیه و با نرم‌افزار ImageJ تحلیل شده‌اند. نتایج نشان داد که پیش از عملیات آنیل انحلالی، کسر حجمی فازهای ثانویه برابر با $19/46 \pm 1/07$ درصد است. این مقدار با داده‌های گزارش شده توسط سالار و همکاران (۱۹ درصد تا ۲۱ درصد) تطابق دارد (۲۶).

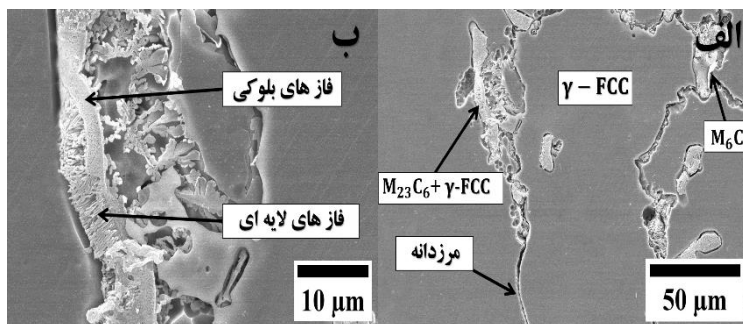
تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی آلیاژ ریخته‌گری شده، در شکل (۴) ارائه شده است. در این تصاویر، رسوبات ثانویه غنی از کروم و مولیبدن به وضوح مشاهده می‌شوند. ریزساختار آلیاژ عمدتاً از یک زمینه FCC غنی از کبالت تشکیل شده است که در آن رسوبات مختلفی در نواحی بین‌دندریتی و مرزدانه‌ها پراکنده‌اند. این رسوبات شامل کاربیدهای $M_{23}C_6$ و M_6C و فاز بین‌فلزی σ و ساختارهای یوتکتیکی لایه‌ای متشکل از کاربید $M_{23}C_6$ و فاز FCC- γ هستند. شکل‌گیری ساختارهای مرواریدی شکل در این آلیاژ به نرخ سرمایش پایین حین انجماد نسبت داده می‌شود (۲۷). اگرچه رسوب فازها یکی از سازوکار اصلی تقویت در آلیاژ ریختگی محسوب می‌شود، تجمع آن‌ها می‌تواند منجر به افت خواص مکانیکی گردد. نوع، اندازه و کسر حجمی این فازها به شرایط انجماد و ترکیب شیمیایی آلیاژ وابسته بوده و حضور عناصر

روبشی نشر میدانی^۶، مدل QUANTA FEG 450 مجهز به آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۷ و همچنین به منظور آنالیز فازی از آزمون پراش پرتو ایکس^۸ با دستگاه Philips X-Pert استفاده شد. آزمون کشش با نرخ ۱ mm/min و سه مرتبه تکرار، و آزمون سختی‌سنجی با دستگاه Koopa KM3/03 با حداقل پنج تکرار تصادفی روی سطح نمونه‌ها انجام گرفت.

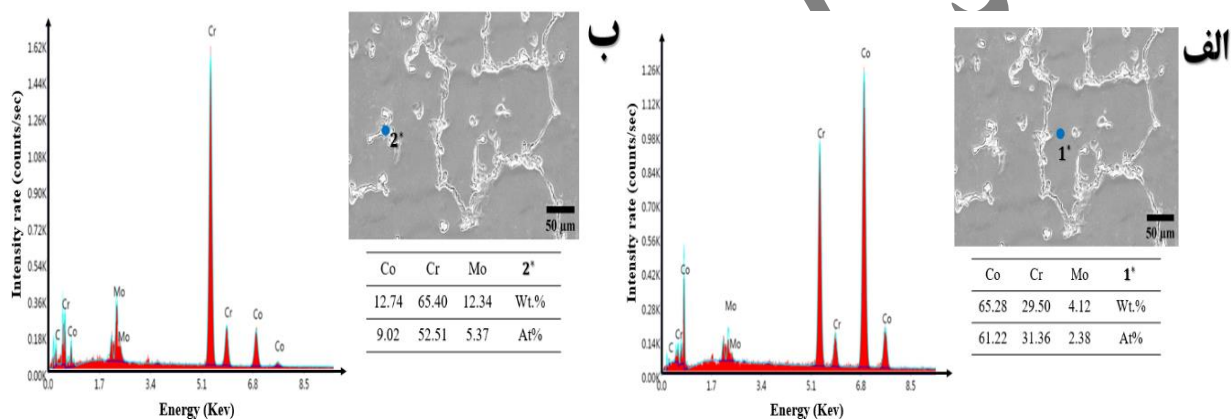
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی ساختار آلیاژ ریختگی

آلیاژ Co-Cr-Mo به دلیل استحکام بالا و مقاومت مناسب در برابر خوردگی، در حوزه‌های پزشکی و مهندسی کاربرد گسترده‌ای دارد. با این حال، شکل ریخته‌گری شده آن معمولاً دارای ساختار ناهمگن و عیوبی نظیر تخلخل، حفرات انقباضی و جدایش عناصر است که می‌تواند خواص مکانیکی و عملکرد نهایی آلیاژ را کاهش دهد (۱۱ و ۱۲). ریزساختار این آلیاژ در حالت ریخته‌گری عمدتاً از دانه‌های درشت با دندریتهای ستونی^۹ تشکیل شده است. در نواحی بین‌دندریتی و مرزدانه‌ای، رسوبات ثانویه غنی از کبالت و کروم به صورت فازهای بلوکی^{۱۰} و یوتکتیکی^{۱۱} مشاهده می‌شوند. فازهای یوتکتیکی با ساختار لایه‌ای عمدتاً در مرزدانه‌ها و نواحی دارای نواقص ساختاری شکل می‌گیرند، درحالی‌که فازهای بلوکی در مرز بین زمینه و فاز یوتکتیکی و نیز درون دندریتهای توزیع می‌شوند. هنگامی که آلیاژ به دمای یوتکتیک می‌رسد، با کاهش دما، دو فاز مختلف به‌طور



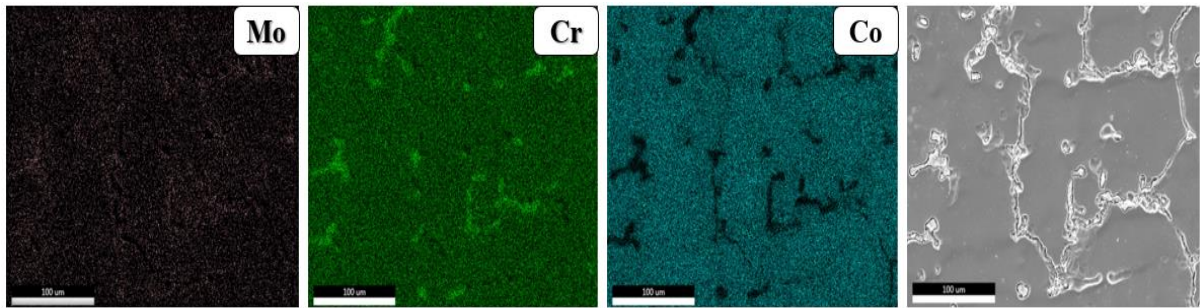
شکل ۴- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی از آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن ریختگی در بزرگنمایی های متفاوت: الف) بزرگنمایی ۵۰ میکرومتر ب) بزرگنمایی ۱۰ میکرومتر.



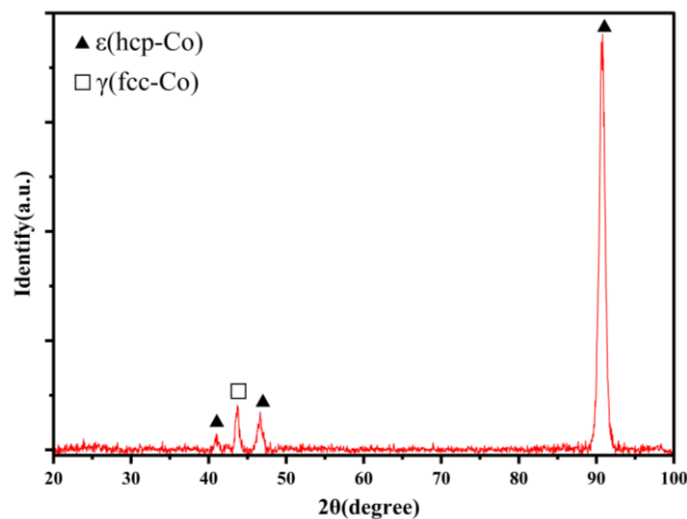
شکل ۵- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی و طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس از نمونه آلیاژ ریختگی کبالت-کروم-مولیبدن (الف و ب).

آلیاژ به شدت تحت تأثیر جدایش عنصری حین انجماد بوده و توزیع فازها تابع دینامیک انجماد و ترکیب شیمیایی اولیه است. برای بررسی نحوه توزیع عناصر آلیاژی در نمونه ریخته‌گری اولیه، از آنالیز توزیع عنصری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی و طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس استفاده شد. نتایج این آنالیز در شکل (۶)، نشان‌دهنده توزیع و تراکم عناصر در آلیاژ است. زمینه آلیاژ عمدتاً غنی از کبالت بوده، درحالی‌که در مرز دانه‌ها غلظت بالاتری از کروم و مولیبدن مشاهده می‌شود. تصاویر میکروسکوپی نشان‌دهنده تفاوت در ترکیب شیمیایی نواحی روشن و تیره است؛ به طوری‌که کبالت به‌طور یکنواخت در زمینه توزیع شده و نواحی روشن غلظت کمتری از آن دارند. در مقابل، کروم در همین نواحی با غلظت بالاتری تجمع می‌کند، که به‌طور عمده در فازهای ثانویه یافت

آلیاژی به‌همراه میزان کربن، نقش تعیین‌کننده‌ای در ترکیب و ریزساختار این رسوبات ایفا می‌کند (۲۸). ساختار میکروسکوپی آلیاژ ریخته‌گری شده با استفاده از آنالیز طیفسنجی پراکندگی انرژی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵). نتایج نشان داد که زمینه دندریتی عمدتاً غنی از کبالت است، درحالی‌که رسوبات ثانویه مقادیر بالایی از کروم و مولیبدن دارند. این رفتار به فرایند انجماد دندریتی نسبت داده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که با پیشروی جبهه انجماد، دندریت‌های غنی از کبالت شکل‌گرفته و عناصر آلیاژی به نواحی مذاب رانده می‌شوند. سپس، نواحی بین‌دندریتی با غلظت بالای کروم و مولیبدن منجمد شده و بخش عمده‌ای از این عناصر به‌صورت فازهای ثانویه کاربیدی رسوب می‌کنند. بخش باقیمانده نیز به شکل رسوبات غنی از عناصر آلیاژی ظاهر می‌شود؛ بنابراین، ریزساختار نهایی



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشی میدانی و آنالیز نقطه‌ای از ریزساختار آلیاژ ریخته‌گری کبالت-کروم-مولیبدن.



شکل ۷- الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژ ریخته‌گری کبالت-کروم-مولیبدن.

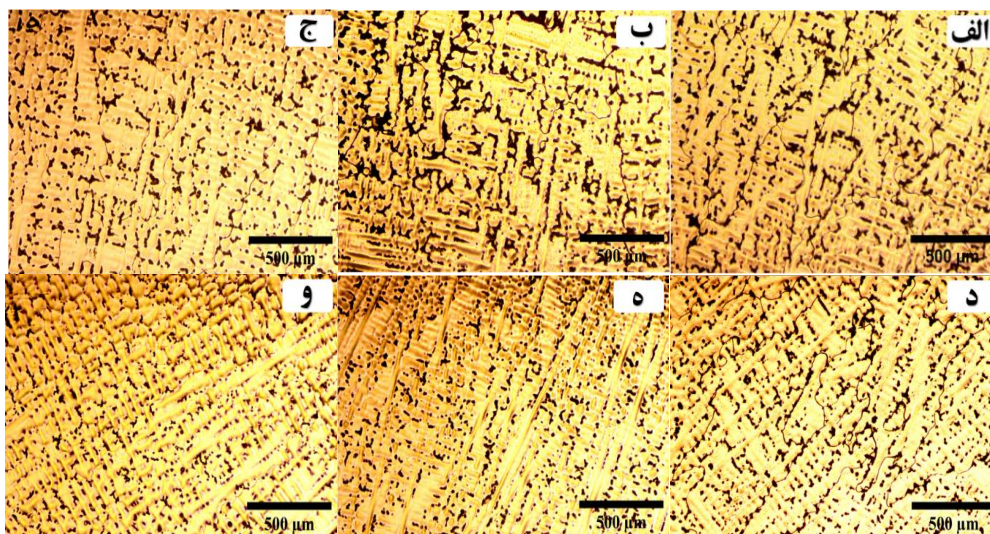
از کروم و مولیبدن) در آلیاژ وجود دارند، اما به دلیل مقدار کم، پیک مشخصه‌ای از آن‌ها در الگوی پراش مشاهده نشد.

۲-۳- ارزیابی ریزساختارهای عملیات حرارتی شده

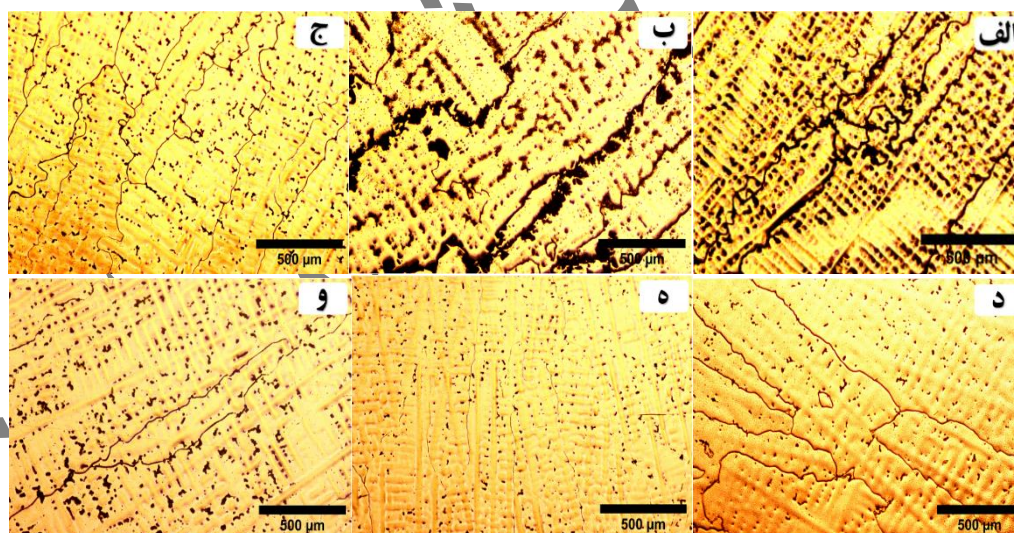
نمونه‌های آلیاژ Co-Cr-Mo تحت عملیات آنیل انحلالی مطابق چرخه‌های حرارتی نشان‌داده شده در شکل (۲) قرار گرفتند. ریزساختار اولیه، شامل ترکیب شیمیایی، کسر حجمی فازها، اندازه و جهت‌گیری دانه‌ها و رسوبات، تأثیر زیادی بر نحوه پاسخ آلیاژ به عملیات حرارتی داشت. تغییرات ریزساختاری، به‌ویژه در اندازه دانه‌ها و توزیع رسوبات، به شرایط دقیق عملیات آنیل انحلالی بستگی داشت. در دمای 1125°C (شکل ۸)، تصاویر میکروسکوپی نوری رشد ستونی دانه‌ها و عدم وقوع تبلور مجدد را نشان می‌دهند که این رفتار به شرایط اولیه ریخته‌گری مرتبط است. نمونه‌های

می‌شود. مولیبدن نیز توزیع غیریکنواختی دارد و در برخی نواحی افزایش غلظت را نشان می‌دهد که احتمالاً مربوط به فازهای غنی از مولیبدن (M_6C) است.

برای شناسایی فازهای موجود در ساختار آلیاژ Co-Cr-Mo در حالت ریخته‌گری، آزمون پراش پرتو ایکس انجام شد. تحلیل الگوی پراش (شکل ۷)، نشان داد که فاز افسیلون (ϵ) غالب‌ترین فاز در ساختار آلیاژ ریخته‌گری شده است. فاز ϵ که ساختار بلوری هگزاگونال فشرده دارد، بر اثر تبدیل مارتنزیتی فاز γ طی سرمایش کند یا انجماد خاص شکل می‌گیرد. حضور غالب این فاز می‌تواند سختی آلیاژ را افزایش دهد، اما احتمالاً چقرمگی آن را کاهش می‌دهد. فاز γ (FCC) نیز در ساختار حضور دارد، هرچند با شدت نسبی پیک‌های کمتر که نشان‌دهنده وجود بخشی از ساختار آستنیتی پایدار است. همچنین، کاربیدهای $M_{23}C_6$ و M_6C (غنی



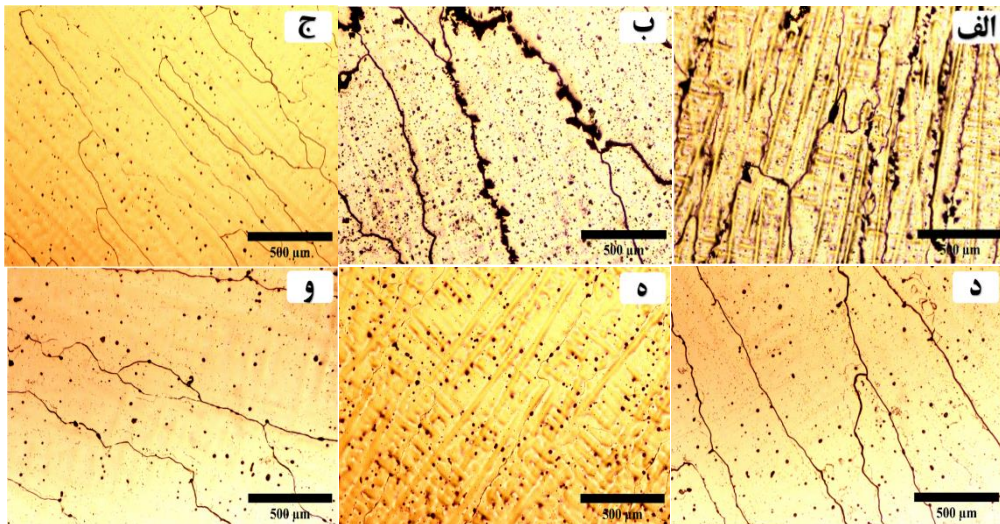
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی نوری از نمونه‌های عملیات آنیل انحلالی شده در دمای 1125°C و زمان ۱ و ۳ ساعت در محیط‌های سردشوندگی کوره، هوا و آب: الف) T1125-H1-FC، ب) T1125-H3-FC، ج) T1125-H1-AC، د) T1125-H3-AC، ه) T1125-H1-WC، و) T1125-H3-WC.



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپی نوری از نمونه‌های عملیات آنیل انحلالی شده در دمای 1175°C و زمان ۱ و ۳ ساعت در محیط‌های سردشوندگی کوره، هوا و آب: الف) T1175-H1-FC، ب) T1175-H3-FC، ج) T1175-H1-AC، د) T1175-H3-AC، ه) T1175-H1-WC، و) T1175-H3-WC.

باعث رشد رسوبات شد ولی تاثیر چندانی بر اندازه دانه نداشت. در دمای 1175°C (شکل ۹)، رشد دانه‌ها به‌طور محسوسی بیشتر از دمای 1125°C مشاهده شد. نمونه‌هایی که در کوره سرد شدند، فازهای ثانویه‌ای درشت‌تر و توزیع ناهمگن‌تری را نشان دادند، درحالی‌که سردکردن در آب منجر به تشکیل رسوبات

سردشده در کوره دارای رسوبات با ابعاد بزرگ‌تر و توزیع ناهمگن در مرز دانه‌ها بودند که احتمالاً ناشی از نفوذ بیشتر عناصر آلیاژی در جریان سرمایش آهسته است. در مقابل، سرمایش در هوا و آب منجر به تشکیل رسوبات ریزتر و توزیع یکنواخت‌تری گردید. همچنین، افزایش زمان نگهداری از یک به سه ساعت



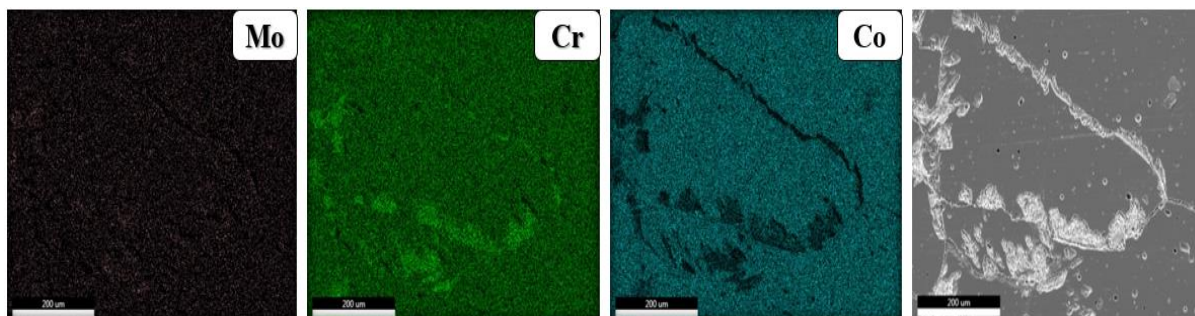
شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی نوری از نمونه‌های عملیات آنیل انحلالی شده در دمای 1225°C و زمان ۱ و ۳ ساعت در محیط‌های سردشوندگی کوره، هوا و آب: الف) T1225-H1-FC، ب) T1225-H3-FC، ج) T1225-H1-AC، د) T1225-H3-AC، ه) T1225-H1-WC، و) T1225-H3-WC.

سردشدن، بیشتر بر اندازه و توزیع فازهای ثانویه تأثیر گذاشته است و تأثیر کمتری بر شکل دانه‌ها مشاهده گردیده است. در نمونه‌های سردشده در کوره، به دلیل سرمایش تدریجی، اندازه کاربیدهای ثانویه M_{23}C_6 افزایش یافته و در مرز دانه‌ها تجمع یافته‌اند. در مقابل، در نمونه‌های سردشده در آب، به دلیل سرمایش سریع‌تر، فازهای ثانویه به‌طور کامل‌تری حل شده و ساختاری یکنواخت‌تر ایجاد شده است. همچنین، افزایش زمان نگهداری از یک ساعت به سه، ساعت منجر به رشد دانه‌ها و کاهش تعداد مرزهای دانه‌ای فعال گردیده است؛ باین‌حال، ساختار ریختگی اولیه و دانه‌های ستونی همچنان حفظ شده‌اند. علاوه‌براین، تعدادی ذرات کرووی شده ریز، از نوع کاربید M_{23}C_6 ، در زمینه آلیاژ باقی ماندند. این کاربیدها حاصل شکست و کرووی شدن کاربیدهای لایه‌ای شبه‌پرلیتی یوتکتیک بودند (۱۲).

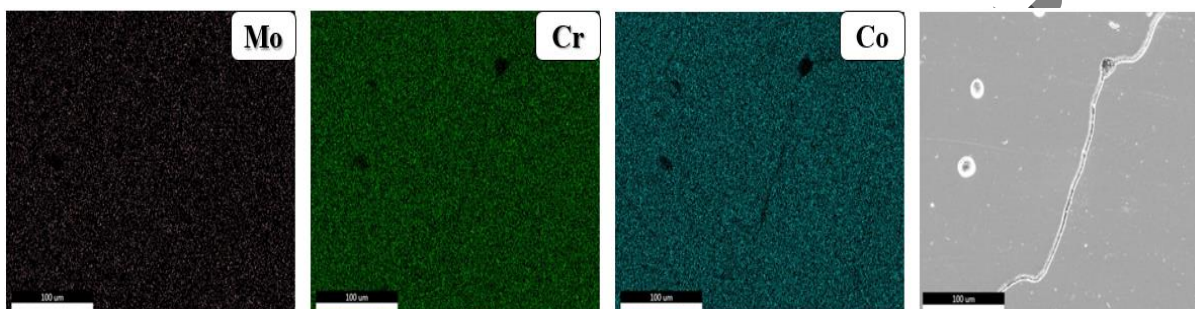
پس از انجام چرخه‌های مختلف عملیات آنیل انحلالی، آنالیز نقشه توزیع عنصری تنها روی نمونه‌هایی که در دمای 1225°C و زمان نگهداری سه ساعت تحت عملیات آنیل انحلالی قرار گرفته‌اند، انجام شد. این انتخاب به‌منظور تمرکز بر اثرات شرایط بحرانی حرارتی و تسهیل تحلیل مقایسه‌ای ریزساختار بود. شکل (۱۱)، نمونه سردشده در محیط کوره را نشان می‌دهد. سرمایش

ریزتر و یکنواخت‌تر گردید. نمونه‌های سردشده در هوا نیز رفتاری بینابین دو حالت یادشده از خود نشان دادند. علاوه‌براین، افزایش زمان نگهداری از یک به سه ساعت موجب رشد بیشتر دانه‌ها و رسوبات در تمامی محیط‌های سرمایش شد.

شکل (۱۰)، ریزساختار نمونه‌های آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن را پس از عملیات آنیل انحلالی در دمای 1225°C و زمان‌های نگهداری ۱ و ۳ ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، ساختار آلیاژ همچنان ماهیت ستونی خود را حفظ کرده و هیچ نشانه‌ای از تشکیل دانه‌های هم‌محور و تبلور مجدد کامل دیده نمی‌شود. دانه‌ها به‌صورت کشیده و دارای مرزهای مشخص در سرتاسر نمونه‌ها قابل رؤیت هستند این موضوع نشان می‌دهد که با وجود افزایش دما تا 1225°C ، انرژی حرارتی و زمان نگهداری برای آغاز و تکمیل تبلور مجدد کافی نبوده است. به دلیل عدم وجود کرنش ذخیره‌شده در نمونه‌های ریختگی و پایداری حرارتی بالای آلیاژ پایه کبالت، مرزهای دانه‌ای فقط تا حدی تحرک یافته و فرآیند اصلی به‌بازیبی و انحلال جزئی کاربیدهای در مرز دانه‌ها محدود شده است. در نتیجه، دانه‌های ستونی اولیه حفظ شده و ساختار آلیاژ از نظر مورفولوژی تغییر چشمگیری نشان نداده است. تفاوت در نرخ



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی و آنالیز نقطه‌ای از ریزساختار نمونه T1225-H3-FC.



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی و آنالیز نقطه‌ای از ریزساختار نمونه T1225-H3-AC.

نشان‌دهنده تأثیر سرمایش سریع در هوا است که منجر به کاهش تشکیل فازهای کاربیدی و افزایش همگنی ترکیب شیمیایی آلیاژ نسبت به سرمایش آهسته در کوره می‌شود.

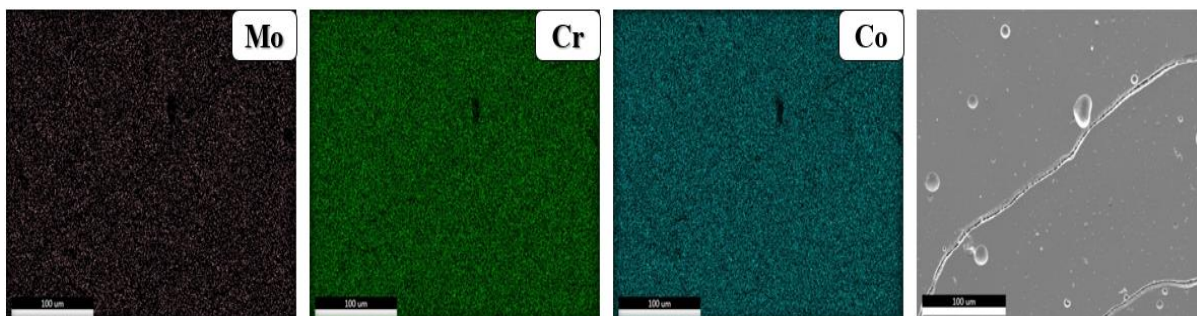
در شکل (۱۳)، نتایج آنالیز عنصری نمونه سردشده در محیط آب نشان داده شده است. مشابه نمونه‌های سردشده در هوا، در نمونه سردشده در آب نیز به دلیل سرعت بالای فرآیند سرمایش، فرصت کافی برای تشکیل فازهای کاربیدی عموماً $M_{23}C_6$ فراهم نشده است. در نتیجه، تمامی رسوبات در زمینه آلیاژ حل شده و توزیع یکنواختی از عناصر آلیاژی در زمینه ایجاد گردیده است. علاوه بر این، نقاط سیاه‌رنگ مشاهده شده در ریزساختار به تخلخل‌هایی مربوط می‌شوند که به دلیل فرآیند ریخته‌گری در آلیاژ ایجاد شده‌اند.

۳-۳- فازشناسی

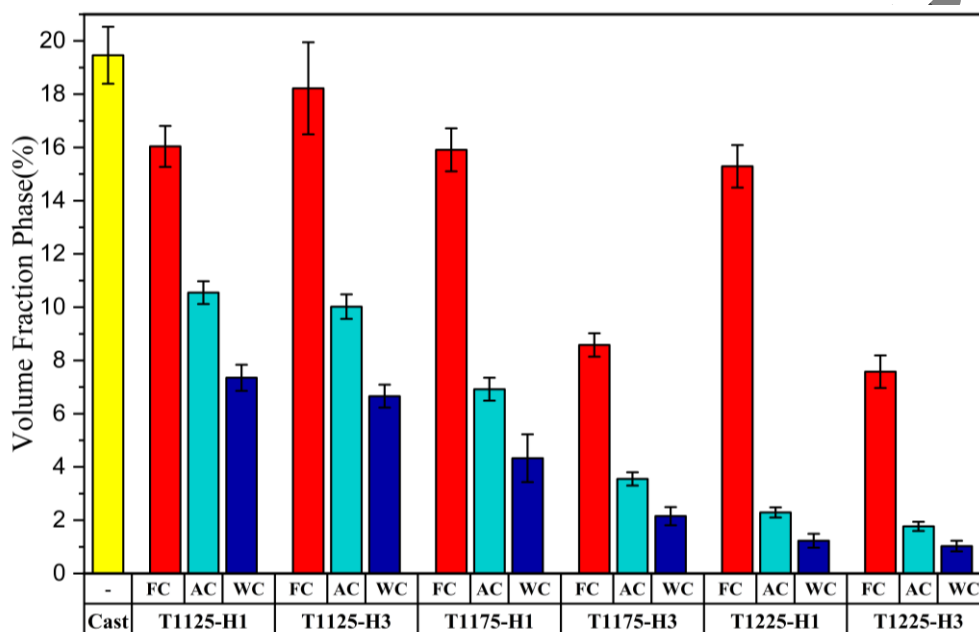
یکی از جنبه‌های مهم در بررسی تأثیر عملیات حرارتی آنیل انحلالی، تحلیل کسر حجمی فازهای ثانویه در ساختار آلیاژ است. برای این منظور، با استفاده از روش‌های پردازش تصویر و

آهسته تأثیر قابل توجهی بر اندازه، ریزساختار و توزیع رسوبات نسبت به ساختار اولیه ریخته‌گری داشته است. عنصر کبالت در نواحی مرز دانه‌ها نسبت به سایر بخش‌ها غلظت کمتری دارد، که نشان‌دهنده انتقال یا انحلال جزئی کبالت از این نواحی تحت تأثیر فرآیند سردشدن آهسته در کوره است. در مقابل، غلظت کروم در مرز دانه‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافته که نشان‌دهنده تجمع این عنصر و احتمال تشکیل کاربیدهای غنی از کروم در این مناطق می‌باشد. همچنین، مولبیدن نیز در مرز دانه‌ها تجمع نسبی دارد، هرچند میزان آن کمتر از کروم است. این نتایج حاکی از تشکیل فازهای غنی از کروم و مولبیدن در مرز دانه‌ها است که عمدتاً ناشی از فرآیند سرمایش آهسته در کوره می‌باشد.

در شکل (۱۲)، نتایج آنالیز عنصری نمونه سردشده در محیط هوا نشان داده شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که سرمایش در هوا توزیع عناصر آلیاژی را به‌طور قابل توجهی نسبت به نمونه‌های سردشده در کوره تغییر داده است. در این شکل، توزیع یکنواخت عناصر اصلی آلیاژ در زمینه مشخص بوده و ریزساختار همگنی را به‌وضوح نشان می‌دهد. این یکنواختی توزیع عناصر



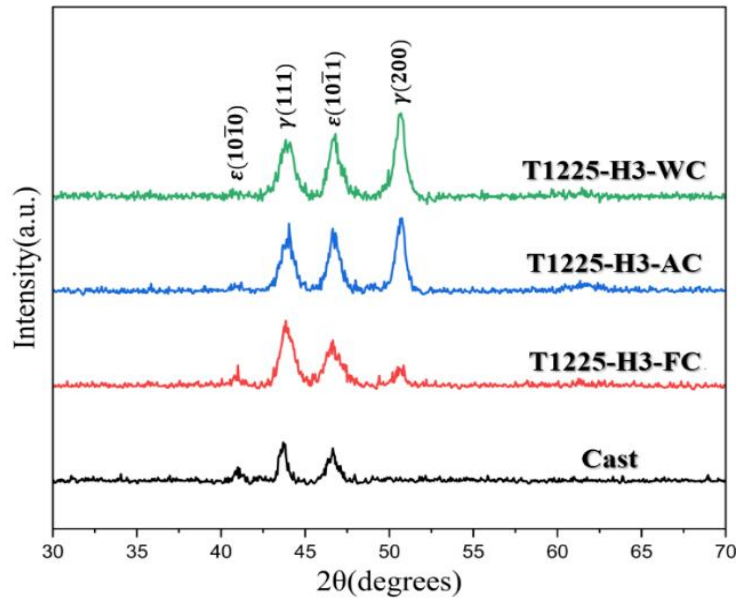
شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی و آنالیز نقطه‌ای از ریزساختار نمونه T1225-H3-WC.



شکل ۱۴- تغییرات کسر حجمی فازهای ثانویه نمونه آلیاژ ریخته‌گری و نمونه‌های آنیل انحلالی.

کمک کرده است، اما در شرایط خاصی نظیر سرمایش در کوره در دمای 1175°C و زمان سه ساعت، میزان فازهای ثانویه نسبت به حالت ریخته‌گری اولیه افزایش یافته است. این پدیده احتمالاً به دلیل تسهیل شرایط ترمودینامیکی و سینتیکی برای رسوب مجدد و رشد فازهای ثانویه ناشی از نرخ سرمایش آهسته است. در سرمایش در کوره، کاهش فازهای ثانویه در دماهای 1125 و 1175°C محدود بوده و در برخی شرایط، رشد مجدد این فازها مشاهده شد. در دمای 1225°C ، هرچند فازهای ثانویه کاهش می‌یابند، اما همچنان نسبت به سایر روش‌های سرمایش مقدار بیشتری دارند. این امر به دلیل فرصت کافی برای نفوذ اتمی و

نرم‌افزار ImageJ، کسر حجمی رسوبات اندازه‌گیری و ارزیابی گردید. در شکل (۱۴)، نمودارهای مربوط به کسر حجمی فازهای ثانویه در ریزساختار تصاویر میکروسکوپی نوری آلیاژ ریخته‌گری شده و نمونه‌های تحت عملیات آنیل انحلالی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان داد که افزایش دمای آنیل از 1125 به 1225°C در تمامی محیط‌های سردکننده، منجر به کاهش میزان رسوبات گردیده است. این کاهش به دلیل افزایش انحلال رسوبات در دماهای بالاتر و کاهش نیروی محرکه برای جوانه‌زنی مجدد فازهای ثانویه قابل توضیح است. همچنین، در برخی موارد، افزایش زمان نگهداری به کاهش بیشتر این فازها

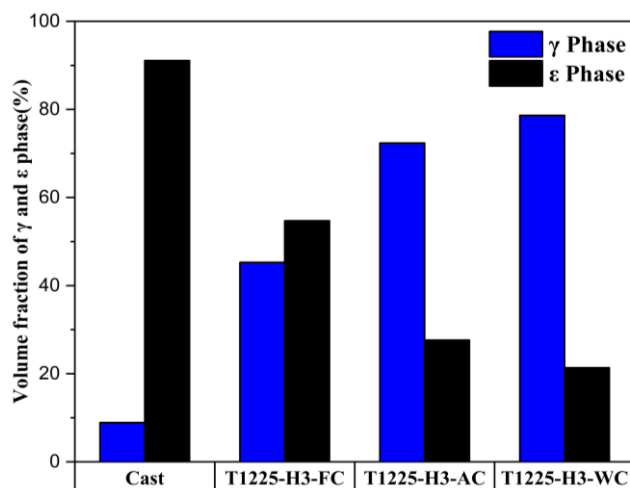


شکل ۱۵- الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژ ریخته‌گری شده و نمونه‌های عملیات آنیل انحلالی.

تغییرات کسر حجمی فازها در طول عملیات حرارتی که با استفاده از رابطه سیج و گیلو محاسبه شده‌اند، نمایش داده شده است. مطالعات گیاجی و همکاران (۳۰)، نشان می‌دهد که در آلیاژ ریختگی کبالت-کروم-مولیبدن فاز σ و کاربیدهای M_6C و $M_{23}C_6$ نیز وجود دارد. این فازهای ثانویه در مراحل اولیه آنیل انحلالی به سرعت تجزیه می‌شوند. فاز σ و کاربیدهای لایه‌ای حل می‌شوند و کاربید M_6C پس از ۱۵ دقیقه حل‌سازی ناپدید می‌شود؛ بنابراین پس از عملیات آنیل انحلالی به مدت سه ساعت در دمای $1225^\circ C$ ، ساختار تقریباً همگن شده و فازهای γ و ϵ ، دوفاز اصلی نمونه را تشکیل می‌دهند و حضور σ یا M_6C در طیف XRD قابل تشخیص نیست. همچنین براساس مطالعه حسنی و همکاران (۳۱)، کسر حجمی فاز γ برای نمونه‌های AC، WC و FC با افزایش سرعت سرمایش به بیشترین مقدار خود می‌رسد. علاوه بر این، عملیات حرارتی ابعاد، شکل و توزیع کاربیدها درون آلیاژ را تغییر می‌دهد. انجام عملیات انحلالی منجر به توزیع ریزتر و یکنواخت‌تر کاربیدهای اولیه در زمینه غنی از کبالت شده است. همچنین، سرعت سردسازی آهسته پس از آنیل انحلالی، موجب تشکیل ساختار لایه‌ای در مرز دانه‌ها می‌شود. طیف‌های اشعه ایکس نشان می‌دهد که بعد از عملیات آنیل،

رسوب مجدد فازهای ثانویه در سرمایش آهسته کوره است. در سرمایش با هوا، کاهش فازهای ثانویه بیشتر از کوره است و در دماهای بالاتر و زمان‌های طولانی‌تر، مقدار این فازها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این روش ترکیبی از سرمایش کوره‌ای و سریع در آب است و برای کاربردهایی که به تعادل بین استحکام و چقرمگی نیاز دارند، مناسب است. در مقابل، سرمایش سریع در آب بیشترین تأثیر را در کاهش فازهای ثانویه دارد. در این روش، مقدار فازهای ثانویه در دمای $1225^\circ C$ و زمان سه ساعت به نزدیک یک درصد رسیده است. این کاهش به دلیل نرخ سرمایش بالا و جلوگیری از تشکیل مجدد فازها است که منجر به ایجاد ریزساختار همگن‌تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که بهترین شرایط برای کاهش فازهای ثانویه، دمای بالا ($1225^\circ C$)، زمان نگهداری طولانی (۳ ساعت) و سرمایش سریع در آب است.

آلیاژ Co-Cr-Mo در دماهای بالا، عمدتاً در فاز γ با ساختار FCC پایدار است. با کاهش دما، فاز γ به تدریج به فاز ϵ با ساختار HCP تبدیل می‌شود. تا حدود دمای $900^\circ C$ ترکیب آلیاژ γ ، ϵ و فازهای ثانویه کاربیدی پایدار هستند (۲۹). الگوهای پراش اشعه ایکس آلیاژ در حالت ریختگی و پس از انجام عملیات آنیل انحلالی در شکل (۱۵) ارائه شده است. همچنین، در شکل (۱۶)



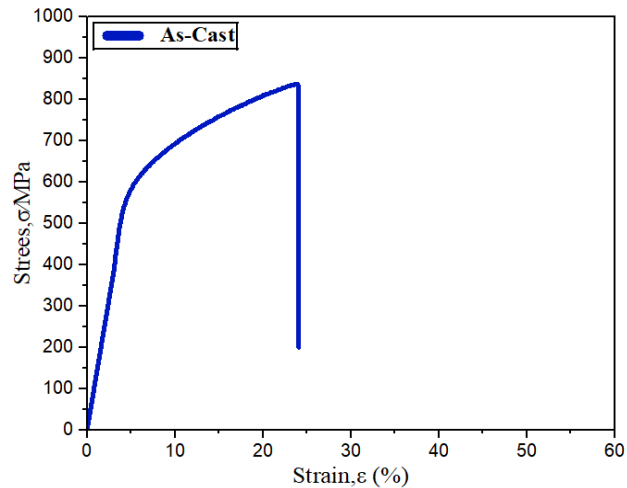
شکل ۱۶- تغییرات کسر حجمی فاز های Γ و ϵ در طول عملیات آنیل انحلالی.

ϵ در نمونه‌های سرد شده در آب (T1225-H3-WC) مشاهده شد که تأثیر سرمایش سریع بر تثبیت فاز γ و محدود کردن تبدیل به فاز ϵ را نشان می‌دهد.

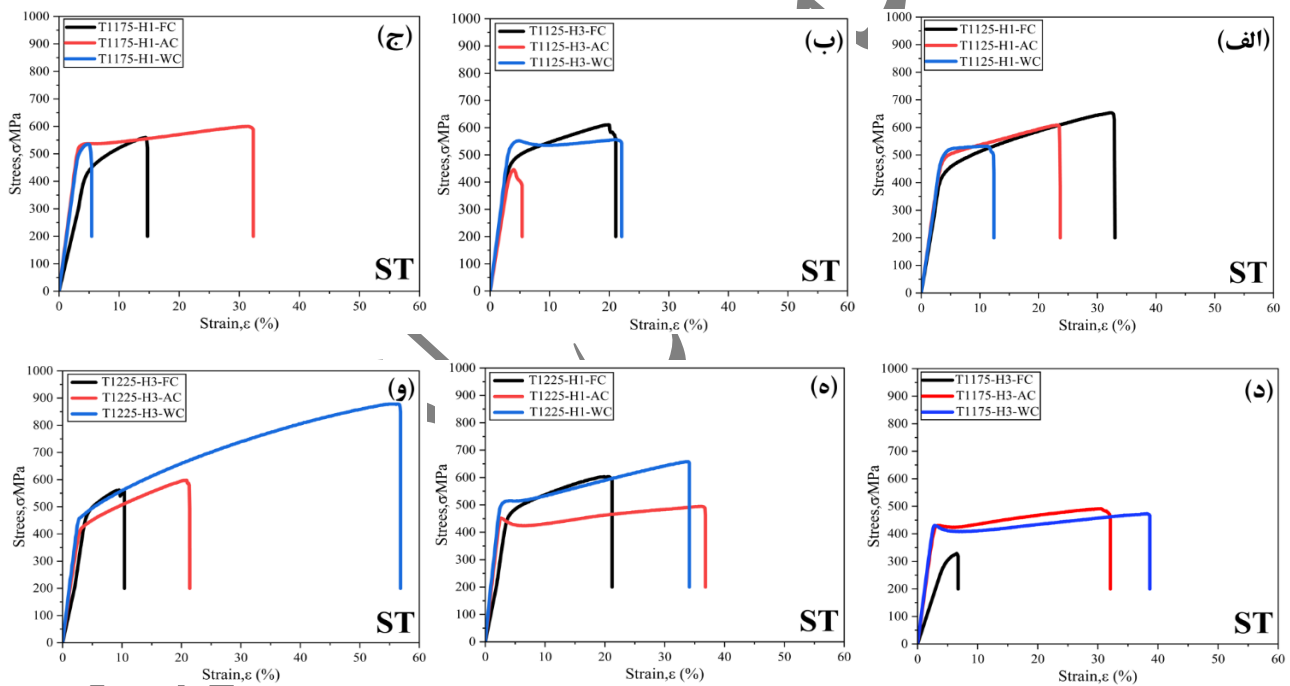
۳-۴- بررسی خواص مکانیکی

نمودارهای تنش-کرنش حاصل از آزمون کشش و داده‌های به دست آمده در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) و جدول (۲)، ارائه شده است. با افزایش دمای عملیات آنیل انحلالی از ۱۱۲۵ به ۱۲۲۵°C، بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی نمونه‌ها مشاهده شد. نمونه‌ای که در دمای ۱۲۲۵°C به مدت سه ساعت عملیات حرارتی شده و سپس در آب سرد شده بود، بالاترین مقادیر استحکام کششی نهایی (۸۷۷ مگاپاسکال) و تنش تسلیم مطلوب (۴۷۰/۴ مگاپاسکال) را از خود نشان داد. در مقابل، سرمایش در کوره، خصوصاً در دمای پایین‌تر، کمترین مقادیر استحکام و درصد ازدیاد طول را داشتند. این افت در خواص مکانیکی ناشی از تشکیل مجدد فازهای ثانویه ترد، یا رشد دانه‌ها بر اثر سرمایش آهسته است که منجر به کاهش شکل پذیری می‌شود. علاوه بر این، بررسی اثر زمان نگهداری در دمای آنیل نشان داد که افزایش مدت زمان از ۱ به ۳ ساعت، به طور کلی موجب بهبود استحکام مکانیکی و کاهش جزئی در ازدیاد طول نسبی گردیده است. این رفتار را می‌توان به کامل تر شدن فرآیند انحلال فازهای بین‌فلزی

شدت پیک‌های (۱۱۱) γ و (۲۰۰) γ نسبت به نمونه ریختگی افزایش یافته است که نشان‌دهنده همگن‌تر شدن ریزساختار و کاهش تنش‌های پسماند است. موقعیت پیک‌ها نیز تغییر اندکی داشته که می‌تواند ناشی از تغییر در پارامتر شبکه‌فازها یا تنش باقیمانده باشد. نسبت شدت میان پیک‌های γ و ϵ بین نمونه‌ها متفاوت است. در نمونه WC، بخش قابل توجهی از آستنیت γ به فاز مارتنزیتی ϵ تبدیل شده است و بنابراین پیک‌های ϵ با شدت بیشتری در زوایای ۴۲° و ۴۷° دیده می‌شوند. بر اساس نتایج به دست آمده در شکل (۱۶)، در نمونه ریختگی فاز ϵ به عنوان فاز غالب شناسایی شد و سهم بیشتری نسبت به فاز γ داشت، که به دلیل نرخ سرمایش آهسته حین انجماد و تبدیل فاز مارتنزیتی (FCC) γ به (HCP) ϵ در این حالت بود. پس از عملیات آنیل انحلالی در دمای و زمان نگهداری سه ساعت، تغییرات قابل توجهی در کسر حجمی فازها مشاهده شد. در نمونه‌های سرد شده در کوره (T1225-H3-FC)، سهم فاز γ افزایش یافت، اما فاز ϵ همچنان غالب بود. این رفتار ناشی از نرخ سرمایش آهسته است که فرصت کافی برای تبدیل بخشی از γ به ϵ حین سرد شدن فراهم می‌کند. در نمونه‌های سرد شده در هوا (T1225-H3-AC)، مقدار فاز γ به طور چشمگیری افزایش یافت و فاز ϵ کاهش یافت، که نشان‌دهنده پایداری بیشتر فاز γ به دلیل نرخ سرمایش متوسط است. بیشترین مقدار فاز γ و کمترین مقدار فاز



شکل ۱۷- نمودار تنش- کرنش نمونه آلیاژ ریختگی.



شکل ۱۸- نمودار تنش- کرنش نمونه‌های عملیات آنیل انحلالی شده در سه محیط سردشوندگی کوره، هوا و آب:

(الف) T1125-H1، (ب) T1125-H3، (ج) T1175-H1، (د) T1175-H3، (ه) T1225-H1، و (و) T1225-H3.

استحکام کششی آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن ریخته‌گری در طی عملیات آنیل انحلالی در دماهای 115°C و 120°C با افزایش زمان نگهداری افزایش یافته و به حدود 800MPa رسیده است. همچنین، عملیات آنیل انحلالی در دمای 120°C و زمان دو ساعت منجر به افزایش درصد ازدیاد طول به ۲۷ درصد شده است.

و یکنواختی بیشتر ریزساختار نسبت داد. از منظر نوع محیط سرمایش، سرمایش سریع در آب با ممانعت از رسوب مجدد فازهای ثانویه غنی از کروم و حفظ ساختار محلولی، منجر به پیشینه‌شدن استحکام کششی و انعطاف‌پذیری شد. مطابق با مطالعات انجام‌شده توسط لی و همکاران (۲۴)،

جدول ۲- مشخصات مکانیکی حاصل از آزمون کشش نمونه‌های آنیل انحلالی شده و آلیاژ ریختگی Co-Cr-Mo

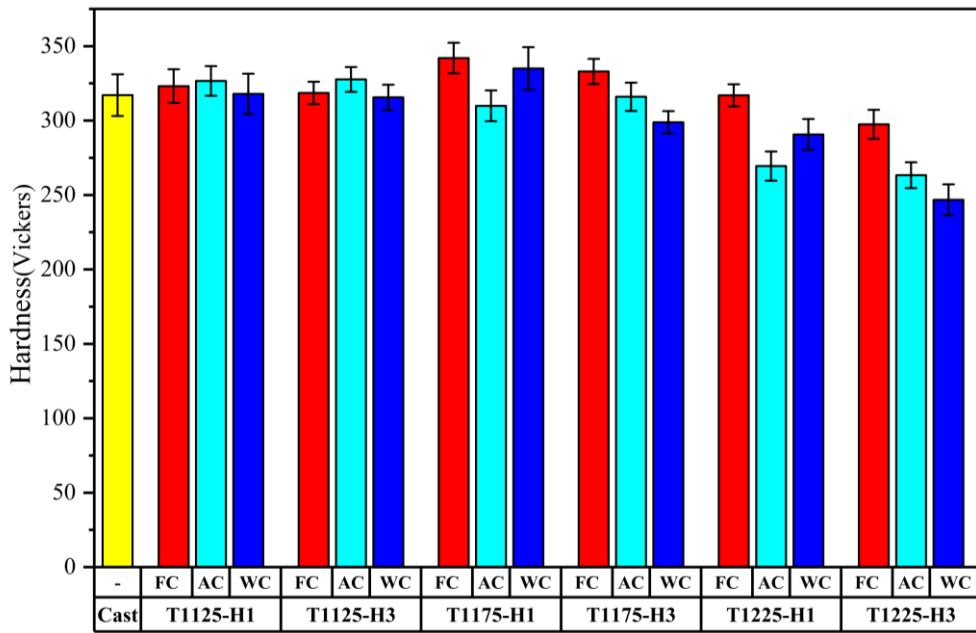
کد نمونه	استحکام کشش نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	انعطاف پذیری (%)
As-Cast	۸۳۷±۴۱/۸	۴۷۷±۲۸/۶	۱۹±۲/۱
T1125-H1-FC	۶۵۳±۳۲/۶	۳۷۰±۲۲/۲	۲۸/۵±۳/۲
T1125-H1-AC	۶۰۹±۳۰/۴	۴۲۷/۸±۲۵/۶	۲۰/۱±۲/۲
T1125-H1-WC	۵۳۲±۲۶/۶	۴۳۰/۹±۲۵/۸	۱۲/۸±۱/۶
T1125-H1-FC	۶۱۱±۳۴/۵	۴۱۶/۷±۲۴/۹	۱۸±۲/۷
T1125-H3-AC	۴۴۶±۲۲/۳	۳۵۵/۲±۲۱/۳	۴±۱/۶۰
T1125-H3-WC	۵۵۶±۲۷/۸	۴۹۹/۶±۲۹/۹	۲۰/۳±۳/۶
T1175-H1-FC	۵۶۰±۲۹/۰	۳۵۹/۷±۲۱/۵	۱۲/۵±۲/۴
T1175-H1-AC	۶۰۰±۳۰/۰	۴۷۹/۳±۲۸/۷	۳۳/۸±۳/۹
T1175-H1-WC	۵۳۵±۲۶/۷	۴۷۲/۵±۳۲/۲	۷/۶±۱/۹
T1175-H3-FC	۳۲۸/۷±۱۶/۴	۲۳۲/۳±۱۳/۹	۴/۱±۲/۳
T1175-H3-AC	۴۹۱/۵±۲۹/۵	۳۹۲/۹±۲۷/۵	۲۹/۵±۳/۱
T1175-H3-WC	۴۷۳/۱±۲۷/۴	۴۰۷/۷±۳۰/۳	۳۶/۵±۴/۱
T1225-H1-FC	۶۰۳±۳۷/۱	۳۹۰/۸±۲۹/۴	۱۹/۶±۲/۸
T1225-H1-AC	۴۹۴/۵±۳۶/۴	۴۴۲/۵±۲۸/۴	۳۴/۷±۴/۷
T1225-H1-WC	۶۵۸±۳۷/۹	۴۹۸/۴±۳۲/۸	۲۶/۶±۳/۶
T1225-H3-FC	۵۶۲±۲۸/۷	۴۰۴/۶±۲۴/۴	۷/۴±۲/۰
T1225-H3-AC	۵۹۸±۲۷/۶	۳۷۴/۳±۲۵/۷	۱۸/۴±۲/۴
T1225-H3-WC	۸۷۸±۴۳/۹	۴۷۰/۴±۲۸/۲	۵۳±۶/۴

با نرخ سرمایش آهسته سرد شده‌اند، افزایش جزئی سختی مشاهده شد. این افزایش به دلیل پایداری برخی از رسوبات کاربیدی، محدود شدن رشد دانه‌ها و افزایش تراکم نایبایی‌ها در ساختار رخ داده است. با انجام عملیات آنیل انحلالی در دمای 1225°C به مدت سه ساعت، سختی نمونه‌های سرد شده در آب و هوا، به ترتیب حدود ۱۷ درصد و ۲۲ درصد کاهش یافت.

۴- نتیجه گیری

۱- افزایش دما و زمان عملیات آنیل انحلالی باعث افزایش انحلال فازهای ثانویه و بهبود یکنواختی ریزساختار آلیاژ شد. این تغییرات به ویژه در دماهای بالاتر (1225°C) و زمان‌های طولانی‌تر (۳ ساعت) بارزتر بود.

سختی نمونه‌های آلیاژ ریختگی و نمونه‌های آنیل شده در شکل (۱۹) نمایش داده شده است. مطابق با پژوهش‌های پیشین، سختی این آلیاژ در محدوده 300° ویکرز گزارش شده است که با مقادیر به دست آمده در این مطالعه برای نمونه اولیه همخوانی دارد (۸ و ۳۲). یافته‌های آزمون ریزسختی نشان داد که انجام عملیات آنیل انحلالی در دما و زمان بالا موجب کاهش سختی آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن خواهد شد. این کاهش سختی را می‌توان به حل شدن نسبی کاربیدها و کاهش میزان فازهای سخت کاربیدی در ریزساختار نسبت داد. افزون‌براین، رشد دانه‌ها در دماهای بالا منجر به کاهش تعداد مرز دانه‌ها شده است که تأثیر مستقیم بر کاهش سختی دارد. دگرگونی‌های احتمالی در ساختار زمینه و تبدیل فازها ترد به فازهای نرم‌تر نیز می‌تواند در افت سختی نقش داشته باشد. در نمونه‌هایی که



شکل ۱۹- تغییرات سختی آلیاژ ریختگی و نمونه‌های آنیل انحلالی.

سرمایش در آب یا هوا بود. این شرایط باعث کاهش فازهای ثانویه و تشکیل رسوبات کاربیدی کروی شکل در ساختار، یکنواختی ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی مانند استحکام و سختی آلیاژ شد، که این آلیاژ را برای عملیات حرارتی بعدی آماده می‌کند.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

محمدحسن اشرفی: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن مقاله، مدیریت منابع. علی شفیع: طراحی و ایده‌پردازی

۲- سرمایش سریع در آب بعد از عملیات آنیل انحلالی باعث کاهش چشمگیر کسر حجمی رسوبات از 17.07 ± 19.4 درصد به 1.0 ± 0.2 درصد شد. این شرایط، منجر به انحلال فازهای ثانویه و ایجاد ساختاری همگن و یکنواخت در آلیاژ می‌شود.

۳- در نمونه‌های سردشده در کوره با کمترین نرخ سرمایش، فازهای ثانویه درشت با توزیع ناهمگن در مرزخانه‌ها ایجاد شد. این امر منجر به رشد دانه‌ها و تشکیل مجدد فازهای ثانویه در این ساختار شد.

۴- در نمونه‌های سردشده در آب، فاز ۷ به‌عنوان فاز غالب باقی ماند و فاز ۴ کاهش یافت. این نتیجه نشان‌دهنده پایداری بیشتر فاز ۷ به‌دلیل نرخ سرمایش بالا است. در مقابل، در نمونه‌های سردشده در کوره و هوا، فاز ۴ همچنان غالب باقی ماند.

۵- عملیات آنیل انحلالی در دمای 1225°C به دلیل انحلال فازهای ثانویه، تأثیر بیشتری بر کاهش سختی آلیاژ داشت. سختی آلیاژ پس از سرمایش در آب و هوا به‌ترتیب ۲۱ درصد و ۱۷ درصد کاهش یافت.

۶- بهینه‌ترین شرایط برای عملیات آنیل انحلالی آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن، دمای 1225°C و زمان سه ساعت همراه با

مهدی میرزا آقایی: طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، اعتبارسنجی نتایج، راهنمایی پروژه.

مطالعه، راهنمایی پروژه، اعتبارسنجی نتایج. مصطفی میلانی: طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، اعتبارسنجی نتایج، راهنمایی پروژه.

واژه‌نامه

1. hexagonal closest packed (HCP)
2. face centred cubic (FCC)
3. investment casting
4. spark optical emission spectrometer
5. optical microscope (OM)
6. field emission scanning electron microscope (FESEM)

7. energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
8. X-ray diffraction (XRD)
9. columnar dendrites
10. blocky phases
11. eutectic phases
12. secondary phases

مراجع

1. Fellah M, Hezil N, Bouras D, Obrosof A, Mohammed AS, Montagne A, et al. Structural, mechanical and tribological performance of a nano structured biomaterial Co-Cr-Mo alloy synthesized via mechanical alloying. *J Mater Res Technol.* 2023;25: 2152–2165. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.031>
2. Mori M, Sato N, Yamanaka K, Yoshida K, Kuramoto K, Chiba A. Development of microstructure and mechanical properties during annealing of a cold-swaged Co-Cr-Mo alloy rod. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2016;64:187–198. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.07.009>
3. Kajima Y, Takaichi A, Kittikundecha N, Nakamoto T, Kimura T, Nomura N, et al. Effect of heat-treatment temperature on microstructures and mechanical properties of Co-Cr-Mo alloys fabricated by selective laser melting. *Mater Sci Eng A* 2018;726:21–31. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.048>
4. Li H, Wang M, Lou D, Xia W, Fang X. Microstructural features of biomedical cobalt-chromium-molybdenum (CoCrMo) alloy from powder bed fusion to aging heat treatment. *J Mater Sci Technol.* 2020;45:146–156. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.11.031>
5. Béres M, Silva CC, Sarvezuk PWC, Wu L, Antunes LHM, Jardini AL, et al. Mechanical and phase transformation behaviour of biomedical Co-Cr-Mo alloy fabricated by direct metal laser sintering. *Mater Sci Eng A* 2018;714:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.087>
6. Turrubiates-Estrada R, Salinas-Rodriguez A, Lopez HF. FCC to HCP transformation kinetics in a Co-27Cr-5Mo-0.23C alloy. *J Mater Sci.* 2011;46(1):254–262. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4969-3>
7. Lopez HF, Saldivar-Garcia AJ. Martensitic transformation in a cast Co-Cr-Mo-C alloy. *Metall Mater Trans A* 2008;39(1):8–18. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9370-8>
8. Ozturk K, Ertugrul O, Ozcan M. Effects of various heat treatments on microstructure and mechanical properties of investment cast Co-Cr-Mo implants. *Cumhuriyet Sci J.* 2021;42(4):2587–2680. <https://doi.org/10.17776/csj.811755>
9. Chauhan M. Microstructural characterization of cobalt chromium (ASTM F75) cubes produced by EBM technique [master's thesis on the Internet]. Gothenburg (Sweden): Chalmers University of Technology;2017. <https://hdl.handle.net/20.500.12380/252375>
10. Zaman HA, Sharif S, Idris MH, Kamarudin A. Metallic Biomaterials for Medical Implant Applications: A Review. *Appl Mech Mater.* 2015;735:19–25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.735.19>
11. Park JB, Jung KH, Kim KM, Son Y, Lee J II, Ryu JH. Microstructure of as-cast Co-Cr-Mo Alloy Prepared by Investment Casting. *J Korean Phys Soc.* 2018;72(8):947–951. <https://doi.org/10.3938/jkps.72.947>
12. Zangeneh S, Lashgari HR, Roshani A. Microstructure and tribological characteristics of aged Co-28Cr-5Mo-0.3C alloy. *Mater Des.* 2012;37:292–303. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.12.041>
13. Matula G, Szatkowska A, Matus K, Tomiczek B, Pawlyta M. Structure and properties of Co-Cr-Mo alloy manufactured by powder injection molding method. *Materials* 2021;14(8). <https://doi.org/10.3390/ma14082010>
14. Mineta S, Namba S, Yoneda T, Ueda K, Narushima T. Carbide formation and dissolution in biomedical CO-CR-MO alloys with different carbon contents during solution treatment. *Metall Mater Trans A* 2010;41(8):2129–2138. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0227-1>
15. Gupta KP. The Co-Cr-Mo (cobalt-chromium-

- molybdenum) system. *J Phase Equilib Diffus.* 2005;26:87–92.
<https://doi.org/10.1361/15477030522608>
16. Koniczny B, Szczesio-Wlodarczyk A, Andrearczyk A, Januszewicz B, Lipa S, Zieliński R, et al. Enhancing the Mechanical Properties of Co-Cr Dental Alloys Fabricated by Laser Powder Bed Fusion: Evaluation of Quenching and Annealing as Heat Treatment Methods. *Materials* 2024;17(21).
<https://doi.org/10.3390/ma17215313>
 17. Marti A. Cobalt-base alloys used in bone surgery. *Injury* 2000;31:S18–S23.
[https://doi.org/10.1016/S0020-1383\(00\)80018-2](https://doi.org/10.1016/S0020-1383(00)80018-2)
 18. Li B, Mukasyan A, Varma A. Combustion synthesis of CoCrMo orthopedic implant alloys: Microstructure and properties. *Mater Res Innov.* 2003;7(4):245–252.
<https://doi.org/10.1007/s10019-003-0260-4>
 19. Yao MX, Wu JBC, Yick S, Xie Y, Liu R. High temperature wear and corrosion resistance of a Laves phase strengthened Co-Mo-Cr-Si alloy. *Mater Sci Eng A* 2006;435–436:78–83.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.054>
 20. Lu Y, Wu S, Gan Y, Zhang S, Guo S, Lin J, et al. Microstructure, mechanical property and metal release of As-SLM CoCrW alloy under different solution treatment conditions. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2016;55:179–190.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.10.019>
 21. Cho HHW, Takaichi A, Kajima Y, Htat HL, Kittikundecha N, Hanawa T, et al. Effect of post-heat treatment cooling conditions on microstructures and fatigue properties of cobalt chromium molybdenum alloy fabricated through selective laser melting. *Metals* 2021;11(7).
<https://doi.org/10.3390/met11071005>
 22. Qi J, Ma L, Gong P, Rainforth WM. Investigation of the wear transition in CoCrMo alloys after heat treatment to produce an HCP structure. *Wear* 2023;518–519:204649.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204649>
 23. Zangeneh S, Lashgari HR, Saghafi M, Karshenas M. Effect of isothermal aging on the microstructural evolution of Co-Cr-Mo-C alloy. *Mater Sci Eng A* 2010;527(24–25):6494–6500.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.06.081>
 24. Li XX, Yu A, Su H, Li L, Liu X, Meng Y. Effect of Solution Heat Treatment on Microstructure and Properties of CoCrMo Alloy. *J Phys Conf Ser.* 2025;2956:012001.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2956/1/012001>
 25. Sage M, Guillaud Ch. Méthode d'analyse quantitative des variétés allotropiques du cobalt par les rayons X. *Rev Metall.* 1950;47(2):139–145.
<https://doi.org/10.1051/metal/195047020139>
 26. Szala M, Beer-Lech K, Gancarczyk K, Kilic OB, Pędrak P, Özer A, et al. Microstructural characterisation of Co-Cr-Mo Casting Dental Alloys. *Adv Sci Technol Res J.* 2017;11(4):76–82.
<https://doi.org/10.12913/22998624/80901>
 27. Ramírez-Vidaurre LE, Castro-Román M, Herrera-Trejo M, García-López C V, Almanza-Casas E. Cooling rate and carbon content effect on the fraction of secondary phases precipitate in as-cast microstructure of ASTM F75 alloy. *J Mater Process Technol.* 2009;209(4):1681–1687.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.039>
 28. Mancha H, Carranza E, Escalante JI, Mendoza G, Ndez MM, Cepeda F, et al. M23C6 Carbide Dissolution Mechanisms during Heat Treatment of ASTM F-75 Implant Alloys. *Metall Mater Trans A* 2001;32A:517–524.
<https://doi.org/10.1007/s11661-001-0355-8>
 29. Li J, Ren H, Liu C, Shang S. The effect of specific energy density on microstructure and corrosion resistance of CoCrMo alloy fabricated by laser metal deposition. *Materials* 2019;12(8).
<https://doi.org/10.3390/ma12081321>
 30. Giacchi J V., Fornaro O, Palacio H. Microstructural evolution during solution treatment of Co-Cr-Mo-C biocompatible alloys. *Mater Charact.* 2012;68:49–57.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.03.006>
 31. Hassani FZ, Ketabchi M, Bruschi S, Ghiotti A. Effects of carbide precipitation on the microstructural and tribological properties of Co–Cr–Mo–C medical implants after thermal treatment. *J Mater Sci.* 2016;51(9):4495–4508.
<https://doi.org/10.1007/s10853-016-9762-5>
 32. Roudnicka M, Bigas J, Molnarova O, Palousek D, Vojtech D. Different response of cast and 3D-printed Co-Cr-Mo alloy to heat treatment: A thorough microstructure characterization. *Metals* 2021;11(5).
<https://doi.org/10.3390/met11050687>