

تغییرات ناشی از افزودن مس در رفتار اکسیداسیون FeAl و میکروساختار آن و تعیین میزان بهینه مس جهت رسیدن به بیشترین افزایش

در مقاومت به اکسیداسیون

راضیه خوشحال^۱، سید وحید علوی نژاد خلیل آباد^۲

۱. * گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران، rkshshal@birjandut.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران، svalavi@birjandut.ac.ir

چکیده

عناصر مختلفی می‌تواند بر افزایش مقاومت اکسیداسیون آلومینیدهای آهن موثر باشد. در این راستا، تاثیر مس بر مقاومت اکسیداسیون FeAl مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که استفاده از مقدار بهینه مس به طور قابل توجهی مقاومت به اکسیداسیون این نوع آلومینید آهن را افزایش می‌دهد. بر اساس نمودار تعادلی فاز برای سیستم دوتایی Cu-Al، نمونه‌هایی با ۲٪، ۷٪ و ۱۲٪ مس (با توجه به میزان آلومینیم موجود در هر نمونه) برای ارزیابی نحوه تأثیر مقادیر مختلف مس بر رفتار اکسیداسیون FeAl استفاده شد. نمونه‌های پودری فشرده با نسبت‌های مولی برابر از آهن و آلومینیم و مقادیر مختلف مس فوق الذکر در هر نمونه، پس از سنتز در دمای ۹۵۰°C، در دماهای ۶۰۰°C، ۷۰۰°C و ۸۰۰°C برای مدت زمان‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ ساعت اکسید شدند. مشاهده شد که در همه دماهای آزمایش شده، نمونه‌های با ۲ و ۷ درصد مس افزایش جرم کمتری نسبت به نمونه‌های فاقد مس پس از اکسیداسیون، از خود نشان دادند. با این حال، افزایش میزان مس به ۱۲٪ منجر به نرخ اکسیداسیون بالاتری شد. شایان ذکر است، عملکرد مقاومت به اکسیداسیون نمونه‌های دارای ۷ درصد مس از نمونه دارای ۲ درصد مس نیز پیشی گرفت. علاوه بر این، ترکیبات حاصل و ریزساختار به دست آمده نیز به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

کلیدواژه‌ها: مس، آلومینید آهن، اکسیداسیون، افزایش جرم، ریزساختار.

Alterations in the oxidation characteristics and microstructure of FeAl resulting from the addition of copper, along with the identification of the optimal quantity of copper to achieve the maximum enhancement in oxidation resistance.

Abstract

Multiple elements have been shown to enhance the oxidation resistance of iron aluminides. In this context, the influence of copper on the FeAl oxidation resistance was investigated. The findings demonstrated that the oxidation resistance of this kind of iron aluminide is greatly increased when the optimal quantity of copper is used. Samples

containing 2 %, 7 %, and 12 % copper (depending on the amount of aluminum in each sample) were used to assess how different copper concentrations impact the oxidation behavior of FeAl. Compacted powder samples with equal molar ratios of iron and aluminum and the above-mentioned amounts of copper in each sample, after synthesis at 950°C, were oxidized at 600°C, 700°C, and 800°C for 20, 40, 60, 80, and 100 hours. It was observed that at all tested temperatures, samples with 2 and 7% copper showed less weight gain than the free copper sample. Nevertheless, a higher rate of oxidation was the outcome of raising the copper content to 12%. It's important to note that the samples with 7% copper outperformed the samples with 2% copper in terms of oxidation resistance. Furthermore, a detailed analysis of the resulting compositions and microstructures was conducted.

Keywords: Copper, Iron Aluminide, Oxidation, Weight Gain, Micro-Structure.

مقدمه

آلومینیدهای آهن به دلیل ویژگی‌هایی چون مقاومت در برابر اکسیداسیون و خوردگی، هزینه‌های پایین و روش‌های تولید آسان حضور چشمگیری در کاربردهای صنعتی مانند مبدل‌های حرارتی، لوله‌های ساختمانی، صنایع حمل و نقل، کوره‌سازی، ساخت فیلترها، اتومبیل‌سازی و هوافضا پیدا کرده‌اند [۱]. مقاومت اکسیداسیون آلومینیدهای آهن به دلیل ایجاد یک لایه آلومینای مقاوم در سطح آنها است [۲]. در سیستم Fe-Al، رفتار اکسیداسیون به مقدار آلومینیوم [۳] و دمای اکسیداسیون [۴] بستگی دارد. افزودنی‌هایی مانند ایتريم [۵]، کروم [۶، ۷]، زیرکونیوم [۸]، تیتانیوم [۷] و سیلیسیم [۹، ۱۰] برای بهبود خواص آلومینیدهای آهن استفاده شده است. مس نیز از دیگر عناصری است که برای تقویت مقاومت به اکسیداسیون آلومینیدهای آهن مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال، سه ترکیب $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ ، $Al_{78}Cu_7Fe_{15}$ و $Al_{80}Cu_5Fe_{14}Si_1$ از مواد خام عنصری سنتز شده و ویژگی‌های خوردگی آنها بررسی شده است [۱۱]. مشخص شده است که $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ بالاترین مقاومت در برابر خوردگی را دارد. همچنین ترکیب $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ سختی بیشتری نسبت به $Al_{78}Cu_7Fe_{15}$ و $Al_{80}Cu_5Fe_{14}Si_1$ از خود نشان داده است. این تحقیق نشان داده که حضور مس می‌تواند بر رفتار خوردگی ترکیبات Fe-Al موثر باشد [11]. در نمودار فاز دوتایی Al-Cu، ترکیبات مختلفی از آلومینیدهای مس را می‌توان از طریق واکنش آلومینیوم و مس تولید کرد [۱۲]. علاوه بر این، مشاهده شده است که حضور مس در سیستم، باعث کاهش مقدار آلومینیوم مورد نیاز برای تشکیل یک لایه Al_2O_3 شده است. وجود مس بر کاهش غلظت اکسیژن مورد نیاز، تسهیل نفوذ آلومینیوم به بیرون و کاهش اکسیداسیون در دمای $1000^\circ C$ موثر است [۱۳]. علاوه بر این، در تحقیقات دیگری نیز به نحوه اثر مس بر خواص ترکیبات حاصل در سیستم Fe-Al پرداخته شده است [۱۴، ۱۵]. مشخص شده است که توزیع خاصی از اکسیدهای آهن و مس و نسبت مشخصی از آنها به عنوان یک عامل ضروری برای ایجاد خواص کاتالیزوری مورد نیاز است [۱۶]. دو ترکیب با نسبت‌های مولی استوکیومتری متفاوت Cu، Fe و Al نیز برای تعیین رفتار اکسیداسیون در دمای $800^\circ C$ و $900^\circ C$ نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده است که نمونه با میزان آهن بالاتر نسبت به نمونه با مس بیشتر، درجه اکسیداسیون بیشتری را از خود نشان می‌دهد [۱۷]. این پدیده با مقدار آلومینیوم مورد نیاز برای تشکیل لایه محافظ آلومینا قابل توجیه است که در نمونه‌هایی با مس بیشتر کاهش می‌یابد. علاوه بر این، اشاره شده است که سرعت نفوذ آلومینیوم در دمای بیش از $475^\circ C$ از اتم‌های مس پیشی می‌گیرد [۱۸]. رفتار اکسیداسیون ترکیبات آلومینید آهن FeAl و Fe_2Al_5 نیز در مطالعات قبلی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹]. همچنین اثر سیلیسیم بر اکسیداسیون این گروه خاص از آلومینیدها نیز مورد مطالعه واقع شده است [۲۰].

بررسی منابع مطالعاتی در دسترس نشان داد که محققان مطالعه منسجمی بر نحوه تأثیر مقادیر متفاوت مس بر رفتار اکسیداسیون FeAl انجام نداده‌اند. لذا نوآوری این تحقیق این است که مشاهده شده است که می‌توان با به کارگیری میزان بهینه مس، مقاومت اکسیداسیون FeAl را افزایش داد. پس هدف این تحقیق، بررسی اثر نسبت‌های مختلف مس بر اکسیداسیون آلومینید آهن در دماهای مختلف تعیین شد. برای این منظور از نسبت‌های مولی ۲٪، ۷٪ و ۱۲٪

مس (در مقایسه با میزان آلومینیم موجود در هر نمونه) استفاده شد. محصولات آلومیناید آهن، پس از سنتز، در دماهای 600°C ، 700°C و 800°C تحت اکسیداسیون قرار گرفت و نهایتاً نتایجی که از این تغییرات مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته بود تحلیل شد. از یک طرف میکروساختار نمونه‌ها مورد بحث قرار گرفت و از طرف دیگر با توجه به تغییرات ایجاد شده در میزان جرم نمونه در اثر اکسیداسیون، از لحاظ عملکردی هم نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.

روش تجربی

در ابتدا نسبت‌های مولی مساوی از آهن (۱۰ میکرون، ۹۹/۵ درصد) و آلومینیم (مش ۳۲۵، ۹۹/۹۵ درصد) برای تولید FeAl مخلوط شدند. سپس ۲٪، ۷٪ و ۱۲٪ مولی مس (نسبت به مقدار آلومینیم موجود در مخلوط هر نمونه) اضافه شد. میزان ۲٪ مس برای رسیدن به حالتی انتخاب شد که در آن مس می‌تواند داخل آلومینیم حل شود، ۷٪ مس به هدف داشتن نمونه در ناحیه هیپوئوتکتیک و ۱۲٪ مس برای هدف قرار دادن نقطه یوتکتیک (بر اساس نمودار فاز دوتایی Al-Cu) انتخاب شد. بر اساس توضیحات بیان شده، درصد مولی هر عنصر در نمونه‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

نمونه ۱ به عنوان یک نمونه شاهد نگهداری شد که در آن فقط FeAl می‌تواند تولید شود [۲۲-۲۰]. نمونه‌ها در قالبی استوانه‌ای به قطر ۱ سانتی‌متر فشرده شدند که فشار این مرحله ۳۰۰ Psi بود. این فشرده‌سازی به هدف اطمینان از تماس کافی بین پودرها اعمال شد. جنس قالب فولاد بود که به کمک روش کربن‌دهی، سختکاری سطحی شد. فشار به صورت یکطرفه اعمال شد. سپس نمونه‌های به دست آمده از مرحله پرس، به مدت ۵ ساعت در دمای 950°C در محیط آرگون تحت سنتز قرار گرفتند. پس از این فرآیند، نمونه‌ها در هوا در دماهای 600°C ، 700°C و 800°C برای مدت زمانهای ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ ساعت اکسید شدند.

نمونه‌ها قبل از اکسیداسیون جرم شده و مساحت هر نمونه اندازه‌گیری شد. پس از هر مرحله اکسیداسیون نیز نمونه از کوره خارج شده و مجدد جرم و مساحت آن تعیین شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آنالیز XRD از نمونه‌های به دست آمده، پودر تهیه شد و توسط دستگاه XRD مجهز به آشکارساز LYNXEYE-XE-T نتایج به دست آمد. بررسی میکروساختار هم به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Vega II XMU انجام شد.

جدول ۱: درصد مولی هر عنصر در نمونه‌های مختلف مورد بررسی در این تحقیق.

درصد مولی			شماره نمونه
Fe	Al	Cu	
۵۰	۵۰	۰	نمونه ۱ (نمونه فاقد مس)
۴۹	۴۹	۱	نمونه ۲ (نمونه جاوی ۲٪ مس)
۴۷/۴۳	۴۷/۴۳	۳/۵۷	نمونه ۲ (نمونه جاوی ۷٪ مس)
۴۶/۸۲	۴۶/۸۲	۶/۳۶	نمونه ۲ (نمونه جاوی ۱۲٪ مس)

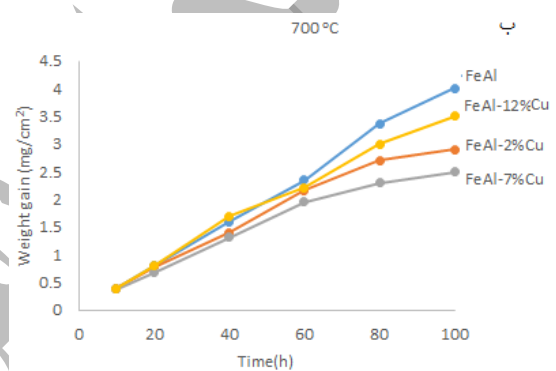
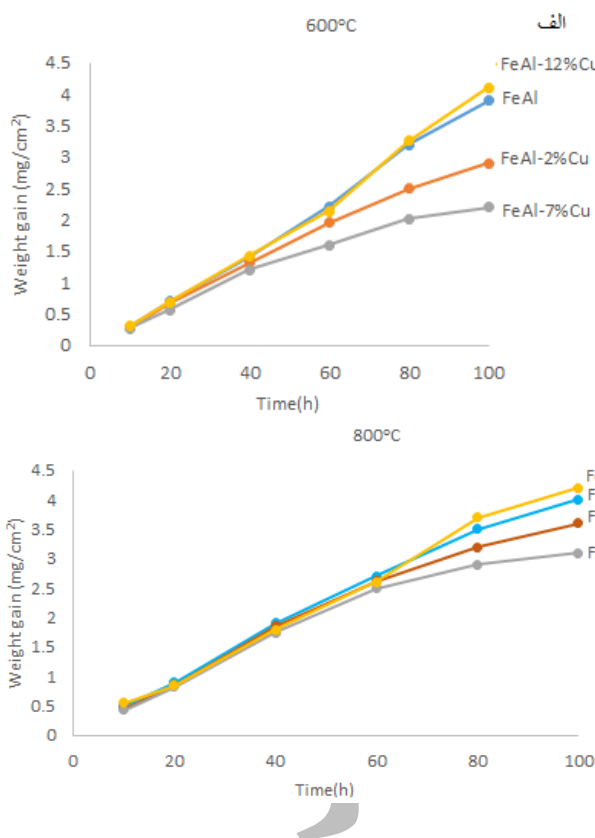
نتایج و بحث

برای بررسی رفتار اکسیداسیون نمونه‌ها، تغییرات جرم در طول فرآیند اکسیداسیون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این محاسبات در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد که در دمای اکسیداسیون پایین (600°C) وجود مس منجر به اختلاف معناداری در افزایش جرم شده است. با افزایش دمای اکسیداسیون به 800°C ، کاهش اختلاف در افزایش جرم ایجاد شده بین نمونه حاوی مس و فاقد آن مشاهده می‌شود. این پدیده

را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که در دماهای پایین‌تر، حضور مس، احتمالاً، تاثیر قابل توجهی بر نفوذ آلومینیوم به سطح به هدف تشکیل لایه محافظ آلومینا داشته است. اما این تاثیر در دماهای بالا که نفوذ آلومینیوم با سهولت بیشتری انجام می‌شود، کاهش یافته است.

تفاوت دیگری که در نتایج حاصل از سه دمای اکسیداسیون مشاهده می‌شود این است که طی ۱۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای اکسیداسیون بالا (۸۰۰ درجه سانتیگراد)، منحنی به حالت افقی نزدیک شده است که نشان دهنده ایجاد مقاومت اکسیداسیون پایدار است، اما در دمای 600°C به نظر می‌رسد که ضخامت لایه آلومینای محافظ ایجاد شده، هنوز به حداکثر مقدار خود نرسیده و در حال رشد است.

نتایج دیگری که در هر سه دمای اکسیداسیون مشهود است این است که نمونه با ۱۲٪ مس رفتار متمایز در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۲٪ و ۷٪ مس نشان می‌دهد. به نحوی که حتی مقاومت آن در برابر اکسیداسیون از نمونه فاقد مس هم کمتر شده است. این پدیده ممکن است به دلیل امکان تشکیل اکسیدهای مس و آهن باشد که مقاومت به اکسیداسیون را کاهش می‌دهد.

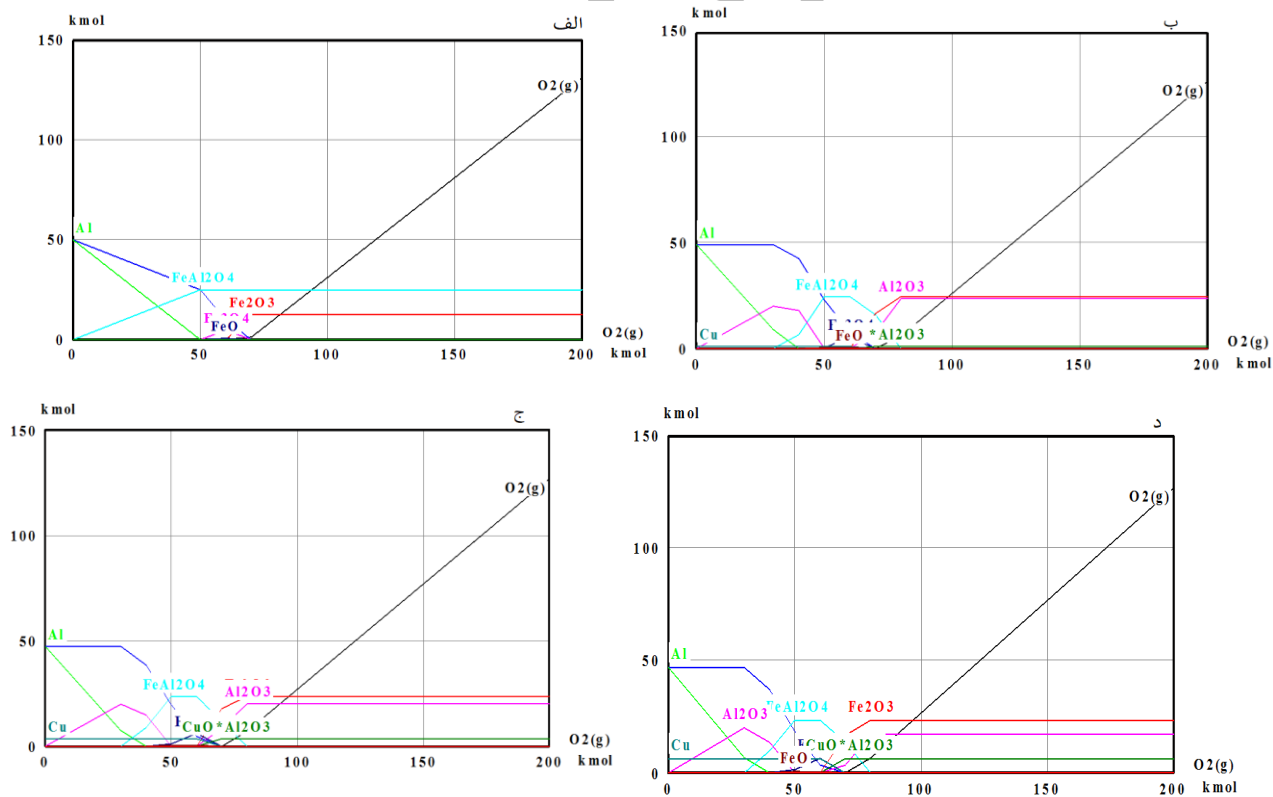


شکل ۱: تغییرات جرم نمونه‌های اکسید شده در دماهای

(الف) 600°C (ب) 700°C و (ج) 800°C .

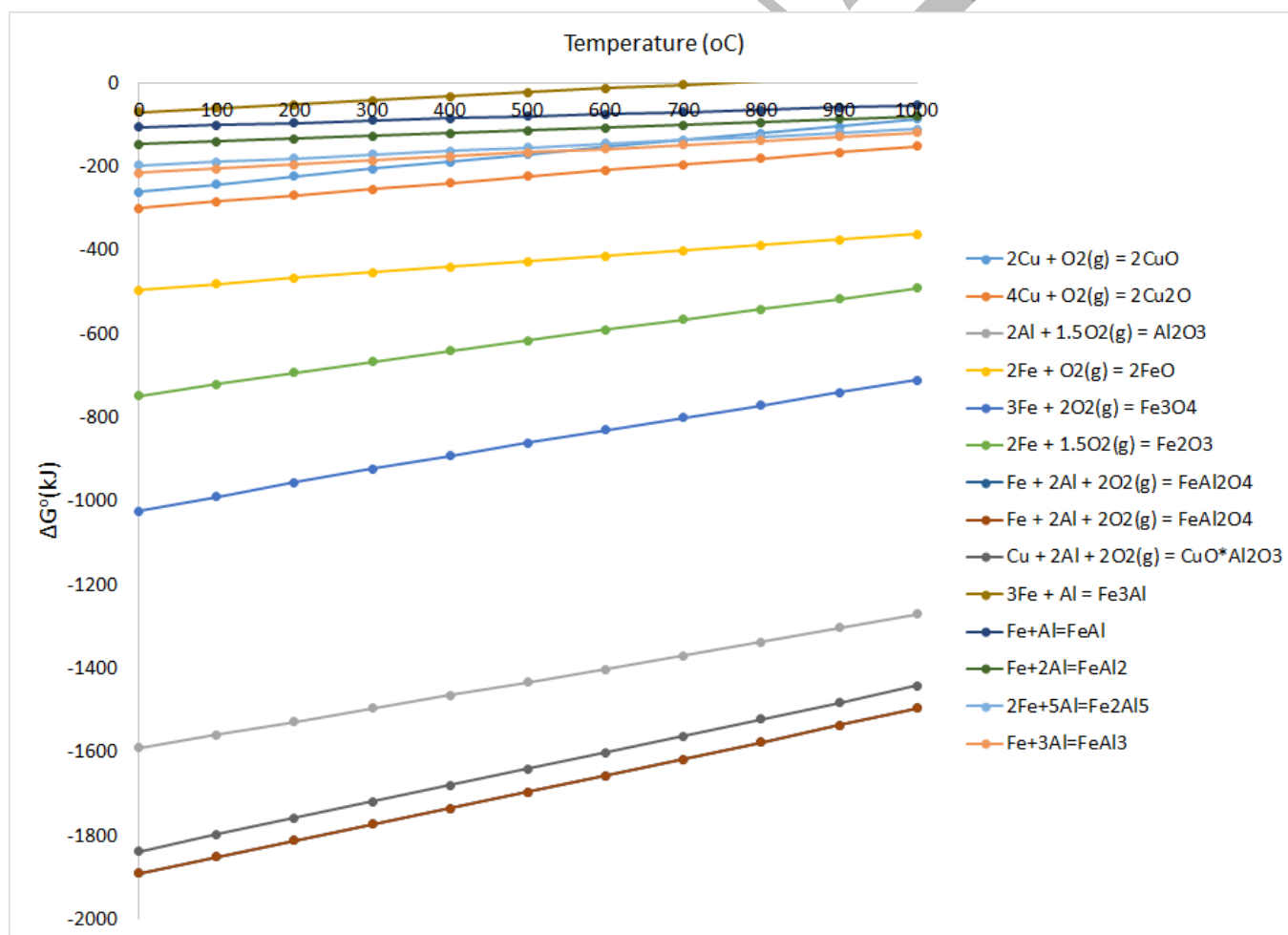
در نمونه حاوی کمترین مقدار مس (نمونه ۲) امکان حل شدن مس در آلومینیوم وجود دارد. انحلال مقدار کمی مس باعث ایجاد اعوجاج در ساختار آلومینیوم می‌شود که این امر احتمالاً، نفوذ اتم‌های آلومینیوم به سطح را تسهیل می‌کند و منجر به تشکیل آلومینای محافظ با کیفیت بهتر در سطح می‌شود.

برای تجزیه و تحلیل بیشتر از نرم افزار HSC Chemistry 5.11 استفاده شد. با استفاده از این نرم افزار، فازهای تعادلی که می‌توانند در یک سیستم حاوی تعداد مول برابر از آهن و آلومینیوم که به آن مقادیر از پیش تعیین شده مس اضافه شده و سپس تحت اکسیداسیون قرار گرفته است، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور فرض شد که اکسیژن در ۲۱ مرحله به سیستم اضافه شود (شکل ۲). قابل ذکر است که این نسخه از نرم افزار فاقد اطلاعات مربوط به تشکیل آلومینایدهای آهن بود. تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از اکسیداسیون آهن و آلومینیوم در نسبت‌های مولی مساوی، چه در حضور مس و چه در نمونه‌های فاقد مس، نشان می‌دهد که فاز اکسید اولیه تشکیل شده در حضور مس Al_2O_3 است. برعکس، در غیاب مس، اولین فاز پایدار مشاهده شده FeAl_2O_4 بوده است. علاوه بر این، افزایش مقدار مس، (همانطور که در نمونه های ۳ و ۴ مشاهده می شود)، تشکیل فاز $\text{CuO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ را تسهیل کرده است. تحقیقات انجام شده توسط محققان قبلی نشان داده است که در سیستم آهن - مس پس از اکسیداسیون در دمای 700°C تشکیل فازهای Fe_2O_3 ، CuO و CuFe_2O_4 محتمل است البته در تحقیق حاضر در نمونه حاوی ۱۲٪ مس، فازهای اکسید مس و آهن مشاهده شد که در قسمتهای آتی به آن پرداخته خواهد شد [۲۴]. علاوه بر این، بیان شده است که ظهور فاز Al_2Cu در سیستم آلومینیوم و مس به افزایش مقاومت در برابر سایش و بهبود خواص مکانیکی کمک می‌کند [۲۵]. این موضوع در تحقیق حاضر نیز به صورت مستند تایید شد. پس از افزودن مس و با تشکیل این فاز، مقاومت به اکسیداسیون بیشتری در نمونه‌ها دیده شد. علاوه بر این، گزارش شده است که حضور این فاز، می‌تواند به افزایش مقاومت در برابر خوردگی منجر شود [۲۶].



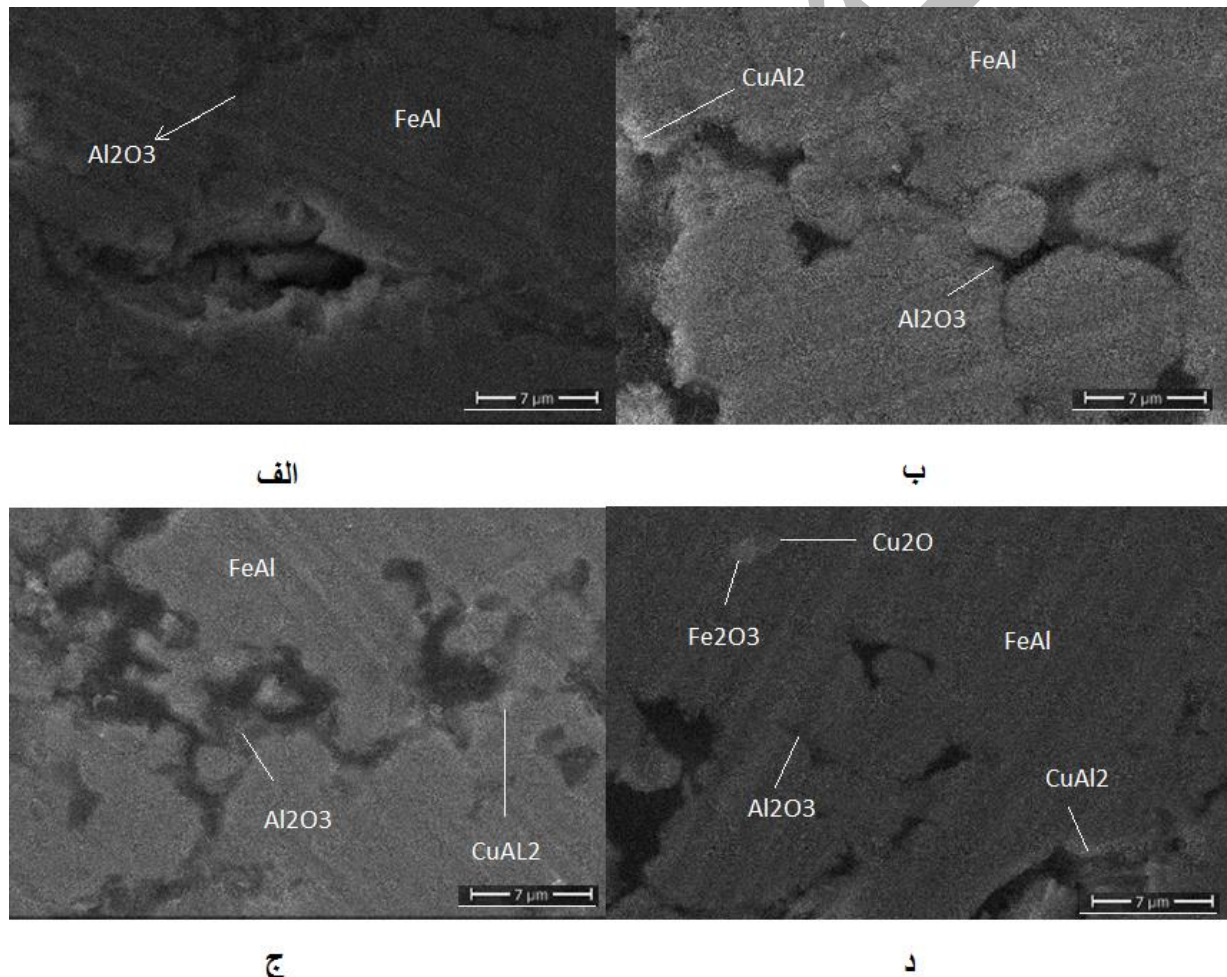
شکل ۲: پیش‌بینی فازهای تعادلی که می‌تواند در یک سیستم حاوی تعداد مساوی مول آهن و آلومینیوم، با نسبت‌های متفاوت مس و اکسیژن وارد شده به سیستم الف) نمونه فاقد مس، ب) نمونه دارای ۲٪ مس، ج) نمونه حاوی ۷٪ مس و د) نمونه حاوی ۱۲٪ مس، (پیش‌بینی شده با استفاده از نرم‌افزار HSC).

تحقیقات پیشین انجام شده نشان داده است که تشکیل CuAl_2O_4 مقاومت به اکسیداسیون را در سیستم $\text{CuO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ بهبود بخشیده است [۲۷]. از نتایج این تحقیق شاید بتوان این ایده را مطرح کرد که حضور و تشکیل این فاز در سیستم به افزایش مقاومت به اکسیداسیون کمک می‌کند. برای تعیین پایداری فازهایی که ممکن است در سیستم $\text{Fe}-\text{Al}-\text{C}-\text{O}$ ایجاد شوند، منحنی تشکیل انرژی آزاد استاندارد گیبس به عنوان تابعی از دما رسم شد (شکل ۳). این منحنی همچنین انرژی آزاد تشکیل آلومینیدهای آهن را در خود جای داده است. بر اساس نتایج این بررسی، فاز FeAl_2O_4 کمترین انرژی آزاد تشکیل را نشان می‌دهد. پس از این ترکیب، $\text{CuO}^*\text{Al}_2\text{O}_3$ ترکیبی است که بیشترین احتمال تشکیل را به خود اختصاص داده است.



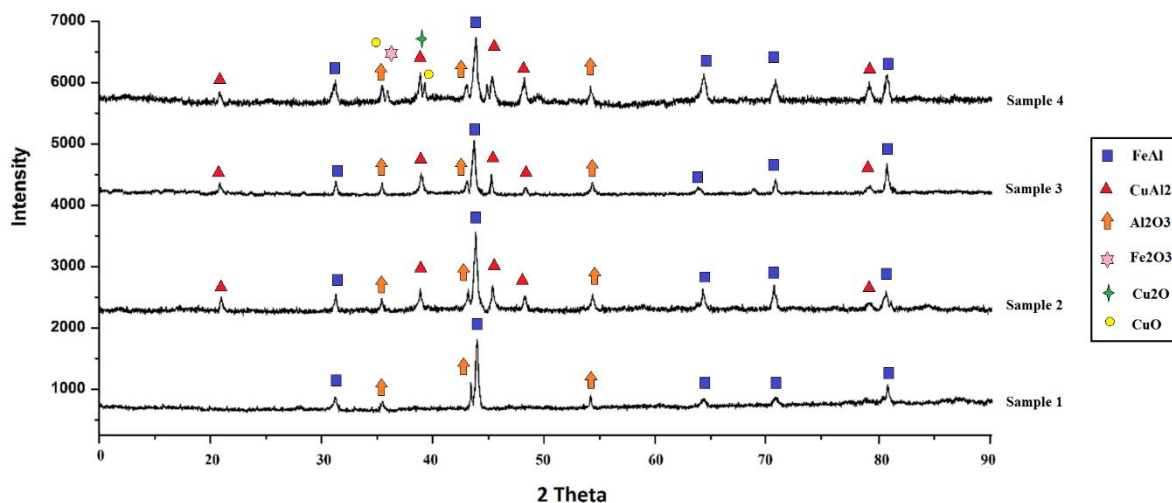
شکل ۳: تجزیه و تحلیل انرژی آزاد گیبس ترکیبات قابل تولید در سیستم آهن-آلومینیوم-مس-اکسیژن.

تحقیقات تکمیلی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی انجام شد (شکل ۴). لازم به ذکر است که بررسی اکسیداسیون در این تحقیق به وسیله ایجاد یک لایه محافظ به اکسیداسیون در سطح نبود. بلکه عنصر مس در کل نمونه اضافه شد و مقاومت به اکسیداسیون کل نمونه مد نظر قرار گرفت. لذا روش بررسی میزان پیشرفت اکسیداسیون، بررسی ضخامت لایه سطحی نبود. بلکه از میزان تغییرات جرم نمونه جهت بررسی تغییرات ایجاد شده در مقاومت به اکسیداسیون استفاده شد. برای بررسی آلومینای محافظ ایجاد شده، بر سطوح آزاد داخلی تمرکز صورت گرفت و این مکانها مورد ارزیابی قرار داده شدند. در نمونه فاقد مس (شکل ۴ الف)، FeAl فاز زمینه و غالب است و در اثر اکسیداسیون در سطوح آزاد، آلومینا شکل گرفته است. در نمونه حاوی ۲٪ مس (شکل ۴ ب)، علاوه بر FeAl فاز CuAl_2 هم شکل گرفته است که با توجه به تحقیقات پیشین اشاره شده، به مقاومت به اکسیداسیون کمک می کند. در نمونه حاوی ۷٪ مس (شکل ۴ ج) نیز تشکیل این فاز قابل مشاهده است، در عین حال که لایه آلومینا نیز در سطوح آزاد مانند نسبت قبلی مس، شکل گرفته است. در نمونه حاوی ۱۲ درصد مس (شکل ۴ د)، حضور و تشکیل ترکیبات اکسیدی (مانند Fe_2O_3 و Cu_2O) قابل مشاهده است. همین امر نشان می دهد این نمونه نتوانسته مقاومت به اکسیداسیون خوبی از خود نشان دهد.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های تحت اکسیداسیون قرار گرفته در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰۰ ساعت (الف. نمونه ۱، ب. نمونه ۲، ج. نمونه ۳، د. نمونه ۴).

ترکیبات موجود در هر نمونه در نهایت به کمک آنالیز XRD مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در نمونه ۱ تنها فاز قابل مشاهده FeAl و آلومینا است که نشان می‌دهد در اثر اکسید شدن FeAl یک لایه آلومینا روی آن ایجاد شده است که پیش از این نیز به مکانیزم تشکیل این لایه و نحوه نفوذ آلومینیم به سطح خارجی جهت تشکیل لایه مقاوم به اکسیداسیون Al_2O_3 اشاره شد. در نمونه ۲ که میزان ۲ درصد مس به آن اضافه شده است فاز $CuAl_2$ تشکیل شده است. پیش از این به تحقیقاتی اشاره شد که نشان می‌داد حضور این از تاثیر مثبت بر مقاومت به اکسیداسیون دارد. احتمالاً، از این رو است که در نمونه حاوی ۲٪ مس، میزان مقاومت به اکسیداسیون افزایش پیدا کرده است. در نمونه حاوی ۷٪ مس نیز فاز $CuAl_2$ قابل مشاهده است. از این رو این نمونه هم مقاومت به اکسیداسیون بیشتری در مقایسه با نمونه فاقد مس از خود نشان می‌دهد. در نمونه با ۱۲٪ مس، در کنار فازهای قبلی، وجود ترکیبات اکسید مس و آهن نیز مشهود است. پدیده‌ای که در نمونه‌های قبلی مشاهده نمی‌شد. این یافته، بحث‌هایی را که قبلاً ارائه شد، تأیید می‌کند. یعنی این نمونه دارا مقاومت به اکسیداسیون نیست اکسیدهای مس و آهن قابلیت تولید نداشتند. تشخیص $CuAl_2$ در نتایج XRD را می‌توان به شکل‌گیری این فاز در مرحله سنتز نسبت داد.



شکل ۵: نتایج XRD به دست آمده از نمونه‌های تحت اکسیداسیون قرار گرفته در دمای ۸۰۰ °C به مدت ۱۰۰ ساعت.

نتیجه گیری

آلومینایدهای آهن به دلیل داشتن مقاومت به اکسیداسیون، کاربردهای وسیعی را در صنعت به خود اختصاص داده‌اند. هر عاملی که بتواند این خاصیت را بهبود بخشد می‌تواند در بهبود عملکرد آنها موثر باشد. از این رو در این تحقیق، به بررسی تاثیر مس بر مقاومت اکسیداسیون FeAl پرداخته شد. نتایج به دست آمده از بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی، آنالیز XRD، EDS و بررسی تغییرات وزن ایجاد شده در نمونه‌ها نشان داد که استفاده از مقدار بهینه مس به طور قابل توجهی می‌تواند مقاومت به اکسیداسیون آلومیناید آهن را افزایش دهد. برای این منظور بر اساس نمودار تعادلی فاز برای سیستم دوتایی Cu-Al، نمونه‌هایی با ۲٪، ۷٪ و ۱۲٪ مس (با توجه به میزان آلومینیم موجود در هر نمونه) تهیه شد. نمونه‌ها با نسبت‌های فوق‌الذکر پس از فشرده‌سازی و سنتز در دمای ۹۵۰°C، در دماهای ۶۰۰°C، ۷۰۰°C و ۸۰۰°C برای مدت زمان‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ ساعت اکسید شدند. مشاهده شد که در همه دماهای آزمایش شده، نمونه‌های با ۲ و ۷ درصد مس افزایش جرم کمتری نسبت به نمونه‌های فاقد مس پس از اکسیداسیون، از خود نشان دادند. با این حال، افزایش میزان مس به ۱۲٪ منجر به نرخ اکسیداسیون بالاتری شد. شایان ذکر است، عملکرد مقاومت به اکسیداسیون نمونه‌های دارای ۷ درصد مس از نمونه دارای ۲ درصد مس نیز پیشی گرفت. علاوه بر این، ترکیبات حاصل و ریزساختار به دست آمده نیز به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

منابع

- [1] S. C. Deevi and W. J. Zhang, "Intermetallics: Applications," in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow et al., Eds. Oxford: Elsevier, 2001, pp. 4165-4173.
- [2] C. Houngniou, S. Chevalier, and J. P. Larpin, "High-Temperature-Oxidation Behavior of Iron-Aluminide Diffusion Coatings," *Oxidation of Metals*, vol. 65, no. 5, pp. 409-439, 2006/06/01 2006.
- [3] V. Shankar Rao, R. G. Baligidad, and V. S. Raja, "Effect of Al content on oxidation behaviour of ternary Fe-Al-C alloys," *Intermetallics*, vol. 10, no. 1, pp. 73-84, 2002/01/01/ 2002.
- [4] J. Takada, S. Yamamoto, S. Kikuchi, and M. Adachi, "Internal oxidation of Fe-Al alloys in the α -phase region," *Oxidation of Metals*, vol. 25, no. 1, pp. 93-105, 1986/02/01 1986.
- [5] X. Xu et al., "Oxidation mechanism of three Fe-Al alloys with and without addition of 0.1 at% yttrium at 800 °C," *Journal of Rare Earths*, vol. 38, no. 10, pp. 1126-1130, 2020/10/01/ 2020.
- [6] V. L. Syrovatka, A. P. Umanskiy, M. S. Yakovlieva, I. S. Martsenyuk, and V. F. Labunets, "Oxidation Resistance of Iron Aluminide Materials," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 58, no. 1, pp. 29-35, 2019/06/01 2019.
- [7] N. Babu, R. Balasubramaniam, and A. Ghosh, "High-temperature oxidation of Fe₃Al-based iron aluminides in oxygen," *Corrosion Science*, vol. 43, no. 12, pp. 2239-2254, 2001/12/01/ 2001.
- [8] F. H. Stott, K. T. Chuah, and L. B. Bradley, "Oxidation-Sulphidation of iron aluminides at high temperature," *Materials and Corrosion*, vol. 47, no. 12, pp. 695-700, 1996/12/01 1996.
- [9] R. Khoshhal, A. Masjedi, and S. V. A. N. K. Abad, "The effect of silicon on the oxidation behavior of iron aluminide produced using powder metallurgy," *Silicon*, vol. 16, no. 7, pp. 3181-3189, 2024/05/01 2024.
- [10] P. Novák and K. Nová, "Oxidation Behavior of Fe-Al, Fe-Si and Fe-Al-Si Intermetallics," vol. 12, no. 11, p. 1748, 2019.
- [11] R. Babilas, A. Bajorek, M. Spilka, A. Radoń, and W. Lonski, "Structure and corrosion resistance of Al-Cu-Fe alloys," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 30, 07/01 2020.
- [12] P. Riani, L. Arrighi, R. Marazza, D. Mazzone, G. Zanichchi, and R. Ferro, "Ternary rare-earth aluminum systems with copper: A review and a contribution to their assessment," *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, vol. 25, no. 1, pp. 22-52, 2004/02/01 2004.
- [13] S. Hayashi, D. Kudo, R. Nagashima, and H. Utsumi, "Effect of Cu on oxidation behaviour of FCC Fe-Ni-Cr-Al and Ni-Cr-Al based alloys," *Corrosion Science*, vol. 163, p. 108273, 2020/02/01/ 2020.

- [14] A. Fedorov *et al.*, "Kinetic and mechanistic study of CO oxidation over nanocomposite Cu–Fe–Al oxide catalysts," vol. 12, no. 19, pp. 4911-4921, 2020.
- [15] A. V. Fedorov *et al.*, "Structure and Chemistry of Cu–Fe–Al Nanocomposite Catalysts for CO Oxidation," *Catalysis Letters*, vol. 148, no. 12, pp. 3715-3722, 2018/12/01 2018.
- [16] T. Žumbar *et al.*, "Influence of Alumina Precursor Properties on Cu-Fe Alumina Supported Catalysts for Total Toluene Oxidation as a Model Volatile Organic Air Pollutant," vol. 11, no. 2, p. 252, 2021.
- [17] J. H. Xiang, Y. Niu, and F. Gesmundo, "The oxidation of two ternary Fe–Cu–10 at.% Al alloys in 1atm of pure O₂ at 800–900°C," *Corrosion Science*, vol. 47, no. 6, pp. 1493-1505, 2005/06/01/ 2005.
- [18] M. V. Yarmolenko, *Copper, Iron, and Aluminium Electrochemical Corrosion Rate Dependence on Temperature*. 2021.
- [19] R. Khoshhal, "Investigation of oxidation behavior of synthesized Fe₂Al₅ and FeAl," *Metal Powder Report*, vol. 74, no. 1, pp. 30-34, 2019/01/01/ 2019.
- [20] R. Khoshhal, H. Mirzaei-Ghasabe, and A. Hosseinzadeh, "The synthesis of a pure FeAl with a density greater than 95% of the theoretical density by optimizing the effective factors," *Amirkabir (Journal of Science and Technology)*, 02/14 2021.
- [21] R. Khoshhal and A. Hosseinzadeh, "Investigation of the mechanism of Fe₂Al₅ powder into FeAl powder transformation," *Metal Powder Report*, vol. 74, no. 1, pp. 25-29, 2019/01/01/ 2019.
- [22] R. Khoshhal and A. H. zadeh, "The Formation Mechanism of Iron Aluminide Phases in Fe-Al System with Different Raw Materials Ratio," (in en), *AUT Journal of Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 407-414, 2020.
- [23] R. Khoshhal and A. Vahid, "Effect of Silicon on the Synthesis of Iron Aluminides from Elemental Powders," *Silicon*, vol. 16, pp. 1-6, 11/14 2023.
- [24] N. S. Yüzbaşı *et al.*, "The effect of copper on the redox behaviour of iron oxide for chemical-looping hydrogen production probed by in situ X-ray absorption spectroscopy," *Physical Chemistry Chemical Physics*, 10.1039/C8CP01309H vol. 20, no. 18, pp. 12736-12745, 2018.
- [25] W. Dai *et al.*, "Effect of Cu on microarc oxidation coated Al–xCu alloys," *Surface Engineering*, vol. 37, no. 9, pp. 1098-1109, 2021/09/01 2021.
- [26] P. Kwolek, M. Wojnicki, and E. Csapó, "Mechanism of corrosion inhibition of intermetallic Al₂Cu in acidic solution," *Applied Surface Science*, vol. 551, p. 149436, 2021/06/15/ 2021.
- [27] C. Sánchez-Trinidad *et al.*, "Effect of the CuAl₂O₄ and CuAlO₂ Phases in Catalytic Wet Air Oxidation of ETBE and TAME using CuO/γ-Al₂O₃ catalysts," vol. 8, no. 8, pp. 1143-1150, 2019.