سید محمد امین امامی

کاربرد میکرو سوند الکترونیکی در تفسیر وبررسی ساختاری اشیای باستانی از دیدگاه متالورژیک

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

دانشجوی دکترای
مینرالوژی ومهندسی مواد
دانشگاه یوهانس گوتنبرگ ، ماینس ،آلمان

۱. مقدمه

در دنیای صنعتی امروز کانی‌ها[۱]، چه به صورت طبیعی، یعنی در بافت سنگ‌ها و فلزات و چه به صورت مصنوعی در جهت تولید آلیاژها، نسوزها، سرامیک‌ها، نیمه‌هادی‌ها و غیره، نقش عمده ای را در صنعت ایفا می‌کنند. وجود صنعت و تکنولوژی به آوری کانه‌هادر جهت مصرف بهینه این مواد، بالاخص فلزات، همواره محکی بر قدرت و پیشرفت تکنولوژی در یک کشور بوده است.

سابقه این علم در فلات ایران به هزاران سال پیش بر می‌گردد. تجربیات و فنون مختلف همواره در طول زمان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته، و در نتیجه از هزاره‌های پیشین اثراتی را برای ما به یادگار در دل خاک محفوظ نگاه داشته است. میراث به جای مانده از گذشتگان برای محققین حال حاضر تنها یک اثر از گذشته تمدن ما نیست بلکه از دید علمی، نمونه‌ای در جهت شناخت طرز تفکر و علم بالا در این فلات پهناور در برهه مشخصی از زمان است. ساخت اشیاء سفالی سابقه‌ای قریب به ۹۰۰۰ سال و اشیاء فلزی سابقه‌ای قریب به ۶۰۰۰ سال قبل از میلاد دارد. تکنیک ساخت، روش ساخت، و ایجاد شرایط کارگاهی مناسب با توجه به خصوصیات ژئومورفولوژی منطقه از جمله مسائلی است که همواره مورد توجه بوده است. به واقع می توان پنداشت که صنعتگران گذشته نه تنها از مسائل تکنیکی دوران خود آگاه بوده، بلکه در حقیقت از آینده نگری خاصی در راستای صنعت خویش برخوردار بوده اند. توجه کامل به خصوصیات ساختاری هر ماده در دنیای باستان نظیر درجه حرارت‌های پایداری، خواص پلاستیکی و کششی، قابلیت جذب آب و غیره، فاکتورهایی می‌باشند که محققان را در طی انجام مطالعات چه برروی سفال و سرامیک، و چه بر روی فلزات به روش‌های علمی فوق دقیقی متکی ساخته است. آثار به جای مانده از گذشته برای محققین همواره روشنگر راهی برای پیشبرد مسیر تکنولوژی در حال حاضر است. با شناخت و فهم این تفکرات قدم بر مسیری می گذاریم که در دل تاریخ برای ما به یادگار محفوظ مانده و ما با افتخار وارث آن هستیم.

چکیده

در سال‌های اخیر برای شناخت و درک هر چه بهتر مسائل فنی در باستان شناسی، از متخصصین علوم مختلف در قالب یک تیم تحقیقاتی منسجم کمک گرفته شده است. این مهم در جهت شناخت و مورد اهمیت قرار دادن یک روش تحقیقاتی_ پژوهشی، تحت عنوان باستان‌سنجی[۲] در باستان‌شناسی معرفی شده است. هدف از مطالعات باستان‌سنجی پی بردن به فنون به کار رفته و کشف تکنیک به ظاهر فراموش شده در دنیای باستان، جهت تولید و به کارگیری مواد است. در این رابطه نقش علوم پایه بالاخص شیمی، فیزیک و مینرالوژی حائز اهمیت است. شیمی تجزیه و روش های مختلف تجزیه شیمیایی جهت پی بردن به نوع مواد به کار برده شده و ترکیب شیمیایی حقیقی یک ماده همواره از موضوعاتی بوده که از چند دهه پیش نتایج بنیادی‌ای را برای تحقیقات باستان‌شناسی به ارمغان آورده است. تفسیر خصوصیات بلورشناسی[۳] یک ماده جهت شناخت ساختاری آن ماده، اعم از سفال، سرامیک یا شیشه و تعیین مشخصات ترمودینامیک یک ترکیب (آلیاژها) نیز از مسائلی است که اهمیت خویش را برای باستان‌شناسان روشن کرده است. پی بردن به چگونگی عوامل تاثیر گذارنده و چگونگی این تاثیر در گذشته و پیش بینی فرآیندهایی مشابه در حال حاضر، از مسائلی است که متخصصین مواد و کانی شناسی را به خود مشغول کرده است. در هر حال با توجه به پیشرفت تکنیک در دنیای امروز می‌توان یک اثر پیدا شده و محفوظ مانده در دل خاک را نه تنها

۱. Minerals

۲. Archaeometry

۳. Crystallography

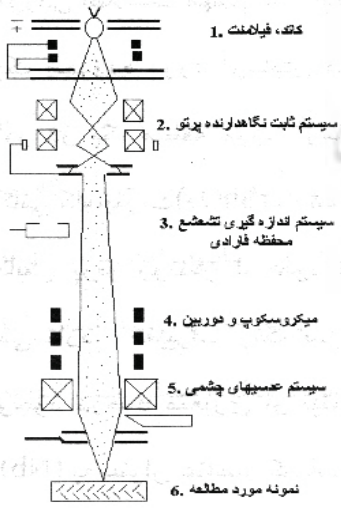
ماکروسکوپیک، بلکه میکروسکوپیک مورد بررسی قرار داد، و از نتایج حاصله نه تنها به اهمیت تاریخی یک شیء پی برد بلکه از دید میکروسکوپی می‌توان به سرگذشت و تکنیک فن آوری و به آوری یک اثر چشم دوخت.

۳. روش کار میکروسوند الکترونیکی (EMS)

میکروسوند الکترونیکی یکی از روش‌های ترکیبی در شناسایی مواد می‌باشد. این روش، ترکیبی است از میکروسکوپ الکترونی و روش شناسایی با استفاده از طیف رونتگن فلوئورسانس (XRF). در این روش یک پرتوی پر انرژی الکترونی بر روی یک سطح کاملاً صیقلی یک نمونه مورد مطالعه متمرکز می‌شود. مساحت قسمت متمرکز شده بر اثر تابش پرتو الکترونی بر روی نمونه در حدود $1\text{-}2\ \mu m^2$ می‌باشد (تصویر۱). نمونه مورد مطالعه در این روش خاصیت آنتی کاتد از خود بروز داده، لایه‌های بالایی روی سطح نمونه در اثر پرتو الکترونی تحریک شده و سیگنال هایی را تولید می‌کنند که اطلاعات زیادی راجع به منطقه مورد مطالعه در بر دارد. شدت آشکار شدن این سیگنال‌ها بسیار متفاوت است که خود ناشی از تفاوت در انرژی آزاد شده در اثر تابش پرتو الکترونی پر انرژی بر روی سطح نمونه می‌باشد. قسمتی از پرتوهای تابیده شده بر روی سطح نمونه مورد مطالعه منعکس شده که این پرتوهای منعکس شده به راحتی قابل آنالیز می‌باشند و اطلاعاتی چون موارد ذکر شده در زیر را در اختیار می‌گذارند. این پرتوها با توجه به عمق نفوذ آنان در نمونه مورد آنالیز نتایج متفاوتی را به دنبال دارند که در زیر عنوان می‌گردد.

۱) قسمتی از این پرتوها بر روی سطح نمونه تابیده شده و تا ضخامت حدودی $1\mu m$ نفوذ کرده و منعکس می‌گردند، این پرتوها مانند پرتوهای نورانی عمل کرده و می‌توانند اطلاعات زیادی در زمینه توپوگرافی سطح صیقل یافته‌ی نمونه در اختیار بگذارند.

۲) قسمت دیگری از این طیف‌های منعکس شده اطلاعاتی در رابطه با عدد اتمی(Z) ترکیبات موجود در سطح مورد تابش در اختیار می‌گذارند که به راحتی باعث شناخت ترکیبات موجود در ناحیه مورد مطالعه می‌گردد.



تصویر ۱. نمای شماتیکی از قسمت اپتیک الکترونی دستگاه میکروسوند الکترونیکی.

قسمت دیگری از پرتوهای اولیه تابیده شده که بر روی سطح نمونه تا عمق حدوداً $1\text{-}2\ \mu m$ نفوذ کرده‌اند، باعث تحریک اتم های ماده و در نتیجه ایجاد پدیده فلوئورسانس در اتم می‌گردد.

پرتوهای‌فلوئورسانس ناشی از تحریک هر اتم جزو

خصوصیات اصلی هر اتم می‌باشد. طیف های تولید شده با کمک آشکارسازهای دقیق قابل آنالیز و تفسیر بوده که در انتها منجر به شناسایی دقیق ترکیبات مورد سنجش می‌گردند. این بدین صورت است که پرتو رونتگن تابیده شده بر روی سطح نمونه، با توجه به عناصر ردیابی و تعیین شده، طول موج‌های مختلفی را از خود نشان می‌دهد. از آنجایی که شدت پرتوهای رونتگن نسبت مستقیمی با درصد تمرکز یک عنصر در یک نمونه دارد، در اثر تابیده شدن پرتوهای پر انرژی بر روی سطح نمونه قسمتی از انرژی به صورت نور ظاهر می‌گردد که قابل مشاهده هم می‌باشد. این پدیده را کاتدولومینسانس[۴] می‌نامند.

پدیده کاتدولومینسانس نیز خود باعث به دست آوردن اطلاعات مهمی در رابطه با عناصر کمیاب در یک محدوده مورد آزمایش می‌باشد. به عنوان مثال اگر در یک منطقه مورد آزمایش، نمونه مورد نظر کانی کاسیتریت(SnO_2) به همراه داشته باشد، در اثر تابش پرتو رونتگن از خود نور سبز- آبی منتشر می‌سازد. تغییرات رنگ بین سبز و آبی به دلیل وجود درصد متغیری از تیتانیوم (Ti) و نوبیدیوم (Nb) به عنوان عناصر کمیاب می‌باشد. با استفاده از میکروسوند الکتریکی می‌توان نمونه های بسیار کوچکی را مورد مطالعه قرار داد که در حدود $1\mu m^3$، حجم و وزنی حدود 10^{-12} گرم را بالغ می‌شوند.

بطور کلی پرتوهای پر انرژی تابیده شده بایستی از یکسری فیلترها و لنزهای الکترومگنتیت عبور داده شوند تا در انتها به یک پرتو خالص تبدیل شده، بر روی نمونه متمرکز گردند. پرتو متمرکز شده را می‌توان بطور اُتوماتیک جوری تنظیم کرد که هر بار یک منطقه را مورد آزمایش قرار دهد. معمولاً سطوح مورد تابش مساحتی در حدود $2\times2\ \mu m$ یا 1.5×1.5 mm را تحت پوشش قرار می‌دهند. در هنگام تابش پرتو الکترونی از هر نقطه موجود بر روی سطح نمونه، یک پرتو منعکس شده تولید می‌گردد که آن پرتو در آشکارسازهای دستگاه، مورد آنالیز و شناسایی قرار می‌گیرند. با توجه به پرتوهای منعکس شده، می‌توان میزان روشنایی پرتوهای کاتدیک که بطور کاملاً منظم تولید شده‌اند اندازه گیری و حتی بر روی مونیتور به وضوح، مشاهده کرد. پرتوهای ثانویه یا به عبارتی منعکس شده را می‌بایست با روش‌های مختلفی تصحیح کرد. این تصحیحات به دو علت لازم است:

۱) توپوگرافی سطح نمونه مورد آزمایش در قسمت‌های مختلف، سختی و قابلیت سایش متفاوتی را از خود نشان می‌دهد که نتیجه آن به صورت سطوح ناهموار در سطح نمونه ظاهر می‌گردد (این تغییرات در حد میکرون می‌باشد و با چشم غیر مسلح دیده نمی‌شوند). در اثر چنین تغییراتی پرتوهای ثانویه از شدت‌های متفاوتی برخوردار خواهند بود که خود اثبات کننده این است که نمونه مورد آزمایش از کانی‌های مختلف یا به عبارتی

۴. Cathodoluminecence

فازهای مختلف تشکیل شده است. برای کم کردن چنین تغییراتی، با توجه به روش‌های مختلف پولیش و آماده‌سازی در هنگام تولید و آماده‌سازی نمونه تصحیحاتی انجام می‌گیرد تا در هنگام آزمایش با توجه به تفاوت درجه سختی کانی‌ها، نهایت صیقلی بودن سطح مورد تابش را در اختیار داشته باشیم.

۲) از آنجایی که تشعشعات ثانویه با توجه به عدد اتمی هر عنصر با شدت‌های مختلف تولید می‌گردد، با توجه به تصاویر دریافت شده از طریق گیرنده‌ها بر روی مونیتور همیشه نمی‌توان گفت که پرتوهای ثانویه دریافت شده متعلق به کدام عنصر می‌باشد، چرا که تفاوت رنگ بر روی مونیتور برای بعضی عناصر با اعداد اتمی نزدیک به هم قابل تشخیص نیست. این خطا را می‌توان با مطابقت دادن طیف دریافت شده با پرتو رونتگن استاندارد برای هر عنصر برطرف کرد. لازم به ذکر است که در دستگاه‌های جدید این امر به طور اتوماتیک برروی مونیتور انجام می‌گیرد.

با استفاده از روش میکروسوند الکترونیکی هم می‌توان به طور کیفی از خصوصیات ساختاری، ترکیب شیمیایی، بزرگی وکوچکی فازهای به وجود آمده در یک قطعه سنگ، سرباره، سفال، سرامیک، شیشه و. . . اطلاع حاصل کرد و هم به طور کمی از مقدار و درصد وجود ترکیبات یا مواد سازنده در یک شیء اطلاعات جامعی را استخراج نمود.

۳_۱. خصوصیات و ویژگی‌های نمونه‌های مورد آزمایش

نمونه‌های مورد آزمایش با روش میکروسوند الکترونیکی می‌توانند به اشکال مختلف مورد استفاده قرار گیرند، به صورت مقاطع نازک و پولیش شده و یا به صورت پودر با دانه بندی بسیار ریز در حد میکرون. آن چیزی که در این رابطه مورد اهمیت است و تأثیر مستقیم در نتایج آزمایشات می‌گذارد این است که، تا آنجا که امکان پذیر است بایستی از یک سطح کاملاً صیقلی برخوردار بود تا بتوان به نتایج دقیقی رسید. این بدین معنی است که توپوگرافی نمونه خود از فاکتورهای مهم در انجام آزمایشات است. در رابطه با نمونه‌های مورد آزمایش بایستی به نکات زیر توجه کرد:

۱. نمونه‌ها بایستی کاملاً خشک باشند چرا که نمناکی، و به خصوص وجود مینرال‌هایی که در ساختار کریستالوگرافیک خود قابلیت جذب آب دارند، در اثر حرارت ناشی از پرتو الکترونی با شدت زیاد یا فشار ناشی از خلاء در دستگاه، ممکن است تخریب شوند.

۲. الکترون‌های ناشی از پرتاب و شلیک بر روی نمونه‌ی مورد مطالعه بایستی توانایی و آزادی حرکت بر روی سطح نمونه را داشته باشند، به همین دلیل نمونه بایستی هادی جریان الکتریکی باشد. این خاصیت را می‌توان با روکش کردن نمونه با یک لایه

نازک از زغال یا طلا بوجود آورد. لایه تولید شده بر روی نمونه بایستی حدوداً 5 nm ضخامت داشته باشد.

۳. برای جلوگیری از اثرات منفی الکتریکی و حرارتی بایستی لایه نازکی از نقره بر روی مس کشیده شود. نمونه‌ها بایستی با لایه‌ای نازک از جنس مس بر روی محل قرارگیری خود چسبانده شوند.

لازم به ذکر است که سینی‌های قرارگیری نمونه‌های مقطع نازک در اندازه‌های استاندارد می‌باشند و به همین دلیل نمونه‌های مقاطع نازک چه بر روی لام شیشه‌ای و چه به صورت نمونه‌های مانت[۴] شده برای مطالعات متالوگرافی بایستی از قطع استانداردی برخوردار باشند.

۳_۲. کاربرد میکروسوند الکترونیکی در شناخت بافت و ترکیب سرباره‌ها

در رابطه با علم سرباره‌شناسی[۵]، مطالعات متالوگرافی و میکروسوند الکترونیکی نقش بسیار عمده ای را به اثبات رسانده است. سرباره‌ها به عنوان یک شی جامد یا سنگ، تفاله های مصنوعی ناشی از عملیات ذوب و به‌آوری به حساب می‌آیند. سرباره‌های قدیمی کشف شده در مناطقی که عملیات معدنکاری و ذوب در آنجا انجام می‌شده، همواره بنیانگذار این سوال برای متخصصین بوده‌اند که براستی چه فلزی در این برهه زمانی استخراج و مورد استفاده قرار می‌گرفته است، و به چه روشی؟ در این رابطه بایستی به عوامل خاصی توجه نمود که خود در این راستا نکات قابل توجهی را برجای می‌گذارند:

- ترکیب شیمیایی پیچیده برخی از کانی‌ها، پاراژنز و چگونگی در کنار هم قرارگیری کانی‌ها در یک نمونه سنگ معدن فلزی باعث می‌شده که در هنگام ذوب و به‌آوری، فلز استخراج شده هم از خصوصیات خاصی برخوردار گردیده و تا حدودی شرایط ساختاری خود را تغییر بدهد. این تغییرات در بافت میکروسکوپی معمولی مشخص نمی‌باشند بلکه بایستی این تغییرات شیمیایی را یا با بزرگنمایی بسیار زیاد و یا با ردیابی بعضی عناصر کمیاب مشاهده کرد. این که این فلز در چه درجه حرارتی و تحت چه شرایط محیطی (Eh, pH, O_f) استخراج شده از روی بررسی فازها و کانی‌های تشکیل شده، و درجه حرارت‌های پایداری مختص هر کانی حدس زده می‌شود. از دیگر موارد مهم در بررسی و شناسایی سرباره‌ها شناخت ساختار غیر هموژن در بافت میکروسکوپی سرباره می‌باشد. این مهم را می‌توان به عنوان مثال در یک مونه از سرباره‌های آهن در تصاویر ۲ و۳ مشاهده کرد. در تصویر شماره۳ آهن به صورت مگنتیت (Fe_3O_4) با ساختار دندریتیک در یک فاز سیلیکاته فایالیت ($Fe_2[SiO_4]$) دیده می‌شود. با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر در تصویر ۴ می‌توان به مخلوط تکتونیکی Magnetite-Wuerstite پی برد. با توجه به آزمایشات

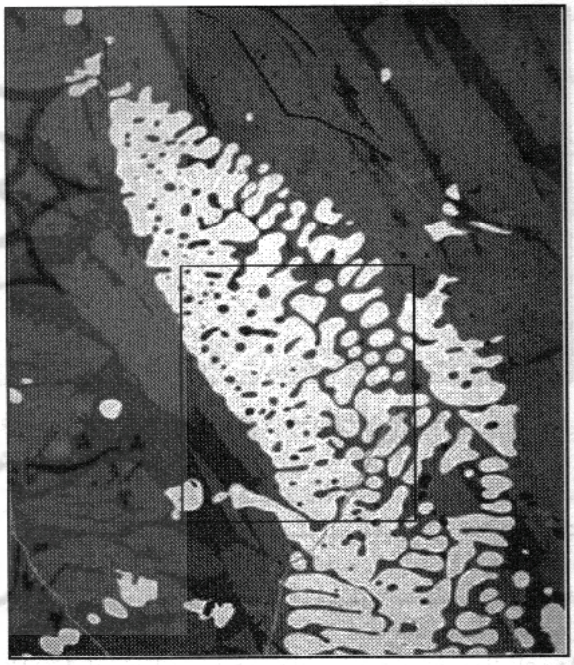
۴. Maunt
۵. Slag Petrology

میکروسوند الکتریکی علاوه بر پاراژنز فوق می‌توان به دو سری پاراژنز دیگر در این مخلوط به شرح زیر پی برد:

$$Fayalit - Magnetite\ (Fe_2[SiO_4] - Fe_3O_4)$$

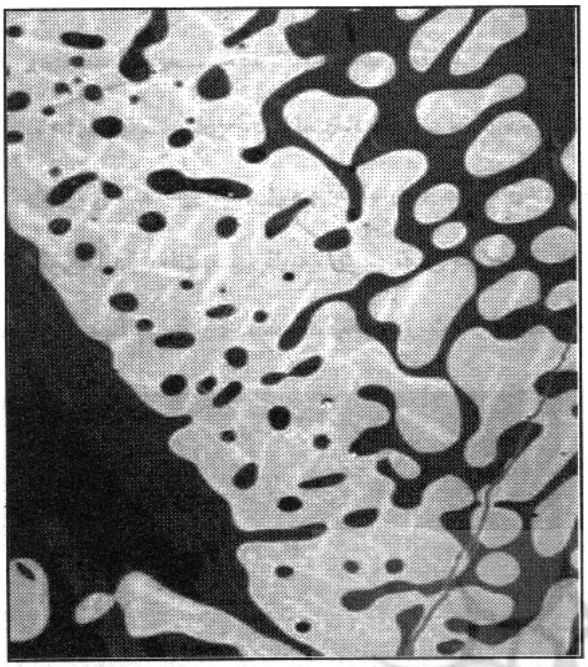
$$Magnetite - Hercynite\ (Fe_3O_4 - FeAl_2O_4)$$

وجود چنین فازهای متوالی و پاراژنز اکسیدهای آهن نشان دهنده مراحل احیا، اکسیداسیون و سوپراکسیداسیون می‌باشد، که شرح این واکنش‌ها از حوزه مطالعاتی این مقاله خارج می باشد.



تصویر ۲. نمایی از مگنتیت به رنگ روشن با ساختار دندریتیک در یک مخلوط فایالیتی به رنگ تیره.

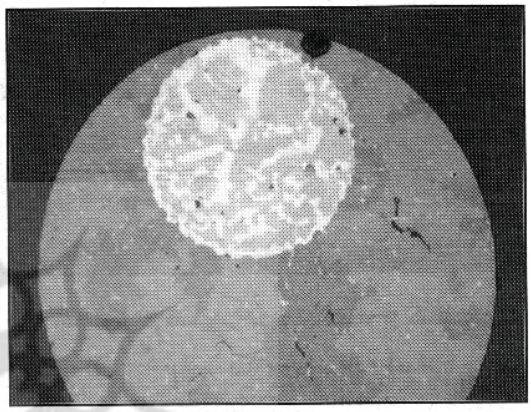
- در مرحله بعدی می‌توان با دقت در بافت میکروسکوپی نمونه حدس زد که آیا این فلز تحت یک عملیات ساده ذوب شده و از ماده مذاب تنها یک فلز به دست آمده و یا این که تکنیک تولید آلیاژ نقشی را ایفا کرده است. از جمله این مسائل را می‌توان در



تصویر ۳. تصویر انتخاب شده از مگنتیت با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر، و تشخیص فازهای موجود در مگنتیت. این فازها نشانگر کانی wuerstit به صورت مخلوط می باشند.

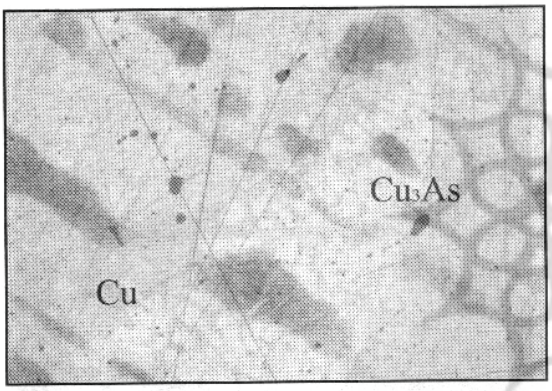
تکنولوژی استحصال نقره یا مس مشاهده کرد. در بسیاری از موارد می توان غیر هموژن بودن مس استخراجی را دلیلی بر وجود صنعت آلیاژ سازی دانست که این امر تنها با مطالعات با بزرگنمایی بسیار بالا در بافت فلز مس امکان پذیر می‌باشد. این مهم را در بافت مس در تصویر شماره ۴ می‌توان مشاهده کرد که گویای ترکیب مس همراه با ارسنیک (Cu_3As)، یعنی کانی دومیکیت (Domykite)، می‌باشد. این بافت به صورت یک گلوله بزرگ از دومیکیت به صورت ایتکتیک (Eutectic) در کنار بورنیت دیده می‌شوند. در قسمت شمالی شاهد وجود گلوله ای از مس فلزی می‌باشیم که خود از ناخالصی‌هایی به صورت ترکیبات سولفیدی در

ترکیب شیمیایی برخوردار است. وجود سولفیدها و یا وجود عناصر کمیاب در مس تنها با انجام آنالیزهای نقطه ای با استفاده از میکروسوند الکترونیکی امکان پذیر می‌باشد. برخی از این ناهمگنی‌ها در بافت مس فلزی را می‌توان نتیجه ای از فعالیت‌های آلیاژسازی دانست (تصویر شماره ۵).



تصویر ۴. گلوله بزرگی از بورنیت و دومیکیت به رنگ های آبی و ارغوانی وگلوله کوچک مخلوطی از چند کانی فلزی مس همراه با ارسنیک و مولیبدن که ناشی از عملیات آلیاژ سازی می باشد.

یکی از عمده ترین سوالات، استفاده از محصولات تکمیلی و فرعی در طی مراحل تولید محصول می‌باشد. گذشتگان به خوبی بر این نکته واقف بوده‌اند که حرارت و انرژی ارزش زیادی داشته و صرفه جویی در مصرف آن امری مهم است. بدین منظور، در طی مراحل استحصال با استفاده از اضافه و کم کردن برخی مواد، سعی در پایین آوردن نقطه ذوب برخی فلزات می‌کردند. این نتایج را با استفاده از آنالیزهای شیمیایی توسط میکروسوند الکتریکی یا رونتگن دیفراکتومتر (XRD) می‌توان مشاهده کرد. در این رابطه پس از یکسری محاسبات شیمیایی برروی نمونه‌ها می‌توان به فرمول شیمیایی حقیقی یک سرباره پی برد. در بسیاری مواقع نتیجه این گونه آزمایشات شامل وجود ناهمگونی و بافت غیر هموژن در ترکیب شیمیایی سرباره می‌باشد. نتایج حاصل از این مطالعات را در قالب نمودارهای هرمی یا سه وجهی شکل می‌توان تفسیر کرد. با توجه به این نمودارها می‌توان دید بسیار جامعی در رابطه با ترکیب شیمیایی هر نوع از سرباره به دست آورد و نیز طبقه بندی جامعی از نمونه‌ها به عمل آورد.



تصویر ۵. سطح مس فلزی به همراه لکه های ناشی از وجود کانی دومیکیت

نتایج آزمایشات میکروسوند الکتریکی به صورت درصد وزنی عنصر مورد آزمایش مشخص می‌شود (%W). این نتایج را می‌توان با محاسبه ساده‌ای به درصد مولی تبدیل کرد و به نسبت اختلاط عناصر و یا به عبارتی به فرمول شیمیایی آنان پی برد:

$$[\%W_X / \Sigma\ \%W_{(X=A_N)}]\times 1000$$

- با استناد و فهم از طریقه و روش تولید، در برخی مواقع این امکان هست که تفاوت بین پیرومتالورژی (متالورژی با استفاده از آتش و حرارت) را از هیدرومتالورژی (متالورژی با استفاده

از آب یا حلال‌های دیگر) در دنیای باستان تشخیص داد.

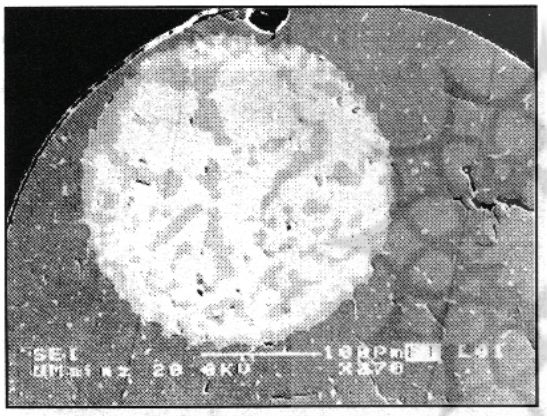
۳_۳. شناخت و بررسی خوردگی‌ها در روی سطح نمونه مورد آزمایش

از دیگر موارد قابل مشاهده و بررسی با استفاده از میکروسوند الکتریکی مشاهده تغییرات ساختاری بر روی سطح پولیش شده یک نمونه است. این خوردگی‌ها یا به عبارت صحیح‌تر، تغییرات ساختاری بر روی سطحی که با چشم غیر مسلح قابل رویت نمی‌باشند، باعث می‌شود که بتوانیم درک صحیح تری از فرآیند خوردگی بر روی سطح نمونه داشته باشیم.

اصولاً در فلزات فرآیندهای خوردگی ناشی از عوامل گوناگونی می‌باشند، که آنها را به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم بندی می‌کنند. از جمله مسائلی که نباید آن را نادیده گرفت عوامل دستگاهی است که به طور مستقیم بر روی نمونه مورد آزمایش تأثیر گذارند.

بحث بر روی شناسایی و تهیه یک شناسنامه از عوامل خوردگی در حوزه این مقاله نمی‌گنجد. آن چه که در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرد اثرات قابل مشاهده عوامل خوردگی است، که در زیر به طور خلاصه معرفی می‌گردند:

۱. در تمامی موارد در صنعت تولید آلیاژ در دوران قدیم همواره شاهد اختلاط موادی هستیم که در هنگام سرد شدن تا حدودی تحت شرایط خاص با توجه به ساختار کریستالوگرافی خود تنش و یا کشش در خود ایجاد می‌نمایند. چنین امری به عنوان مثال در مورد مس و مولیبدن صادق است که اثر آنرا در تصویر شماره ۵ نمی‌توان دید ولی تصاویر EDV (تصاویر۶ و۷) تاحدود زیادی گویای این فرآیند می‌باشند. مشاهده چنین اثراتی خود دلیلی بر اختلاط ثانویه‌ای عناصر چه به صورت مذاب و چه به صورت ترکیبی در کانی دیگر می‌باشد.

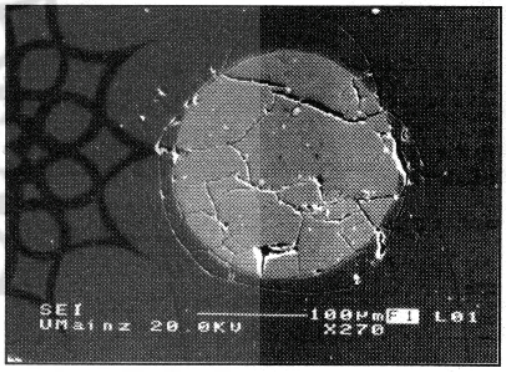


تصویر ۶. در این شکل خوردگی شیمیایی ناشی از واکنش بین محلول ها در کنار جدار خارجی گلوله کوچک دیده می شود. این واکنش های منجر به خوردگی، باعث ایجاد کناره هایی حفره ای و یا هلالی شکل شده، که ناشی از خوردگی شیمیایی می باشند. حفرات کناری و در حاشیه مس، ترکیبات سولفیدی مس می باشند که چون در درجه حرارت کمتری از مس بوجود می آیند باعث ایجاد کناره های کروی شکل در مس می شوند.

۲. تاثیرات ناشی از اسیدها و یا محلول‌ها. این تاثیرات به صورت غیر مستقیم بستگی به سنگ معدنی مادر و یا سنگ در برگیرنده موجود در منطقه دارد که اسیدی و یا بازی باشد. چنین عواملی باعث ایجاد اسیدهایی خفیف در هنگام ذوب و حتی در

هنگام درست کردن نمونه می‌گردد که معمولاً باعث خوردگی کناره‌های بعضی از فازهای کم مقاومت می‌گردد.

۳. تاثیرات آب و هوایی به طور گسترده اثر خود را در بافت شیشه‌ای ماده ذوب شده نشان می‌دهند که به صورت درزه و شکاف و یا ترک قابل مشاهده است. عوامل هوازدگی و در نتیجه اکسیداسیون اولیه، و یا اکسیداسیون ثانویه در مخلوطی که از عناصر احیاء شونده تشکیل شده و یا اشباع است، در بسیاری موارد قابل مشاهده و درک است.



تصویر ۷. در این شکل خوردگی بصورت ترک هایی ناشی از تنش های ایجاد شده در فلز مس دیده می شوند. در قسمت های کناری نیز تفاوت ناشی از فلز و ماتریکس شیشه ای سرباره در اطراف آن باعث ایجاد ترک هایی تقریباً در امتداد جدار خارجی مس شده است. در این تصویر همان طور که در زیر تصویر نیز به آن اشاره شده گلوله فلزی دارای بزرگنمایی برابر با µm 100 می باشد.

بعضی از اثرات نامبرده شده در بالا را می‌توان در تصاویر ۶ و ۷ به عنوان مثال، معرفی و تشریح کرد.

منابع

1. Meurig P. Jones, *Methoden der Mineralogie, 1997* Enke Verlag Stuttgart.

2. Eitel W., *Silicate Science, Volume IV 1966* Academic Press New York-London.

3. Keesmann I. & Moreno A. , *Archäometallurgische Untersuchungen zur Blei, Zink & Silber Technologien Monigua / Spanien, 1998.* Forschungsmagazin der Johannes Gutenberg Universität Mainz 18, Sonderausgabe Messen 2002 S . 8-16.

۴. جمشیدی، م.؛ *اصول خوردگی و حفاظت فلزات*؛ انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۷.