



برگزیده مقالات اولین و دومین همایش ملی

کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

به کوشش: مهدی رازانی و بهرام آجورلو

۱۳۹۱-۱۳۹۲

برگزیده‌ی مقالات اولین و دومین همایش ملی
کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و
مرمت میراث فرهنگی

دانشگاه هنر اسلامی تبریز
(۲۵ و ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۲-۱۳۹۱)

به کوشش
مهدی رازانی و بهرام آجورلو



دانشگاه هنر اسلامی تبریز

۱۳۹۳

سرشناسه	: همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی (نخستین: ۱۳۹۱: تبریز)
عنوان و نام پدیدآور	: برگزیده‌ی مقالات اولین و دومین همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی.../ به کوشش مهدی رازانی، بهرام آجورلو.
مشخصات نشر	: تبریز: دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۴۱۵ ص: مصور (رنگی)، جدول، نمودار: ۲۲×۲۹ س.م.
شابک	: 978-600-93946-8-5
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
موضوع	: باستان‌سنجی -- ایران -- کنگره‌ها
موضوع	: آثار فرهنگی -- ایران -- نگهداری و مرمت -- کنگره‌ها
شناسه افزوده	: آجورلو، بهرام، ۱۳۵۴ - گردآورنده
شناسه افزوده	: رازانی، مهدی، ۱۳۶۳ - گردآورنده
شناسه افزوده	: همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی (دومین: ۱۳۹۲: تبریز)
رده بندی کنگره	: ۸۱۳۹۳۵/۷۵/۷CC
رده بندی دیویی	: ۹۳۰/۱۰۲۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۷۵۶۵۵۲



برگزیده‌ی مقالات اولین و دومین همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی
در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی دانشگاه هنر اسلامی تبریز
۱۳۹۱-۱۳۹۲

مهدی رازانی و بهرام آجورلو (به ویرایش)

ناشر: دانشگاه هنر اسلامی تبریز، نشر الکترونیک
نوبت چاپ اول: ۱۳۹۳
تعداد صفحه و قطع: - وزیری

امور فنی و نظارت بر آماده سازی: مؤسسه فرهنگی میراث مهر آفرین
(با همکاری: سحر احمد خان بیگی، نگار کاظمی پور و سمیرا جعفری)

تبریز، خیابان آزادی، میدان حکیم نظامی، صندوق پستی، ۴۵۶۷-۵۱۳۸
کد پستی: ۵۱۶۴۷۳۶۹۳۱؛ تلفن: ۰۴۱)۳۵۴۱۹۹۷۰
research@tabriziau.ac.ir

فهرست مندرجات

پیشگفتار

بیانیه‌ی تبریز

بخش اول: برگزیده‌ی مقالات باستان‌سنجی

- ۱-۱۶ نشر القائی اشعه‌ی ایکس القائی پروتن (PIXE)
روشی غیرتخریبی برای تجزیه و تحلیل مواد در باستان‌سنجی
مسعود باقرزاده کثیری
- ۱۷-۳۵ منشاء یابی اُبسیدین‌های یافته‌شده از کاوش تپه بوینو خدا آفرین آذربایجان
به‌روش PIXE
سمیه نوری، کمال‌الدین نیکنامی، بهرام آجورلو، محمد علیزاده سولا
- ۳۷-۵۷ فرآیند گذار از عصر مفرغ به عصر آهن بر اساس مطالعات آزمایشگاهی
سفال‌های تپه سگزآباد دشت قزوین
حسن طلایی، احمد علی یاری
- ۵۹-۸۷ تحلیل داده‌های سنجش از راه دور (ژئوماتیک) در بررسی‌های
آرکئومتالورژی معادن باستانی محدوده‌ی جیان و فریادان در استان فارس
سید محمد امین امامی، بامشاد یغمایی
- ۸۹-۱۰۵ مطالعات اولیه زمین‌باستان‌شناسی بر روی مواد و مصالح خاکی
(موضوع موردی: بررسی مواد و مصالح به کار رفته در کهن‌دژ و ارگ تاریخی توس)
معین اسلامی
- ۱۰۷-۱۳۲ جعل و تقلب در آثار باستانی و هنرهای تجسمی
(مفاهیم، گونه‌شناسی، سرنوشت قانونی و روش‌های بررسی)
مهدی رازانی، بهناز نصیرزاده
- ۱۳۳-۱۴۹ گاه‌شناسی درختی و اصول آن در مطالعه‌ی آثار تاریخی
محسن محمدی آچالویی، محمد معین دلداز

بخش دوم برگزیده‌ی مقالات حفاظت و مرمت میراث فرهنگی

- مروری بر کاربرد روش‌های الکتروشیمیایی در حفاظت و مرمت آثار تاریخی فلزی
حمیدرضا بخشنده فرد
۱۶۴-۱۵۱
- مروری بر روش‌های آنالیز بست در نقاشی
امیرحسین کریمی، غلامرضا وطنخواه
۱۹۸-۱۶۵
- رديابی فناوری ساخت در ريزساختارهای آثار فلزی تاریخی
محمد مرتضوی
۲۲۹-۲۰۹
- بررسی و امکان‌سنجی استفاده از عسل میمند فارس به‌عنوان بازدارنده‌ی طبیعی خوردگی در حفاظت اشیاء برنزی تاریخی
وحید پورزرقان
۲۴۸-۲۳۱
- لزوم به کارگیری مطالعات مکانیسم تخریب در معماری صخره‌کند
روستای کندوان
مهدی رازانی، سیدمحمد امین امامی، علیرضا باغبانان، خوزه دلگادو رودریگوئز
۲۶۷-۲۴۹
- ارزیابی روش‌های استحکام‌بخشی جهت بهبود مشخصات مقاومتی سنگ‌های آهکی لوماشل
احسان محمدی، علیرضا باغبانان، فرشاد رضانی‌فر، حمید هاشم‌الحسینی، مهدی رازانی
۲۸۴-۲۶۹
- نقدی بر روش‌های حفاظت و مرمت تزئینات در مسجد مظفریه تبریز
سعید مهریار، مهدی رازانی
۳۰۷-۲۸۵
- مطالعه و بررسی فنی لایه‌های دیوارنگاره‌ی سقف گنبد بقعه‌ی سیدرکن الدین یزد
یاسر حمزوی، رسول وطن‌دوست
۳۳۳-۳۰۹
- مطالعات فن و آسیب‌شناسی یک نمونه تاپستری از مجموعه‌ی تاپستری‌های کاخ موزه‌ی نیاوران
مینا ناظر، محمد مرتضایی
۳۵۹-۳۳۵
- مروری بر فنون و روش‌های طلاکاری آثار فلزی تاریخی
محمد مرتضوی، محمدعلی گل‌عذار، احمد صالحی کاخکی
۳۷۶-۳۶۱

ردیابی فناوری ساخت در ریزساختارهای آثار فلزی تاریخی

محمد مرتضوی

استادیار دانشگاه هنر اصفهان

(مکاتبات: m.mortazavy@aui.ac.ir)

چکیده

آرکئومتالورژی زمینه‌ای از پژوهش‌های باستان‌شناسی با هدف به‌دست آوردن اطلاعات درباره متالورژی دوران باستان است. در این زمینه، آثار مختلفی از جمله اشیاء فلزی، مواد مرتبط با تولید مانند کانه‌ها، سرباره‌ها، بوته‌ها و باقی‌مانده‌های کوره به همراه ابزار مورد استفاده در ساخت، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. هر شیء فلزی که از گذشته به ما می‌رسد، حاوی شواهدی از فناوری‌های اولیه به کار رفته و سنت‌های متالورژیکی است که در ترکیب و ریزساختار آن ثبت شده است. متالوگرافی به عنوان یک روش برای بازیابی این شواهد و ردیابی فناوری ساخت اشیاء تاریخی فلزی مورد استفاده است. نتایج تحلیل‌های متالوگرافیکی با فراهم آوردن اطلاعاتی درباره روش ساخت، مواد به کار رفته، استحصال و عمل آوری، شناخت ما از گذشته را افزایش می‌دهد. از اینرو نظر به اهمیت متالوگرافی، در این مقاله مروری بر کاربردهای مختلف متالوگرافی در شناسایی فناوری‌های فلزکاری دوران باستان با مطالعه نمونه‌های تاریخی از مس و آلیاژهای آن، آلیاژهای آهن، نمونه‌های قلع اندود و زرآراسته انجام گرفته است. در این راستا، شواهد موجود در بدنه آثار فلزی تاریخی به ریزساختارهای فلزی، آخال‌ها و سرباره‌ها، تزیینات و عملیات سطحی، تخلخل، روش‌های اتصال و خوردگی طبقه بندی شده است و داده‌های حاصل از هر

یک در شناسایی ترکیب آلیاژی، روش ساخت، عملیات مکانیکی و حرارتی، عمل آوری مواد، روش‌های اتصال، پوشش‌ها و عملیات تکمیلی مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: آرکئومتالورژی، متالوگرافی، ریزساختارهای فلزی، فلزات باستانی.

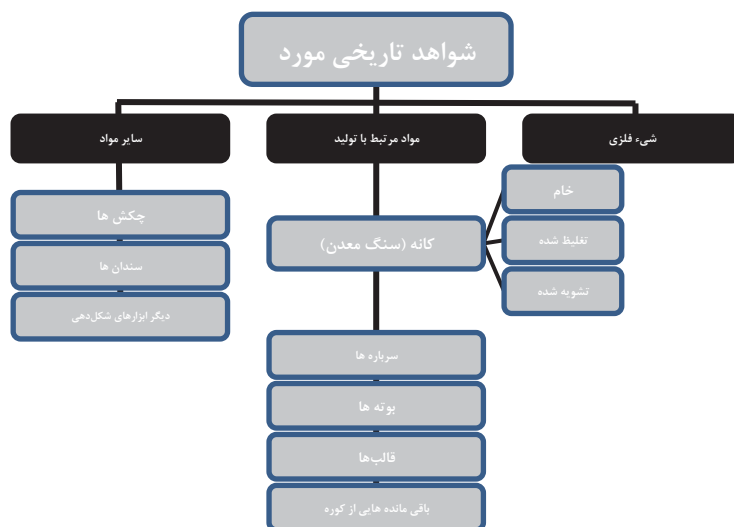
۱ - مقدمه

آگاهی از متالورژی کهن و به‌دست‌آوردن اطلاعات دقیق در مورد روش‌ها و مواد مورد استفاده در فلزگری باستان مستلزم بررسی تمامی شواهد مرتبط با این حوزه است. در این خصوص شواهد باستان-شناختی مورد بررسی در سه گروه قابل طبقه‌بندی هستند (Wayman 2004):

الف- اشیاء فلزی که به تعداد قابل توجه از بسیاری از محوطه‌های تاریخی به‌دست می‌آیند.

ب- مواد مرتبط با تولید که شامل کانه (سنگ معدن)، سرباره‌ها، بوته‌ها، قالب‌ها، کوره-ها یا باقی مانده‌هایی از آن‌ها می‌شود.

ج- سایر مواد که شامل ابزارهای مورد استفاده در ساخت مانند چکش، سندان و دیگر ابزارهای شکل‌دهی می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. نمودار نشان‌دهنده مواد و شواهد باستان‌شناختی مرتبط با فرآیندهای متالورژی (بر اساس Wayman 2004)

هر یک از این مواد اطلاعات مشخصی درباره فرایندهای فلزگری باستان فراهم می‌آورند. از این بین، اشیاء فلزی تاریخی طیف وسیعی از مواد شامل مس و آلیاژهای آن (برنز، برنج)، نقره، طلا، آهن و آلیاژهای مختلف آن، روی و سرب و آلیاژهای آن‌ها را شامل می‌شود. این فلزات علاوه بر استفاده به عنوان ماده سازنده آثار تاریخی، به عنوان پوشش و تزئین نیز به کار رفته‌اند. مجموع این فلزات در کنار روش‌های مختلف ساخت و تزئین، تنوع بسیار چشمگیری را در آثار فلزی سبب شده است. فلزگر باستان با استفاده از مواد و روش‌های مختلف آثاری ساخته است که نشان از نبوغ و خلاقیت او در استفاده از فلز را دارد (شکل ۲).

یکی از سوالاتی که به هنگام بررسی آثار فلزی تاریخی مدنظر پژوهشگران است، روش ساخت آن‌ها است که در این خصوص، مطالعه اشیاء فلزی که بخش مهمی از اطلاعات مربوط به فناوری متالورژی باستان را در خود ضبط کرده‌اند همواره مورد توجه است. فرایندهای متالورژیکی، عملیات حرارتی و مکانیکی متفاوتی که بر روی اشیاء فلزی در مراحل مختلف ساخت صورت می‌گیرد، می‌تواند منجر به ایجاد ویژگی‌های ساختاری خاصی شود که امکان ردیابی آن‌ها در ریزساختارها فلزی مسیر است. مطالعه ریزساختارهای فلزی با میکروسکوپ انعکاسی که تحت عنوان متالوگرافی شناخته می‌شود، یکی از روش‌های کاربردی در بررسی آثار فلزی تاریخی است. اطلاعات بسیار مفیدی که در این روش به دست می‌آید گاهی به هیچ یک از روش‌های موجود قابل دستیابی نیست. مطالعه میکروسکوپی مقاطع فلزی اطلاعاتی در مورد روش ساخت (ریخته‌گری یا چکش‌کاری)، عملیات حرارتی (تابکاری، آبدهی و بازپخت)، ترکیب آلیاژی، آخال‌ها و سنگ‌معدن اولیه، فرایندهای متالورژیکی (مانند سمانتاسیون)، عملیات سطحی (قلع اندود یا نقره اندود کردن)، تزئینات و روش‌های اتصال فراهم می‌آورد. علاوه بر این، مطالعه سیستم‌های خوردگی از قبیل خوردگی مرزدانه‌ای و میان‌دانه را نیز امکان‌پذیر می‌سازد. از این‌رو در این مقاله به بررسی و معرفی قابلیت‌های متالوگرافی در مطالعه فنی آثار فلزی تاریخی و ردیابی روش‌های ساخت پرداخته شده است.



شکل ۲- ظرف مسی قلع اندود متعلق به موزه قوچان (راست)، دکمه و حلقه‌های برنزی متعلق به هزاره اول ق.م. به دست آمده از بیستون، کرمانشاه (چپ).

۲- ریزساختار فلزی (ماتریس)

بررسی و مطالعه ریزساختار اشیاء فلزی از اصلی‌ترین مواردی است که برای شناخت روش ساخت آن‌ها مدنظر قرار می‌گیرد. ساختار میکروسکوپی فلزات تحت تأثیر ترکیب آلیاژی (نوع و میزان هر یک از عناصر موجود)، عملیات حرارتی و مکانیکی مختلفی که روی آن‌ها انجام می‌شود، ویژگی‌های متفاوتی پیدا می‌کنند که به‌عنوان عوامل شناساگر در ردیابی فرایندهای به‌کاررفته در شکل‌دهی و تولید آن‌ها به‌کار می‌روند. به عبارتی، میزان قلع موجود در برنز و یا کربن موجود در آهن در ریزساختار شیء تأثیرگذار است. همچنین وجود عناصر فلزی و غیرفلزی دیگر در بدنه نیز می‌تواند به صورت‌های مختلف نمایان شود. افزون بر این ریخته‌گری، چکش‌کاری و تابکاری، هر یک ساختار مشخصه‌ای ایجاد می‌کند که برای تشخیص آن‌ها به‌کار می‌رود. در ادامه مثال‌هایی از ساختار میکروسکوپی چند شیء تاریخی و تحلیل فن‌شناسی آن به‌عنوان نمونه ارائه شده است.

نمونه موردی ۱

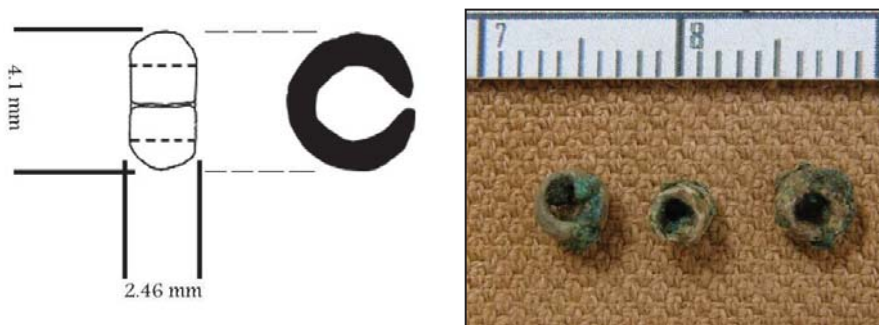
ریخته‌گری یکی از روش‌هایی است که برای ساخت اشیاء برنزی از دوران باستان مورد استفاده قرار گرفته است. ریزساختار اشیاء برنزی و آلیاژهای مس که به‌این روش ساخته شده‌اند به‌واسطه وجود ساختار دندریتی قابل تشخیص است. اما این اشیاء همواره به شکل نهایی مورد نظر ریخته‌گری نمی‌شده‌اند و پس از ریخته‌گری، مجموعه‌ای از فرایندهای چکش‌کاری و تابکاری ممکن بود بر روی آن‌ها انجام شود. یا این که مذاب ابتدا به‌صورت شمش تهیه‌شده و سپس با چکش‌کاری و تابکاری به آن شکل‌داده و فرم

ردیابی فناوری ساخت در ریزساختارهای آثار فلزی تاریخی (۲۱۳)

موردنظر تبدیل می‌شده است. در این حالت، ساختار دندریتی اولیه تغییر کرده و دیگر قابل تشخیص نخواهد بود. اما در مواردی که مغزه‌دار شدن در شمش اولیه که شیء فلزی از آن ساخته شده است شدید باشد، شبیح یا طرح دندریتی کم‌رنگی از آن در ریزساختار شیء کار شده، روی ساختار بازتبلور یافته قابل تشخیص است (Scott 2002). در این حالت با توجه به شبیح الگوی دندریتی باقی‌مانده، می‌توان فرایند ساخت شیء فلزی را که با چکش‌کاری یک شمش ریخته‌گری ساخته شده است ردیابی و شناسایی کرد.

نمونه موردی ۲

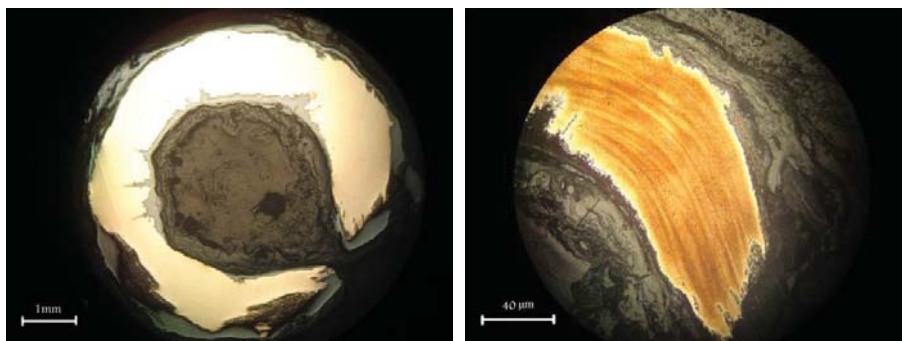
در حفاری‌های سال ۱۳۸۴ در ترائشه ۱۱ تپه‌ی تاریخی گرگی‌وند واقع در دشت بیستون در عمق ۸/۷ m، یک اسکلت انسانی متعلق به عصر آهن III (هزاره‌ی اول ق.م) به‌دست آمد که همراه آن مجموعه‌ای از آثار سفالی و فلزی دفن گردیده بود. در عملیات پاکسازی و برداشتن خاک اطراف اسکلت در ناحیه گردن جسد، مجموعه‌ای از مهره‌ها و اشکال فنری (مارپیچی) مربوط به یک گردنبند مفرغی به‌دست آمد. تعداد مهره‌ها زیاد بود و به سی عدد می‌رسید در حالی که از قطعات فلزی به شکل فنری تنها سه عدد به‌دست آمد. مهره‌ها و قسمت‌های مارپیچ این گردنبند دارای ابعاد بسیار کوچکی هستند به طوری که قطر بیرونی مهره‌ها ۴ میلی‌متر و عرضی در حدود ۲/۵ میلی‌متر دارند (شکل ۳).



شکل ۳- تصویر و ترسیم نما و برش یکی از مهره‌های گردنبند به‌دست آمده از دشت بیستون متعلق به عصر آهن

(۲۱۴) همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

شکل کروی، کوچکی ابعاد و کاربرد تزئینی این مهره‌ها استفاده از یک ترکیب آلیاژی و روش خاص شکل‌دهی را می‌طلبد. متالوگرافی زیورآلات با توجه به اندازه بسیار کوچک و همچنین ارزش آن‌ها کار سختی بوده و در بسیاری از موارد نمونه‌برداری و یا انجام مطالعات متالوگرافی امکان‌پذیر نمی‌باشد. از زیورآلات این مجموعه، با توجه به تعداد زیاد مهره‌های گردنبند یکی از آن‌ها برای مطالعات متالوگرافی انتخاب شد. تصاویر قبل از اچ، وضعیت دو قسمت انتهایی مفتول فلزی که برای ساخت مهره‌ها به کار رفته را نشان می‌دهد (شکل ۴). در این قسمت مفتول فلزی کمی نازک‌تر شده و در دو انتها به هم نرسیده است. علاوه بر این نفوذ خوردگی در ساختار فلزی که در قسمت‌هایی به صورت خوردگی بین‌دانه‌ای قابل مشاهده است نیز قبل از اچ نمایان است. نفوذ خوردگی در این بخش به صورت شعاعی از دیگر نکات مورد توجه است. پس از اچ، خطوط سیلان فلز (خطوط جریان) نمایان شد که در تمام مقطع در راستای شکل کلی قابل مشاهده است (شکل ۴).



شکل ۴- تصویر کلی مقطع مهره گردنبند قبل از اچ (چپ)، تصویر قسمت انتهایی مهره پس از اچ، خطوط سیلان نشان دهنده جهت جریان فلز طی شکل‌دهی دیده می‌شود (راست) (مرتضوی و گل‌عذار ۱۳۸۹).

در رابطه با روش ساخت مهره‌ها، متالوگرافی مقطع طولی، خطوط جریان به صورت ساختار نواری را در هماهنگی با شکل کلی نمایان ساخت. این ساختار نتیجه‌ی کشیدگی اجزاء ریزساختار فلز در جهت کار انجام شده می‌باشد (ASM Handbook

ردیابی فناوری ساخت در ریزساختارهای آثار فلزی تاریخی (۲۱۵)

1993). این الگو نشان دهنده‌ی جهت جریان فلز طی شکل دهی گرم یا سرد است. خطوط جریان نشان دهنده‌ی ساخت این مهره‌ها با شکل دهی به مفتول مفرغی است و امکان ساخت آن را با استفاده از سنبه‌کاری یک صفحه مفرغی به کلی منتفی می‌سازد. لذا مشخص است که برای ساخت این مهره‌ها ابتدا به روشی سیم (مفتول) مفرغی اولیه را تهیه کرده، آنگاه آن را حول یک محور تا کرده تا به شکل دایره درآید، از اینرو خطوط سیلان می‌تواند مربوط به هر یک از مراحل ساخت مفتول فلزی و یا شکل دهی آن برای به دست آوردن فرم دایره باشد. تاریخ ساخت سیم و مفتول فلزی تا دوران پیش از تاریخ به عقب بر می‌گردد. از آغاز دوران پیش از تاریخ، سیم بایستی با چکش کاری میله های مسی و برنزی ساخته شده باشد (Coghlan 1975). با یک چکش کاری دقیق، سیمی با مقطع تقریباً دایره به این طریق می‌توانست به دست آید و در ادامه برای بدست آوردن سطح صاف، صیقلی و فاقد آثار چکش کاری، کار نهایی سنباده زنی بوده است. همچنین برای ساخت سیم به استفاده از حدیده^۱، صفحه‌ای مجوف با سوراخ‌هایی که به طور پیوسته کوچکتر می‌شود، نیز اشاره شده است (Coghlan 1975). این عمل مشابه ساخت سیم در حال حاضر است که با عبور آن از داخل قالب‌هایی که مرتب قطر آن کوچکتر می‌شود (اکستروژن)^۲ انجام می‌گیرد.

نمونه موردی ۳

یکی از موضوعاتی که پژوهشگران حوزه فلزگری کهن به آن توجه خاص دارند، سیر تحول استفاده از فلزات و آلیاژهای مختلف توسط انسان است. در این زمینه استفاده از مس طبیعی و انتقال به مرحله استحصال و استخراج مس از سنگ معدن در مطالعه توسعه فناوری فلزگری از اهمیت بسیاری برخوردار است. برای این منظور بایستی بتوان مس طبیعی مورد استفاده در ساخت اشیاء تاریخی را از مس استحصال شده از سنگ معدن تشخیص داد. اما از آنجا که مس استحصال شده نیز می‌تواند مانند مس طبیعی از خلوص بالایی برخوردار باشد، شناسایی این دو نوع مس بر اساس آنالیزهای شیمیایی به تنهایی امکان‌پذیر نخواهد بود (Wayman 2004). در این مورد متالوگرافی در کنار روش‌های آنالیز دستگاهی می‌تواند بسیار کارآمد باشد. ریزساختار مس طبیعی به‌طور

معمول به خاطر اندازه بزرگ دانه‌ها و تراکم خیلی کم آخال‌ها و در بعضی موارد تعداد بسیار فراوان دوقلوئی‌های باریک و بلند از مس استحصال شده متمایز است (Wayman 2004).

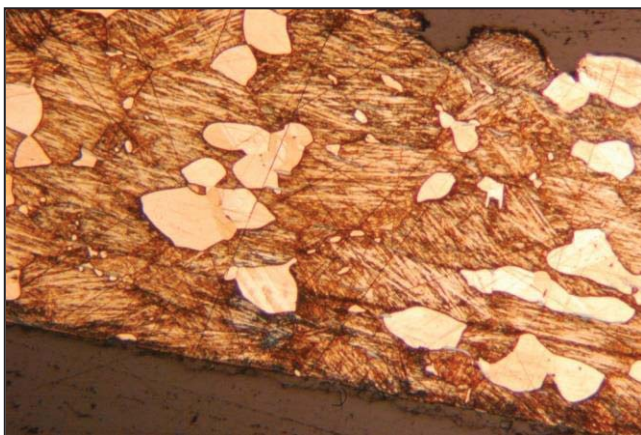
نمونه موردی ۴

نوع و میزان عناصر موجود در ترکیب آلیاژی بر ریزساختاری نهایی شیء فلزی تأثیرگذار است. بر این اساس با توجه به ریزساختارهای متالوگرافیکی امکان تعیین تقریبی میزان بعضی از عناصر وجود دارد. میزان قلع در ترکیب آلیاژی اشیاء برنزی، استحکام و سختی محصول نهایی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش میزان قلع، افزایش سختی آلیاژ برنز را به دنبال خواهد داشت. اما علاوه بر این با افزایش میزان قلع، ریزساختار فلزی که هنگام سرد شدن مذاب شکل می‌گیرد ممکن است تغییر کند. حداکثر میزان حلالیت قلع در مس در حالت جامد به صورت تئوری کمتر از 17 % wt است (Scott 2002). این بدان معنی است که در مقادیر بالاتر قلع، علاوه بر فاز α غنی از مس، فازهای دیگر مانند δ ، β و η و γ نیز ممکن است تشکیل شود (Oudbashi & Mortazavi 2011). از طرفی حرارت دهی آلیاژها برنز دارای میزان بالایی از قلع و سرد کردن سریع آن منجر به تشکیل ساختار مارتنزیتی سوزنی شکل β و نواحی مجزای فاز α خواهد شد (Mortazavi & Oudbashi 2010). بر این اساس، ترکیب آلیاژی با توجه به وجود فازهای α ، یوتکتوئید $\alpha+\delta$ و ساختار سوزنی β به طور نسبی مشخص خواهد شد. همچنین وجود فازهای مختلف مانند فاز ماتنزینی β بر انجام آبدهی دلالت می‌کند (Scott 1991). در این مورد بررسی میکروسکوپی بر روی یک ظرف برنزی (شکل ۶) مربوط به دوره اسلامی از موزه ملی ایران نشان داد که ماتریس فلزی شامل فاز سوزنی شکل β و نواحی مجزای فاز α است (شکل ۷). این ساختار، مشخصه آلیاژهای برنز دارای میزان قلع بالا^۳ نزدیک نقطه پریکتیک (حدود 22 % wt) است (Park et al. 2009). علاوه بر این وجود فاز مارتنزینی β بر حرارت‌دهی شیء برنزی تا دمایی بالای ۵۸۶ درجه سانتی‌گراد، در محدوده دمایی تشکیل فاز β (۷۹۹-۵۸۶ درجه سانتی‌گراد) و سپس سرد کردن سریع آن دلالت دارد.

ردیابی فناوری ساخت در ریزساختارهای آثار فلزی تاریخی (۲۱۷)



شکل ۶- تصویر شیء برنزی مربوط به دوره اسلامی، متعلق به موزه ملی ایران.



شکل ۷- ساختار میکروسکوپی ظرف برنزی اسلامی متعلق به موزه ملی ایران. ماتریس فلزی با ساختار سوزنی شکل فاز B و نواحی مجزای فاز α که نشان دهنده برنز با حدود 22 wt % قلع است دیده می‌شود (Mortazavi & Oudbashi 2010).

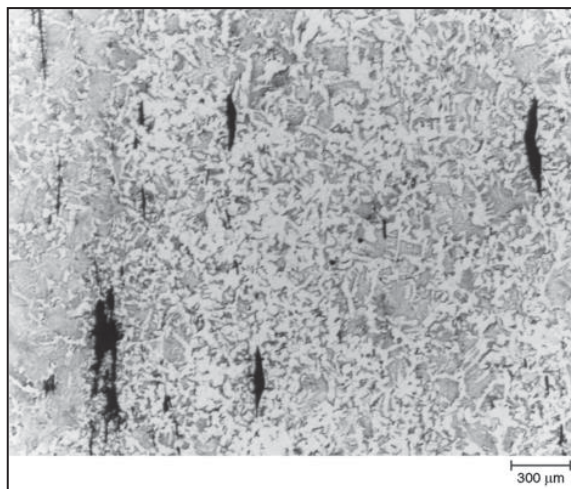
نمونه موردی ۵

سمانته کردن یکی از روش‌هایی است که در گذشته برای تولید فولاد مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش آهن کارشده با مواد کربنی پوشانده و حرارت داده می‌شود (Scott 1991). در این حالت، کربن به درون آهن نفوذ کرده و فولاد کم‌کربن تولید

(۲۱۸) همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

می‌شود. تشخیص این نوع فولادها از فولادهای بوت‌های براساس آنالیز مقدار کربن امکان‌پذیر نخواهد بود. اما متالوگرافی و بررسی ریزساختاری فولادهای تولید شده به روش سمانتاسیون تفاوت قابل ملاحظه‌ای با فولادهای بوت‌های نشان می‌دهد (Wayman 2004). با توجه به این که در فولادهای سمانته، نفوذ کربن در حالت جامد اتفاق می‌افتد، محتوی کربن در کل ساختار یکنواخت نیست. به عبارتی با توجه به نفوذ کربن از بیرون به سمت مرکز شیء، کاهش کربن از سطح به سمت داخل اتفاق می‌افتد. تغییر مقدار کربن در آهن موجب تغییر در ریز ساختار فلزی می‌شود. حداکثر حد حلالیت کربن در آهن در حالت جامد ۰/۰۲۵ درصد در دمای ۷۲۷ درجه سانتی‌گراد است که با کاهش دما پیوسته کاهش یافته و در دمای محیط به مقدار بسیار کمی می‌رسد (آیزنشتات ۱۳۷۹، گل‌عذار ۱۳۸۷).

با این میزان کربن، فاز α (فریت) شکل می‌گیرد و افزایش میزان کربن با تشکیل سمنتیت در ساختار پرلیتی همراه خواهد بود. نسبت فریت به پرلیت به میزان کربن موجود در ترکیب آلیاژی بستگی دارد. هر چقدر مقدار کربن بیشتر می‌شود، ساختار پرلیتی بیشتری شکل می‌گیرد. بر این اساس در فولادهایی که با روش سمانتاسیون آهن کار شده ساخته شده‌اند، در بخش‌های مختلف شیء از سطح به سمت داخل، نواحی کاملاً فریتی، فریتی-پرلیتی و یا کاملاً پرلیتی با توجه مقدار کربن نفوذی وجود خواهد داشت (شکل ۸).

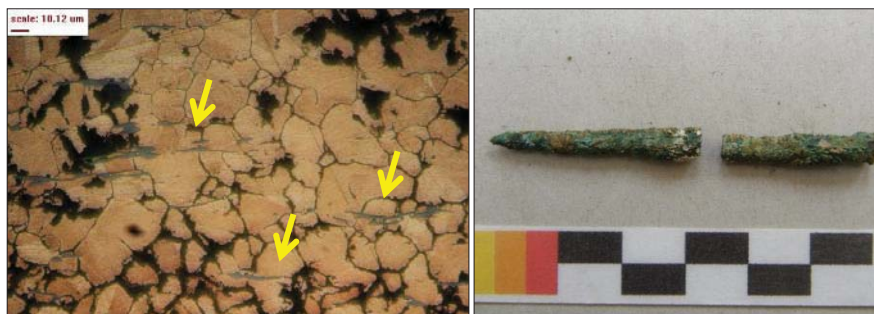


شکل ۸- ریزساختار سوهان فولادی که توزیع ناهمگن کربن مشخصه فولاد حاصل از سمانته کردن را نشان می‌دهد (Wayman 2004).

۲ - آخال‌ها و سرباره‌ها

از دیگر مشخصه‌هایی که در بسیاری از موارد در ریزساختارهای فلزات تاریخی قابل مشاهده است، آخال‌ها هستند. آخال‌ها در فلزات تاریخی، اغلب ناخالصی‌هایی هستند از ترکیب سنگ معدن اولیه، که طی فرایند استحصال و تصفیه خارج نشده و در فلز باقی‌مانده‌اند. در این مورد به ویژه از آخال‌های سولفیدی مس (Cu-S) و مس و آهن (Cu-Fe-S) در آثار برنزی (Mortazavi 2011) و سرباره‌های سیلیکاتی مانند فایالیت ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) در اشیاء آهنی می‌توان نام برد (Scott 1991). گاهی نیز آخال‌ها طی استحصال تشکیل می‌شوند و در واقع ناشی از واکنش فلز مذاب با مواد مورد استفاده در فرایند استحصال و یا اکسیژن موجود در مذاب یا هوا هستند. از آن جمله اکسید مس (Cu_2O)، اکسید مس و آرسنیک (Cu-As-O) و اکسید قلع (Sn-O) را می‌توان ذکر کرد (Figueiredo et al. 2011, Scott 1991). بر این اساس ترکیب آخال‌ها در فلزات مختلف می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. آخال‌ها می‌تواند اطلاعات بسیار ارزشمندی در مباحث مربوط به فناوری استحصال، عملیات تصفیه، کانه مورد استفاده برای تهیه فلز و در مواردی تشخیص منشأ کانه فراهم آورد (Figueiredo et al. 2011). اما آن‌چه در بررسی‌های متالوگرافیکی، فارغ از ترکیب آخال‌ها مورد توجه است، شکل آن‌ها است. در مواردی آخال‌ها به صورت کشیده در امتداد طولی مقطع مشاهده می‌شوند. آخال‌های کشیده در ریزساختار نشان دهنده استفاده از چکش‌کاری در ساخت شیء فلزی است (Angelini 2007; Scott 1991). علی‌رغم استفاده از تابکاری در فرایند ساخت بسیاری از اشیائی که به روش چکش‌کاری ساخته می‌شوند، بیشتر آخال‌های غیرفلزی طی چرخه چکش‌کاری و تابکاری، بازتبلور پیدا نمی‌کند و در نتیجه به عنوان دلیلی بر چکش‌کاری شناخته می‌شوند (Scott 1990). همچنین در این مورد میزان طولیل‌شدگی با توجه به نسبت طول به عرض آخال‌ها نیز در بررسی مقدار کار انجام شده بر روی شیء مورد توجه قرار گرفته است. به عبارت دیگر هرچه چکش‌کاری بیشتری برای ساخت یک شیء انجام شده باشد، آخال‌ها تخت‌تر و کشیده‌تر می‌شوند. بر این اساس، اسکات (1990) در بررسی یک بشقاب نقره‌ای در موزه گتی با اندازه‌گیری نسبت طول به عرض آخال‌های اکسید مس I موجود در ریزساختار نقره که در محدوده

۸:۱ تا ۱۲:۱ بوده است، چکش کاری و تابکاری قابل توجهی را برای شکل‌دهی و ساخت بشقاب نتیجه می‌گیرد. نمونه‌های بی‌شماری از این نوع آخال‌ها را در اشیاء تاریخی فلزی مختلف می‌توان مشاهده کرد. مثالی از این موضوع، اشیاء آلیاژی مس متعلق به تپه سگزآباد قزوین (عصر آهن، ۸۰۰-۱۵۰۰ ق.م) است که در بررسی متالوگرافیکی شماری از آن‌ها، کشیدگی آخال‌های سولفیدی با ترکیب Cu-Fe-S مشاهده شده است (Mortazavi 1391; Mortazavi 2014). شکل ۸ یک میخ برنزی (دارای حدود ۸ wt% ۵ قلع) متعلق به تپه تاریخی سگزآباد قزوین (عصر آهن) به همراه ریزساختار آن را نشان می‌دهد. در ریزساختار مقطع طولی این نمونه، آخال‌های کشیده که در مواردی نیز به اجزاء کوچکتر شکسته و خرد شده‌است به رنگ خاکستری-آبی دیده می‌شود. کشیدگی آخال‌ها، در نتیجه چکش کاری نمونه در زمان شکل‌دهی اتفاق افتاده است و به عنوان نشانه‌ای از تأثیر عملیات مکانیکی برای ردیابی فرایند ساخت مورد توجه است. مشابه این موضوع در مورد اشیاء آهنی کارشده^۴ نیز مشاهده می‌شود. سرباره باقی‌مانده در ساختار اشیاء آهنی در نتیجه چکش کاری کشیده می‌شوند.



شکل ۸- تصویر کلی شیء شماره Sg78-9 مربوط به هزاره اول ق.م به دست آمده از تپه سگزآباد دشت قزوین (راست)، مقطع فلزی دارای آخال‌های کشیده به رنگ خاکستری-آبی در امتداد طولی نمونه، نشان دهنده استفاده از چکش کاری در ساخت شیء (چپ).

۱- تخلخل

از دیگر مواردی که در بررسی متالوگرافیکی قابل تشخیص است، وجود تخلخل در ریزساختار فلزی است. در فلزاتی که ریخته‌گری شده‌اند تخلخل و حفره‌هایی مشاهده می‌شود که می‌تواند در نتیجه گازهای حل شده در مذاب و یا حفره‌های بین‌دندریتی که طی انجماد پرنشده‌است، باشد (Scott 1991). زمانی که فلز مذاب سرد می‌شود،

ردیابی فناوری ساخت در ریزساختارهای آثار فلزی تاریخی (۲۲۱)

اکسیژن حل شده از جامد خارج شده و با فلز واکنش می‌دهد و یا این‌که در شیء ایجاد تخلخل می‌کند (شکل ۹). در مورد مس، یک واکنش یوتکتیک اتفاق می‌افتد و اکسید مس I علاوه بر فاز α شکل می‌گیرد. اگر کوپریت به مقدار زیادی وجود داشته باشد، واکنش اکسید مس I با هیدروژن باعث تشکیل بخار آب شده که در ادامه تخلخل ریخته‌گری زیادی را سبب خواهد شد (Figueiredo et al. 2011). البته باید این نکته را نیز در نظر گرفت که آماده‌سازی نامناسب نمونه‌های متالوگرافی در مواردی منجر به خروج گویچه‌های سرب از ریزساختار اشیاء مس و برنزی شده و ممکن با تخلخل ناشی از ریخته‌گری اشتباه شود.



شکل ۹- تصویر متالوگرافی مربوط به یک دوات متعلق به دوره اسلامی (اواخر قرن ۱۲ و اوایل ۱۳ م) که به روش ریخته‌گری ساخته شده است و در آن حفره‌های ناشی از ریخته‌گری دیده می‌شود (Scott 1991, 87).

۲- پوشش‌ها، عملیات تکمیلی، تزئینات

پوشش‌دهی و تزئین سطح اشیاء فلزی، چوبی و سنگی از گذشته‌های دور همواره مورد توجه بشر بوده است. تکنیک‌های مختلف طلاکاری، قلع اندود کردن آلیاژهای مس و تزئین سطح از قبیل سیاه قلم^۵ در آثار فلزی از جمله روش‌هایی است که مورد استفاده قرار گرفته است. سابقه زراندود کردن فلزات به ۳۰۰۰ ق.م در خاورمیانه برمی-

گردد و تا امروز نیز ادامه یافته است (Oddy 2000). روش‌های مختلف طلاکاری شامل استفاده از ورق طلا، طلاکاری نفوذی، ملغمه‌ای، تهی‌سازی سطحی و جانشینی الکتروشیمیایی برای پوشش و تزیین سطح به کار رفته است (Oddy 1991). در بسیاری از موارد تشخیص روش طلاکاری با بررسی سطح و به‌صورت ظاهری امکان‌پذیر نیست و حتی روش‌های آنالیز سطح نیز در این مورد چندان کارآمد نیست. بررسی مقاطع فلزی با میکروسکوپ متالوگرافی در این موارد اطلاعات بسیار مفیدی را فراهم می‌آورد.

اسکات (2000) در مطالعه حلقه‌های بینی از جنس مس به دست آمده از آمریکای جنوبی، با بررسی میکروسکوپی مقطع اشیاء لایه‌های مختلف طلا را روی سطح شناسایی کرد. همچنین در این نمونه، نفوذ لایه‌ها در بخش‌هایی مشاهده شد که در نتیجه استفاده از روش پیوند نفوذی^۶ برای اتصال ورقه‌های طلا روی سطح اتفاق افتاده است. بر این اساس، روش طلاکاری این حلقه‌ها استفاده از ورق نسبتاً ضخیم طلا، مالش آن روی سطح و حرارت ملایم برای ایجاد نفوذ متقابل زمینه و پوشش بوده است. از دیگر روش‌های طلاکاری، تهی‌سازی سطحی است که در آن آلیاژی از مس-طلا (تومباگا)^۷ یا نقره- طلا مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروج مس سطحی از آلیاژ اول و یا نقره از آلیاژ دوم سبب ایجاد سطحی غنی از طلا می‌شود. لایه طلایی با رنگ متفاوت در مقطع فلزی قابل تشخیص است.

از دیگر روش‌های پوشش‌دهی و تزیین سطح، قلع اندودکردن آثار مسی و آلیاژهای آن (برنز و برنج) است. قلع اندودکردن یک روش قدیمی است که برای بهبود مقاومت خوردگی و همچنین تزئین سطح به کار می‌رود. قلع اندودکردن ظروف برنزی و مسی از ایجاد ترکیبات سمی مس جلوگیری می‌کند (Smit et al. 2008, Suri & Banerjee 2005, Smit et al. 1996). برای قلع اندودکردن دو روش قدیمی مورد استفاده بوده است: قلع اندودکردن مالشی^۸ و قلع کاری غوطه‌وری^۹ (Meek 1986). منابع بسیاری به ترکیبات بین فلزی اتا (η ; Cu_6Sn_5)، اپسیلین (ϵ ; Cu_3Sn) و دلتا (δ ; $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$) به عنوان فازهایی که در سطح مشترک قلع- مس در سطوح قلع‌اندود تشکیل

می‌شود اشاره کرده‌اند (Scott 1991, Meek 1986). تشکیل این ترکیبات بین‌فلزی

ردیابی فناوری ساخت در ریزساختارهای آثار فلزی تاریخی (۲۲۳)

در سطح مشترک بسیار تعیین‌کننده است (Gong et al. 2009). تشکیل ترکیبات بین‌فلزی سبب ایجاد پیوند متالورژیکی بین ترکیب رویی و سطح زمینه می‌شود (Smit et al 2008). ساختار چندلایه سطوح قلع‌اندود از بیرون به داخل به صورت؛ لایه قلع، η ، ϵ و زمینه مسی به‌ترتیب بیان شده است (Meek 1986). اما این ساختار ممکن است به‌صورت پیچیده‌تری نمایان شود زیرا تغییرات دما، مدت زمان گرم کردن و ضخامت لایه قلع می‌تواند نسبت این فازها را تحت تأثیر قرار دهد. در واقع عملیات حرارتی می‌تواند سبب تشکیل، رشد و یا حذف کامل یک فاز یا لایه شود.

در بررسی یک نمونه تاریخی، وجود لایه نایکنواخت و دندانه دندانه η با رنگ سفید-خاکستری مستقیماً روی سطح مس مشاهده شد (شکل ۱۰). در تصویر متالوگرافی، لایه قلع دیده نمی‌شود در حالی که تصاویر SEM-BSE وجود لایه قلع را مشخص کرد. این موضوع با توجه به تاریخی بودن نمونه و خوردگی لایه رویی (پوشش قلع) که در تصاویر متالوگرافی با نور بازتابی معمولی به‌رنگ تیره خواهد بود قابل توجیه است. از طرفی باقی ماندن ترکیب بین‌فلزی η (Cu_6Sn_5) با توجه به مقاومت خوردگی بیشتر آن نسبت به قلع رویی و زمینه‌ی مسی منطقی است. ترکیبات بین‌فلزی نسبت به خراش مقاوم بوده و در فرایند خوردگی نیز به عنوان کاتد عمل می‌کنند (Leidheiser 1971). از این‌رو در نمونه تاریخی، پوشش رویی خورده شده و در تصاویر دیده نمی‌شود. اما وجود ترکیب بین‌فلزی η که به صورت یک لایه دندانه دندانه روی سطح مس دیده می‌شود، دلیلی بر قلع‌اندود بودن این نمونه است که با بررسی متالوگرافی مشخص گردید.



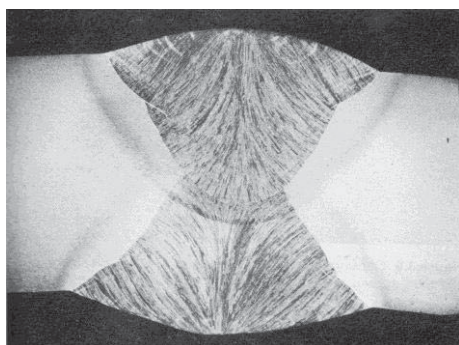
شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپی مقطع بدنه ظرف مسی قلع‌اندود تاریخی، بزرگنمایی $\times 500$ ، فاز η با رنگ روشن

(۲۲۴) همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

علاوه بر این، در یک مورد مرصع نقره‌ای روی سطح یک شیء مسی سیاه رنگ به‌عنوان نقره‌کوبی با استفاده از مفتول نقره تلقی می‌شد، اما مطالعات متالوگرافیکی نشان داد که نقوش مرصع اجرا شده روی شیء در واقع آلیاژی از Ag-Cu-Zn است که در محل شیار روی سطح ریخت‌گری شده است (Wayman 2004)

۳ - روش‌های اتصال

روش‌های مختلفی برای اتصال قطعات فلزی در گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. اتصال مکانیکی از قبیل چین دادن^{۱۰}، روی‌هم‌افتادگی درز^{۱۱} و پرچ‌کاری^{۱۲} و اتصال متالورژیکی مانند زردجوشکاری^{۱۳}، لحیم‌کاری سخت^{۱۴}، لحیم‌کاری نرم^{۱۵} و جوشکاری ذوبی^{۱۶} را می‌توان نام برد (Scott 1991). با توجه به‌خوردگی و پوشیده شدن سطح اشیاء فلزی تاریخی با محصولات خوردگی تشخیص نوع اتصال اغلب به‌راحتی و با بررسی ظاهری امکان‌پذیر نیست. با این وجود بررسی میکروسکوپی محل اتصال این امکان را فراهم می‌آورد. این موضوع به‌خصوص در مواردی که از اتصال متالورژیکی استفاده شده است بسیار کارآمد است. در این مورد تغییرات ساختاری ایجاد شده در حین اتصال برای تشخیص نوع اتصال می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. مثالی از این مورد شکل ۱۱ است که جوشکاری دو قطعه را نشان می‌دهد. تفاوت رنگ با توجه به تفاوت ماده جوشکاری به‌وضوح مشاهده می‌شود. همچنین ساختار ایجاد شده و حرارت ناشی از آن که به‌صورت هاله‌ای در اطراف محل جوش دیده می‌شود بر ذوب شدن ماده جوش و استفاده از دمای بالا در جوشکاری دلالت دارد.



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی که چگونگی تغییر دو فلز را در محل جوش نشان می‌دهد (Wheatcroft 1987)

۳ - خوردگی

از دیگری موضوعاتی که هنگام بررسی نمونه‌های متالوگرافی در اشیاء تاریخی فلزی مورد توجه است، مطالعه سیستم‌های خوردگی است شامل ترتیب لایه‌ها و خوردگی-های مرزدانه‌ای و میان دانه‌ای است. این موضوع اگرچه به‌شناسایی روش‌های ساخت اشیاء مربوط به طور مستقیم ارتباطی ندارد اما اشکالی از خوردگی، شناسایی و تشخیص شاخص‌های متالوگرافیکی مرتبط با روش‌های ساخت و ترکیب آلیاژی را در ریزساختارها بدون نیاز به اچ امکان‌پذیر می‌سازد. در این باره خوردگی خطوط لغزش در اشیاء پایه مس مثالی از این نوع است. خطوط لغزش در آثاری که چکش‌کاری سرد شده‌اند ایجاد می‌شود. در این اشیاء خطوط لغزش خورده شده و در بررسی مقطع شیء دیده می‌شود. مثالی دیگر در این خصوص، خوردگی یک فاز در بدنه شیء فلزی است در حالی که فاز دیگر خورده نشده باقی‌مانده است. نمونه این در تعدادی از آهن‌های ریخته‌گری مشاهده شده است که در آن‌ها فریت در ساختار پرلیتی خورده شده در حالی که سمنتیت نسبت به خوردگی مقاوم‌تر بوده است (Wayman 2004). شکل ۱۲ بخشی از یک مشبک فولادی صفوی متعلق به موسسه کتابخانه و موزه ملی ملک را نشان می‌دهد که دارای ساختار پرلیت-سمنتیت است. نواحی فریتی در بخش پرلیتی خورده شده در حالی که سمنتیت به طور قابل ملاحظه‌ای باقی‌مانده است.



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ نوری مقطع نمونه مربوط به مشبک فولادی متعلق به دوره صفوی که در آن خوردگی یک فاز و باقی‌ماندن فاز دیگر مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

مطالعات انجام گرفته بر روی نمونه‌های موردی فلزات مختلف تاریخی، قابلیت‌های بالای متالوگرافی و بررسی‌های ریزساختاری در ردیابی روش‌های ساخت و فرایندهای متالورژیکی را مشخص می‌کند. در این مقاله سعی شد مثال‌هایی متنوع از جنبه‌های مختلف کاربرد متالوگرافی به‌اختصار بیان شود. بر این اساس تعدادی از رایج‌ترین مشخصه‌های قابل مشاهده در تصاویر میکروسکوپ نوری مقاطع فلزات تاریخی و نقش هریک در شناسایی فرایندهای متالورژیکی بیان شد. این مثال‌ها که به‌وضوح کارآمدی متالوگرافی در مطالعات فن‌شناسی آثار فلزی را نشان می‌دهد تنها بخشی از مطالعات آرکئومتالورژی را پوشش می‌دهد که در آن شناسایی روش ساخت اثر مد نظر است. اما افزون بر این، بررسی‌های میکروسکوپی در کنار سایر روش‌های آنالیز دستگاهی اطلاعاتی در مورد سایر فرایندهای متالورژیکی نیز فراهم می‌آورد. از این‌رو اگرچه در این مقاله موضوع متالوگرافی به‌تنهایی مطرح شده‌است اما گاهی استفاده از سایر روش‌های دستگاهی نیز ضروری است. در این خصوص می‌توان به تشخیص مس طبیعی از مس استحصال شده اشاره کرد که روش‌های آنالیز عنصری در کنار متالوگرافی تمایز دقیق‌تر بین این دو نوع مس را امکان‌پذیر می‌سازد. بنابراین متالوگرافی به‌عنوان یکی از روش‌های مطالعه آثار فلزی که با صرف هزینه و زمان کم داده‌های ارزشمندی را برای حفاظت‌گران و باستان‌شناسان فراهم می‌آورد، مورد توجه است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Draw-plate
- 2- Extrusion
- 3- High-tin bronze
- 4- Wrought iron
- 5- Niello
- 6- Diffusion bonding
- 7- Tumbaga
- 8- Wipe tinning
- 9- Hot-dip tinning
- 10- Crimping
- 11- Overlapping seam

- 12- Riveting
- 13- Brazing
- 14- Hard soldering
- 15- Soft soldering
- 16- Fusion welding

منابع

- آیزنشتات، مالوین.(۱۳۷۹) ، آشنایی با خواص مکانیکی مواد، ترجمه علی حائریان اردکانی، چاپ سوم، تهران، مرکز نشر دانشگاهی.
- گلعدار، محمد علی.(۱۳۸۷)، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها، چاپ ششم، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- مرتضوی، محمد. صالحی کاخکی، احمد. گلعدار، محمد علی.(۱۳۸۹) ، بررسی پوشش قلع و ترکیبات بین فلزی در ظروف مسی قلع اندود تاریخی در ایران، چهارمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران.
- مرتضوی، محمد. گلعدار، محمد علی.(۱۳۸۹) ، ارزیابی متالورژیکی مهره‌های گردنبند باستانی به دست آمده از بیستون، کرمانشاه، مهندسی متالورژی، شماره ۳۹، صص ۴۴-۳۹.
- Angelini, I. Frizzi, T. Alberti, R. Masiero, E. Artioli, G. Molin, G. Venturion Gambari, M.(2007), Snapshot of a Final Bronze Age Metal Worker: Archaeometallurgical Study of the Hoard and the Working tools from Chiusa di Pesio, Cuneo, Italy, In Archaeometallurgy in Europe 2007, Aquileia, 17-21 June 2007, Proceeding CD.
- ASM Handbook,(1993) , vol 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, United States of America, ASM international Handbook committee.
- Coghlan, H. H.(1975), Note on the prehistoric Metallurgy of Copper and Bronze in the Old World, Great Britain, Oxford University Press.
- Figueiredo, E. Valério, P. Araújo, M. F. Silva R. J. C. and Monge Soares, A. M.(2011), Inclusions and metal composition of ancient copper-based artefacts: a diachronic view by micro-EDXRF and SEM-EDS, X-Ray Spectrometry. Vol. 40, Issue 5, pp. 325-332.
- Gong, J. Liu, C. Conway P. P. and Silberschmidt, V. V.(2009), Initial formation of CuSn intermetallic compounds between molten SnAgCu solder and Cu substrate, Journal of Scripta Materialia, Vol. 60, Issue 5, pp 333–335.
- Leidheiser, H.(1971), The Corrosion of Copper, Tin and their Alloys, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Meek, N. D.(1986), Tin-Rich Surfaces on Bronze-Some Experimental and Archaeological Considerations, Journal of Archaeometry, 28, 2, pp 133-162.
- Mortazavi, M. Oudbashi, O.(2010), Influence of Heat Treatment in Formation of Martensitic Structure in Historical Bronzes, International

Conference on Materials Heat Treatment (ICMH 2010), Islamic Azad University, Majlesi Branch, May, 11-14, 2010, Isfahan, Iran.

Mortazavi, M. Salehi Kakhki, A. Golozar, M. A. Talai, H.(2011), Preliminary Metallurgical Investigation of Copper-Based Artifacts at Tepe Sagzabad in Qazvin Plain, Iran (1500-800 BC), Iranian Journal of Archaeological Studies, Vol, 1, Issue 2, pp. 49-59.

Mortazavi, M. Salehi Kakhki, A. Golozar, M. A. Talai, H.(2014), Tracing Manufacturing Technique in an Archaeological Thin Sheet Tube form Tepe Sagzabad in Qazvin Plain, Iran (1500-800 BC), Mediterranean Archaeology and Archaeometry, Vol. 15, No 1,

Oddy W.A.(1991), Gilding: an outline of the technological history of the plating of gold on to silver or copper in the Old World, Endeavour, New Series, Volume 15, No. 1, pp 29-33.

Oddy W.A.(2000), A History of Gilding with Particular References to Statuary, in Gilded Metals; History, Technology and Conservation, Drayman-Weisser. Terry (ed.), Archetype publication Ltd, London, pp 1-20.

Oudbashi, O. Mortazavi, M.(2011), Some Aspects of Heat Treatment in Ancient and Historic Copper Alloy Artefacts, International Conference on Materials Heat Treatment (ICMH 2011), Islamic Azad University, Majlesi Branch, May10-12, 2011, Isfahan, Iran.

Park, J. S. Park C. W. and Lee, K. J.(2009), Implication of Peritectic composition in historical high-tin bronze metallurgy, journal of Materials Characterization, Vol. 60, Issue 11, pp 1268-1275.

Scott, B. G.(1971), Applications of Metallographic Examination of Iron Artifacts to Irish Archaeology, Ulster Journal of Archaeology, Third Series, Vol. 34, pp. 87-95.

Scott, D. A.(1990), A Technical and Analytical Study of Two Silver Plates in the Collection of the J. Paul Getty Museum, The J. Paul Getty Museum Journal, Vol. 18, pp. 33-52.

Scott, D. A.(1991), Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals, Getty conservation institute, Los Angeles.

Scott, D. A.(2000), A Review of Gilding Techniques in Ancient South America, In: Gilded Metal: History, Technology and Conservation, Terry Drayman-Weisser (ed.), Archetype Publications Ltd, London, pp 203-222.

Scott, D. A.(2002), Copper and bronze in art: Corrosion, Colorants, Conservation, The Getty conservation institute, Los Angeles.

Smit, Z. Istenic, J. Gerdun, V. Milic, Z. Mladenovic, A.(2005), Archaeometric analysis of Alesia Group Brooches From sites in Slovenia, Journal of Archeoloski vestnik (Arh. vest.) 56, 213-233.

Smit, Z. Istenic, J. Knific, T.(2008), Plating of archaeological metallic objects – studies by differential PIXE, Journal of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 266, Issue 10, pp. 2329–2333.

Suri, A. K. and Banerjee, S.(1996), Tin in Material Science and Technology: A Comprehensive Treatment, R.W. Chan, P. Haasen, E. J. Kramer (eds.), Vol. 8, Structure and Properties of Nonferrous Alloys, VCH publishers Inc., New York.

ردیابی فناوری ساخت در ریزساختارهای آثار فلزی تاریخی (۲۲۹)

Wayman, M.L.(2004), Metallography of Archaeological Alloys, Metallography and Microstructures, Vol 9, ASM Handbook, ASM International, , pp 468–477.

Wheatcroft, A. (ed.), (1987), Science for Conservation, Vol. 3, Adhesive and Coating, Conservation Unit of the Museum & Galleries Commission.

[صفحه سفید]