



مروری بر استحصال و ویژگی‌های آلیاژهای مس-آرسنیک در دنیای باستان (مقاله مروری)

وحید پورزرقان^{۱*}، سیدمحمدامین امامی^۲، حمیدرضا بخشنده‌فرد^۳

۱. دانش‌آموخته دکتری تخصصی حفاظت و مرمت، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استاد، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۳. دانشیار، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴

چکیده

بی‌شک یکی از مهمترین عناصر آلیاژکننده در دنیای باستان، عنصر آرسنیک است که نقش مهمی در دست‌ساخته‌های آلیاژهای اوایل عصر برنز را ایفا کرده است. آلیاژهای مس-آرسنیک و برنزهای آرسنیک بی‌تردید به‌عنوان یک آلیاژ ساخته‌شده دست بشر از جایگاه ویژه‌ای در بین باستان‌شناسان و محققان فلزگری کهن برخوردار است. آرسنیک به‌عنوان یک عنصر آلوده‌کننده و ناخالصی در تمام محیط به‌صورت پراکنده وجود دارد و فلزگر باستان با توجه به معایب و مضرات این عنصر برای اهداف آیینی و کاربردی، در تولید آلیاژ مس-آرسنیک استفاده کرده است. آرسنیک به‌عنوان یک عنصر چالش‌برانگیز در ساخت این آثار و همچنین ویژگی‌های خاصی که در سطح این آثار ایجاد می‌نماید، ظاهر می‌گردد که از مهمترین ویژگی این عنصر در ریخته‌گری، ایجاد جدایش معکوس در سطح این آثار است که ایجاد پدیده عرق آرسنیک در این آلیاژها می‌نماید. مواد معدنی اولیه مورد استفاده در ساخت این آلیاژها اولوینیت $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ یا کیلنوتیس $\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ ، سولفور آرسنید آهن FeAsS و انارژیت Cu_3AsS_4 هستند که یا به‌صورت احیاء مستقیم یا به روش ذوب هم‌زمان Co-Smelting مورد استحصال قرار گرفته‌اند و یا اینکه آرسنیک به‌صورت آگاهانه از طریق Speiss، در تولید آلیاژ مس-آرسنیک در هزاره سوم مورد استفاده قرار گرفته است. از استحصال این فلزات چندین محصول دیگر همراه با ذوب هم‌زمان که شامل مات Matt، اشپایس Speiss و سرباره Slag است، ایجاد می‌شوند. هدف اصلی این مقاله با توجه به اهمیت موضوع آلیاژهای مس-آرسنیک در حوزه باستان‌شناسی و بررسی‌های فلزگری کهن، ارائه یک بررسی جامع در مورد روش‌های استحصال، ویژگی‌های فیزیکی این آلیاژها و نقش آرسنیک و تأثیر آن به‌عنوان عنصر آلیاژی در شکل‌گیری سطح نقره‌ای و همچنین محصولات جانبی دیگر به‌عنوان موضوعی پراهمیت در بررسی آلیاژهای اوایل عصر برنز پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: آلیاژهای مس-آرسنیک، عرق آرسنیک، مات، اشپایس، سرباره، فلزگری کهن

* نویسنده مسئول مکاتبات: دانشگاه هنر، دانشکده‌ی حفاظت و مرمت.

پست الکترونیکی: Vahidpourzarghan@gmail.com

۱. مقدمه

استفاده از مس دست‌کم به ده هزار سال ق.م برمی‌گردد. نخستین شواهد برای استخراج این فلز از رسوب‌های مس طبیعی از محوطه‌ی Cagonu tepesi در جنوب شرقی ترکیه است که به شکل مهره‌هایی از مالاکیت و مس طبیعی یافت شده است. همچنین در هزاره ۹ تا ۷ ق.م در تپه علی‌کوش در غرب ایران نیز چنین مهره‌هایی کشف شده است [1]. آلیاژهای مس و آرسنیک و برنزهای آرسنیک، در سرتاسر خاور نزدیک و اروپا از اوایل هزاره چهارم ق.م تا اواخر عصر برنز تولید و استفاده شده است [2]. در آمریکا، برنزهای آرسنیک نخست در ناحیه آند [3] Andean در جنوب آمریکا توسعه یافت [4-5].

برنزهای آرسنیک در پایان هزاره ۴ و در اوایل هزاره سوم ق.م عموماً با غلظت بالای ۵ درصد آرسنیک مورد استفاده قرار گرفته است و این در حالی است که برنزهای قلعی در طی میانه هزاره سوم ق.م معرفی شده‌اند. هوسلر معتقد است که آرسنوپریت منبع اصلی آرسنیک در غرب مکزیک برای تولید گسترده برنز آرسنیک از ۱۲۰۰ ق.م تا استیلای اروپا بود. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، برخی از زنگ‌های ساخته‌شده در غرب مکزیک، حاوی ۱۳ درصد وزنی آرسنیک بوده است و حتی در برخی درصد آرسنیک بین ۲۲ تا ۲۳ درصد وزنی شناسایی شده است [6]. به‌هرحال نخستین ماده خام استفاده شده برای ذوب مس بدون شک از طریق رسوبات مس اکسیدی تهیه شده است [7].

شواهدی از ذوب مس به شکل سرباره‌های اولیه در محوطه‌های آناتولی مانند چاتال‌هیوک پیدا شده است که به هزاره ششم ق.م می‌رسد. ذوب ناخودآگاه یا تصادفی کانه‌های مس با آرسنیک در نخستین مدل‌های اولیه از آلیاژهای مس-آرسنیک با رنگ طلایی و ویژگی‌های سخت‌کنندگی خوبی حاصل شده است. شواهدی از این سرباره‌ها نیز در اریسمان [8] و تپه حصار [9] به‌صورت چندین تن از اشیای که در تولید آلیاژهای آرسنیک مورد استفاده قرار گرفته، مشاهده می‌شود.

یکی از مهمترین ناحیه‌های ایدئال برای تولید مس آرسنیک، کشور ایران است که شامل ذوب سنگ‌های معدنی پیچیده سولفور آرسنید است [10]. مهمترین محل

تولید مس آرسنیک و برنز آرسنیک در جنوب شرق ایران، شامل تمدن هلیل‌رود [11]، اسپیدر بزمان [12-16] و شهر سوخته [13, 17] مربوط به هزاره سوم ق.م است.

در آناتولی، ایران، عمان و قبرس بیشتر رسوبات مس شامل کانه‌های سولفیدی است که مس از این کان‌سنگ‌های سولفیدی استحصال شده است، این کان‌سنگ‌ها در ابتدا تحت شرایط اتمسفری، جهت تولید مس و سولفور دی‌اکسید برشته شده است. در صورت کامل نشدن، مرحله ابتدایی، ترکیب ناخالصی از مس و سولفید مس ایجاد می‌شود که به‌عنوان مات شناخته می‌شود. مات باید کاملاً با اکسیدها برشته شود و به‌وسیله کربن برای تولید بیشتر یا کمتر مس خالص کاهش یابد [18-19].

هدف از این مقاله بررسی فرایند تولید آلیاژهای مس-آرسنیک، بررسی شرایط ترمودینامیکی و فازی این آلیاژ، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و تأثیر آرسنیک از طریق روش‌های مختلف در ایجاد سطوح نقره‌ای در فلزگری کهن و همچنین محصولات جانبی تولیدشده، است.

۲. ویژگی‌های شیمیایی آرسنیک

آرسنیک با علامت شیمیایی As، جزء نیمه فلزات در جدول تناوبی قرار دارد. جایگاه این عناصر در جدول تناوبی بین فلزات و نافلزات قرار دارد. مقدار این عنصر در پوسته زمین، کم است (Emsley As= 1.8ppm) [20].

پیکربندی الکترونی آرسنیک به‌صورت $[Ar] 3d^{10} 4s^2 4p^3$ است که باعث ایجاد افزایش الکترون و اوربیتال‌های پرنشده می‌شود [21].

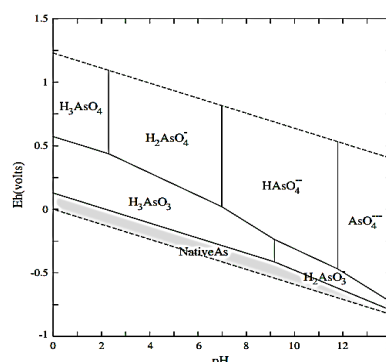
ظرفیت آرسنیک به حالت‌های مختلف اکسیداسیون که متشکل از ۳- (آرسین)، ۰ (آرسنیک)، ۳+ (آرسنیت) و ۵+ (آرسنات) است، وجود دارد. شکل ساختاری As^{3+} شامل سه پیوند هرمی و یک جفت الکترون به‌عنوان بازوی چهارم وجهی است. در محلول آبی، آرسنیت با ساختار هرمی، شامل سه لیگاند اکسیژن و جفت الکترون تنها را حفظ می‌کند. آرسنیک پنج ظرفیتی، چهاروجهی متظم است که به لیگاندهای اکسیژن پیوند خورده است و در نتیجه، آنیون آرسنات $(AsO_4)^{3-}$ پایدار را ایجاد می‌کند. آرسنیک معمولاً به‌عنوان اکسی آنیون‌های معدنی آرسنیت (As^{3+}) یا آرسنات

کاتیون‌های فلزی، خاک رس و ... pH و Eh بستگی دارد [28]. از این رو آرسنیک به دلیل سمیت آن در محدوده وسیعی از pH و Eh بسیار نگران‌کننده است. سمیت آرسنیک بین حالت‌های اکسیداسیون آرسنیک، متفاوت بیان شده است، یعنی آرسین سمی‌تر از آرسنیت و آرسنیت سمی‌تر از آرسنات است [29].

۳. ترکیبات آرسنیک با دیگر عناصر

سولفید آرسنیک به نام انارژیت Cu_3AsS_4 یک کانی راهنما، حاوی رسوبات کم مس در آهن است [30]. عناصر آرسنیک، آنتیموان و بیسموت عناصری با گرایش کالکوفیل و مقداری سیدروفیل هستند. میل ترکیبی آرسنیک با مواد معدنی سولفیدی بیشتر است اما به هر حال میزان کمی از آرسنیک می‌تواند در ترکیبات بین فلزی، نیز قرار گیرند [30]. آرسنیک به عنوان یک محصول جانبی، اغلب در مس و سنگ آهن وجود دارد. همچنین آرسنیک میل ترکیبی زیادی به کبالت و نیکل از خود نشان می‌دهد که به سنگ معدن، خصوصاً رگه‌های گرمابی مرتبط است. آرسنوپریت به عنوان حامل طلا، قابل توجه است و عمدتاً طلا به صورت ناخالصی کوچکی در آرسنوپریت وجود دارد. آرسنیک طبیعی ممکن است حاوی آنتیموان باشد و جامد SbAs را تشکیل دهد [31]. آرسنیدهای مس شامل آگودنیت، دومیکیت و ویتینیت هستند. طلا و نقره اغلب به آرسنید و همچنین آرسنیدهای سولفیدی متصل هستند. Ni-As نیکولیت (Niclilite) نسبتاً نادر است. تنانتیت فلهور یکی از رایج‌ترین سنگ معدن آرسنیک، در کنار آرسنوپریت و انارژیت است؛ مانند تتراهیدریت آنتیموان-فلهور که اغلب دارای ۲ درصد وزنی نقره است [32]. اکسیداسیون سوپرژنی آرسنوپریت یا مواد معدنی غنی از آرسنیک در ارتباط با مس (فاهلور، انارژیت) می‌تواند منجر به ایجاد مس آرسنات‌های سبزرنگ شود. آرسنات‌های سبزرنگ در گوسان‌ها و پوشش‌های شسته شده رخ می‌دهند و به آسانی می‌تواند با مس خالص اشتباه گرفته شود. تعداد زیادی از آرسنات‌ها با طیف گسترده‌ای از فلزات دیگر مانند (Pb, Cu, Fe, Zn, Ni, Co) ترکیب می‌شوند. جدایش آهن آرسنیک در هیدروکسید آهن می‌تواند منجر به تجمع آرسنیک بر روی سطح و یا در آب زیرزمینی شود [33].

(As^{5+}) یافت می‌شوند [22]. ترکیبات آرسنیک می‌تواند به صورت گونه‌های آلی یا معدنی، وجود داشته باشد و به طور معمول گونه‌های آرسنیک محلول معدنی، سمی‌تر از ترکیبات آرسنیک آلی محلول هستند [23]. گونه‌های غالب را در مرزهای خط آب، در سیستم $\text{As-H}_2\text{O}$ در دمای 25°C و در فشار ۱ bar نشان داده شده است. در یک محیط اکسندتر آرسنات به طور کلی، شکل غالب آرسنیک است که در (شکل ۱) قابل مشاهده است.



شکل ۱: دیاگرام Eh-pH برای سیستم As-O-H در 25°C و فشار ۱ bar. ΣAs در 106- تنظیم شده است.

Fig. 1: Eh-pH diagram for As-O-H system at 25°C and 1 Bar pressure. ΣAs is set at M10-6.

آرسنیک پنج ظرفیتی به شکل H_3AsO_4 در pH پایین، ۲ است. همچنین H_3AsO_4 به صورت H_2AsO_4^- ، AsO_4^{3-} و $\text{H}_2\text{AsO}_4^{2-}$ در مقادیر pH بالاتر از ۲ تجزیه می‌شود. آرسنیت به صورت H_3AsO_3 در $\text{pH}=9$ ظاهر می‌شود. H_3AsO_3 در pH بالای ۹ به صورت HASO_3^{3-} ، HASO_3^{2-} و AsO_3^{3-} تجزیه می‌شود. آرسنیت و آرسنات هر دو در آب محلول هستند. با این حال آرسنیت سمی‌تر از آرسنات است [24-25].

آرسنات تمایل بیشتری نسبت به آرسنیت برای رسوب خارج از محلول با افزودن کاتیون فلزی دارد. رسوبات فلزهای آرسنات به صورت کلی از فرم $\text{Mn}(\text{AsO}_4)_m \cdot \text{H}_2\text{O}$ پیروی می‌کند [26].

پایداری رسوبات به کاتیون مورد استفاده برای تشکیل رسوب و شرایطی که در آن رسوب نگهداری می‌شود به دما و پتانسیل اکسایش، کاهش (Eh) بستگی دارد [27]. تحرک آرسنیک به غلظت آرسنیک و سایر گونه‌های موجود (مانند

آرسنیک تحت شرایط اکسیدکننده، اکسیدها (هیدروکسی) آهن، حلالیت آرسنیک را کنترل می‌کنند. آرسنیک‌ها در نزدیک سطح متمرکز می‌شوند [30].

بیشترین حلالیت آرسنیک در مس برابر با ۷/۹۶ درصد وزنی آرسنیک در دمای 685°C است و بعد از آن حلالیت کاهش می‌یابد. در این مرحله با کاهش دما، آرسنیک اضافه‌شده به‌طور قابل توجهی دمای کریستالیزاسیون را کاهش می‌دهد [30].

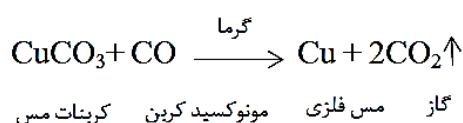
در (جدول ۱)، مهمترین ترکیبات آرسنیک با دیگر عناصر آورده شده است. از مهمترین ترکیبات فلز مس با آرسنیک شامل: آرسنوپریت FeAsS ، انارژیت Cu_3AsS_4 ، دومیکیت Cu_3As و تریپکیت CuAs_2O_4 است. شبه‌فلز آرسنیک با دیگر عناصر ترکیباتی ایجاد می‌کند که تاکنون تحقیقی در این زمینه انجام نشده است.

جدول ۱: رایج‌ترین مواد معدنی حاوی آرسنیک [34].

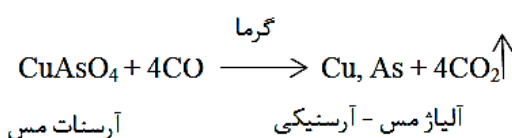
Table 1: The most common minerals Containing Arsenic [34]

اسم	ماده معدنی	فرمول
Sulfides and Solfoalts	Arsenopyrite	FeAsS
–	Arsenical pyrite	$\text{Fe}(\text{As}, \text{S})_2$
–	Cobaltite	CoAsS
–	Enargite	Cu_3AsS_4
–	Gersdorffite	NiAsS
–	Orpiment	As_2S_3
–	Proustite	Ag_3AsS_3
–	Realger	As_4S_4
–	Tennantite	$(\text{Cu}, \text{Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$
Arsenides	Domeykite	Cu_3As
–	Löllingite	FeAs_2
–	Nickeline	NiAs
–	Rammelsbergite	NiAs_2
–	Safflorite	CoAs_2
–	Sperryite	PtAs_2
As (III) Oxides	Arsenolite	As_2O_3
–	Claudite	As_2O_3
–	Gebhardite	$\text{Pb}_8(\text{As}_2\text{O}_5) \text{OCl}_6$
–	Leiteite	ZnAs_2O_4
–	Reinerite	$\text{Zn}_3(\text{AsO}_3)_2$
–	Trippkeite	CuAs_2O_4
As (V) Oxides	Austinite	$\text{CaZnAsO}_4\text{OH}$
–	Conichalcite	$\text{CaCuAsO}_4\text{OH}$
–	Erythrite	$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
–	Hörensit	$\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
–	Juhenbaumite	$\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{OH}$
–	Mansfieldite	$\text{AlAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
–	Oliverite	$\text{Cu}_2(\text{AsO}_4) \text{OH}$
–	Sarmientite	$\text{Fe}_2\text{AsO}_4\text{SO}_4\text{OH} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
–	Scorodite	$\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

شده است، برای به‌دست آوردن مس فلزی، استفاده از مواد معدنی اکسیدی آن، مناسب است که در این شرایط، محیط ذوب باید شامل محیط احیاکننده باشد؛ و این شرایط از طریق احتراق جزئی به‌وسیله زغال چوب که ایجاد مونوکسید کربن می‌کند، تهیه می‌شود. مونوکسید کربن با اکسیژن در مواد معدنی کانسنگ ترکیب می‌شود و کانه به ترکیبات فلزی آن احیا می‌شود. معادله‌های (۱-۴ و ۲-۴) مثال‌هایی از واکنش ذوب مستقیم در مجاورت کوره یا بوته است [35-36].

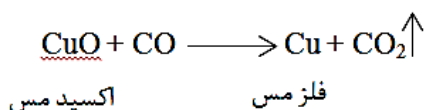
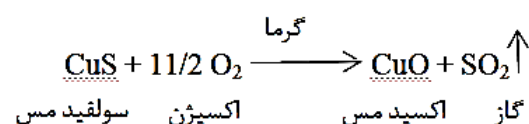


ذوب به روش احیا مستقیم از کانه اکسیدی، آلیاژی از مس و آرسنیک که دو ترکیب فلزی از مواد معدنی هستند ایجاد می‌شود که واکنش آن به‌صورت زیر است.



محقق‌ها [37-40] پیشنهاد کردند که آهنگرهای اولیه تنها انتخاب در دسترس برای استخراج فلز از کانه‌های سولفیدی، استفاده از روش دو-مرحله‌ای به شرح زیر است.

۱- برشته کردن.
۲- به دنبال برشته کردن از طریق ذوب مستقیم، کانه اکسیدی و کانه سولفید تولید شده که دارای واکنش‌های (۳-۴، ۴-۴) است.



۴. استخراج فلزات آرسنیک

فلزگران برای استفاده از مس-آرسنیک به‌عنوان یک ماده در ساخت یک شی، نیاز به استخراج آن از کانسنگ اولیه داشته‌اند؛ بنابراین استخراج و استحصال آلیاژ مس-آرسنیک از طریق ذوب احیا مستقیم یا ذوب هم‌زمان (توام) که شامل مراحل زیر است، انجام می‌شود:

۴-۱. روش احیا مستقیم

ذوب به روش احیا مستقیم در یک بوته یا کوره ساده انجام

در صورتی که مواد معدنی فلزی در کانسنگ آرسنات مس، یعنی Olivenite, $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ روی کانسنگ سولفور آرسنید مس Enargite, Cu_3AsS_4 تشکیل شود.

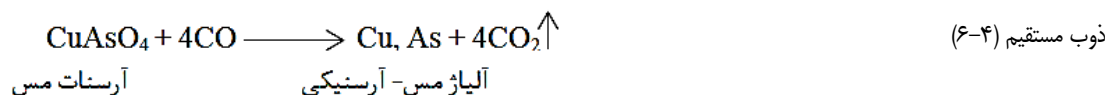
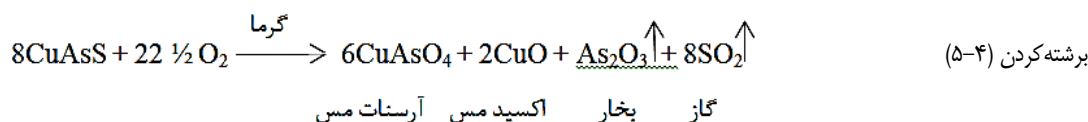
بیشتر کانه‌های حاوی آرسنیک دنیا، سولفیدی هستند. برای مثال کانه سولفور آرسنید مس مانند، انارژیت Enargite. کانه سولفور آرسنید آهن arsenopyrite, FeAsS در ناحیه آند، Andase هرچند از نظر فراوانی دارای میزان کمی از آرسنیک است اما به‌هرحال دارای عنصر آرسنیک هستند. کانه‌های سولفیدی نمی‌توانند از طریق مونواکسید کربن احیا شوند. این واقعیت دلیل بر آن شده است که بسیاری از

برشته کردن (۳-۴)

ذوب مستقیم (۴-۴)

هم مس و هم آرسنیک در طی برشته‌شدن، اکسید می‌شوند که در ابتدا به فرم آرسنات مس و تری اکسید آرسنیوس As_2O_3 که به صورت دود یا بخار سفید هستند از محیط خارج می‌شوند. مطابق با واکنش (۴-۵) در ذوب مستقیم آلیاژ Cu-As تولید می‌شود که

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته توسط لخمین نشان داده شد در صورتی که کان سنگ یک سولفور آرسنید، شامل مس و آرسنیک باشد. واکنش محصولات متفاوت به محض برشته‌شدن، مطابق واکنش‌های (۴-۵، ۴-۶) انجام می‌شود.



منجر به ایجاد مونواکسید کربن که غیر ضروری است، می‌شود. در ذوب هم‌زمان اکسید و کانه‌های سولفید با هم مخلوط می‌شوند و در کوره یا بوته آهنگری شارژ می‌شوند.

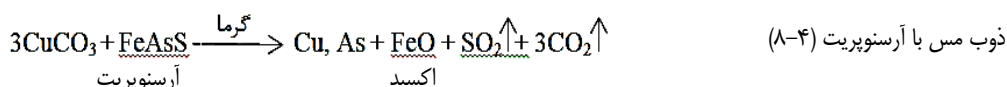
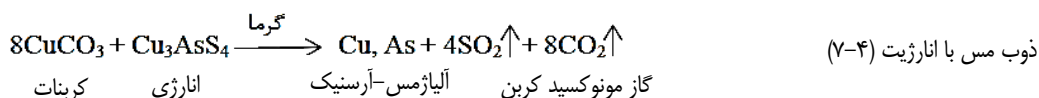
گاز کربن دی‌اکسید مطابق با واکنش (۴-۶) نیز از محیط خارج می‌گردد.

۳.۴. ذوب هم‌زمان کانه‌های اکسید مس با مس یا آهن سولفور آرسنید

در واکنش سولفور از طریق واکنش (۴-۷) اکسید شده و به عنوان یک عامل احیاکننده، به صورت گاز از محیط خارج می‌شود. زمانی که محتوای شارژ یک کانه سولفور آرسنید از مس یا آهن باشد، حذف مرحله برشته‌کردن به شدت باعث کاهش، اکسیداسیون آرسنیک به بخار As_2S_3 می‌شود. واکنش (۴-۸).

۲.۴. استخراج فلزات به روش ذوب هم‌زمان (Co-smelting)

با توجه به اینکه سولفور موجود به عنوان سولفید در مواد معدنی فلزی متعلق به کانه‌های اولیه، می‌تواند، کانه اکسید مس را به مس فلزی در ذوب هم‌زمان احیا کند [41]. شرایط ترمودینامیکی که تحت استخراج مس از اکسیدهای صورت می‌گیرد، می‌تواند با سولفور به عنوان یک عامل احیاکننده بررسی شود. از این رو زغال چوب نمی‌تواند به عنوان سوخت مورد نیاز ذوب محسوب شود، زیرا

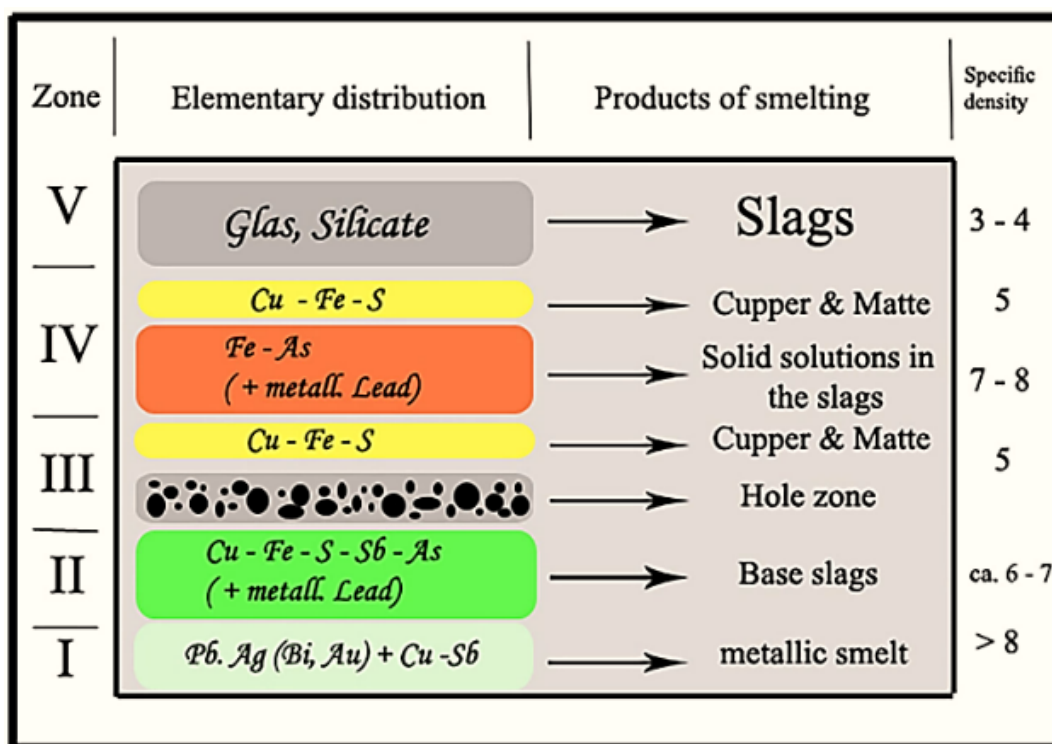


- ۱- مات (Matt): سولفیدهای مس یا مس و آهن (به عنوان مثال: CuS, Cu_2S, Cu_5FeS_4).
- ۲- اشپایس (Speiss): آرسنیدهای مس و آهن.
- ۳- سرباره (Slag): زمانی که سیلیس SiO_2 کافی در سنگ‌های معدن با اکسید آهن (FeO) موجود باشد،

۵. محصولات به دست آمده از ذوب هم‌زمان
چندین محصول دیگر ممکن است از ذوب هم‌زمان همراه فلز یا آلیاژ باشد، ایجاد شود که به غلظت گوگرد و آهن در شارژ بستگی دارد. این محصولات شامل موارد زیر است.

مشخص است که اجزاء ریز و کروی شکل فلزی و نیمه فلزی مواد به صورت پراکنده در آن رخ می‌دهد [30]. نحوه توزیع و موقعیت این عناصر در (شکل ۲) آورده شده است.

به صورت فایلیت با ترکیب (Fe_2SiO_4) که تا حدی به صورت آمورف است ایجاد می‌شود. به جز لایه نیمه بلوری در نزدیکی مات که حاوی فایلیت و به صورت کشیده است؛ که قسمت بین بخش‌های آمورف و کریستالی به وضوح



شکل ۲: شکل شماتیک از ذوب مس از سنگ معدن سولفید/آرسنید به علاوه تشکیل اشپایس آهنی. فازهای جدایش یافته در جامعه تکنولوژی باستان بر اساس وزن مخصوص شان [42,15].

Fig. 2: Schematic diagram of copper smelting from sulphide/arsenide ores with the formation of ferric sprite. Separated phases in ancient technological society based on their specific gravity [42,15].

(۱) [44]. سولفیدهای مس ممکن است حاوی مواد مختلفی از فلزات دیگر باشند در صورتی که میل به ترکیب با گوگرد را دارند. این فلزات شامل آهن، آرسنیک، آنتیموان، نیکل، کبالت و روی است. علاوه بر این مات می‌تواند حاوی طلا و نقره باشد. در بیشترین مقدار آرسنیک یا آنتیموان، جداسازی اشپایس رایج است. مات مس یا مات آهن-مس یا مات سرب، محصولات واسطه‌ای، در استخراج مس یا نقره از سنگ معدن سولفیدی یا سولفاته هستند (جدول ۲). یکی از مزایای اصلی ذوب برای مات، مایع‌سازی و جداسازی سریع آن حتی قبل از تشکیل یک سرباره سیلیسی است. نقطه ذوب سولفیدها نسبتاً کم است و این امر به جداسازی بهتر مات از سرباره کمک می‌کند.

۵-۱. مات (Matt)

کلمه مات، مخلوط مذاب سولفیدی فلزات سنگین، ترجیحاً آن‌هایی که از مس، آهن و سرب که از سرباره سیلیسی در طی فرایند ذوب جدا شده‌اند را توصیف می‌کند [43]. مات‌ها، گاهی، حاوی مقداری اکسید هستند. سرباره‌های سیلیسی و سولفیدی فقط در حد بسیار محدود قابل اختلاط هستند. سولفیدها چگالی بیشتری نسبت به سرباره سیلیسی پیرامون که با آن تولید شدند را دارد. چگالی سرباره حدود gr/cm^3 ۵-۴ است. چگالی مات (مس)، حدود gr/cm^3 ۵/۴-۸/۸ و حتی بالاتر با محتوای سرب است. بر این اساس و در حالت ایدئال یک جدایش گرانشی بین دو حالت مایع وجود دارد که کزمن جدایی سرباره و مات را توضیح داده است (شکل

جدول ۲: فازهای سولفیدی در مات‌ها در سرباره‌های فلزگری کهن و مدرن [45-47].
Table 2: Sulphide phases in mattes in archaeometallurgical and modern slags [45-47].

فارسی	اسم فاز لاتین	فرمول شیمیایی	Cu(wt%)	Fe (wt%)	Other (wt%)
برونیت	Bornite	Cu ₅ FeS ₄	۶۳/۳	۱۱/۱	–
ایدایت	Idaite	Cu ₃ FeS ₄	۵۰/۹	۱۴/۹	–
کالکوسیت، دیجنیت	Chalcocite, digenite	Cu ₉ +xS ₅	۸۰	–	–
کالکوپریت	Chalcopyrite	CuFeS ₄	۳۴/۶	۳۰/۴	–
کالکوپیرروتین (ایزوکوبانیت)	Chalcopyrrhotine (Isocubanite)	CuFe ₂ S ₃	۲۳/۴	۴۱/۲	–
کولیت	Covellite	CuS	۶۶/۵	–	–
کوبانیت	Cubanite	CuFe ₂ S ₃	۲۳/۴	۴۱/۲	–
کوپروستسبیت	Cuprostibite	Cu ₂ Sb	۵۱/۱	–	۴۸/۹(Sb)
گالنیت	Galenite	PbS	–	–	۸۶/۶ (Pb)
کوتکیت	Koutekite	Cu ₅ As ₂	۶۸	–	–
پیرروتیت	Pyrrhotite	Fe _{1-x} S	۴/۵ ≥	۶۰/۴	–
اسفالریت، وورتزیت	Sphalerite, wurzite	ZnS	–	۱۴/۷	۵۱/۶ (Zn)
تالناختی	Talnakhite	Cu ₉ Fe ₈ S ₁₆	۳۷/۲	۲۱/۸	۷/۶ (Ni)

می‌توان گفت، حلالیت اکسیژن در مات بوته، نسبت به مات کوره کمتر است. البته در آزمایش انجام شده توسط ساندمن [48] نشان می‌دهد که نه تنها اکسیژن نقش مهمی را ایفا می‌کند، بلکه دما نیز تأثیر بسیار مهمی در تشکیل برونیت Bronite دارد. با توجه به سطوح اکسیژن، برونیت در دمای کم پایدارتر است. از این رو احتمال می‌رود که سرعت خنک شدن کوره، کمتر از سرعت خنک شدن بوته باشد.

۱-۱-۵. مس مات (مس رشته‌ای Filament Copper)

مس خالص تنها در مات برونیت که از ذوب کوره به دست آمده است، یا در داخل خرج و فروج و یا در شکاف‌هایی داخل مات که به صورت رشته‌ای رشد کرده و یا به عنوان یک نوار در مرز مشترک مات و آلیاژ فلزی است، ظاهر می‌شوند. شکاف امتزاج‌پذیری در سیستم Cu-Fe-S این تأثیر را توضیح می‌دهد. در این بررسی توسط تیدمن، مس

از محصولات تشکیل شده چه در بوته و چه در کوره ذوب فلزات، شامل سرباره، مات، اشپایس و فلز است. باین حال، با توجه به بررسی‌های لخم، مات کوره و بوته از لحاظ شیمیایی دارای دو جنبه متفاوت‌اند. مات کوره دارای ترکیب کالکوسیت Cu₂S هستند، این در حالی است که مات کوره‌ای دارای ترکیب برونیت Cu₅FeS₄، با ۶ درصد وزنی آهن است که به عنوان کمک ذوب عمل می‌نماید. جنبه دوم از نظر فیزیکی، مات‌های بوته، دارای لایه‌های مجزا و منسجمی هستند. مات کالکوسیتی معمولاً تمایل به توزیع همگنی در سرتاسر دانه‌ها یا پوسته اطراف فلز را دارد، اما در مات کوره‌ای، مات‌های برونیت به صورت لایه‌ای کاملاً جداشده در بالای توده فلز دیده می‌شوند. در ترکیب مات و به ویژه نسبت آهن به مس، میزان اکسیژن موجود می‌تواند جهت اکسیداسیون آهن خارج از مات، نقش قابل توجهی را ایفا کند که نشان می‌دهد اکسیژن، در تعادل آهن به مگنتیت در سرباره آهن – اشباع از سیلیکات و در مقایسه کلی،

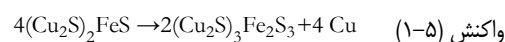
۲-۵. اشپایس (Speiss)

کلمه اشپایس شامل، ترکیبات فلزی سنگین آهن، مس، نیکل و کبالت با مقادیر عمده‌ای از آرسنیک و آنتیموان را توصیف می‌کند؛ که آن‌ها را آرسنیدها یا آنتیمونیدها می‌نامند. اشپایس و مات سولفیدی، تنها به‌صورت مقدار کمی در یکدیگر حل می‌شوند که شکاف امتزاج‌پذیر زیادی بین آن‌ها وجود دارد (شکل ۳). مات تنها چند درصد از این نیمه فلزات را شامل می‌شود. درحالی‌که اشپایس تنها شامل چند درصد گوگرد است. از نقطه‌نظر متالورژیکی، اشپایس یک محصول ناخواسته است که محصول نقره-سرب و مس را تشکیل می‌دهد [30].

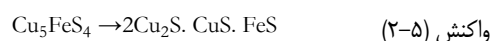
۲-۵.۱. تشکیل اشپایس

اشپایس محصول فرعی ناخواسته، مس مذاب است که عمدتاً شامل طیف گسترده‌ای از آرسنیدها و آنتیمونیدها هستند. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده توسط لخن و کلین، مات می‌تواند آرسنیک را حل کند، اما حلالیت آرسنیک در مات کاهش می‌یابد که با افزایش محتوای مس این کمبود جبران می‌شود و باعث تشکیل فازهای اشپایس در داخل مات می‌شود. تشکیل اشپایس بیشتر به غلظت آهن در سیستم بستگی دارد، زیرا آهن میل ترکیبی بیشتری برای ترکیب‌شدن با آرسنیک نسبت به مس دارد [50]. اشپایس به‌صورت محدودی می‌تواند در مات توزیع شود. در صورتی‌که اشپایس بیشتر از محدوده حد حلالیت حل شود، وارد آلیاژ می‌شود [51]. اشپایس ماده‌ای است که از نظر ظاهری شبیه به فلز است. اگرچه این ماده شکننده است و غیر از ریخته‌گری قابل کار نیست و از آن به‌عنوان یک محصول زائد و دورریختنی یاد می‌شود [36]. وقوع اشپایس باعث کاهش شدید فلز در هنگام ذوب مس می‌شود. در مورد استحصال فلزات دیگر، وقوع اشپایس، در مورد ذوب سرب، به‌عنوان مرحله مقدماتی در تولید نقره، مضر تلقی می‌شود؛ زیرا مقدار زیادی از فلز نقره را، به‌جای فلز سرب در اشپایس به دام انداخته که ممکن است توسط کوپلاسیون از یکدیگر جدا شوند [52]. اشپایس‌های غنی از سرب و مس در مراکز اروپای غربی و اوایل عصر کالکوتیک تولید شده است [53-54]، گاهی اشپایس

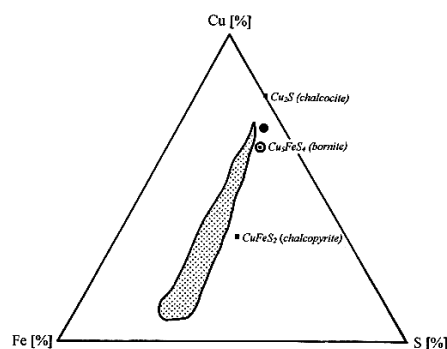
خالص از مذاب با ترکیب تقریبی $(\text{Cu}_2\text{S})_2\text{FeS}$ تقریباً ۶۲ درصد وزنی مس که این مذاب به برونیت و رسوب‌های مس به‌صورت «مس مویرگی» یا «مس رشته‌ای» تجزیه می‌شود، نشان داده شده است. تیدمن این واکنش را به‌صورت واکنش (۱-۵) شرح می‌دهد [49-50].



در واکنش (۱-۵) مذاب باید غنی از Cu_2S باشد تا واکنش انجام شود، در غیر این صورت Cu_2S تا حدی به‌صورت واکنش‌های (۲-۵ و ۳-۵) انجام می‌شود [50].



حداکثر رسوب مس در محلول مذاب، تقریباً ۶۲ درصد است. در این ترکیب ۱۵/۷ تا ۲۵ درصد وزنی، مذاب به‌صورت مس رشته‌ای رسوب می‌کند که دمای واکنش بین 185°C و 548°C است [49] که با توجه به (شکل ۳) محصولات مات ایجادشده در آزمایش‌های تیدمن به‌صورت نقطه‌ای سیاه نزدیک به قسمت بالایی شکاف امتزاج‌پذیر قرار دارد. گوشه‌ای از شکاف امتزاج‌پذیری که در آن رسوب مس از مذاب بیشتر است.



شکل ۳: فاز سه‌تایی Cu-Fe-S، نشان دهنده منطقه تجزیه مات و رسوب مس برای دماهای بین 185°C و 548°C . علائم ● نشان دهنده مات و ■ نشان دهنده شکاف امتزاج‌پذیری: ناحیه تجزیه مات و رسوب مس [49].

Fig. 3: Ternary phase diagram for the system Cu-Fe-S, indicating the region of matte decomposition and copper precipitation for temperatures between 185°C and 548°C . Symbols ● indicates Matt and ■ indicates miscibility gap: area of opaque breakdown and copper deposition [49].

به‌صورت شمش در اواخر عصر برنز استفاده شده است. احتمالاً از اشپایس برای استخراج بیشتر مس، نقره و سرب که در آن به دام افتاده‌اند استفاده شده است.

۵-۲-۲. سرباره اشپایس (Speiss Slag)

ترتوتون معتقد است که در حال حاضر هیچ آلیاژی شناخته نشده است که به این روش ساخته شده باشد، در عوض ممکن است به‌عنوان یک جزء آلیاژی، در تولید مس آرسنیک‌دار استفاده شده باشد. برای این کار می‌توان اشپایس غنی از آرسنیک را با مس در یک بوته تحت شرایط اکسیدکننده ذوب کرد (مات مس) که در این فرآیند آهن از طریق سرباره حذف خواهد شد. اگرچه مقداری آرسنیک در این فرآیند به‌عنوان دود As_2O_3 از بین می‌رود، اما به‌هرحال به‌اندازه کافی با مس ترکیب می‌شود که این مقدار از آرسنیک برای تولید مس آرسنیک‌دار مناسب است [55]. از طرف دیگر فلزکار می‌تواند از نقطه‌جوش کم آرسنیک ($614^{\circ}C$) برای انتقال آرسنیک از اشپایس به سطح آثار پایه مسی در یک بوته سربسته تحت شرایط کاهشی از طریق فرایندی با عنوان سمت‌سازی استفاده نماید. چنین شیوه نقره‌سازی با استفاده از آرسنیک، از هزاره سوم ق.م در آثاری مانند گاو هورزوتپه [56] مشاهده شده است. حدس دیگر در مورد اشپایس و آهن آرسنیک‌دار این است که به‌آسانی ذوب می‌شوند و ممکن است به‌عنوان یک فلز ریخته‌گری مورد استفاده قرار گیرد.

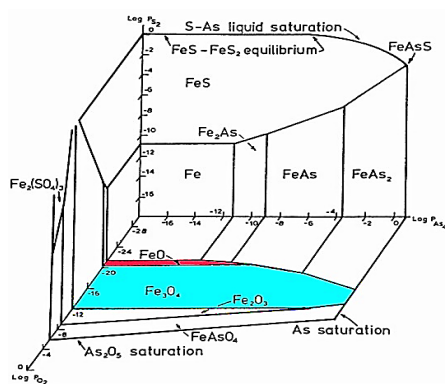
در بررسی‌های متالورژی کهن (Archaeometallurgy) دو نوع اشپایس وجود دارد که در این حوزه مورد توجه قرار گرفته است. نخست اشپایس آهنی که معمولاً مخلوطی از آهن آرسنیک‌دار و آرسنیدهای آهن است و نوع دوم اشپایس پایه فلزی که معمولاً مخلوطی از مس، نیکل، آهن و یا نقره است و به‌عنوان آرسنیدها و آنتیمونیدها اغلب با مقداری گوگرد و سرب همراه هستند [30]. از نظر سطح ماده، اشپایس به ترکیبات بین فلزی متشکل از فلزات و عناصر اصلی گروه پنجم جدول تناوبی، یعنی Bi, N, P, As, Sb اشاره دارد. در عمل تنها آرسنیک، آنتیم وان و فسفر به‌عنوان جزء آلیاژی در آهن اولیه نقش مهمی را ایفا می‌کنند و گاهی نیز در ذوب سرب براساس مواد معدنی، فسفر ظاهر می‌گردد.

هم آرسنیک و هم آنتیمون به‌عنوان عناصر آلیاژی مس استفاده می‌شود و زنجیره‌ای بین مس آرسنیک و آنتیمونی وجود دارد (تمام آرسنیک و آنتیمون در محلول جامد در فاز مس α قرار دارد). برنزه‌های آنتیمونی و آرسنیک (شامل محلول جامد α با برخی ترکیبات بین فلزی دیگر) و اشپایس مناسب (حاوی فاز α محلول جامد یا بدون آن) است. در مورد سرب باید گفت که سرب یک فلز واسطه نیست و نمی‌تواند ترکیب فلزی بین آرسنیک و آنتیمون را تشکیل دهد و نمی‌تواند بخشی از اشپایس باشد، اما به دلیل ارتباط ژئوشیمیایی سرب با بسیاری از سنگ‌های معدنی فلزات پایه و نقطه ذوب کم سرب، اغلب در هنگام تشکیل، همراه با فاز اشپایس دیده می‌شود.

اشپایس پایه فلزی از بسیاری از محوطه‌های تاریخی و پیش‌ازتاریخ، به‌ویژه هنگام ذوب سنگ‌های معدنی مس یا سرب غنی از آرسنیک یا آنتیمون به دست آمده است [57-59].

گزارش‌های زیادی از تولید اشپایس آهنی از خاور نزدیک و آسیای میانه منتشر شده است. در اوایل عصر برنز از هزاره سوم ق.م در شهر سوخته، در جنوب شرق ایران [60-61]، احتمالاً در اسپیدژ بزمان در شهرستان ایرانشهر [13-16] در پروس-کاتسامباس Poros-Katsambas در اوایل عصر برنز در شمال کرت، در کارگاه‌های جریکو (اردن) [62] در بوغازکوی Boğazköy مربوط به هزاره ۲ ق.م در مرکز ترکیه [63]، قطعاتی در کارگاه کامید ال-لوز Kamid el-Loz در لبنان [64] در کارگاه ترینز (Triyns) یونان [65-66] و همچنین در یک بافت رومی-یونانی در کیترا Kythera این ماده تولید شده است [67]. همچنین اشپایس‌های غنی از سرب و مس در مرکز اروپای غربی در اوایل عصر کالکولتیک تولید شده است [53, 68]. گاهی اشپایس پایه فلزی به‌صورت شمش در اواخر عصر برنز [69-71] و در روم باستان دادوستد شده است [72-74] که احتمالاً از این ماده برای استخراج بیشتر مس، سرب و یا نقره که در اشپایس به دام افتاده بودند استفاده می‌کردند. در قرون وسطی، اشپایس به‌صورت یک ماده ناخواسته بوده است [74-76]. به‌رحال اشپایس، محصولی مهم در هزاره اول تا سوم ق.م بوده است. حتی در کشتی غرق‌شده در دریای

طبیعی است. از این رو، ترکیب شیمیایی سرباره‌ها به صورت دامنه‌ای خاص و پیچیده از ترکیبات مختلف، در شرایط خاص ترمودینامیکی است. در بسیاری از موارد بخش‌هایی از دیواره‌های ذوب کوره و یا ماسه‌سنگ‌های حرارت دیده نیز جزئی از سرباره‌ها رده‌بندی می‌شوند که در حقیقت این نوع رده‌بندی تمایز با تعریف علمی سرباره پیدا می‌کند. بخش‌هایی از قسمت‌های کوره ذوب و ماسه‌سنگ‌های کف کوره، جزء دسته‌بندی سرباره‌ها تلقی نمی‌شوند. این بخش‌ها و قطعات کوره می‌تواند اطلاعات بسیار زیادی در مورد پخت و در بعضی موارد میزان درجه حرارت را در عملیات ذوب مشخص نماید. با توجه به شرایط استحصال و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، این سرباره‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند که شامل ۱- سرباره‌های متالورژیک (Metallurgical Slags) و ۲- سرباره‌های غیر متالورژیک (Non-Metallurgical-Technological Slags). [80-81] هستند. از نظر تئوری، سرباره‌های غنی از آهن، می‌تواند از آرسنات‌های ذوب آهن، مانند اسکوردیت در طول هوازدهی آرسنوپریت شکل گیرد. این مسئله با حضور منظم مگنتیت در این سرباره‌ها سازگار خواهد بود. برای تولید اشپایس از چنین کانی‌هایی کاملاً اکسید شده در شرایط اکسایش و کاهش، گستره‌ای از پایداری مگنتیت و ووستیت مطابق با (شکل ۴) وجود دارد. این نمودار ناحیه‌های پایداری، گوگرد، آرسنیک و اکسیژن را به طور هم‌زمان نشان می‌دهد.



شکل ۴: موقعیت حوزه‌های پایداری فازهای مختلف در سیستم Fe-As-O-S در ۹۷۳ درجه کلوین در فشارهای جزئی مختلف اکسیژن، گوگرد و آرسنیک. اقتباس شده از چاکرابورتی و لینچ [82].

Fig. 4: The position of stability domains of different phases in the Fe-As-O-S system at 973 °K at different partial pressures of oxygen, sulfur and arsenic. Adapted from Chakraborty and Lynch [82].

بالتیک اشپایس غنی از مس و نیکل دیده شده که اهمیت این محصول را در عصر برنز برجسته کرده است [9]. اشپایس شاید از ذوب سنگ‌های آرسنید مانند آرسنوپریت (FeAsS) Löllingite یا اسکوردیت (FeAsO₄.2H₂O) و سپس به عنوان فلز برای ریخته‌گری استفاده شده است یا برای تولید مس آرسنیک به عنوان جز آلیاژی استفاده شده است. در اینجا لولنگیت دارای ترکیب با ۲۷ درصد آهن و ۷۳ درصد وزنی آرسنیک است؛ بنابراین می‌توان گفت که اشپایس یک محصول متالورژیک است و نه یک ماده معدنی.

همچنین باید اشاره کرد که بسیاری از آثار مکشوف مربوط به هزاره ۳ و ۴ ق. م، مانند نهال میشمار (Nahal Mishmar) در لیوانت، ارسلان تپه در آناتولی و شنگویت (Shengavite) در قفقاز، دارای حداکثر ۲۵ درصد وزنی آرسنیک هستند و احتمالاً این آثار از اشپایس ساخته شده‌اند [77-79].

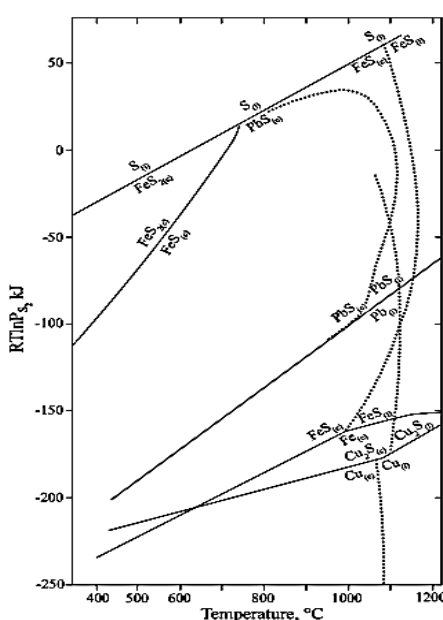
تحت شرایط تعادلی هم مس-آرسنیک و هم مس-آنتیموانی، فازهای بین فلزی خالص با حدود ۳۰ درصد وزنی به عنوان فازهای Cu₃As و Cu₃Sb شناخته شده است؛ بنابراین آلیاژهای دارای بیش از ۲۰ درصد وزنی آرسنیک و یا آنتیموان را می‌توان به عنوان هم‌مرز اشپایس پایه فلزی تعریف کرد [30].

دمای ذوب این آلیاژ با ۱۵ تا ۲۰ درصد آرسنیک نسبتاً پایین است و یک یوتکتیک دوتایی برای مس و آرسنیک، مس و آنتیموان که هر کدام در دمای کمتر از ۷۰۰°C ذوب می‌شوند، وجود دارد. همچنین وجود سرب می‌تواند دمای ذوب را بسیار کم کند و در نتیجه محدوده انجماد برای آلیاژهایی نزدیک به یوتکتیک را افزایش دهد. این ویژگی احتمالاً باعث شده است تا آلیاژهای غنی از اشپایس را برای ریخته‌گری‌های پیچیده و دشوار مناسب نماید.

۳-۵. سرباره

سرباره‌ها، تقاله‌های سیلیکاته ناشی از فرآیند ذوب هستند که به صورت یک سیلیکات مذاب و یا به صورت مخلوطی از چند سیلیکات دیده می‌شوند که دارای بافت شیشه‌ای هستند. در شرایط خاص ترکیب سرباره‌ها شامل ترکیبی از اکسیدها، فسفات‌ها، برات‌ها، سولفیدها، کاربیدها و فلزهایی به صورت

(۵) [86]. در حقیقت در ذوب مس، گوگرد تمایل بیشتری به جذب مس نسبت به آهن دارد، بنابراین گرمای تشکیل FeS بیشتر از Cu_2S است. بر این اساس واکنش $2\text{CuO} + \text{FeS} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{FeO}$ واکنش در جهت تولید بیشتر Cu_2S و از چپ به راست خواهد بود [87] در مقابل در سیستمی با هر دو فلز و عنصر اکسیژن، آهن به‌صورت قوی‌تری با اکسیژن پیوند برقرار می‌کند؛ بنابراین در یک سیستم حاوی فلزات و عناصری مانند گوگرد، اکسیژن و آهن، اکسید آهن را تولید می‌کند و از این‌رو جذب سرباره مذاب می‌شود، درحالی‌که مس ترجیحاً به‌عنوان یک فاز مذاب جداگانه با گوگرد پیوند می‌دهد تا مات را تولید کند [88].



شکل ۵: سبک الینگهام برای آهن، مس و سرب در ارتباط با گوگرد. باز ترسیم شده [86] نشان می‌دهد که در دماهای بالاتر از حدود 650°C ، خط واکنش $\text{Cu}_2\text{S} - \text{Cu}$ در فشارهای جزئی کمتر است گوگرد از خط $\text{FeS} - \text{Fe}$ ، نشان می‌دهد که مس در مقایسه با آهن ترجیحاً با گوگرد واکنش می‌دهد.

Fig. 5: Ellingham style diagram for iron, copper and lead in relation to sulphur. Redrawn [86] The graph shows that at temperatures above about 650°C , the reaction line $\text{Cu}_2\text{S} - \text{Cu}$ is lower at partial pressures of sulfur than the $\text{FeS} - \text{Fe}$ line, indicating that Cu compared to Fe It reacts preferentially with sulfur.

۶. تشکیل فازهای تشکیل شونده با توجه به

دیاگرام تعادلی فاز مس-آرسنیک

مس و آرسنیک در حالت جامد تا حدودی در یکدیگر محلول هستند. در دمای یوتکتیک یعنی در دمای 685°C ، $6/83$

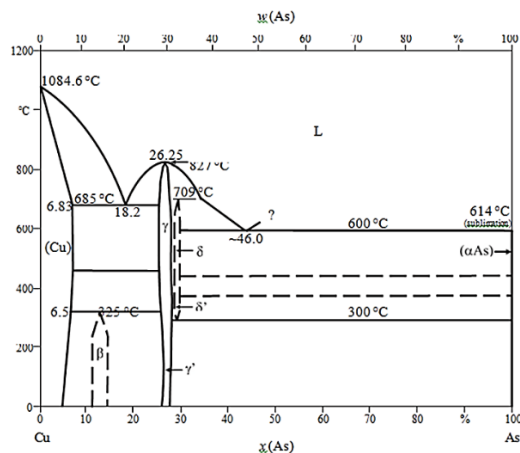
سرباره‌ها از نظر رنگ ظاهری به سه دسته تقسیم می‌شوند که شامل سرباره خاکستری، سیاه و قهوه‌ای رنگ است [83-84]. با توجه به سرباره‌های خاکستری رنگ به‌دست‌آمده از منطقه اریسمان که از نظر ماکروسکوپی متراکم و به‌صورت لکه‌های سبزرنگ اکسید مس در سطح بیرون و گاهی اوقات الگوی جریان معمولی در سرباره‌ها دیده می‌شود. سرباره‌های خاکستری رنگ به‌دست‌آمده از اریسمان، نشان از ذوب سنگ معدن مس در تولید مس آرسنیک را تأیید می‌کند. وجود ووستیت FeO در سرباره خاکستری نشان از شرایط احیاکننده‌تری در ذوب است. همچنین، وجود ناخالصی‌های سولفیدی در این سرباره می‌تواند ناشی از حضور مقداری سولفور در شارژ بوته باشد. سرباره‌های قهوه‌ای رنگ نیز می‌تواند دلیل بر وجود عناصر دیگری مانند دیواره‌های ذوب کوره یا ریفرکتوری باشد و نشان می‌دهد که از سرباره‌های خاکستری رنگ متخلخل‌تر و ناهمگن‌تر هستند. در بررسی سیستم Fe-As همه ساختار اشپایس بین دمای 825°C تا 1000°C با فازهای متفاوت که به میزان آرسنیک یا آهن و شرایط اتمسفری کوره بستگی دارد ایجاد می‌شود [85]. در بررسی‌های ترنتون، تفاوت اصلی سرباره قهوه‌ای و خاکستری، مقدار اکسید آهن و آهک کم است و در سرباره قهوه‌ای فاقد مس گزارش شده است؛ اما میانگین محتوای اکسید آرسنیک در سرباره‌های قهوه‌ای تقریباً ۱۰ برابر بیشتر از سرباره خاکستری است. ناخالصی‌های فلزی در سرباره‌های قهوه‌ای همگی به‌صورت ترکیبات آهن-آرسنیک و یا سولفید هستند [144-145]. ترنتون معتقد است پریل‌هایی که در سرباره‌ها به دام افتاده‌اند، محدوده‌ای از ترکیبات Fe_2As تا FeAs_2 است. مات و اشپایس از طریق اختلال ناپذیری متقابل و چگالی متفاوت در حالت مایع، بعد از انجماد به‌وسیله عملیات مکانیکی از یکدیگر جدا می‌شوند [30].

گزارش‌های مختلف در سیستم Fe-As و اکسید Fe-As ذکر شده است که تحت شرایط کاهش Fe تا دمای ذوب خودش پایدار است، درحالی‌که در اتمسفر غنی از CO_2 به FeO و بخار آرسنیک و مونوکسید کربن واکنش می‌دهند.

نمودارهای الینگهام برای واکنش‌پذیری فلزات مختلف با گوگرد نشان می‌دهد که در سیستم حاوی مس، آهن و گوگرد در کوره معمولی در دمای بالا، مس تمایل بیشتری برای ترکیب با گوگرد نسبت به آهن از خود نشان می‌دهد (شکل

به‌عنوان فاز β و فاز γ در این دیاگرام فازی مشخص شده است. فاز β از نظر استوکیومتری بین Cu_6As و Cu_9As و به‌وسیله یک واکنش پرتکتیک در حدود دمای 325°C ایجاد شده است. فاز شیمیایی Cu_6As با نماد پیرسون $\text{hp}2$ و گروه فضایی $P6/mmc$ [94] است. فاز γ با فرمول شیمیایی نزدیک به Cu_3As ، در ساختار هگزاگونال متبلور شده و با علامت پیرسون $\text{hp}24$ و گروه فضای $P3\text{ Cl}$ [95] نشان داده شده است. این آرسنیدهای بین فلزی از فرایندهای ریخته‌گری آلیاژ Cu-As به دست آمده است [96]. فرم دمای بالا برای Cu_3As با ساختار هگزاگونال با علامت پیرسون $\text{Ph}8$ و گروه فضایی $P63/mmc$ گزارش شده است. مطابق بررسی‌های سابرامین و لوچ (Subraminns and Laue) این تنها گزارشی از فرم دومیکیت دمای بالا بوده است؛ بنابراین این فاز در دمای بالا تأیید نشده است و در بررسی‌های بعدی در سیستم Cu-As و با نادیده گرفتن فاز β در دمای اتاق، فاز مس می‌تواند تقریباً $6\text{ wt}\%$ آرسنیک را در دمای اتاق بدون رسوب آرسنید فاز γ در خود حل کند.

$\alpha\text{-domeykite}$ دارای ساختار مکعبی و در گروه فضایی $T43d$ تعریف شده است که این مینرال در گرمای 225°C به $\beta\text{-domeykite}$ و algonite تجزیه شده است. از نقطه نظر کریستالوگرافی، مینرال $\beta\text{-domeykite}$ دومیکیت ساختگی نامیده می‌شود. با توجه به داده‌های مینرالوژی، رایج‌ترین پدیده طبیعی، شکل Cu_3As را به‌عنوان مینرال ($\alpha\text{-domeykite}$) یا $\beta\text{-domeykite}$ در نظر گرفته‌اند [97-98].



شکل ۶: نمودار تعادلی مس-آرسنیک [129].

Fig. 6: Copper-arsenic equilibrium diagram [129].

درصد (Wt=7.8%) آرسنیک در مس حل می‌شود. در دمای پایین‌تر، حلالیت به $6/5$ درصد (Wt=6.9%) در دمای اتاق کاهش می‌یابد [89]. بخشی از مس خالص در نمودار تعادل فازی نشان می‌دهد. یک یوتکتیک $18/2$ درصد، (Wt=21%) آرسنیک و دو ترکیب بین فلزی مس غنی از فاز β و فاز Cu_3As به‌صورت پرتکتیکی در بین دمای بین 300°C تا 350°C شکل می‌گیرد [90].

فاز γ ، Cu_3As به‌صورت متجانس در دمای 827°C شکل می‌گیرد و تقریباً مستقل از دما و در دامنه ترکیبی بین $25/5$ و $27/5$ آرسنیک وجود دارد. مواد معدنی مذکور به‌صورت طبیعی ترکیب Cu_3As که به‌عنوان دومیکیت شناخته می‌شود، ایجاد می‌کند [91]. در آزمایش‌های نورث‌آور یوتکتیک Cu_3As بدون شرایط تعادلی در مس شامل 3 درصد آرسنیک یافته شده است [92]. همچنین بود، پیدایش نخستین فاز γ در حدود 2 درصد آرسنیک را ثبت کرد که این فاز قبلاً در آلیاژهای شامل 1 درصد آرسنیک نیز مشاهده شده است [93].

مشکل دیگر در ریخته‌گری آلیاژهای مس-آرسنیک گرایش به جدایش دانه‌ای است. دیاگرام تعادل فازی مس-آرسنیک در (شکل ۶) نشان می‌دهد که انجماد در طی فاصله زمانی زیادی رخ می‌دهد. قبلاً اشاره شد در صورتی که شرایط بدون تعادل باشد، رشد ریزساختارها اغلب به‌صورت دندریتی است. در این مورد جدایش دانه‌ای یا هسته‌دار شدن در مرکز دندریت‌ها دارای ترکیب غنی از مس مذاب با نقطه ذوب بالاتر شکل گرفته است؛ درحالی که مس در ناحیه‌ی بین دندریت‌های بیشتر حاوی ترکیب با نقطه ذوب کمتری است.

دیاگرام فازی Cu-As ، توسط اسکینر (Skinner) و لوچه (Luce) در سال ۱۹۷۱ پیشنهاد داده شد که شامل هم‌آرسنیدهای $\alpha\text{-domeykite}$ و $\beta\text{-domeykite}$ به‌عنوان فازهای مینرالی دمای پایین فرض شده است. Cu_3As و Cu_{27}As به ترتیب با فرمول $\alpha\text{-domeykite}$ و $\beta\text{-domeykite}$ مطابق با دیاگرام مینرالی، پایداری بالای مینرال خالص $\alpha\text{-domeykite}$ در فشار 1 اتمسفر باید نزدیک به 90°C باشد (دمای پایین‌تر نسبت به آنچه قبلاً گزارش شده است). مطابق دیاگرام فازی (شکل ۶) آرسنیدهای بین فلزی احتمالاً در دمای پایین روی می‌دهند. این فازها

۷. وجود آرسنیک در پاتین

جیملا-مایر (Giumlia-Mair)، میکس (Meeks) و مودلینگر (Modlinger) معتقدند که عنصر آرسنیک در پاتین‌های اشیاء، بیشتر جهت زیبایی اشیاء بکار گرفته شده‌اند و اغلب شامل میزان کمی طلا، آرسنیک یا فلزهای دیگر هستند که در تشکیل جلای نقره‌ایی [99]، طلایی و سیاه‌رنگ استفاده شده است [100].

کراذوک (Craddock) و جیملا-مایر بر این عقیده‌اند که بر روی برنزه‌های مصر باستان که به‌عنوان همس-کم hsm-km مشهورند، پاتین سیاه وجود دارد که در ترکیب آنها حدوداً ۴ درصد طلا، ۱ درصد آرسنیک و ۱ درصد نقره وجود دارد. با این حال جیملا-مایر، پاتین‌های تیره و درخشان را بر روی آثار مصری فاقد طلا می‌داند؛ اما نسبتاً میزان کمی از آرسنیک، قلع، آهن و سرب در این نوع پاتین‌ها وجود دارد [100].

یکی از اولین نشریه‌هایی که کار آزمایش روی شاکادو Shakudo ژاپنی را توصیف کرد، مجله انو مربوط به تاریخ ۱۹۲۹ م است؛ که مشخص کرده است حدود ۵ درصد طلا با مس ایجاد پاتین سیاه می‌کند. آنالیزهای آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهد که عناصر آلیاژکننده با درصدهای کم متفاوت، مانند آرسنیک یا آنتیموان می‌توانند در رنگ پاتین تأثیر داشته باشند. تأثیرات کم طلا، نقره، آرسنیک، آهن و قلع اضافه‌شده به مس را روی رنگ سطحی آلیاژ بعد از تولید پاتین‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند [101].

۸. ایجاد پوشش نقره‌ای در آلیاژهای مس-آرسنیک

۸-۱. جدایش معکوس (Invers Segregation)

جدایش یا سگریگیشن (Segregation) به جداسازی مواد تشکیل‌دهنده در یک آلیاژ یا مناطقی با ترکیب شیمیایی مختلف در آن آلیاژ، گفته می‌شود [102]. به عبارت دیگر، عدم یکنواختی توزیع عناصر آلیاژی در ساختمان فلزی را جدایش می‌نامند.

زمانی که یک آلیاژ ریخته‌گری شروع به انجماد می‌کند، بسته به دما، ضخامت قالب و ماده، عنصرهای در محلول مایع

توزیع مجدد، خودشان می‌توانند منجر به ایجاد جدایش ماکرو و میکرو شوند.

از این فرایند در طی جدایش معکوس می‌تواند منجر به ایجاد سطح نقره‌ای، روی آلیاژ Cu-As شود. در طی فرایند انجماد، جدایش معکوس می‌تواند وقتی باقیمانده ماده مذاب در مجاری بین‌دانه‌ای به بیرون نیرو وارد می‌کند، روی دهد. انقباض حرارتی، نیروی محرکه اصلی است که منجر به ایجاد این پدیده‌ها می‌شود [103].

در دیاگرام تعادلی مس-آرسنیک نشان می‌دهد که زمینه روشن بین‌دندریتی، باید نقطه پایین یوتکتیک از ترکیب دومیکیت و فاز γ باشد که موجب جدایش نرمال و مغزه‌دارشدن در طی ریخته‌گری شده است.

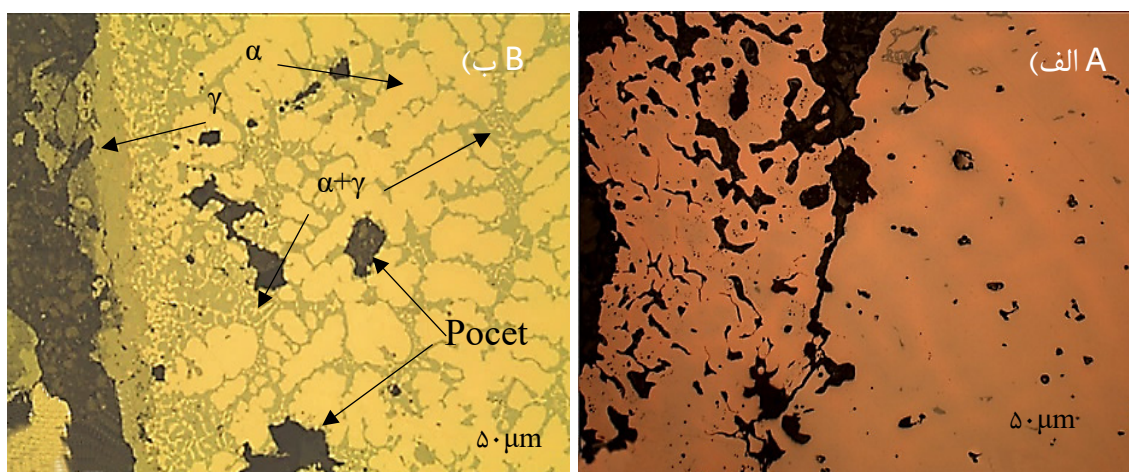
در طول انجماد، هنگامی که آلیاژ Cu-As در تماس با قالب است، از داخل محلول ریخته شده در قالب، محلول با آرسنیک بالاتر، به سمت بیرون رانده می‌شود. تغییر گازهای محلول که در طی فرایند جامدسازی آزاد می‌شوند، نیز به افزایش فشار داخلی کمک خواهد کرد و باعث می‌شوند یوتکتیک $(\alpha+\gamma)$ غنی از آرسنیک به همراه فیدرهای بین‌دندریتی به سطح فشار وارد نمایند؛ که در نتیجه این شرایط، غلظت آرسنیک به‌طور قابل توجهی از بقیه ریخته‌گری در نزدیکی سطح بیشتر مشاهده خواهد شد (شکل ۷).

در مورد عرق آرسنیک، جدایش معکوس در غلظت‌های بسیار پایین از آرسنیک نسبت به برنزه‌های قلعی روی می‌دهد [106]. احتمالاً به دلیل فشار بخار بالای آرسنیک در آلیاژ مذاب است. به اندازه ۲ درصد آرسنیک در مس برای تأمین ساختار یوتکتیک کافی است و از این رو امکان تعریق وجود دارد [107].

در این فرایند هر چه محتوای آرسنیک بیشتر باشد می‌توان عرق بیشتری و در نتیجه لایه سطحی گسترده‌تر و ضخیم‌تری بر روی سطح ایجاد کند. عرق آرسنیک یک ریزساختار یوتکتیک شامل محلول جامد α و ترکیب γ یعنی $(\alpha+\gamma)$ شامل ۲۹/۶ درصد آرسنیک است. جدایش معکوس (پدیده هراش) در آلیاژهای مس-آرسنیک، با انجماد آلیاژ، Cu-As، در فشار بالاتر، غلظت محلول آرسنیک باعث

وزنی در هنگام بازپخت به صورت پاکت‌هایی در زیر سطح آلیاژ ظاهر می‌شوند (شکل ۷-ب) و با افزایش غلظت آرسنیک باعث می‌شود این پاکت‌ها در سطح ظاهر شوند و یا موجب جدا شدن بخشی از آلیاژ از شیء می‌شوند [104]. از این رو در دنیای باستان، فلزگر توانایی ایجاد سطح نقره‌ای را بر روی اشیاء کامل را داشته است، از این رو در برخی از این اشیاء مانند برخی از سکه‌های کارتاژین Carthaginian حاوی آرسنیک بین ۳/۱ تا ۱۲/۲ درصد دیده شده است (شکل ۸).

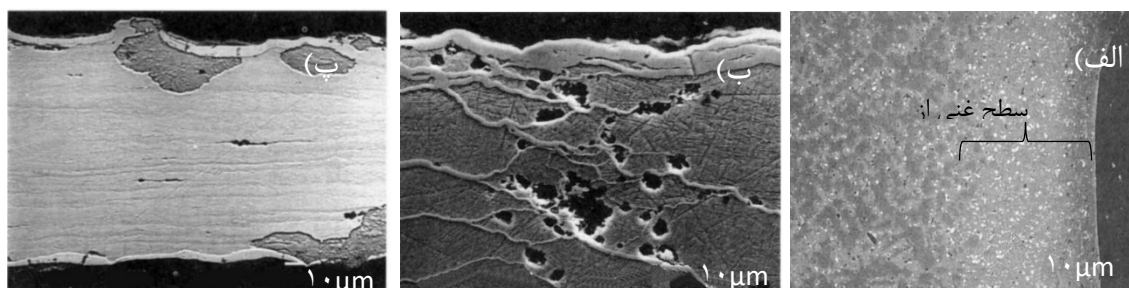
حرکت به سمت قالب ریخته‌گری می‌شود. فیبرهای بین-دندریتی یوتکتیک ($\alpha+\gamma$) غنی از آرسنیک که باعث فشار به سطح می‌شود، به صورت چشمگیری منجر به غلظت‌های از آرسنیک بیشتر در نزدیکی سطح، نسبت به بقیه ریخته‌گری می‌شوند. لایه سطحی یوتکتیک ($\alpha+\gamma$)، به محض اینکه شی بازپخت شود تغییر شکل می‌دهد (شکل ۷-الف) و به آسانی به محلول جامد α غنی از آرسنیک تبدیل می‌شود [108-109]. در بررسی‌های مودلینگر، آرسنیک با ۵ درصد



شکل ۷: الف) ساختار برنز آرسنیک بعد از نیم ساعت در اثر بخار آرسنیک، شکاف و یا پاکت‌هایی ایجاد شده است [104].

ب) وجود فازهای α و فاز γ در سطح و ساختار یوتکتیک پاکت‌های ایجاد شده ($\alpha+\gamma$) [105].

Fig. 7: A) The structure of arsenic bronze after half an hour of annealing. In the effect of arsenic radiation, gaps or pockets have been created [104]. B) The presence of α and γ phases on the surface, created pockets and the presence of eutectic ($\alpha+\gamma$) [105].



شکل ۸: الف) سکه کارتاژین با محتوای آرسنیک ۱/۳ تا ۱۲/۲ درصد آرسنیک [110]، ب) تیغه Quimperle فرانسه، لایه مرکب فاز γ گسترده بر روی تیغه [111]، پ) تیغه Los millares اسپانیا و فاز γ پوشیده شده در سطح و رسوب آرسنیک به صورت رشته‌ای در ساختار فلز [112].

Fig. 8: A) Carthaginian coin with arsenic content of 1.3 to 12.2% arsenic [110], B) French Quimperle blade, γ -phase compound layer spread on the blade. [111], C) Los millares blade of Spain and γ phase covered on the surface and arsenic deposition in the form of filaments in the metal structure [112].

به‌هرحال ساختار دندریتی α با ناحیه‌های ضخیم‌تر، روی سطح این سکه‌ها (کارتازین) و فیدرهای بین‌دندریتی از بدنه فلز، آشکارا ماهیت ریخته‌گری شده، جدایش معکوس را در سطح این سکه‌ها نشان می‌دهد [113]. همچنین در اثر دیگری بر روی سطح تیغه‌ای از کوویمپرل، Quimperle فرانسه، ساخته شده از آلیاژ مس-آرسنیک، یک لایه مرکب گسترده γ روی سطح تیغه دیده شده است [111-112]. همچنین در اثر دیگری از اوایل عصر برنز در تیغه از لوس میلارس، Los millares اسپانیا، فاز γ دیده شده است که به نظر می‌رسد که در مورد تیغه لوس میلارس، لایه ترکیبی نقره‌ای احتمالاً نتیجه عرق آرسنیک که به شدت کار شده بوده و هنوز شواهدی از چکش‌کاری را حفظ کرده است، دیده می‌شود. در مورد تیغه لوس میلارس بعید است که یک سطح کاری عمده به‌وسیله فرایند سماتاسیون انجام شود، چنانچه برای گاو نر هورزتپه بکار رفته فرایند سماتاسیون بکار رفته است، رشته‌های ضخیم ترکیب γ در بدنه فلزی ناشی از رسوب پس از دفن است که به‌صورت دویده شده در مرزدانه‌ها، در طول زمان دفن رسوب ایجاد کرده است (شکل ۸). اگرچه ساختار آلفا+دومیکیت $\alpha + (\text{Cu}_3\text{As})$ مکعب هرگز در آلیاژهای مس آرسنیک توسط ریخته‌گری شناسایی نشده است (فرایند مذاب). اطلاعات این مینرال نشان می‌دهد که ساختار مکعب می‌تواند فرم پایدار دومیکیت در سیستم Cu-As در دمای اتاق باشد [98, 114]. در ساختارهای SEM دو نوع ساختار خاکستری نشان داده شده است که یکی شامل رشته‌های نازک‌تر و دوم دارای رسوبات یا رشته‌های ضخیم‌تر است.

دو نوع مورفولوژی اساسی برای آرسنیدها وجود دارد که بستگی به ضخامتشان دارد. این نوع ترکیبات رشته‌ای به سختی با دگرگونی (تبدیل) یوتکتیک ارتباط دارند؛ زیرا آن‌ها ساختار دوفازی را نشان نمی‌دهند. باین‌حال، رسوبات رشته‌ای آرسنید ضخیم‌تر مربوط به ریخته‌گری غیرتعادلی است؛ مانند ریزجدایش‌های رشته‌ای که عملیات حرارتی بازپخت قادر به از بین بردن بیشتر آن نبوده است. رسوبات رشته‌ای آرسنید نازک‌تر می‌تواند در اطراف مرزدانه‌های جوانه‌زده شده، مشاهده شود. بازپخت تبلور مجدد، تنها پس از فرایند ترمودینامیکی رخ می‌دهد؛ بنابراین، هنگامی که

رسوبات رشته‌ای آرسنید پس از ریخته‌گری ایجاد شود، می‌تواند تنها با تحول حالت جامد تفسیر شود. در نتیجه، این نوع رسوبات آرسنید این ایده را تقویت می‌کند که زمان طولانی مدت در محیط دفن باعث رسوب آرسنید مس در مرزدانه‌های فاز مس شده است که می‌تواند دلیل بر جدایش آرسنیک از محلول جامد فوق اشباع‌شده در دمای پایین باشد.

۸-۲. سماتاسیون (Cementation)

یکی دیگر از ویژگی‌های آلیاژهای مس-آرسنیک ایجاد لایه سماتاسیون در سطح شی است که در برنزهای به‌دست‌آمده از مصر باستان و آناتولی قابل مشاهده است. در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی بر روی سطح برنز گاو نر به‌دست‌آمده از محوطه آناتولی از هورزتپه Horoztepe در ترکیه امروزی که حاوی لایه غنی از آرسنیک بود، یافت شد که مربوط به ۲۱۰۰ ق.م است. چنین پوششی در سطح، پریشی را مطرح می‌کند که آیا این لایه مربوط به ویژگی سطح اصلی بوده و یا به‌صورت جداگانه در تمام سطح به‌کاررفته است [56]. اسمیت معتقد است که این پیکره فاقد آرسنیک بوده است و اینکه آرسنیک به‌عنوان یک پاتین یا پوشش‌دهنده باید به آن افزوده شده باشد. به هر حال احیای چنین تکنولوژی چشمگیری از ساخت یک پاتین مس-آرسنیک که مربوط به ۵ هزار سال پیش در آناتولی ترکیه توسعه‌یافته، مشکل است. اسمیت به این نتیجه رسیده است بعید است که آلیاژ مس-آرسنیک در حالت مذاب به‌کاررفته باش؛ زیرا ریزساختارها هیچ علامتی مبنی بر وجود فاز یوتکتیک آلفا+دومیکیت $\alpha + (\text{Cu}_3\text{As})$ را نشان نمی‌دهند. در نتیجه بکار بردن آن در حالت مذاب غیرممکن است. اخیراً بیله یک روش متفاوت را پیشنهاد می‌کند که نشان می‌دهد این چنین گاو برنزی در ۴ تا ۵ قسمت ریخته‌شده که در ریخته‌گری این آلیاژ از آرسنیک استفاده شده است. بیله یافت که نیم‌شفه از این گاو به‌وسیله مس آرسنیک ریخته شده است درحالی‌که پاهای جلو از برنز قلع سربی ساخته شده است. آنالیز ایکس‌آردی XRD از پهلوی گاو فاز مس-آرسنیک ویتنی‌ایت Whitneyite و دومیکیت Domeykit را نشان می‌دهد و پیشنهادشده که به دلیل جدایش سطحی از آرسنیک است (شکل ۹).

35 [116]، ظاهراً این نوع تزئین بر روی این گوشواره در اثر خوردگی تعمیدی در سطح ایجاد شده است (شکل ۱۰) [13].

۸-۴. رسوب پس از رسوب‌گذاری (Post-depositional precipitation of γ -phase)

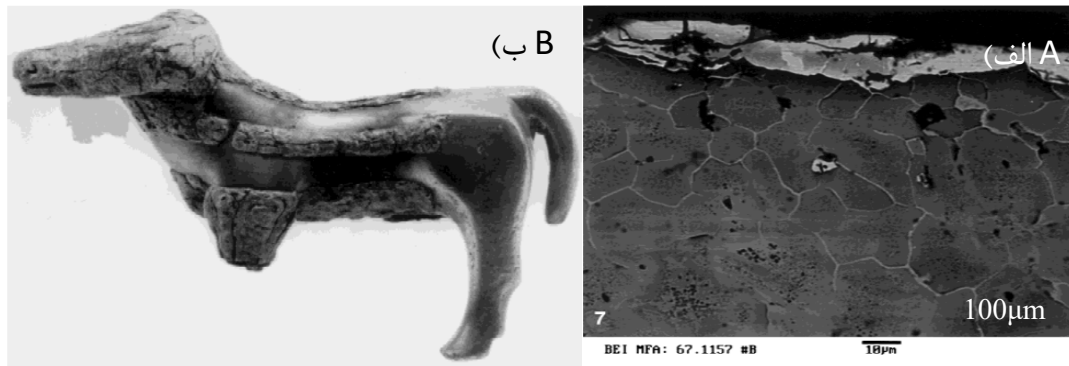
فاز γ دومیکیت، می‌تواند هم در سطح و هم در مرزخانه‌ها رسوب کند [56,117,118,120]. این فاز حتی می‌تواند در دمای اتاق در بین مرزخانه‌ها، در آلیاژهایی با میزان آرسنیک بالا که به‌شدت بر روی آن‌ها کار شده و همگن‌شده‌اند، نیز ایجاد شود [108,109,122]. باین‌حال [119] اتفاق مشابهی از رشته‌های ترکیب γ را در تیغه‌های از موندسه Mondese استرالیا را ثبت شده است و معتقد است که فاز γ بین‌دانه‌ای از محلول جامد غنی از آرسنیک در طول زمان دفن، رسوب کرده است. در سوزن مس-آرسنیک به‌دست‌آمده از پرو [121] یک نوع متفاوت از این نوع رسوب مشاهده شده است. این رسوب، آلودونیت alogodonite شامل Cu_3As ۱۲ درصد آرسنیک) در مرزخانه‌ها مشاهده می‌شود و تصور می‌شود که به صورت الکتروشیمیایی رسوب ایجاد شده است که این رسوب مشابه با رسوب مجدد در برنز خورده شده است [113,123].

تکه‌ای مس طبیعی از انارک، ایران، نشان می‌دهد، با مرزخانه‌های غنی‌شده از ۳/۵ درصد آرسنیک که به‌صورت رگه ظاهر می‌شود. این پدیده متفاوت گرایش طبیعی آرسنیک به غنی شدن یا رسوب دادن در مرز مشترک را نشان می‌دهد. این رسوبات حتی پس از خوردگی بسیار شدید آلیاژهای مس-آرسنیک در خوردگی‌های بین‌دانه‌ای و شکستگی‌ها، در آلیاژهای کاملاً خورده شده، از محوطه‌های شهر سوخته و اسپیدز بزمان با توجه به آنالیزهای میکروسکوپ نوری و آنالیز SEM-EDX نیز به‌صورت رشته‌ای سبزرنگ که حاوی تجمع آرسنیک است، دیده می‌شود [13].

تفسیری برای حضور فاز دومیکیت جدایش معکوس روی سطح ریخته‌گری، احتمالاً جوابگوی پوشش دهندگی در این مورد است زیرا در طول روند ریخته‌گری بعضی از مؤلفه‌ها با نقطه ذوب پایین‌تر، مانند فاز غنی از آرسنیک می‌تواند به سطح بیرونی قالب انتقال یابد. پوشش‌های آرسنیک بر روی بعضی از برنزهای مصری یافت شده است اما تابه‌حال هیچ شواهد متالوگرافی منتشر نشده است. در محوطه‌های تاریخی دیگر نیز ظاهراً برای ایجاد پوشش نقره‌ای از فاز γ استفاده شده است که در این مورد مودلینگر معتقد است که در شهر سوخته مربوط به هزاره سوم ق.م این سطح نقره‌ای احتمالاً با بکار بردن اشپایس جهت سماتاسیون سطح بر روی آثار کامل شده، استفاده شده است [104]، یا اینکه ترون‌تون معتقد است برای دادن پوشش نقره‌ای فلز مس را در پودر آرسنیک قرار داده‌اند [9]. تاکنون چنین موردی، به دلیل وجود خوردگی بسیار شدید آثار م س-آرسنیک در این محوطه گزارش نشده است [13].

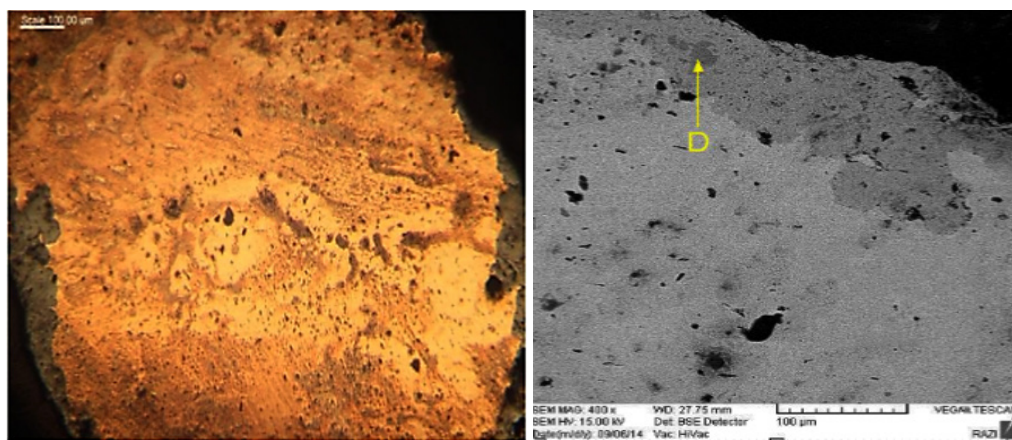
۸-۳. خوردگی تعمیدی (Intentional corrosion/ Copper depletion)

از دیگر آسیب‌های آثار مس-آرسنیک، ایجاد خوردگی تعمیدی یا به عبارتی کاهش مس در سطح است که وجود محلول جامد α غنی از آرسنیک در سطح است. در این نوع آسیب که جزئی از موارد تزئینی جهت ایجاد سطح نقره‌ای در سطح مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از ریخته‌گری، آلیاژ مس آرسنیک (با ترکیب ۴ تا ۸ درصد وزنی آرسنیک) را در محلول سدیم کلرید، به مدت تقریباً دو روز قرار می‌دهند که نهایتاً سطح نقره‌ای‌رنگی بر روی اثر ظاهر می‌شود که ایجاد فاز γ می‌نماید [115]؛ اما تابه‌حال اثری با این نوع تزئین سطحی ناشی از خوردگی مورد شناسایی قرار نگرفته است [104]؛ اما با توجه به آنالیزها (SEM-EDX) و بررسی‌های صورت گرفته، از گوشواره به‌دست‌آمده از جعفرآباد گرگان (J-A-2010)



شکل ۹: الف) تصویر SEM از گاو هورز تپه که وجود فاز γ به صورت گسترده در سطح نشان‌دهنده پوشش سماتاسیون در سطح این اثر است. ب) گاو به دست آمده از هورز تپه.

Fig. 9- A) SEM image of Horztepe bull, the presence of γ phase widely on the surface indicates the cementation coating on the surface of this effect. B) bull obtained from Horz Tepe.



شکل ۱۰: خوردگی تعمدی برای پوشش نقره‌ای رنگ در اولین نمونه گوشواره به دست آمده از جعفرآباد گرگان (J-A-2010-35) [116]
Fig. 10: Intentional corrosion for silver coating in the first earring sample obtained from Jafarabad, Gorgan (J-A-2010-35) [116]

۹. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی برنز آرسنیک

فلزگران اولیه کشف کردند، با اضافه کردن آرسنیک، قلع، روی یا سرب به مس، به طور چشمگیری باعث تغییر در رنگ فلز و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خواهند شد و هر نوع از این آلیاژها، با توجه به روش ریخته‌گری درجه خوردگی را تغییر می‌دهند [100].

۹-۱. سخت‌کاری

سخت‌کاری در دماهای بالا و در زیر دمای تبلور مجدد دوباره انجام می‌شود. تغییر شکل دادن باعث جذب انرژی در طی کار سرد می‌شود که از طریق تبلور مجدد این

انرژی آزاد خواهد شد. مطابق با گزارش‌ها [124] آلیاژهای مس با حدود ۱۸ درصد آرسنیک نشان می‌دهد که سخت‌کاری در دمای 600°C تا 500°C بسیار شکل‌پذیر هستند. برنزه‌های آرسنیک که با گرما لوله و چکش‌کاری شده‌اند در دمای 625°C به شدت شکل‌پذیر هستند. آلیاژهایی با محتوای ۱۳ درصد آرسنیک حالت پلاستیک و چکش‌خواری دارند که به صورت ترک‌هایی در لبه‌ها اشیاء باقی خواهند ماند [125].

یکی از مشکلات در سخت‌کاری آلیاژهای مس-آرسنیک در هوا، یعنی در شرایط اکسیداسیون می‌تواند باعث از دست رفتن آرسنیک شود؛ و محتوای آرسنیک داخلی از ۸/۷ درصد به ۷/۳ درصد کاهش دهد [113].

شکل پذیری به ماده برگردد. تابکاری در دمای معمولی منجر به حذف فشارهای باقیمانده ناشی از کار سرد می شود. هسته دار شدن دانه های جدید را تبلور مجدد نامیده می شود. با توجه به اینکه بیشتر نابجایی ها از طریق این مرحله حذف شده اند، ماده تبلور یافته از استحکام پایی بر خوردار است. آلیاژهای متبلور شده در دماهای بالاتر نسبت به فلزات خالص به دلیل حذف شدن عناصر در محلول جامد یا دیگر فازها مانع حرکت نابجایی ها می شوند. مس خالص در دمای 200°C تا 270°C دوباره متبلور می شود در حالی که در مس آرسنیک این امر در دامنه دمایی 300°C تا 400°C اتفاق می افتد [129].

بود معتقد است که حتی بعد از تابکاری در دمای 682°C نمونه مس با میزان $6/06$ آرسنیک از طریق جدایش دانه های در ریخته گری، دندریته های نسبتاً غنی از مس و پیچیده شده با جزایری از فاز دومیکیت Cu_3As به صورت پراکنده ایجاد خواهد شد. او همچنین نشان داد که تبلور مجدد در ناحیه های غنی از مس در دمای پایین 300°C اتفاق می افتد؛ اما تبلور مجدد کامل، زیر دمای تقریباً 600°C در میکرو ساختارها ظاهر نمی شوند. در بررسی های متالوگرافی برای تبلور مجدد، دانه های هم محور و به جای دانه های تغییر شکل داده شده، دانه های کشیده شده مشخص شده است [129-130].

دانه های متبلور شده در صورتی که دارای ابعاد کوچک و میزان تغییرات زیاد باشد، ایجاد می شوند. زمان بازپخت کوتاه، دماهای پایین تر و فازهای ثانویه از رشد دانه ها جلوگیری می کنند. در بررسی های متالوگرافی، مخصوصاً زمانی که مس در شبکه FCC تابکاری شده، خطوط دوقلوبی ها می تواند به عنوان شاهدهی برای تبلور مجدد باشند. شاهد دیگر، برای تبلور مجدد، کاهش استحکام و سختی متعلق به ماده تابکاری شده است که از طریق اندازه گیری سختی می تواند تعیین شود [129].

۱۰. ویژگی های مکانیکی

هانسون و ماریت Hanson and Marryat بر این عقیده هستند که مس حاوی ۱ درصد آرسنیک، باعث افزایش سختی برنیل Brinell نمی شوند [131]. همچنین برای مس

مطابق با مشاهدات نورس آور، شواهد کمی جهت کار سختی آلیاژهای مس-آرسنیک پیش از تاریخ وجود دارد. در متالوگرافی این آثار ناخالصی های کشیده شده نمی تواند به عنوان شواهدی برای این کار محسوب شوند زیرا هم سولفیدها و اکسیدها در کار سرد تغییرپذیر هستند [126].

۹-۲. کار سرد

افزایش سختی پذیری کاری، یعنی تأثیر کار سرد، یکی از قابل توجه ترین ویژگی های آلیاژهای مس-آرسنیک است. کار سرد، تغییر فلز در زیر دمای تبلور مجدد دوباره است. با انجام کار سرد شکل نهایی مورد نظر حاصل می شود و فلز در یک زمان مقاوم می شود. مقاومت یا کار سختی در نتیجه افزایش تعداد نابجایی ها است. زمانی که فشار بکار رفته افزایش یابد بازده مقاومت، نابجایی ها در فلز شروع به لغزش می کنند. اثرهای این حرکت می تواند در بخش متالوگرافی همان طور که خطوط لغزش نامیده می شوند، دیده شود. افزایش بیشتر فشار به کار رفته منجر به شکستگی دانه ها می شود؛ که در بررسی های متالوگرافی به صورت تغییر شکل و ساختار فیبری شکل مشاهده می شوند. این نابجایی ها متقابلاً در مرز دانه ها و ناخالصی ها بر روی یکدیگر افتاده و در درجه معینی از تغییر شکل، حرکت نابجایی ها مانع از تغییر شکل بیشتر خواهد شد؛ که در نتیجه منجر به افزایش مقاومت ماده می شود که به عنوان کار سختی شناخته می شود. در صورتی که ماده بیشتر تغییر پیدا کند، ساختار آن از طریق شکستن تخریب خواهد شد. بوهن معتقد است که سخت شدگی تنها به عنوان تأثیر کار سرد است [127] که در مقایسه با دیگر محققان مانند بود و اناوی معتقدند که آلیاژ با محتوای ۲ درصد آرسنیک به طور چشمگیری شکننده است [128-129].

۹-۳. بازپخت

با توجه به آنچه در بالا در مورد کار سرد گفته شد، کار سرد باعث افزایش تعداد نابجایی ها در ماده می شود. در صورتی که حرکت نابجایی ها، مانع از تغییر شکل شود، ترک ها شکل می گیرند و ماده شکننده خواهد شد. در صورتی که ماده نیاز به تغییر شکل بیشتر باشد، اثر کار سختی باید حذف شود و

۱۱. ویژگی‌های کاری

آرسنیک به‌عنوان یک بازدارنده خوردگی بین‌دانه‌ای، نیز می‌تواند از طریق توزیع مساوی آرسنیک در محلول جامد، نقش مهمی را داشته باشد [132-133]. ذوب سنگ‌های معدنی حاوی آرسنیک و کار بر روی مس آرسنیک می‌تواند منجر به تبخیر زیاد اکسید آرسنیک (As_2O_3) شود و دقیقاً مشخص نیست که آیا فلزگر عصر برنز از تبخیر گاز آرسنیک اطلاع داشته است یا نه. به‌هرحال سلیمچانوف با اطمینان توضیح می‌دهد که در طی ذوب مس و مواد معدنی آرسنیک نه تنها فلزگر، بلکه تمام موجودات زنده اطراف آن از بین رفته‌اند [135]؛ بنابراین چارلس بر این باور است که استفاده از مس آرسنیک برای یک دوره ۳۰۰ تا ۴۰۰ ساله به‌نوعی کنترل و توسعه یافته است. به‌منظور کنترل این خطر یقیناً فلزگر قدیمی به مشخصه بوی شبیه، سیر توجه داشته است که نتیجه بخار اکسید آرسنیک است. کرختی یا سستی شدید مزمن آرسنیک با التهاب عصبی-آرسنیک همراه بوده است که منجر به فلج همیشگی شده و می‌تواند در درازمدت لنگیدن فلزگران اسطوره‌های قدیمی را شرح دهد [136].

دلایل دیگر جایگزینی آلیاژهای مس-آرسنیک می‌تواند به‌دلیل کنترل روند فلزگری و تولید باشد. در مقایسه برنزهای آرسنیک ذوب شده از کانسنگ‌های مربوطه، برنزهای قلعی از طریق اضافه کردن قلع به مس مذاب راحت‌تر کنترل می‌شوند. برنزهای قلعی وابستگی بیشتری بین ترکیب، رنگ و ویژگی‌های مکانیکی نسبت به مس آرسنیک و فلزهای فله‌ور از خود نشان می‌دهند [137].

با توجه به وجود آرسنیک در آلیاژ و چالش‌پذیر بودن مقدار آرسنیک اضافه‌شده به آلیاژ، عمدی و غیر عمدی بودن این عنصر به دست‌ساخته‌های حاوی این عنصر مطرح است. چند فرضیه در خصوص کشف آلیاژها از ذوب غیرعمدی از کانه‌های حاوی آرسنیک تا آلیاژهای عمدی با آرسنیک طبیعی وجود دارد [138] که بر اساس اضافه شدن مقدار آرسنیک موجود در آلیاژ، عمدی یا غیر عمدی بودن این عنصر مطرح است، چنانکه رابتر

با محتوای ۲ درصد آرسنیک سختی به HV ۵۳ اندازه‌گیری شده است که تنها کمی بیشتر از سختی مس یعنی، سختی HV ۵۰ است. افزایش عمده سختی با حدود ۷ درصد آرسنیک ثبت شده است. بالای ۸ درصد آرسنیک، باعث شکنندگی شدن، آلیاژ خواهد شد. از این‌رو نتایج نشان می‌دهد که تا محدوده حلالیت جامد، محلول جامد مس با آرسنیک سخت می‌شود که قابل توجه نیست [54, 126]. بود همچنین مشاهده کرده است که آهسته سرد شدن محلول مذاب در قالب‌های ماسه‌ای، موضوعی مهم برای سخت شدن محلول نسبت به ریخته‌گری در قالب‌های فلزی است. همچنین یافته‌های بود نشان می‌دهد که سرد کردن قالب‌های ماسه‌ای به تعادل نزدیک‌تر خواهد بود، بنابراین قسمت زیاد آرسنیک در محلول جامد قابل پیش‌بینی خواهد بود [5].

یافته‌های هانسون و مریت نشان می‌دهد که اندازه کریستال آرسنیک در ریخته‌گری که منجر به افزایش مقاومت کششی خواهد شد، کاهش می‌یابد؛ و این به دلیل اینکه افزایش مقاومت کششی همراه با کاهش اندازه دانه‌ها خواهد بود. میزان ۱ درصد آرسنیک در تشکیل محلول جامد، اندکی افزایش مقاومت کششی نشان خواهد داد، درحالی‌که شکل‌پذیری بی‌تأثیر می‌شود [131].

لخمن Lechtman در بررسی‌هایش نشان می‌دهد که آلیاژهای مس-آرسنیک لوله شده ضخامتشان به ۷۰ و ۵۰ کاهش خواهد یافت که با افزایش میزان آرسنیک و درجه کاری، شکل‌پذیری و استحکام کششی آلیاژ افزایش می‌یابد [54, 129, 125].

آلیاژهای مس، تقریباً با ۴ تا ۵ درصد آرسنیک دامنه پهنه ترکیب، برحسب کار سرد و کار سخت است. نتایج نورس‌آور Northover نشان می‌دهد که اکثر اشیای قدیمی مس آرسنیک دارای میزان آرسنیک کمتر از ۴ تا ۵ درصد هستند [92, 122]. وجود ۸ درصد آرسنیک نیز در آثار به‌دست‌آمده از اسپیدر بزمان باعث شکست در ساختار فلز شده است [15]. از تأثیر مهم آرسنیک در مس، موجب افزایش ریز سختی در طول کار سرد می‌شود. معادله (۱) ارتباط بین ریز سختی و میزان آرسنیک نشان داده شده است. $HVCu = 26y + 74$ که y ، $\%Wt$ آرسنیک در ماده است [132-134].

با محتوای ۸/۰۱ و ۱۱/۷ درصد آرسنیک، انجماد با تغییر بخار سفید اکسید آرسنیک همراه بوده است [107].

۱۳. نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین آلیاژهای اوایل عصر باستان، آلیاژهای مس آرسنیک است. با توجه به اهمیت این آلیاژ در بررسی‌های فلزگری کهن و باستان‌شناسی، آثار ساخته‌شده و محصولات جانبی این آلیاژ از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است؛ اما با توجه به سمی بودن این عنصر و خطرهای ناشی از آن، باعث اختلال‌های عصبی و یا فلج‌شدگی بر روی آهنگر باستان شده است و به‌مرور زمان باعث جایگزین شدن عنصر قلع در آلیاژ برنز شده است. استخراج و استحصال فلزهای مس آرسنیک، با دو روش احیاء مستقیم و روش ذوب هم‌زمان صورت گرفته است؛ که در روش ذوب احیاء مستقیم از کانه اکسیدی، آلیاژی از مس و آرسنیک که در ترکیب فلزی با هم هستند، ایجاد می‌شود؛ اما با توجه به اینکه بیشتر کان‌سنگ‌های اولیه، کانه‌های سولفیدی هستند، فلزگران از دو روش یعنی، روش برشته‌کردن و ذوب مستقیم که باعث احیاء فلز می‌شود، استفاده کرده‌اند. در روش برشته‌کردن، کانه اکسیدی تولیدشده و سولفور به‌صورت دی‌اکسید گوگرد از ترکیب خارج شده و سپس با ذوب مستقیم، احیاء فلز مس و آرسنیک صورت گرفته است؛ که محصولات جانبی دیگر مانند مات، سرباره و اشیای از تولید این آلیاژها به دست آمده است. از مهم‌ترین ویژگی آلیاژهای مس آرسنیک، ایجاد پدیده جدایش معکوس در هنگام ریخته‌گری است که به‌دلیل فشار بالای گاز As_2O_3 ، موجب ایجاد لایه یا پوششی از فاز گسترده γ یا دومیکت، در سطح این آلیاژها شده است، اما با توجه به بررسی‌های انجام‌شده و آگاهی فلزگران از مضرات وجود گاز آرسنیک، احتمالاً فلزگر باستان با آگاهی اقدام به ایجاد پوشش نقره‌ای بر روی سطح این آثار نموده است. به‌هرحال در دنیای صنعتی و مدرنیزه امروز، وجود آرسنیک را به مقدار بسیار ناچیز در حد ppm را نوعی عنصر آلوده‌کننده برای مس می‌دانند. به‌هرحال در دنیای باستان با توجه به مسائل آئینی و کاربردی، ظاهر نقره‌ای برای اشیای فلزی از اهمیت و جایگاه خاصی برخوردار بوده است. روش‌های ایجاد سطح

پیشنهاد کرد که آلیاژهای مسی حاوی بیشتر از ۱ درصد آرسنیک محصولاتی هستند که آگاهانه ساخته شده‌اند [139].

گاهی تهیه نخستین آلیاژها، به‌عنوان نوعی جادوگری تفسیر شده است [140]. همچنین پیشنهاد می‌شود که کانه‌های مس کربناتی، یا اکسیدی مانند مالاکیت بهتر با مواد معدنی آرسنیکدار مانند الوینیت، Olivenite مخلوط و ذوب می‌شوند [141]. غلظت عناصر فرار، مانند آرسنیک، آنتیموان و روی بستگی به روش تشویه کانی دارد. میزان آرسنیک نهایی در فلز تمام‌شده، بیشتر به دمای ذوب وابسته است [142].

۱۲. تأثیر آرسنیک بر مس

چنانکه زویسکر Zwicker گزارش کرده است، افزایش ۰/۵ درصد آرسنیک به مس، می‌تواند از ایجاد خلل و فرج حتی زمانی که ریخته‌گری تحت شرایط اکسیداسیون باشد، جلوگیری کند [143]. با این حال ماریت و هسنون گزارش کرده‌اند ریخته‌گری با آلیاژهای مس حاوی تقریباً ۱ درصد آرسنیک مشکل است. با افزایش میزان اکسیژن این مشکل به‌اندازه زیادی از بین می‌رود. کمی نقص در ریخته‌گری، تأثیر شدیدی بر ویژگی‌های کاری فلز ندارد هرچند این امر می‌تواند در ویژگی‌های مکانیکی آن مؤثر باشد [131]. بود و اُتاوی Budd and Ottaway نشان دادند که آلیاژهای مس با آرسنیک بالای ۱۱/۷ درصد در قالب شنی متخلخل شده است [128]. ریخت‌شناسی این خلل و فرج به شکل کروی و نیمه کروی، نشانه مهمی برای خروج گاز آرسنیک از این حفرها، است [5]. مکزل و تلیکت یک افت ۱ درصد آرسنیک را بعد از ۲ ساعت ذوب و سرد کردن برای آلیاژ با ۹/۷ درصد آرسنیک مشاهده کرده‌اند. این در حالی است که در یک شرایط اتمسفر، بدون اکسیداسیون، اثری از افت آرسنیک مشاهده نشده است [113]. بود و اُتاوی ثبت کردند که ذوب و آلیاژ کردن تحت زغال چوب منتج به شرایط احیاکنندگی زیاد می‌شود که در این شرایط هیچ شاهده‌ای از افت آرسنیک یافت نشده است. در بررسی‌های این محققان، آلیاژهایی،

شده است، از موضوع‌های چالش‌برانگیز در حوزه حفاظتی و فلزگری کهن بوده است. از مهم‌ترین ویژگی آلیاژهای مس آرسنیک، در محیط دفن، رسوب آرسنیک در مرزخانه‌ها است که به‌صورت دیویده شده در زمینه این آثار دیده می‌شود. وجود این نوع رشته‌های آرسنیک باعث هویت و اصالت بیشتر این آثار شده است. این رسوبات حتی در آلیاژهایی که در محیط دفن به‌شدت دچار خوردگی شده‌اند، مانند آلیاژهای مس آرسنیک شهر سوخته و اسپیدر بزمان دیده شده است.

نقره‌ای با استفاده از ۱-جدایش معکوس، ۲-سمانتاسیون ۳-خوردگی تعمدی، ۴-رسوب پس از رسوب‌گذاری انجام شده است. این روش‌ها اگرچه باعث آسیب‌هایی به این آلیاژها شده است اما به‌رحال با توجه به جنبه زیباشناختی و مبانی حفاظتی، تابه‌حال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌رحال، وجود آلیاژهای آرسنیک در عصر باستان از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند هم از نظر اهمیت و محتوای آرسنیک در زمان ساخت (تعمدی یا غیر تعمدی اضافه شدن آن) به این آثار و هم از نظر قرارگیری آلیاژهای آرسنیک در طول محیط دفن که باعث خارج شدن این عنصر از آلیاژ

References

- [1] Tylecote R.F. A History of Metallurgy, second ed, The Institute of Materials, London, Materials, London, 1992. 1-9.
- [2] Hessel, D. & Lamberg-Karlovsky, C. C. An alternative sequence for the development of metallurgy: Tepe Yahya, Iran. In (T. Wertheim & J. Muhly, Eds) The Coming of the Age of Iron. New Haven: Yale University Press, (1980) pp. 229–266.
- [3] Lechtman H. Tradition and styles in central Andean metalworking. In: Maddin R (ed) The beginnings of the use of metals and alloys, Cambridge, MA, (1988). pp 344–378.
- [4] Budd, P. Haggerty, R. Pollard, A. Scaife, B. and Thomas, R. Rethinking the quest for provenance. *Antiquity*, (1996). 70:168–174.
- [5] Budd, P. A metallographic investigation of Eneolithic arsenical copper. PhD thesis, University of Bradford, Dep. of Archaeological Science, Bradford. (1991).
- [6] Hosler, D. The Sounds and Colors of Power. London: The MIT Press, (1994). p. 310.
- [7] Rapp Jr G, Determining the origins of sulfide smelting, in: A. Hauptmann, Pernicka. E, Wagner. G.A. (Eds.), Old World Archaeometallurgy, Proceedings of the International Symposium "Old World Archaeometallurgy" Heidelberg, Dt. Bergbau-Museum, Bochum, 1987, pp. 107–110 (1989).
- [8] 1987, pp. 107–110 (1989).
- [9] Rehren, Thilo. Boscher, Loïc. Pernicka, Ernst. Large scale smelting of speiss and arsenical copper at Early Bronze Age Arisman, Iran. *Journal of Archaeological Science*. (2012). 39. 1717-1727.
- [10] Thornton, C.P. Rehren, Th. Pigott, V.C. The production of speiss (iron arsenide) during the Early Bronze Age in Iran. *Journal of Archaeological Science*, (2009). 36. 308–316.
- [11] Rostoker, W., Pigott, V. C. & Dvorak, J. R. Direct reduction to copper metal by oxide-sulfide mineral interaction. *Archaeometallurgy* (1989). 3, 69–87.
- [12] Meier, David Mathias Philip. Preliminary Archaeometallurgical Investigations of Bronze Age Metal Finds from Shahdad and Tepe Yahya Iranian journal of archaeological studies. (2011). 1: 2.
- [13] Pourzarghan, Vahid. Sarhadi-Dadian, Hossein. Hosseini, Samine. Identifying the Technology of a Bronze Dagger Discovered in Espidezh Region of Bazman in Sistan and Baluchestan, Iran. *Journal of Anthropology and Archaeology*. 2017. Vol. 5, No. 1, pp. 47-55 [In Persian].

- [وحدید پور زرقان، حسین سرحدی دادیان، ثمینه حسینی. شناسایی فن خنجر برنزی مکشوفه از ناحیه اسپیدژ بزمان واقع در سیستان و بلوچستان. ایران. مجله انسان‌شناسی و باستان‌شناسی، ۲۰۱۷، ۵ (۱)، ۴۷-۵۵]
- [14] Pourzarghan, Vahid. Analysis of corrosion mechanism of arsenic-copper discovered of Spidej region of Bazman and Shahr-i-Sokhta areas in line with conservation of these objects. PhD Thesis, Art University of Isfahan. 2022. [In Persian].
- [وحدید پور زرقان، تحلیل سازوکار خوردگی مس-آرسنیک به دست آمده از محوطه اسپیدژ بزمان و شهر سوخته در راستای پایداری این آثار، رساله دکتری، ۲۰۲۲، دانشگاه هنر اصفهان]
- [15] Pourzarghan, Vahid. Bakhshandefard, Hamidreza. Heydari, Mohammad. Microscopic and Microstructural Study of Arsenic Copper from Spidej Bazamn. Journal of Research on Archaeometry. 2020 6 (2):75-89. DOI: 10.52547/jra.6.2.75. URL: <http://jra-tabriziau.ir> [In Persian].
- [وحدید پور زرقان، حمیدرضا بخشنده‌فرد، محمد حیدری، مطالعات میکروسکوپی و ریزساختاری مس آرسنیک از محوطه اسپیدژ بزمان، پژوهش‌های باستان‌سنجی، ۲۰۲۰، ۲ (۲)، ۷۵-۸۹]
- [16] Emami, Mohammadamin. Dardeniz, Gonca. Vallcorba, Oriol. Pourzarghan. Vahid. Tayyari, Javad. Towards a deeper understanding of the third millennium BC Iranian metallurgy: Use of synchrotron light for characterizing arsenic-bearing minerals in metal objects from Espidej. Surf Interface Anal. 2022. 1-15. John Wiley & Sons, Ltd [In Persian].
- [محمد امامی، گونکا داردنیز، اریول والکوربا، وحید پور زرقان، جواد طیار، درک عمیق از متالورژی هزاره سوم ق.م استفاده از نور سینکروتون برای ویژگی‌های مواد معدنی حاوی آرسنیک در اشیاء فلزی بدست آمده از اسپیدژ بزمان، تحلیل فصل مشترک سطح، ۲۰۲۲، جان وایلی، ۱-۱۵]
- [17] Sabouhi Sani. Farahangiz. Corrosion recognition and study technique and provides a solution for the Bronze Age espidezh cemetery metal objects in South East Cultural Museum of Iran. M.A. Thesis. Art University of Isfahan. 2019. [In Persian].
- [فرنگیس صبوحی ثانی، شناسایی خوردگی و تکنیک ساخت اشیاء فلزی بدست آمده از عصر برنز از گورستان اسپیدژ در موزه میراث جنوب شرق ایران، رساله کارشناسی ارشد، ۲۰۱۹، دانشگاه هنر اصفهان]
- [18] Hauptmann, A., Rehren, Th., & Schmitt-Strecker, S. Early Bronze Age copper metallurgy at Shahr-i Sokhta (Iran), reconsidered. In Th. Stöllner, G. Koerlin, G. Steffens & J. Cierny (Eds.), Man and Mining—Mensch und Bergbau. Studies in Honour of Gerd Weisgerber. (2003). pp. 197-213 (Der Anschnitt, Beiheft 16). Bochum: Deutsches Bergbau-Museum.
- [19] Potts DT. Mesopotamian civilization. The material foundations. Cornell University Press. (1997).
- [20] [Muhly JD. Copper and tin: the distribution of mineral resources and the nature of the metals trade in the Bronze Age. The Connecticut Academy of Arts and Sciences, New Haven. (1973).
- [21] [21] Emsley J. The elements, 2nd edn. Oxford University Press, Oxford. (1991).
- [22] O'Day, P.A. Chemistry and mineralogy of arsenic. Elements 2 (2), 77-83. Okereke, A., Stevens, S.E., 1991. Kinetics of Iron oxidation by Thiobacillus ferrooxidans. Appl. Environ. Microbiol, 2006 57 (4), 1052-1056.
- [23] Gallegos-Garcia, M., Ramírez-Muñiz, K., Song, S. Arsenic removal from water by adsorption using iron oxide minerals as adsorbents: a review. Miner. Process. Ext. Metall. Rev., 2012. 33 (5), 301-315.
- [24] Mandal, B.K., Suzuki, K.T. Arsenic round the world: a review. Talanta., 2002. 58 (1), 201-235.
- [25] Yang, B., Zhang, G.L., Deng, W., Ma, J. Review of arsenic pollution and treatment progress in nonferrous metallurgy industry. Adv. Mater. Res. 2013. 634, 3239-3243.

- [26] Panagiotaras, Dionisios. Papoulis, Dimitrios and Elias Stathatos. *Geochemistry of Arsenic and Toxic Response*. 2015. DOI: 10.1201/b18734-6. <https://www.researchgate.net/publication/283005429>.
- [27] Ritcey, G.M., *Tailings management in gold plants*. Hydrometallurgy. 2005. 78 (1), 3–20.
- [28] Riveros, P.A., Dutrizac, J.E., Spencer, P. *Arsenic disposal practices in the metallurgical industry*. Can. Metall. Q. 2001. 40 (4), 395–420.
- [29] Bissen, M., Frimmel, F.H., *Arsenic-a review. Part I: occurrence, toxicity, speciation, mobility*. Acta Hydrochim. Hydrobiol. 2003a 31 (1), 9–18.
- [30] Vaughan, D.J. *Arsenic*. Elements., 2006 2, 71–75.
- [31] Hauptmann, Andreas. *Archaeometallurgy – Materials Science Aspects*. Springer. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50367-3>.
- [32] Ramdohr P, Strunz H. *Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie*. Enke Verlag, Stuttgart. (1978).
- [33] Quiring H. *Die Metallischen Rohstoffe, ihre Lagerungsverhältnisse und ihre wirtschaftliche Bedeutung 8: Arsen*. Enke, Stuttgart. (1946).
- [34] Tretner A. *Sorptions- und Redoxprozesse von Arsen an oxidischen Oberflächen. Experimentelle Untersuchungen*. PhD-diss, Univers Heidelberg. (2002).
- [35] Nazari, Amir Mohammad. Radzinski, Rebecca. Ghahreman, Ahmad. *Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic*. Hydrometallurgy. 2017. 174 258–281.
- [36] Tylecote, R.F. *A History of Metallurgy* Second edition. London. 1992.
- [37] Lechtman, Heather. Klein, Sabine. *The Production of Copper-Arsenic Alloys (Arsenic Bronze) by Cosmelting: Modern Experiment, Ancient Practice*. Journal of Archaeological Science (1999) 26, 497–526.
- [38] Charles, J. A. *The coming of copper and copper-base alloys and iron: a metallurgical sequence*. In (T. A. Wertime & J. D. Muhly, Eds) *The Coming of the Age of Iron*. New Haven, CT: Yale University Press. (1980) pp. 151–181.
- [39] Tylecote, R. F. *Summary of results of experimental work on early copper smelting*. In (W. A. Oddy, Ed.) *Aspects of Early Metallurgy*. London: British Museum. (1980b), pp. 5–12.
- [40] Zwicker, U., Greiner, H., Hofmann, K.-H. & Reithinger, M. *Smelting, refining, and alloying of copper and copper alloys in crucible furnaces during prehistoric up to Roman times*. In (P. T. Craddock & M. J. Hughes, Eds) *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*. London: British Museum. (1985) pp. 103–115.
- [41] Rapp Jr., G. *Determining the origins of sulfide smelting*. In (A. Hauptmann, E. Pernicka & G. A. Wagner, Eds) *Old World Archaeometallurgy*. Bochum: Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, (1989) pp. 107–110.
- [42] Rostoker, W., Pigott, V. C. & Dvorak, J. R. *Direct reduction to copper metal by oxide-sulfide mineral interaction*. Archaeomaterials. (1989). 3, 69–87.
- [43] Keesmann I, Bachmann H, Hauptmann A. *Klassifikation eisenreicher Schlacken nach dem Phasenbestand*. Fortschritte der Mineralogie. 1984. 62:114–116.
- [44] Tafel V. *Lehrbuch der Metallhüttenkunde 2 (Wismut, Blei, Zinn, Antimon, Zink, Quecksilber, Nickel, Aluminium)*. Hirzel, Leipzig. (1929).
- [45] Keesmann, I., *Rio Tinto: Die Technik der Silbergewinnung zu Beginn des Mittelalters*, in: Conference papers, Archeologie, Sou's theme "Argent, plomb et cuivre dans l'histoire". CNRS, Villeurbanne, 1991. pp. 1–13.
- [46] Ettler V, Johan Z, Selmi Wallisova M, Mihaljevič M, Šebek O. *Slag*

- remains from the Na Slupi site (Prague, Czech Republic): evidence for early medieval non-ferrous metal smelting. *J Archaeol Sci.* (2015) 53:72–83.
- [47] Hauptmann A. 5000 Jahre Kupfer in Oman 1: die Entwicklung der Kupfermetallurgie vom 3. Jahrtausend bis zur Neuzeit. *Der Anschnitt Beih.* 4. (1985).
- [48] Westner K, Klein S, Gassmann G. Roman to medieval precious and base metal smelting near Ulpiana (Kosovo): evidence for complex multistage extraction of silver. In: Körlin G, Prange M, Stöllner T, Yalçın Ü (eds) *From bright ores to shiny metals*, *Festschrift a Hauptmann. Der Anschnitt Beih.* (2016). Vol 29, pp 205–218.
- [49] Sundman, B., Jansson, B. & Anderson, J.-O. The ThermoCalc data base system. *Calphad* 9, (1985). 153–190
- [50] Tafel, V. *Lehrbuch der Metallhüttenkunde*. Bd. 1 Leipzig: S. Hirzel Verlagbuchhandlung.
- [51] Tiedemann, H. Die Haarkupferbildung im Kupferstein. *Metall und Erz.* (1926). 23, 200–210
- [52] Kassianidou, V., 1998. Was silver actually recovered from speiss in antiquity? In: Rehren, Th., Hauptmann, A., Muhly, J.D. (Eds.), *Metallurgica Antiqua. Der Anschnitt, Beiheft 8. Deutsches Bergbaumuseum, Bochum*, (1951). pp. 69–76.
- [53] Craddock PT. Dto., 3. The origins and early use of Brass. *J Archaeol Sci* 3:93–113.
- [54] Müller R, Rehren T, Rovira S (2004) Almizaraque and the early copper metallurgy of southeastern Spain: new data. *Madrid Mitt.* (1978). 45:33–56.
- [55] Keesmann I, Moreno Onorato A. Naturwissenschaftliche Untersuchungen zur frühen Technologie von Kupfer und Kupfer-Arsen-bronze. In: Hauptmann A, Pernika E, Rehren T, Yalçın Ü (eds) *The beginnings of metallurgy, Der Anschnitt Beih.* (1999). vol 9, pp 317–332.
- [56] Lechtman H. Arsenic bronze: dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas. *J Field Archaeol.* (1996) 23(4):477–514.
- [57] Zwicker, U., Natural copper-arsenic alloy and smelted arsenic bronzes in early metal production. In: Mohen, J.-P., Eluere, C. (Eds.), *Decouverte du Metal*. Picard, Paris, 1991. pp. 331–340.
- [58] Smith, C.S., An examination of the arsenic-rich coating on a bronze bull from Horoztepe. In: Young, W.J. (Ed.), *Application of Science in the Examination of Works of Art*. Boston Museum of Fine Arts, Boston, 1973. pp. 96–102.
- [59] Bachmann, H.-G., *The Identification of Slags from Archaeological Sites*. Institute of Archaeology, London. Occasional Publication. 1982. No. 6.
- [60] Keesmann, I. Eisen in antiken Schlacken des südwestiberischen Sulphiderzgußrtels. *Pallas*. 1999 50, 339–360.
- [61] Rehren, Th., Schneider, J., Bartels, Ch., Medieval lead-silver smelting in the Siegerland, West Germany. *Historical Metallurgy*. 1999. 33, 73–84.
- [62] Doonan, R., Day, P., Dimpoulou-Rethemiotaki, N., Late Bronze Age Crete: the metallurgical finds from Poros Katsambas and their context. In: Day, P., Doonan, R. (Eds.), *Metallurgy in the Early Bronze Age Aegean*. Oxbow Books, Oxford, 2007. pp. 98–122.
- [63] Hauptmann, A., Rehren, Th., Schmitt-Strecker, S., Early Bronze Age copper metallurgy at Shahr-i Sokhta (Iran), reconsidered. In: Stöllner, T., Körlin, G., Steffens, G., Cierny, J. (Eds.), *Man and Mining/Mensch und Bergbau. Studies in Honour of Gerd Weisgerber: Der Anschnitt, Beiheft 16. Deutsches Bergbaumuseum, Bochum*, 2003. pp. 197–213.
- [64] Khalil, L., Bachmann, H.-G., Evidence of copper smelting in Bronze Age Jericho. *Historical Metallurgy*. 1981. 15, 103–106.

- [65] Muhly, J.D., Maddin, R., Stech, T., Özgen, E., Iron in Anatolia and the nature of the Hittite iron industry. *Anatolian Studies*. 1985. 35, 67–84.
- [66] Frisch, B., Mansfeld, G., Thiele, W.-R., Kamid el-Loz 6. Die Werkstätten der spätbronzezeitlichen Palaeste. Dr. Rudolf Habelt GMBH, Bonn. 1985.
- [67] Kilian, K., 1983. Ausgrabungen in Tiryns. Bericht zu den Grabungen. *Archäologischer Anzeiger* 3, 1981 294–328.
- [68] Waldbaum, J.C., The coming of iron in the eastern Mediterranean: Thirty years of archaeological and technological research. In: Pigott, V.C. (Ed.), *The Archaeometallurgy of the Asian Old World*. University Museum Monograph 89. The University Museum, University of Pennsylvania, Philadelphia, 1999. pp. 27–57.
- [69] Broodbank, C., Rehren, Th., Zianni, A., Scientific analysis of metal objects and metallurgical remains from Kastri, Kythera. *Annals of the British School in Athens*. 2007. 102, 221–240.
- [70] Müller, R., Rehren, Th., Rovira, S., Almizaraque and the early copper metallurgy of southeast Spain: New data. *Madrid Mitteilungen*. 2004. 45, 33–56.
- [71] Paulin, A., Orel, N.T. Metallurgical examinations in the archaeometallurgical projects of the National Museum of Slovenia. *Materiali in Tehnologije*, 2003. 37 (5), 251–259. Paulin, A., Spaic, S., Spruk, S., Heath, D.J., Trampuz-Orel, N., Speiss from Late Bronze Age. *Erzmetall*. 1999. 52 (11), 615–622.
- [72] Paulin, A., Spaic, S., Heath, D.J., Trampuz-Orel, N., Analysis of Late Bronze Age Speiss. *Bulletin of the Metals Museum*. 2000. 32, 29–41.
- [73] Tylecote, R.F., *The Early History of Metallurgy in Europe*. Longman, New York. 1987.
- [74] Craddock, P.T., Freestone, I.C., Hunt Ortiz, M., Recovery of silver from speiss at Rio Tinto (SW Spain). *IAMS Newsletter*. 1987. 10/11, 8–11.
- [75] Goldenberg, G., *Archäometallurgische Untersuchungen zur Entwicklung des Metallhüttenwesens im Schwarzwald. Blei, Silber- und Kupfergewinnung von der Frühgeschichte bis zum 19. Jahrhundert*. In: Goldenberg, G., Otto, J., Steuer, H. (Eds.), *Archäometallurgische Untersuchungen zum Metallhüttenwesen im Schwarzwald*. Thorbecke Verlag, Sigmaringen, 1996. pp. 9–275.
- [76] Rehren, Th., Schneider, J., Bartels, Ch., Medieval lead-silver smelting in the Siegerland, West Germany. *Historical Metallurgy*. 1999.33, 73–84.
- [77] Boscher, L. A Reconstruction of Early Bronze Age Arsenical Copper Production at Arisman on the Iranian Plateau. Unpublished MSc thesis, UCL Institute of Archaeology, London. 2010.
- [78] Tadmor, M., Kedem, D., Begemann, F., Hauptmann, A., Pernicka, E., SchmittStrecker, S., The Nahal Mishmar hoard from the Judean Desert: technology, composition, and provenance. *Atiqot*. 1995. 27, 95–148.
- [79] Palmieri, A.M., Frangipane, M., Hauptmann, A., Hess, K., Early metallurgy at Arslantepe during the Late Chalcolithic and the Early Bronze Age IA-IB periods. In: Hauptmann, A., Pernicka, E., Rehren, Th., Yalcin, U. (Eds.), *The Beginnings of Metallurgy. Der Anschnitt, Beiheft 9. Deutsches Bergbau-Museum, Bochum*, 1999. pp. 141–149.
- [80] Meliksetian, K., Pernicka, E., Badaylan, R., Avetissyan, P., Geochemical characterization of Armenian Early Bronze Age metal artefacts and their relation to copper ores. In: *Archaeometallurgy in Europe*. Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, 2003. pp. 597–606.
- [81] Bachmann, H.G., “The identification of slags from archaeological sites”,

- Institute of Archaeology London. Occasional Publication, (1982). No.6
- [۸۲] امامی، سید محمدامین، اهمیت مطالعات مینرالوژیک بر روی سرباره‌های ذوب قدیمی در پاراژنز کانی‌های فلزی. کنفرانس مهندسی معدن ایران ۱۳۸۳.
- [83] Chakraborti, N., Lynch, D.C. Thermodynamics of roasting arsenopyrite. Metallurgical Transactions B., 1983. 14B, 239-251.
- [84] Radivojević, Miljana. Rehren, Thilo. Paint It Black: The Rise of Metallurgy in the Balkans. J Archaeol Method Theory. 2015. DOI 10.1007/s10816-014-9238-3.
- [85] Radivojević, Miljana. Archaeometallurgy of the Vinča culture: a case study of the site of Belovode in eastern Serbia. Historical Metallurgy. 2013. 47(1). 13–32.
- [86] Raghavan, V., Phase Diagrams of Ternary Iron Alloys Part 2: Ternary Systems Containing Iron and Sulphur. Indian Institute of Metals, Calcutta. 1988.
- [87] Willis, G.M., Toguri, J.M., Yazawa's diagram. The AusIMM Metallurgical Society. 2009. Special Paper., 1-8.
- [88] Emami, Mohammadamin. Kowald, Torsten. Trettin, Reinhard. Preliminary archaeometallurgical studies on copper extraction from polymetallic ore sources in Meymand, south central Iranian desert. Archaeol Anthropol. 2015. Sci DOI 10.1007/s12520-016-0319-y [In Persian].
- [۸۹] محمد امین امامی، تورستن کوالد، رین هارد تریتن، مطالعه مقدماتی فلزگری در استخراج مس از منابع کان سنگ چند فلزی در میمند، ناحیه جنوب مرکزی ایران، باستان‌شناسی علوم انسانی
- [90] Craddock, P.T. Early Metal Mining and Production. Smithsonian Institution, Washington D.C, 1995.
- [91] Dies, K. Kupfer und kupferlegierungen in der technik. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 1967
- [92] Subramanian, P. R. and Laughlin, D. E. As-Cu (Arsenic-Copper). In Subramanian, P. R., editor, Phase diagrams of binary copper alloys, Monograph Series on Alloy Phase Diagrams, (1994a) pages 43–52. The Materials Information Society, Materials Park. Ohio.
- [93] Hanson, D. and Marryat, C. Investigation of the effects of impurities on copper. Part III – The effect of arsenic on copper. Journal of the Institute of Metals, (1927). 37:121–148.
- [94] Northover, J.P. Properties and use of arsenic-copper alloys. In Old World Archaeometallurgy, Proceedings of the International Symposium, Heidelberg 1987 (eds A. Hauptman, E. Pernicka, and G.A. Wagner) Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, Bochum, (1989). pp. 111-118.
- [95] Budd, P. Eneolithic arsenical copper: heat treatment and the metallographic interpretation of manufacturing processes. In Proceedings of the International Symposium on Archaeometry, Heidelberg 1990, pages 35–44, Basel. Birkhäuser Verlag.
- [96] Naud, J. & Priest, P. Contributions to the study of the copper-arsenic system. Mater Res Bull, (1972). 783–792 (in French).
- [97] Bengough, G.D. & Hill, B.P. The properties and constitution of copper-arsenic alloys. J Inst Met. (1910). 3, 34–71.
- [98] Skinner, B.J. & Luce, F.D. Stabilities and compositions of α -domeykite and algodonite. Econ Geol. (1971). 66, 133–139.
- [99] Heyding, R.D. & Despault, G.J.G. The copper/arsenic system and the copper arsenide minerals. Can J Chem. (1960). 38(12), 2477–2481.
- [100] Pereira, Filipa. Silva, Rui J. C. Monge Soares, António M. Araújo, Maria F. Oliveira, Maria J. Martins, Rui M. S. and Schell, Norberth. Effects of Long-Term Aging in Arsenical Copper Alloys Microsc. Microanal. 2015. 21, 1413–1419. doi:10.1017/S1431927615015263.
- [101] Giumlia-Mair, Alessandra. Investigation of a Copper-based Hoard from the Megalithic Site of al-

- Midamman, Yemen: An Interdisciplinary Approach. *Journal of Archaeological Science*. 2002 29, 195-209. doi:10.1006/jasc.2001.0686, available online at <http://www.idealibrary.com> on.
- [102] Scott, D. A, Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants and Conservation, Los Angeles, Getty Conservation Institute Publications, (2002).
- [103] Giumlia-Mair, A., and M. Lehr. Patinating black bronzes: Texts and tests. In *Proceedings of the Fourth International Conference on the Beginning of the Use on Metals and Alloys*, 1998 103-8. Tokyo: Japan Institute of Metals.
- [104] ASM Handbook Volume 17. Nondestructive Evaluation and Quality Control. ASM International, 1992.
- [105] Boeira, A., Ferreira, I.L., Garcia, A., Alloy composition and metal/mold heat transfer efficiency affecting inverse segregation and porosity of as-cast AlCu alloys. *Mater. Des.* 30, 2090e2098. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08>.
- [106] Mödlinger M. and Sabatini B. A Re-evaluation of inverse segregation in prehistoric As-Cu objects. *Journal of Archaeological Science*, 2016 74, pp 60-74.
- [107] Mödlinger, Marianne. Cziegler, Andreas. Schnideritsch, Holger. Sabatini, Benjamin. *Archaeological Arsenical Bronzes and Equilibrium in the As-Cu System*. Metallurgical and Materials Transactions. 2017. DOI: 10.1007/s11663-018-1322-8 <https://www.researchgate.net/publication/326312521>.
- [108] Mödlinger1, Marianne. Calderon, Raquel de Oro. Haubner, Roland. Arsenic loss during metallurgical processing of arsenical bronze. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2018. DOI: 10.1007/s12520-017-0534-1 <https://www.researchgate.net/publication/319199072>.
- [109] Budd, P. and Ottaway, B. The properties of arsenical copper alloys: implications for the development of Eneolithic metallurgy. In Budd, P., Chapman, (1991).
- [110] Meeks, N. Patination phenomena on Roman and Chinese high-tin bronze mirrors and other artefacts. In *Metal Plating and Patination*, ed. S. LaNiece and P. Craddock, 1993a 63-84. Oxford: Butterworth-Heinemann. Meeks, N. Surface characterization of tinned bronze, high-tin bronze, tinned iron and arsenical bronze. In *Metal Plating and Patination*, ed. S. LaNiece and P. Craddock, 1993b. pp 247- 75. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [111] La Niece, S., and Carradice, I. White copper: The arsenical coinage of the Libyan revolt 241-238 BC. *Journal of the Historical Metallurgy Society*, (1989). 23(1), 9-16.
- [112] Briard, J., and Mohen, J-P. Le tumulus de la forêt de Cannoit a Quimperle (Finistère). *Antiquities Nationales*, (1974), 6, 46-60.
- [113] Hook, D.R., Freestone, I.C., Meeks, N.D., Craddock, P.T., and Moreno Onorato, A The early production of Copper Alloys in SouthEast Spain. In *Archaeometry 90* (eds E. Pernika, and G.A. Wagner) *Proceedings of the Archaeometry Conference*, Heidelberg 1990, Birkhäuser Verlag, Basel, (1991). pp. 65-76.
- [114] McKerrell, H. and Tylecote, R. F. The working of copper-arsenic alloys in the Early Bronze Age and the effect of the determination of provenance. *Proceedings of the Prehistoric Society*, (1972) (38):209-218.
- [115] Meeks ND. Surface characterization of tin bronze, tinned iron and arsenical bronze. In: La Niece S, Craddock P (eds) *Metal plating and Patination. Cultural, technical and historical developments*. Butterworth Heinemann, (1993). pp 247-275.
- [116] Ryndina, N., The potential of metallography in investigations of early objects made of copper and

- copper-based alloys. *Hist. Metall.* 2009. 43/1, 1-18.
- [117] Yadolahi Hafshejani, Atefe. Technology and Cause of deterioration investigation of some bronze ornamentation were found in Kurgan's excavations of jafarabad and interpretation a conservation and restoration plan. M.A. Thesis. Art University of Isfahan. 2015.
- [۱۱۸] [عاطفه ید الهی هفشه جانی، فن‌شناسی و بررسی دلیل تخریب و بعضی از تزینات برنزی یافته شده از جعفرآباد گرگان و تحلیل نقشه حفاظت و مرمت، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر اصفهان، ۲۰۱۵]
- [119] Ravich, I.G., Ryndina, N.V., Early copper-arsenic alloys and the problems of their use in the Bronze Age of the North Caucasus. *Bull. Metals Mus.* 1995. 23, 1-18.
- [120] [120] Budd, P., Gale, D., Pollard, A.M., Thomas, R.G., Williams, P.A., The early development of metallurgy in the British Isles. *Antiquity.* 1992. 66, 677-686.
- [121] Budd, P.D. Determination of the Manufacturing Processes of Early Prehistoric Arsenical Copper Artefacts by Microstructural Analysis Based on a Reevaluation of the Mechanical Prop. 1991b
- [122] Rovira, S., Gomez, R.P., Las primeras etapas metalúrgicas en la península Iberica. *Estudios metalográficos (Madrid).* 2003.
- [123] Smith CS. An examination of the arsenic-rich coating on a Bronze Age bull from Horoztepe. In: Young WJ (ed) *Applicat Sc Examin arts*, (1973). pp 96-102.
- [124] Northover P. Properties and use of arsenic-copper alloys. In: Hauptmann A, Pernicka E, Wagner GA (eds) *Old World Archaeometallurgy. Proc Internat.* (1989).
- [125] Pereira, F., Silva, R.J.C., Monge Soares, A.M., Araújo, M.F., The role of arsenic in Chalcolithic copper artefacts e insights from Vila Nova de Sao Pedro (Portugal). ~ *J. Archaeol. Sci.* 2013. 40, 2045-2056. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2012.12.015>
- [126] Ravich, I.G., Ryndina, N.V. Early copper-arsenic alloys and the problems of their use in the Bronze Age of the North Caucasus. *Bull. Metals Mus.* 1995 23, 1e18.
- [127] Lechtman, H. Arsenic bronze: Dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas. *Journal of Field Archaeology*, (1996). 23(4):477-514.
- [128] Northover, P. Exotic alloys in antiquity. In Rehren, T., Hauptmann, A., and Muhly, J. D., editors, *Metallurgia Antiqua, Der Anschnitt:* (1998). Beiheft 8, pages 113-121. Deutsches Bergbaumuseum Bochum, Bochum.
- [129] Böhne, C Zur Frage der Härtung von Kupferwaffen und Geräten. *Technische Beiträge zur Archäologie*, (1965). 2:126-130.
- [130] Budd P, Ottaway BS. The properties of arsenical copper alloys: implications for the development of eneolithic metallurgy. In: Budd P, Chapman B, Jackson C, Janaway R, Ottaway BS (eds). (1991).
- [131] Bosk M. Material properties of copper alloys containing arsenic, antimony, and bismuth. The material of Early Bronze A. (2003).
- [132] Budd, P. Enolithic arsenical copper: heat treatment and metallographic interpretation of manufacutering processes. In proceeding of the international symposium on archaeometry, Heidelberg 1990, 35-44-Basel. Birkhäuser verlag.
- [133] Hanson, D. Marryat, C. Investigation of the effects of impurities on copper. Part III- the effect of arsenic on the copper. *journal of institute of metals.* 1927. 37, 121-148.
- [134] Scott. D. A. Metallography and microstructure of ancient and historic metals. Gettyconservation inst. J. Paul Getty Museum. Malibu. Calif. 1991.
- [135] Scott, David A. Schwab, Roland. *Metallography in Archaeology and Art.* Springer Nature Switzerland. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11265-3>.

- [136] Scott. D.A. Ancient Metals: Microstructure and Metallurgy Vol I. Principles and Practice. Conservation science Press. 2010.
- [137] Selimchanov, I. R Arsenical copper in H.H. Coghlan's works and investigations in the laboratory of the Institute of History at the Academie of Sciences at Azerbaijan SSR. Historical Metallurgy, (1982). 16(2):50–57.
- [138] Charles, J. A. Early arsenical bronzes – a metallurgical view. American Journal of Archaeology, (1967). (1):21–26.
- [139] Askeland, D. R. The science and engineering of materials. PWS Publishing Company, Boston. (1994).
- [140] Pernicka, E. Gewinnung und Verbretung der metalle in pärhistorischer Zeit. Jahrbuch des Römish-Germanchen Nationalmuseum Mainz. 1990. 21-129.
- [141] Witter, W. Neues zu den Barrenring-Hortfunden im Vorlande der Ost-alpen. Prähistorische Zeitschrift, (1953). 34/35:179–190.
- [142] Spiridonov, A. A. Kupfer in der Geschichte der Menschheit. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. (1986).
- [143] Ottaway, B. Prähistorische Archäometallurgie. Verlag Marie L. Leidorf, Espelkamp. (1994).
- [144] Pollard, A. M., Thomas, R. G., and Willianm, P. Some experiments concerning smelting of arsenical copper. In Budd, P., Chapman, B., Jackson, C., Janaway, R., and Ottaway, B., editors, Archaeological Sciences 1989, Oxford. Oxbow Books.
- [145] Zwicker, U. Natural copper-arsenic alloysand smeltingarsenic bronzes in early metal production. In Mohen, J.-P., editor, Découverte du métal, volume 2 of Millénaires, (1991). Pages 331–340. Picard, Paris.
- [146] Thornton C. The chalcolithic and early Bronze Age metallurgy of Tepe Hissar, Northeast Iran: a challenge to the “Levantine paradigm”. PhD-diss Univers of Philadelphia. (2009b).
- [147] Thornton C. The emergence of complex metallurgy on the Iranian plateau: escaping the Levantine paradigm. J World Prehist. (2009a). 22:301–327.