

### المعادن

(١, ٥) مقدمة<sup>(١)</sup>

(١, ١, ٥) التكوين والخواص<sup>(٢)</sup>

تتألف المعادن من بلورات تعرف بالحبيبات. وتتأثر الخواص الفيزيائية للمعادن، جزئياً، بحجم الحبيبات وشكلها. مثلاً، عند طرق البرونز تتسطح الحبيبات، ومن ثم ينتج عنها معدن أقوى لكنه أكثر هشاشة؛ وبالتالي فإن التسخين الذي يعرف بالإحماء (annealing) قد ينتج عنه حبيبات أصغر حجماً، تحتوي على درجة من القوة الزائدة، ولكن المعدن يصبح بدرجة من الهشاشة. ويحدث هذا التغيير عند درجة حرارة إعادة البلورة، التي تكون في حدود ٦٠٠ درجة مئوية بالنسبة للبرونز، بينما هي منخفضة للخصائص بمستوى درجة حرارة الغرفة العادية.

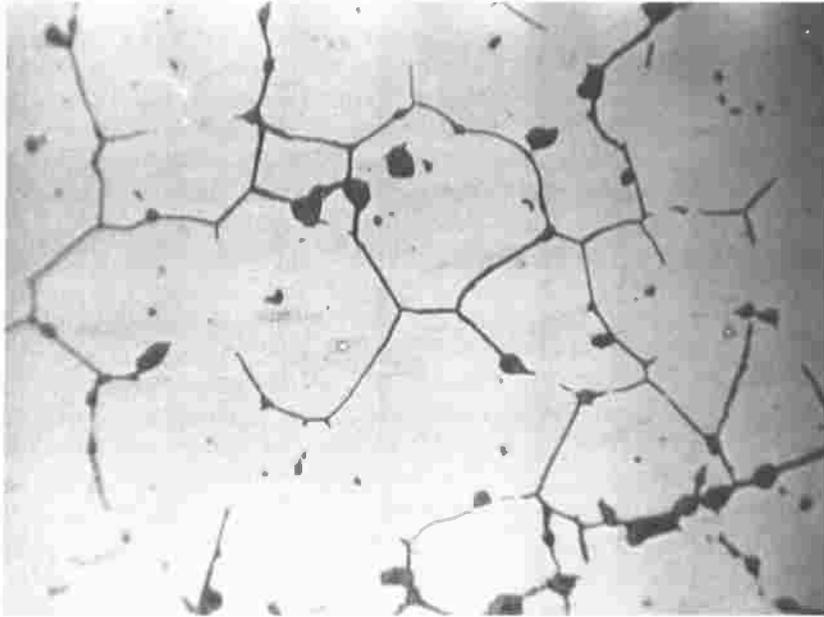
إضافة إلى شكل الحبيبات، فإن الخواص الفيزيائية للمعادن تتأثر بالمادة التي تتألف منها. ففي المعادن الخالصة، فإن هذا الأمر بسيط، أما بالنسبة للسبائك، التي تتكون من خلطات من المعادن وعناصر أخرى، فإن الحبيبات إما أن تكون متألفة من عناصر خالصة، أو مركبات كيميائية أو من عناصر السبيكة، أو خليطاً من ذلك،

\* annealing تعني التسخين ثم التبريد، وتسمى في بعض الأحيان التلدين، من الفعل يلدن. المترجم.

وكل مركب يتكون يسمى مرحلة أو طوراً (phase). ولكل مرحلة خواص كيميائية مختلفة، وكل منها يسهم في دمج بعض هذه الخواص في المعدن الناتج، ومن ثم فإن وجود مرحلة مركب هش سوف يجعل المعدن بصورة عامة يتميز ببعض الهشاشة. ويعتمد حدوث المراحل في السبيكة على تركيز عناصر السبيكة والحرارة التي تتعرض لها، والمدى الذي وصلت إليه درجة حرارة برودتها. فعلى سبيل المثال، فإن البرونز الذي يحتوي على ٥٪ من القصدير سيتكون من حبيبات كلها من نوع واحد للمرحلة، أي خليط مرن من النحاس والقصدير. غير أنه، إذا ما ارتفع تركيز القصدير فلا تنخفض درجة إنصهار المعدن، لكن يتكون أيضاً مركب جديد وصلب وهش من القصدير والنحاس، مما يؤثر على خواص البرونز الناتج. وإذا ما تم تبريد المعدن بسرعة، فإن كميات فائضة من هذا المركب الهش سوف تتكون، لكن يمكن تشتيته نوعاً ما عن طريق إعادة تسخين هادئ. في بعض الحالات، يمكن أن يحدث هذا التغيير في المرحلة عند درجات الحرارة العادية، لكن عادة ما يحدث فقط خلال فترة زمنية طويلة جداً.

تحتوي المعادن عادة على شوائب من مواد أخرى بكميات صغيرة، والمتبقي، في بعض الأحيان يحتوي على كميات كبيرة من الخبث. الخبث: هو نوع من الزجاج قد يحتوي على مادة بلورية، يتكون خلال الصهر (القسم ١، ٥، ٢) من المادة السيليكونية المتوفرة في معظم المعادن الخام. ويوجد الخبث إما داخل الحبيبات أو عند حدود الحبيبات، مما يؤثر على خواص المعدن، ويستطيل في الاتجاه الذي يسير عليه المعدن. من خلال دراسة تكون الحبيبات وتركيبها ومراحل المعدن، يصبح بالإمكان معرفة خواص المعدن وتاريخ صناعته. وقد أجريت دراسة هذا التعدين (metallography) باستخدام المجهر الاستقطابي (microscope polarizing) لرؤية السطوح المصقولة للمعدن (اللوحة ٥، ١). عادة ما تؤخذ عينة صغيرة من القطعة الأثرية بحجم ٥٠ ملم مكعباً

تقريباً، ومن ثم توضع هذه العينة في وعاء بلاستيكي وتصلق بنعومة. يجب ملاحظة أنه إذا أعيد تسخين القطعة الأثرية المعدنية أو شوهدت بعد الكشف عنها، وهو أمر قد يحدث، فإن بعض هذه المعلومات قد يفقد. وتختلف درجات حرارة البلورة الحرجة (critical recrystallization temperatures) بالنسبة لكل معدن وسيبكية، وهناك إرشادات بخصوص هذه المعادن في الأقسام التالية.



اللوحة ( ٥, ١ ). جزء مصقول يوضح الحبيبات من سبيكة نحاسية متآكلة.

(٥, ١, ٢) المواد المرتبطة

(٥, ١, ٢, ١) الوصلات<sup>(٣)</sup>

يمكن وصل المعادن إما ميكانيكياً، بالطي أو البرشام، أو بطريقة إنشائية أخرى. يمتاز بعض المعادن، وبشكل خاص الحديد، بخاصية مفيدة للغاية وهي أنه عندما يُلحَمُ

سطحان مكشوفان (عن طريق الحرارة أو الطرق)، فإنهما يلتحمان. غير أن هناك طرقاً أخرى لوصل المعادن، وهذه تتطلب إضافة أنواع مختلفة من المواد.

تتضمن مادة اللحام (soldering) تشكيل سبيكة بين مادة اللحام وسطح المعدن (أو المعدن) الذي يتم لصقه عليه. ولتكون مادة اللحام فعالة يجب أن يكون لها القدرة على تشكيل سبيكة مع المعدن، ويجب أن تكون قادرة على الالتصاق مع المعدن دون تدخل طبقة من الأكسيد. وللحصول على لحام جيد، يجب أولاً أن يكون طرف المعدن نظيفاً، ومن ثم توضع مادة اللحام المنصهرة، وذلك يعني أنه يجب أن يكون لها درجة حرارة انصهار أقل من المعدن. ولضمان هذا الالتصاق، تستخدم مادة تعرف باسم المثبت (Flux) لإزالة أي أكسيد، أو لمنع تكونه خلال عملية اللحام، وللمساعدة في تدفق مادة اللحام فوق المعدن. وفي حالة تغطية طرفي المعدن، الذي سيتم وصله، بمادة اللحام كل على حدة، ثم لصقه بالتسخين الموضعي، فإن هذا اللصق يسمى بالتعرق (Sweating on).

اللحام الصلب (Hard solders): وهو لسبائك معدنية لها درجات حرارة انصهار عالية، عادة ليست أقل بكثير عن درجة حرارة انصهار المعدن المراد وصله. يعني هذا أن السبيكة، بين مادة اللحام والمعدن، ستكون كثيفة واللصق قوياً. ويتمثل هذا باستخدام لحام الفضة على الفضة أو الزنك المقتسى على النحاس الأصفر. وفي التحف الأثرية، يمكن أن تشتمل المثبتات (Fluxes) لمواد اللحام الصلبة، على ملح وملح النطرون أو الحجر الخمري (البلورات التي تظهر في الخمرة العتيقة).

اللحام المرن (Soft solders): وهو لسبائك لها درجات حرارة انصهار منخفضة، إذا كانت أقل بكثير من المعدن، فإنه ينتج تسبك قليل ويصبح اللصق، الذي لا يتم إلا عن طريق الضغط (keying)، ضعيفاً. وتعد سبائك الرصاص والقصدير أكثر مواد اللحام المرنة شيوعاً، وتستخدم مع المثبتات، مثل شمع النحل

والرايمنتج؛ وبينما لا تزيل هذه المثبتات الأكاسيد، إلا أنها تمنع تكونها كطبقة بل إنها تحترق وتنتهي.

تستخدم المواد اللاصقة للصلق المواد غير المعدنية مثل الزجاج، والمرجان، أو للصلق الأحجار الكريمة بالمعادن. وهي قد تكون عضوية أو غير عضوية (القسم ١، ٣، ٤).

#### (٢، ١، ٥) السطوح المعدنية المختلفة<sup>(٤)</sup>

من الشائع أن يكون اللون المعدني لسطح المعدن مختلفاً عن لون الجسم، وقد يكون هذا نتيجة متعمدة للأساليب المستخدمة في التزيين، أو لجعل القطعة المعدنية تبدو أكثر قيمة مما هي عليه، أو لحمايتها من التآكل. ويمكن أن تتكون هذه السطوح المختلفة بوضع طبقة رقيقة من معدن مختلف ثم يضغط عليها ميكانيكياً، أو بإضافة المواد اللاصقة، أو لحمها. في الحالة الأخيرة، تكون مشكلات عدم استمرارية لحامها بسبب طبقة الأكسيد المتكونة، وهي مشابهة لتلك التي تحدث أثناء لحام الوصلات (القسم ١، ٢، ٥)، ومن ثم تصبح عمليات إعداد السطح واستخدام المثبتات ضرورية.

في المقابل، يمكن الحصول على هذه الأسطح من خلال إزالة معدن واحد أو أكثر من سطح السبيكة\*. لاحقاً (القسم ٢، ٣، ٥) سترى هذه الظاهرة، التي تعرف بتخصيب السطح، والتي قد تحدث بشكل طبيعي أثناء عمليات التآكل، لكنها تنتج اصطناعياً على سبائك الفضة أو الذهب فتعرف بالتفضيض (blanching) أو الطلاء الاستنزافي بالذهب (depletion). فهنا تتغير المعادن، في طبقة سطح السبائك، بالتسخين، وتزال الأكاسيد الناتجة بالغمر في الأحماض الطبيعية. وإذا سخن المعدن في غبار الطوب، فإن الأملاح الآكلة، الموجودة في المسحوق، تعمل على تعزيز الاستنزاف.

\* حيث إن السبيكة تحتوي على أكثر من معدن. المترجم.

يمكن الحصول على اللون الفضي الموجود في بعض القطع الأثرية المعدنية بواسطة أنواع مختلفة من المعادن؛ وقبل تحديدها يستحسن الإشارة إليها بأنها "معدن أبيض" بدلاً من التسرع بالحكم عليها أنها فضة، بافتراض أن السطح واحد من الأنواع المذكورة لاحقاً. في بعض الأحيان يمكن أن يظهر السطح الفضي الموضوع على السبائك النحاسية لامعاً حتى عندما يحتوي على ٧٠٪ من القصدير، حيث يفترض أن يسمى في هذه الحالة "التصفيح" (tinning). وبالإمكان طرق شريحة فضية رقيقة بالدرجة الكافية التي تسمح بلحمها على قطعة معدنية ما، لكن الناتج لا يكون مرضياً جداً أبداً. في العادة يتم إنتاج الطبقة الفضية أولاً بوضع اللحام الفضي (القسم ١، ٢، ١، ٥) على القطعة المعدنية، ومن ثم تفضيض المعدن الأصلي. ويظهر أن هناك العديد من الطرق المختلفة المستخدمة للتفضييض، من أهمها ما يستخدم فيه مزيج الفضة (زئبق ممزوج بمعدن آخر) (amalgam). هنا توضع عجينة من الفضة والزئبق على سطح ثم تسخن، حيث يطرد الزئبق وتلحم الفضة. ويمكن أن تبقى آثار من الزئبق على المكان الذي استخدم فيه المزيج. وعلى نحو مماثل، يتكون السطح الفضي عموماً بواسطة تفضييض المواد الفضية الأصلية (القسم ١، ٦، ٥).

القصدير (Tinning) يمكن أن تكون رقيقة للغاية، وعادة ما تظهر أكثر قتامة من التفضييض، نتيجة للطبقة التي تغطيها من أكسيد القصدير (القسم ٢، ٤، ٥). وهي في العادة غير نقية، وذلك لاندماجها، في شكل سبيكة، مع الرصاص، أو النحاس، أو حتى النحاس الأصفر. أما الرصاص الخام وحده فيمكن أن يعطي تأثيراً مماثلاً. وحيث إن هذه السبائك رخيصة نسبياً، ولها درجات حرارة انصهار منخفضة، فإن القطعة عادة ما تغمر في حمام من السبيكة المنصهرة، وهناك احتمالات عديدة للنتائج<sup>(٥)</sup>. فقد

\* أو القصدير وهو الطلاء بالقصدير. المترجم.

يتكون على سطح القطعة طبقة بيضاء ، وهي تتكون نتيجة لانفصال حبيبات القصدير عن البرونز ، المحتوي على نسبة عالية من القصدير ، أثناء الصب ويسمى هذا بترشيح القصدير (tin sweat).

كما اتضح أن الزرنيخ\* يعطي سطحاً لامعاً أبيض للسبائك النحاسية. ويمكن أن يحدث هذا إما عن طريق فصل الزرنيخ عن سبيكة النحاس أثناء الصب ، أو عن طريق وضع خام الزرنيخ على السطح ثم يختزل في الفحم (الجمر).

وحيث يمكن طرق الذهب إلى شرائح مرنة رقيقة جداً ، فإن بالإمكان لصقه على سطح معدن آخر باستخدام مادة لاصقة تغطي ما بين السطحين كليهما. في كثير من الأحيان<sup>(١)</sup> ، يكون الذهب في السبيكة الفضية أو النحاسية مذاباً مع طبقة سطح المعدن فقط ، ويتم الحصول على هذا (السطح) من خلال الطلاء الاستنزافي بالذهب لسبيكة الذهب في القطعة الأثرية ، أو لسبيكة النحاس ، التي أذيبت بواسطة سبيكة الذهب/النحاس ، وفي الحالة الأخيرة ، يمكن أن يسمى هذا الطلاء بالذهب ، بهذه الطريقة ، غسلاً أو طلاء (wash or fusion gilding). يمكن وضع طبقة رقيقة جداً من الطلاء الذهبي مع مزيج الذهب والزرنيق (amalgam) وتثبت بالتسخين ، كما تم مع الفضة. هنا قد تبقى آثار من الزرنيق على سطح التماس. غير أن هناك أسلوب ربط آخر وهو لحم شرائح رقيقة جداً من الذهب على سطح القطعة الأثرية.

ومن الممكن وضع الصُّفْر (brass)\*\* أو البرونز على القطع الأثرية الحديدية معطية بذلك سطحاً أصفر ، ومن الممكن تصفيح هذا السطح أولاً. ويجب ملاحظة أن ترسب سطح الذهب المعتم يمكن حدوثه على سبيكة نحاسية أو رصاصية من خلال ظاهرة التآكل أثناء الدفن (القسم ١، ٢، ٣، ٥) والقسم (١، ٢، ٥، ٥).

\* الزرنيخ عنصر معدني ذو لون رمادي. المترجم.

\*\* النحاس الأصفر. المترجم.

**(٥, ١, ٢, ٣) غشاء القدم (الباتينا) (Patina)\*\*\***

يحدث عادة نتيجة للتآكل الطبيعي، ولكن لما كان من الممكن تغيير لون سطح المعدن، فإن من الصعب، في بعض الأحيان، تحديد ما إذا كانت القطعة الأثرية قديمة أم لا. ويمكن الحصول على الألوان بطرق اصطناعية سيتم وصفها في الأقسام الخاصة بكل معدن.

**(٥, ١, ٢, ٤) الورنيش\* والدهانات (Lacquers and paints)**

للمحافظة على لمعان المعادن يمكن منع درجة معينة من الهواء، والرطوبة، والأملاح عنها من خلال وضع الورنيش والشموع والشحوم. وجدت هذه على قطعة أثرية قديمة مصنوعة من سبيكة النحاس (القسم ٤, ٥, ٥)، لكن يمكن أن تستخدم على معادن أخرى. بالنسبة للدهانات فقد اكتشفت على سطوح المعادن، مثل دهان الرصاص الأحمر.

**(٥, ١, ٢, ٥) النيلو (Niello)**

النل هو مادة لامعة سوداء تستخدم على الزخارف الغائرة وبشكل رئيس على الفضة أو الذهب. وهو إما خليط من كبريتيد النحاس والفضة، أو بكل بساطة، كبريتيد الفضة<sup>(٧)</sup> ويلحم على الطبقة السفلية للمعدن.

**(٥, ١, ٢, ٦) المينا (Enamels)**

يتم تكوين المينا من خلال تغطية سبائك النحاس، أو الفضة، أو الذهب أو حتى الحديد بالزجاج. عادة ما يوضع مسحوق الزجاج على المعدن، ثم يسخن بحيث يذوب ويلتحم بالمعدن، وتعتمد درجة الحرارة المطلوبة على تركيب الزجاج (القسم ١, ٤, ٤). ويجب اختيار نوعية مادة الزجاج، التي يجب أن تنصهر عند درجة أقل من درجة انصهار المعدن؛ حتى تسيل على سطح المعدن، ومن ثم تلتحم

\*\*\* طبقة ذات لون أخضر تحدث نتيجة القدم، ويمكن إنتاجها صناعياً بواسطة الأحماض. المترجم.

\* الورنيش هو دهان يطلّى به المعدن ليحافظ على لمعانه، يسمى في بعض الأحيان اللك. المترجم.

بالمعدن ، وينكمش بمعدل درجة انكماش المعدن نفسه ، ليمنع الزجاج من التشقق والسقوط عن سطح المعدن. وإذا استخدمت ألواح الزجاج بدلاً عن المسحوق يجب تثبيتها ميكانيكياً أو بمواد لاصقة. غير أنه لا يمكن استخدام الألواح الزجاجية ، المصنوعة من قضبان متعددة الألوان ، المعروفة باسم ميليفوريات (Millefiori) ( الشكل رقم ١، ١٥) بشكل مسحوق ، ويظهر أن لصقتها يتم ، غالباً ، من خلال مصفوفة من زجاج أحمر أكثر قابلية للالتحام ( الشكل رقم ١، ٥ ب)<sup>(٨)</sup>. تم مناقشة تدهور طلاء الميناء ومعالجته في الفصل الرابع.

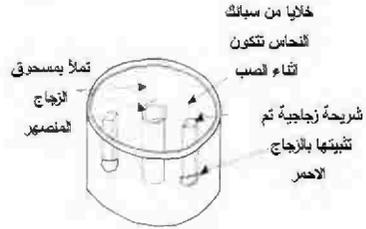
أ- تكون عنصر الميليفوري:

- (١) يتكون قضيب زجاجي مربع من عدة أقسام.
- (٢) يتم تغليف ( احتواء ) القضيب في شريحة من الزجاج بلون آخر.
- (٣) وضعت قضبان متماثلة بعضها مع بعض وتم احتواؤها في شريحة زجاجية أخرى.
- (٤) تم تسخين الكل وسحبه ليشكل قضيباً أكثر رقة وطولاً.
- (٥) تم تقطيعه القضيب إلى عناصر.



ب- تكون طلاء ميناء الشاملف (Champleve) :

- ١- تملأ الفراغات بالمسحوق الزجاجي ومن ثم تلحم لاحقاً.
- ٢- تتكون خلايا السبيكة النحاسية في القالب ... إلخ.
- ٣- تثبت شريحة ميليفوري في مكانها بواسطة الزجاج الأحمر.



الشكل رقم (١، ٥). صناعة طلاء الميناء.

**(٥, ١, ٢, ٧) الترسيع المعدني**

يمكن وضع المعادن في تجاويف في معادن أخرى إما بطريقة ميكانيكية بسيطة، أو عن طريقة مماثلة للذي جرى وصفه للحام. في هذه الحالة، سوف يعكس الاختيار والتقنية الطريقة المستخدمة للترصيع المعدني (القسم ١, ٢, ٥).

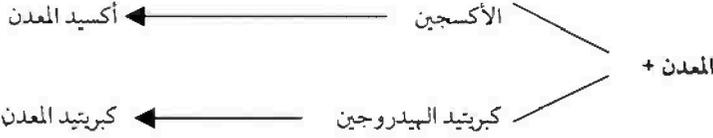
**(٥, ١, ٣) التلف**

من المعروف، حتى الآن، أن أهم أنواع التلف في المعادن ينتج عن التلف الكيميائي أكثر من التلف الفيزيائي. إن الكيمياء المستمدة من المصادر العضوية والنشاطات البيولوجية للكائنات الدقيقة، تتوافر، على الدوام في البيئة، وعادة ما تُحدث تغييراً كيميائياً في المعادن مثل التآكل. وفيما عدا الذهب، فإن المعادن التي تستخدم في اللقى الأثرية ليست مستقرة على نحو خاص، وتميل في معظم البيئات إلى التفاعل مع المكونات الأخرى لتشكيل مركبات أكثر استقراراً. وهذا ليس مستغرباً طالما أن مصدر هذه المعادن هو المادة الخام، أي مركبات كيميائية مستقرة للمعادن، التي لا يمكن استخلاصها إلا بواسطة عملية الصهر، وهي عكس التآكل. هناك نوعان من التآكل يتعرض لهما المعدن: تآكل يعرف باسم التآكل الجاف (dry corrosion)، وعادة يتخذ شكل طبقة رقيقة كالباتينا أو على شكل لون باهت (tarnishing). والنوع الثاني يعرف باسم التآكل الرطب (aqueous corrosion)، حيث تتم مهاجمة المعدن بشكل أكثر عنفاً وذلك لوجود الرطوبة.

**(٥, ١, ٣, ١) التآكل الجاف**

بما أن أية بيئة طبيعية تحتوي، تقريباً، على بعض الرطوبة، فإن هذه النوع من التآكل، في القطع الأثرية، يكون أقل شأنًا من التآكل المائي. فعند صقل معدن ما بحيث يصبح سطحه لامعاً، ثم يترك في جو جاف، فإنه يصبح باهتاً وقاتمًا. وهذا بسبب

الأكسجين أو المواد الملوثة، مثل كبريتيد الهيدروجين (hydrogen sulphide) في الجو، التي تهاجم السطح:



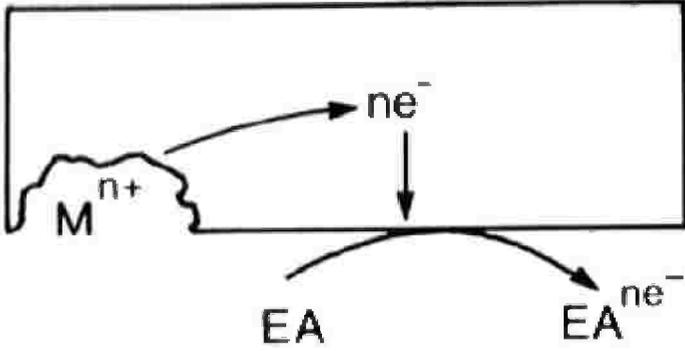
قد يكون للأكسيد أو الكبريتيد (طبقة رقيقة) الناتج تركيباً بلورياً مماثلاً للمعدن الأم التحتي، بحيث يتناسب معه تماماً ويمنع وصول المزيد من الغازات. ويقال إن مثل هذه الطبقات الرقيقة واقية حيث إنها تسمح بحدوث تآكل سطحي خارجي فقط. غير أن بعض الطبقات الرقيقة تخفق في محاكاة التركيب البلوري المعدني، ولا تلتصق بشكل جيد وتخفق في منع المزيد من التآكل كما سيجري وصفه لاحقاً.

(٢، ٣، ١، ٥) التآكل المائي<sup>(٩)</sup>

وهو أكثر شيوعاً من التآكل الجاف حيث تدخل الرطوبة في ذلك. توجد الرطوبة في معظم البيئات الطبيعية وما لم يتم حبسها في شكل جليد، فإنها يمكن أن تتسبب في تلف وتآكل كبيرين. في الأحوال البيئية الطبيعية توجد الرطوبة على شكل بخار ماء، ويمكن أن تتكثف على سطح معدن بارد، أو أن يتم جذبها بواسطة المركبات الممتصة للرطوبة، ملوثة السطح المعدني. وأينما توجد الرطوبة، فإن عمليات التآكل لا تصبح مركبات كيميائية بسيطة، ولكن تتضمن أيضاً الكيمياء الكهربية (Electrochemistry).

**التآكل الكهروكيميائي:** يتم تحرير الإلكترونات (electron)، وهي جزيئات تحمل شحنة سالبة (negative)، عندما تكون ذرة المعدن أيوناً (ion)، ففي هذه الحالة، يسمى الجزيء الذي يحمل الشحنة الموجبة (positive) بالكاتيون (cation). ويطلق على كل هذه العملية مصطلح، الأكسدة (oxidation)، وهي في أساسها إزالة

للإلكترونات، حيث لا تكون هناك حاجة لاستخدام الأوكسجين نفسه، وليس بالضرورة أن يتكون أكسيد. ولذا، فعندما تفقد الإلكترونات تصبح المعادلة:



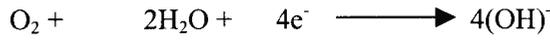
- الأيلكترونات - e<sup>-</sup>
- عدد الأليكترونات - n
- أيون المعدن - M<sup>n+</sup>
- الأيونات المتفاعلة - EA

الشكل رقم (٢، ٥). التآكل المائي للمعدن.

يحدث هذا التفاعل (الأوكسدة) في موقع يعرف بالمصعد (anode) وينتج عنه تآكل للمعدن. ويجب أن يتم استهلاك الإلكترونات التي تتحرر أثناء تآكل المعدن في تفاعل مكمل يعرف (بالاختزال)، يحدث هذا في موقع يعرف بالمهبط (cathode). يمكن أن يكون هذا الموقع منطقة قريبة من سطح المعدن أو الطبقات الخارجية، غير أن هذا يعتمد على متقبل الإلكترون (acceptor) الموجود، ومعدل الإحلال أو الاستبدال

لمتقبل الإلكترون في المهبط يحدد معدل تآكل المعدن ( الشكل ٢, ٥). وحيث ينجم عن هذا النظام تدفق إلكترونات ومن ثم تيار، فإنه يسمى خلية التآكل.

في البيئات المائية، حيث يتوفر الأكسجين الحر، يكون متقبل الإلكترون عند المهبط هو الأكسجين نفسه؛ يقوم الأكسجين والماء بالاتحاد مع الإلكترونات المتقبلة لتكون أيونات هيدروكسيل في تفاعل امتصاص الأكسجين.



أيونات الهيدروكسيل إلكترونات ماء أكسجين

عندما تكون مستويات الأكسجين منخفضة، تعمل أيونات الهيدروجين كمتقبلات للإلكترون، حيث يتم اختزالها إلى ذرات هيدروجين:



غير أن هذه المعادلة بطيئة، ما لم تكن أيونات الهيدروجين فائضة بشكل كبير، أي أن يكون الرقم الهيدروجيني حوالي (pH 4). هناك عوامل أخرى تؤثر في التآكل في الأحوال الخالية من الأكسجين وسيتم التطرق إليها لاحقاً.

**التآكل الفعال، والخامد والمناعة ( Active corrosion, passivation and immunity):**

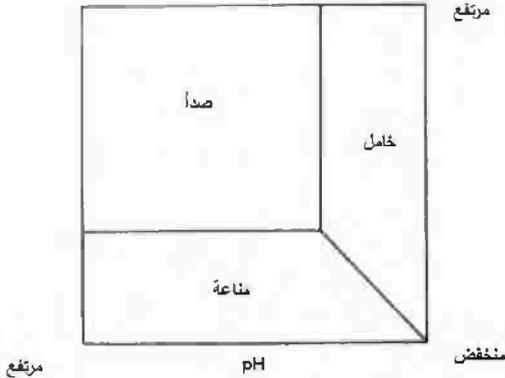
لدى كاتيونات المعدن التي يتم تحريرها الآن عند المصعد خياران؛ الأول: بإمكانها دخول البيئة بوصفها أيونات مائية وترسب بعيداً عن المعدن الذي يواصل التآكل. ويحدث هذا عادة في البيئات الحامضية جداً أو القلوية المتناهية، عندما تُفقد بقايا المعدن كافة. وبشكل آخر، يمكن أن تتفاعل مباشرة مع الأيونات في البيئة (الكربونات، والأكاسيد، والهيدروكسيدات، والكبريتات... إلخ) وتشكل الصدأ الذي يلتصق بسطح المعدن. وإن هذه الأنواع من الصدأ، خاصة الكربونات التي تتوفر في التربة القلوية، سويماً مع طبقات أكسيديه معينة، تميل إلى خمد خلايا التآكل، مما

يمنع المزيد من التآكل. ويعمل هذا على حفظ معظم معدن القطعة الأثرية ويطلق عليه مصطلح الخامدية (passivation).

ومن ثم، وبشكل عام، ينجم أحد الموقفين: (أ) التآكل النشط: حيث يشكل المعدن صدأً قابلاً للذوبان، يتحرك بعيداً عن المعدن إلى البيئة المحيطة، (ب) الخمول: حيث يشكل المعدن صدأً صلباً، يلتصق بسطحه ويمنع مزيداً من التآكل أو أنه يحد منه. في بعض الأحيان وجد أن المعادن تتآكل في بيئات يفترض أن تحدث فيها طبقة خامدة تمنع التآكل، ويمكن أن يكون هذا نتيجة لتوفر بعض الأيونات العنيفة، مثل أيون الكلور. ويعكس الأيونات الأخرى، فإن هذه الأيونات العنيفة تمر عبر الطبقة الواقية وتسبب تآكل المعدن من تحته.

على الرغم مما اتضح سابقاً من أن تآكل المعدن أو خامديته يعتمدان على الرقم الهيدروجيني للبيئة (pH)، فإن ذلك ليس هو الصورة الكاملة. وحيث إن التآكل هو تفاعل يتضمن أكسدة واختزالاً، فإنه أيضاً يعتمد على طاقة النظام، ويتم شرح هذا بواسطة طاقة فرق الجهد بين الاختزال والأكسدة (Eh). فكلما كانت هناك طاقة أكثر في النظام، كانت الأكسدة أكثر وكان من المرجح أكثر أن يتآكل المعدن. وعندما تكون (Eh) منخفضة جداً، كما في البيئة المختزلة، فإنه لا يحدث تآكل ومن ثم يقال إن المعدن محصن أو ذو مناعة. ويمكن عرض التأثير المشترك لهذين المتغيرين لـ (pH و Eh) اللذين يعملان سوياً على المعدن في شكل رسم تخطيطي (الشكل ٥,٣). وقد كان "مارسيل بوربايا" (Marcel Pourbaix) أول من استخدم هذا المخطط ومن ثم نسب إليه "مخطط بوربايا"<sup>(١٠)</sup>. يندر أن يوجد فرق جهد منخفض (اختزال/أكسدة) redox potential، الذي ينجم عنه مناعة في التربة العادية، وذلك لأن ماء المطر يعمل على سد نقص التربة من الأكسجين، ويعمل على رفع معدل فرق الجهد. غير أن مثل هذه

الأحوال كثيراً من تسود في البيئات الراكدة ( مصب النهر، والشواطئ، وترسبات المناطق الحضرية المضغوطة، وبعض المستنقعات) وتسمح لبعض المعادن مثل النحاس، أن يصبح منيعاً ضد التآكل. أما بعض المعادن الأخرى الأكثر تفاعلاً، مثل الحديد، الذي يحتاج لطاقة صغيرة نسبياً للتآكل، فإنه يتطلب عادة طاقات اختزال أو أكسدة منخفضة بشكل غير عادي لتحقيق المناعة ضد التآكل. غير أن هناك مساهماً آخر في بيئة التآكل في البيئات التي يكون فيها توفر الأكسجين محدوداً، هذا المساهم هو الكائنات الدقيقة.



الشكل رقم (٣، ٥). رسم تبسّطي لمخطط بوربايا لنشاط النحاس في الماء.

التآكل الميكروبي غير الهوائي (Anaerobic Microbial Corrosion): لم يستغرق علماء صدأ المعادن طويلاً قبل إدراك أن ما ذكر أعلاه ليس بالصورة الكاملة بحيث إن الحديد المدفون حديثاً يتآكل حتى في الظروف التي يكون فيها احتمالية الاختزال أو التأكسد منخفضة جداً. وقد أدرك أن البكتيريا غير الهوائية المختزلة للكبريتات (القسم ٢، ١، ١، ٢) تسهل عملية التآكل، ربما عن طريق إنتاج أيونات

الكبريتيد التي تتحد فوراً مع أيونات المعدن عند المصعد، مما يسمح بمزيد من الأكسدة للمعدن. والنشاط الحيوي للبكتيريا يمكن أن يلخص كما يلي:



لا تعمل هذه البكتيريا إلا في مناطق معينة، عندما يكون فرق الجهد بين (-1.50 إلى +1.10) ميلي فولت والرقم الهيدروجيني (pH) يساوي 5.5 إلى 8، وتتوفر هذه في الطين الأرضي أو البحري الكثيف. وتستثنى سبائك النحاس من هذا التآكل المعزز، حيث إن النحاس سام بالنسبة للبكتيريا.

#### التهوية النفاضلية والخلايا المجلفنة\* ( Differential Aeration and Galvanic )

(Cells): من أجل إعداد خلية التآكل، يجب أن تصبح منطقة واحدة من المادة مهبطاً والأخرى مصعداً، يمكن إحداث هذه التفرقة بعدة طرق. إذا كان تركيز الأكسجين في منطقة من السطح أكثر من منطقة أخرى، فإن هذه المنطقة سوف تتخذ دور المهبط، بينما ستأكل منطقة الأكسجين المنخفض. ويسمى هذا بخلية التهوية النفاضلية، ويمكن رؤية هذا التآكل عندما تتآكل منطقة معدن ما تحت البرشام، وذلك على حساب المعدن المهبط. وتميل المناطق ذات الطاقة العالية إلى فقدان الإلكترونات بسهولة أكبر من المناطق ذات الطاقة المنخفضة، حيث تتقابل عند الطاقة العالية شبكية بلورية واحدة مع الأخرى، وتصبح الحدود الحبيبية داخل المعدن مصعداً بالنسبة للحبيبة المغلقة، وسوف تتآكل بشكل تفاضلي. يمكن إعداد المصعد أو المهبط إما بشكل كبير، أو حتى على المستوى المجهرى.

هناك سبب آخر لحدوث المصعد والمهبط يمكن أن يوجد، داخل القطعة الأثرية. عندما يتلامس معدنان مختلفان، كلاهما يميل إلى فقد الإلكترونات بدرجات مختلفة.

\* خاص بالتيار الكهربائي (معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية منير العليبي، 1986م). المترجم.

يقاس هذا الميل بجهد قطب المادة (electrode potential)، وبالنسبة للمعادن فإن هذا يمكن ترتيبه بسرعة التأثير كما في السلسلة المجلفنة، على سبيل المثال ( انظر أدناه). وتسمى المعادن التي تتسم بأكثر احتمالية لفقدان الإلكترونات بالمعادن سالبة الشحنة (electronegative)، ويمكن رؤيتها في أسفل سلسلة المعادن التي تتآكل بسرعة أكبر من تلك المعادن في باقي السلسلة. وهي المعادن موجبة الشحنة (electropositive) أو النبيلة، أي المعادن غير القابلة للتآكل ( غير القابلة للصدأ).

## السلسلة المجلفنة

معادن وضعيفة سالبة الشحنة	Zn	زنك
	Fe	حديد مشغول
	Fe	حديد صب**
	Pewter	بيوتر (سبيكة الرصاص مع القصدير)
(50: 50)		
معادن نبيلة موجبة الشحنة	Pb	رصاص
	Sn	قصدير
	Brass	نحاس أصفر
	Cu	نحاس
	Bronze	برونز (سبيكة النحاس مع القصدير)
	Ag	فضة
	Au	ذهب

نظرياً، عندما يتلامس معدنان غير متماثلتين، مثل النحاس والحديد، سوف يتآكل المعدن النبيل، وهو في هذه الحالة النحاس، بنحو أقل من المعتاد، حيث يعمل

\*\* Cast iron يسمى حديداً مصبوباً (حيث يتشكل في قالب) وقد يقال له حديد الزهر، سنستخدم في الترجمة حديد الزهر.

المهبط. ومن ثم يصبح ما يطلق عليه محمياً بشكل مهبطي (cathodically protected). وسوف يتآكل المعدن الوضيع وهو في هذه الحالة الحديد المصبوب، أكثر من المعتاد. وسوف تتواصل الحماية المهبطية حتى يتم تحويل كل الحديد إلى صدأ. أما بالنسبة للسبائك فإن الصورة معقدة؛ فقد يكون المركب الوضيع موجوداً بكميات قليلة للدرجة التي يكون فيها فقدانه غير ملاحظ، ومن ثم تظهر السبيكة أكثر مقاومة للتآكل من المعدن النبيل وحده. وبشكل مغاير، يمكن أن تحدث مرحلة (phases) التعدن المتداخلة وتعمل المصاعد (anodes) كضحية أو مناطق محمية مهبطياً مقاومة للتآكل.

يتأثر تآكل المعادن المجلفنة (عملياً) بعوامل أخرى غير تلك التي ذكرت؛ لذا فإن نسبية المعادن، والخواص البيئية المحلية، وقابلية مقاومة طبقات السطح، جميعها - قد تؤثر على السلوك المتوقع.

هذه المقدمة عن التآكل غير مكتملة أبداً، ولمزيد من الشرح على القارئ اللجوء إلى العديد من الكتب والمقالات المتخصصة في هذا الموضوع (انظر المذكرة رقم ٩).

**ملخص للتآكل الرطب:** بينما تميل معظم المعادن إلى القتامة في الهواء الجاف، فإنها تتآكل بسرعة أكبر في وجود الماء. ويتفاعل المعدن مع الكيمائيات في بيئة مثل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون، والأملاح... إلخ، ويتشكل صدأ على شكل أكاسيد، و كربونات، وكبريتات. وإذا كان هذا الصدأ قابلاً للذوبان، كما هي العادة في البيئات الحمضية، فإن المعدن سوف يواصل التآكل إلى درجة الانعدام، أو في أقصى الحالات، يتحول إلى لون في التربة. غير أن الصدأ إذا كان غير قابل للذوبان، فإنه يبطئ أو حتى يمنع المزيد من تآكل المعدن المتبقي. وتعرف هذه العملية باسم (الحمول)،

التي ، لسوء الحظ ، يمكن قطعها بواسطة ملوثات معينة مثل الكلوريدات ، التي هي مكون للملح العادي.

ويمكن السيطرة على التآكل بالتحكم في مستوى الأكسجين في البيئة. فغياب الأكسجين عادة ما ينجم عنه توقف التآكل ، لكن في حالة الحديد ، يتسبب نشاط البكتريا المختزلة للكبريتات (sulphate-reducing bacteria) (القسم ٢, ١, ٢) في تعقيد الصورة.

بعض المعادن المعروفة مثل المعادن الوضيعة أكثر احتمالاً للتآكل من المعادن النبيلة مثل الذهب والفضة ، يمكن ترتيب المعادن العادية التُحفية فيما يختص بقابلية التفاعل كمعادن لها قابلية عالية للتآكل ( وضيعة) إلى تلك غير المتفاعلة ( النبيلة) :

زنك - حديد - قصدير - رصاص - نحاس - فضة - ذهب

معادن وضيعة معادن نبيلة

عندما يتلامس معدنان ، يحدث نوع خاص من التآكل ، بحيث يتآكل المعدن الأقل قيمة بشكل أكثر أسرع من المعتاد ، بينما الأكثر نبلاً يتآكل ببطء أكثر. هذا هو التآكل المجلفن حيث تتم حماية المعدن الأكثر نبلاً من التآكل.

وحيث إن عمليات التآكل معقدة ، فمن الصعوبة تعميم ذلك فيما يتعلق بالزمن الذي دفنت فيه القطعة الأثرية ، فإن من المرجح العثور على معدن غير متآكل عند الحفر ، عدا تلك الحالة التي يتوقف فيها التآكل كلية.

(٥, ١, ٣, ٣) منتجات التآكل (الصدأ)

تعتمد المكونات الكيميائية للصدأ على التفاعلات الموجودة في البيئة. يوجد الصدأ في شكل مساحيق غير منتظمة (لا شكل لها). لكن ، في كثير من الأحيان في شكل بلورات مماثلة لتلك المعادن التي تتوفر طبيعياً ، ويوصف الصدأ عادة باسم معادنه. وعندما تتكون البلورات ببطء فإنها تميل إلى أن تنمو بشكل أكبر ومن ثم تظهر شفافة ، بينما تلك التي تتكون بسرعة تكون صغيرة ، وتبدو شاحبة ومعممة. من النادر

أن تتألف قشور الصدأ من نوع واحد من الصدأ؛ عادة تتكون من عدد من أنواع الصدأ، التي قد تتداخل بلوراتها، وقد تحتوي على شوائب من التربة المحيطة<sup>(١١)</sup>.

(٥، ١، ٣، ٤) السطوح الكاذبة والسطوح الأصلية ( Pseudomorphs and Original surfaces)

عندما يدفن الحديد قليل الجودة، وفي بعض الأحيان المعادن النبيلة من الرصاص، والنحاس وحتى الفضة لأكثر من بضع مئات من السنين، فإنها لا تستطيع البقاء، فتفنى. وعندما يكون الرقم الهيدروجيني (pH) للتربة عالياً جداً أو منخفضاً، فإن الصدأ يكون قابلاً للذوبان بحيث لا يبقى شيء من القطع الأثرية يمكن التنقيب عنه. غير أنه من الممكن الكشف عن وجودها بوجود تلون في التربة، أو بواسطة اختبار كيميائي دقيق. وفي الكثير من المواقع الأثرية الأخرى، حيث يكون الصدأ معدناً غير قابلاً للذوبان أو غير محمي، بشكل خاص من التآكل، فإنه لا يمكن استرداد القطع الأثرية المعدنية المدفونة من الحفر إلا في شكل معدن كاذب. أي أنه يتم الاحتفاظ بالأشكال الأصلية للقطع الأثرية لكنها تكون مؤلفة من مواد مختلفة في هذه الحالة مثل صدأ الأكاسيد، والكربونات، ويتبقى القليل من المعدن أو لا يتبقى مطلقاً. وتستخدم العبارة (السطح الأصلي) فيما يتعلق بالأشكال الكاذبة للمعدن لوصف مستوى وطبوغرافية أسطح القطع الأثرية قبل تأكلها. في حالات معينة، يصبح من الممكن رؤية السطح الأصلي بسهولة، حيث يتم الحفاظ عليه بواسطة صدأ كثيف ومضغوط، أو بواسطة الجزء النبيل من السبيكة، حيث يذوب الجزء الوضيع. في حالات أخرى، لا يمكن رؤية السطح الأصلي من أول وهلة، حيث يغطي بالصدأ. على كل حال، سوف يظهر في الأقسام التالية كيف تم الاحتفاظ بمستوى وطبوغرافية السطح الأصلي للقطعة الأثرية في داخل شكلها الكاذب، ومن خلال الترميم الحذر، يمكن الكشف عنه. إن الاعتماد على هذا (السطح الأصلي) أمر مشكوك فيه بالنسبة لبعض المعادن دون

غيرها، لكن هذه الفكرة تعدُّ في غاية الأهمية أثناء التنظيف الاستقصائي للقطعة الأثرية.

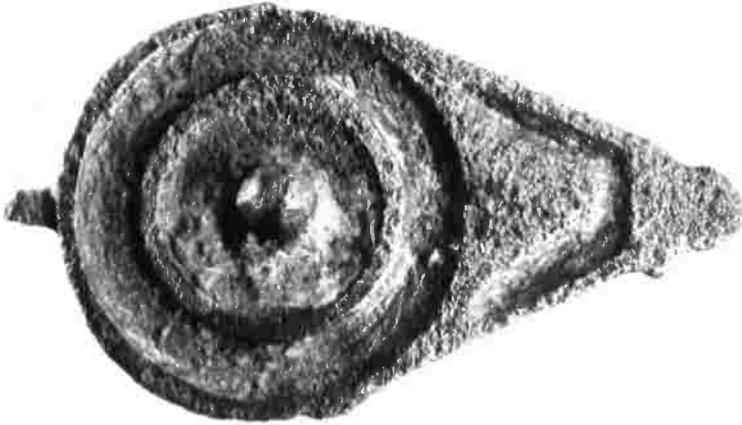
نتيجة أخرى للصدأ تستوجب عناية كبيرة أثناء التنظيف الاستقصائي وهي استبدال الشكل الكاذب للمواد العضوية. وهنا لا يتم الاحتفاظ بالقطعة الأثرية المعدنية بواسطة الصدأ، ولكن أيضاً بالمادة العضوية المرتبطة بها<sup>(١٣)</sup>. لذا فإنه يمكن العثور على بقايا صغيرة من الخشب، والجلد، والعظم... إلخ، داخل قشور الصدأ في البيئات المحايدة وحتى القلوية المشبعة بالأكسجين، التي عادة ما تتآكل فيها المواد العضوية وتنتج المعادن صدأً غير قابل للذوبان.

#### (٥, ١, ٤) التنظيف الاستقصائي

مثل القطع الأثرية كافة، يجب تسجيل المواد المعدنية قبل تلقيها أية معالجة. وكما سيتم بيانه في الأقسام التالية، يعدُّ تصوير القطع المعدنية الأثرية بالأشعة ذا أهمية خاصة (القسم ٣, ١, ٣, ٥)، كذلك يعدُّ التنظيف الاستقصائي مهماً في فهم ظاهرة السطح الأصلي والمادة العضوية المستبدلة (القسم ٤, ٣, ٥, ١). ويمكن أن تثار مشكلة عندما يتم التطرق للصدأ المرئي، كما ذكر سابقاً (القسم ٤, ٣, ٥, ١)، حيث إن لون هذا الصدأ يختلف لأقصى حد، ومضلل إلى درجة ما. وعند تسجيل القطع الأثرية المعدنية عادة يتم تحديد الصدأ بواسطة لونه وشكله فقط، مضيفاً اسم المعدن إذا كان هناك تحليل له. أيضاً تبدو الحاجة للتحليل لتحديد أي معدن أو سطح قد يظهر أثناء التحليل.

إلى وقت قريب كانت القطع الأثرية المعدنية تنظف عموماً بواسطة الكيمائيات أو بالتحليل الكهربائي. ويتضمن هذا تعرية القطع الأثرية، أي الإزالة الكلية للصدأ للكشف عن المعدن تحته. على كل حال، أصبح من الواضح الآن أن هذه الطرق، في معظم الظروف، إما غير مرضية أو غير أخلاقية. إذا ما تمت تعرية (stripped) الصدأ،

فإن الدلائل التي بداخلها، مثل السطوح الأصلية الأخرى، والمواد العضوية المستبدلة، والطبقات المعدنية، وبقايا اللك القديم أو معالجات السطح الأخرى، والطلاء بالمينا المتآكل، والتبطينات غير المحكمة... إلخ - تفقد جميعها. واستخدام طريقة التعرية للكشف عن السطوح الأصلية لا تحدث إلا في حالات نادرة كأن يكون سطح المعدن كثيفاً جداً. إن أي سطح معدني يتم كشفه يكون، في العادة، مغطى بالبثور، وكصدأ فإنه يزال ( اللوحة ٥,٢)، وفي كثير من الأحيان يكون لون السطح غير ممثل للسبيكة الأصلية، حيث إن المعدن الوضيع يتم ترشيحه عبر السنين ليشكل قشرة التآكل. كذلك تهاجم طرق التعرية هذه المعادن عندما يكشف، مما يؤدي إلى مزيد من ترشيح المادة، جاعلاً الدراسات التحليلية مضللة والسطوح الملساء أكثر تنقراً. علاوة على ذلك، يمكن للمعادن والمركبات الذائبة في المحلول أن تسيل بشكل لا رجعة فيه فوق سطح القطعة الأثرية في غضون دقائق. أخيراً، فإن المواد الكيميائية المستخدمة أو المتكونة خلال ذوبان قشرة التآكل، يجب إزالتها بعد المعالجة لمنع مزيد من التدهور في المستقبل. هذا الأمر ليس بالسهل وقد يكون مستحيلاً عندما تصبح الكيميائيات ملتصقة بسطح الصدأ.



اللوحة رقم (٥,٢). غطاء صندوق محكم من سبيكة النحاس مزخرف، أزيل أثر طلاء المينا وظهر المعدن المكشوف منقراً بشكل سيئ.

لهذه الأسباب، تم التخلي عن طرق التعرية بشكل كبير بالنسبة لسبائك الحديد والنحاس. أما بالنسبة لسبائك الرصاص والفضة، فإن الحالة ليست واضحة بشكل جلي. حيث إن هذين المعدنين يتسمان باللين نوعاً ما. خاصة الفضة، حيث قد تحتفظ بسطحها المعدني في القطعة الأثرية. ويمكن أن يحدث التنظيف الميكانيكي تلفاً في هذا السطح، ومن ثم يفضل استخدام المواد الكيميائية أو التحليل الكهربائي.

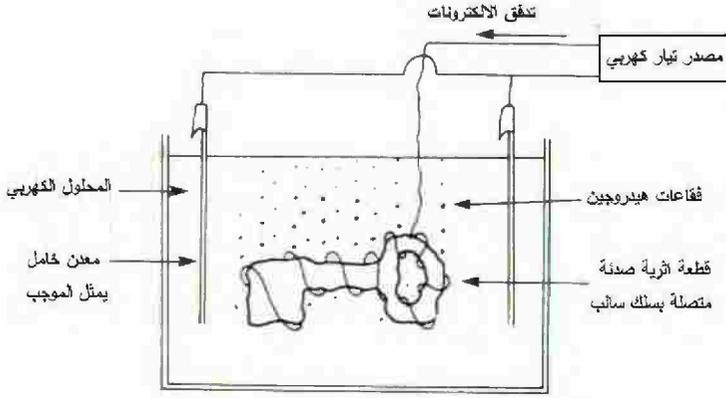
#### (١, ٤, ١, ٥) الطرق الميكانيكية

الطرق الميكانيكية المستخدمة وصفت في القسم (٢, ٣, ٣) وسوف تناقش بتفصيل أكبر مع الطرق الكيميائية المستخدمة، للمساعدة عند اللزوم، في تلك الأقسام الخاصة بمعادن معينة.

#### (٢, ٤, ١, ٥) طرق التعرية

يتضمن التحليل الكهربائي تياراً يتدفق تقريباً عكس الذي يحدث أثناء التآكل الكهروكيميائي (القسم ٢, ٣, ١, ٥). هنا يتم التزود بالكهرباء عن طريق مصدر خارجي مثل البطارية أو المحول، ويمكن تحقيق تأثير مماثل بخلط بعض المواد الكيميائية، حيث تعرف هذه العملية باسم التنظيف الكهروكيميائي.

في طريقة تنظيف التحليل الكهربائي<sup>(١٣)</sup>، يتم توصيل المعدن الذي يتم تنظيفه بالطرف السلبى لمصدر تيار مباشر، بفولتية منخفضة، بينما يتم توصيل المعدن الحامل مثل الفولاذ الذي لا يصدأ بالطرف الموجب. ويتم غمر كلا الطرفين في محلول كهربائي (electrolyte). عندما يفتح التيار، يصبح المعدن الحامل مصعداً، بينما تصبح القطعة المعدنية الأثرية المراد تنظيفها مهبطاً يتغذى بالإلكترونات (الشكل رقم ٤, ٥).



الشكل رقم (٤، ٥). تنظيف مفتاح معدني متآكل بطريقة التحليل الكهربائي.

تفاعل الاختزال الرئيس، عند المهبط، هو تكوّن غاز الهيدروجين، الذي يتكون في شكل فقائيع على سطح المعدن، أسفل قشرة التآكل. وهذه الفقائيع تدفع قشرة الصدأ إلى الحوض، مما يؤدي إلى تنظيف المعدن (ميكانيكياً). ويمكن أن تحدث أيضاً تفاعلات اختزال ثانوية لقشرة التآكل، لتكون منتجات تآكل يمكن إزالتها بسهولة، أو مسحوقاً معدنياً يتم إزالته بالفرشاة. وبخلاف عملية التحليل الكهربائي، فإنه يمكن إنتاج الهيدروجين الضروري لعملية الاختزال بواسطة تفاعل معدن أمفوتري\* (amphoteric) مثل الزنك، أو الألومنيوم مع هيدروكسيد الصوديوم. وتعرف هذه الطريقة بالتنظيف الكهروكيميائي أو الجلفنة، أيضاً يمكن أن يحدث تعزيز للحماية الاختزالية عن طريق تكوين خلية منتجة للتيار الكهربائي (القسم ٢، ٣، ١، ٥) مع القطعة المعدنية الأثرية كمهبط.

يمكن تنفيذ طرق التحليل الكهربائي بدون غمر، من أجل تنظيف بعض الأماكن الموضعية للقطعة الأثرية المعدنية. هنا تكون القطعة الأثرية المعدنية هي المهبط، ويتم عمل

\* أمفوتري: محلول حمضي قلوي يحتوي على أيونين سالب وموجب المترجم.

الدائرة الكهربائية عبر ممسحة رطبة من المحلول الكهربائي، الذي يتم لفه حول مسبار مربوط بالمصعد. وتتم ملاسة هذا الصدأ غير المرغوب الذي سيسقط كما ذكر سابقاً. بوضع عيوب طرق التعرية، التي ذكرت سلفاً، في الحسبان، فإنها لا تستخدم إلا عندما يكون معروفاً أن المعدن لين، ويمكن أن يتلف بطريقة التنظيف الميكانيكي. وتفضل طرق التعرية مقارنة بالطرق الميكانيكية لأنها أرخص ولا تكلف جهداً كبيراً، ولكن يجب وضع تكلفة القطعة الأثرية نفسها في الحسبان.

### (٥, ١, ٥) الاستقرارية

عند استخراج القطعة الأثرية المعدنية من بيئة يكون فيها المعدن والصدأ في حالة توازن، بعد مضي قرون من الدفن، فإنه يجب أن تجرى محاولات إعادة الاستقرارية للقطعة الأثرية. ففي السابق كان الجهد الأعظم ينصب على معالجة المعدن اللامع، لكن حديثاً تركزت العناية حول حفظ قشور التآكل أيضاً، حيث اتضح أنها تحتوي على معلومات كثيرة، وبما أن هذه القشور تختلف اختلافاً كبيراً من معدن لآخر، فإنه سيتم التعرض لاستقراريتها في الأقسام التالية.

من الممكن عمل بعض التعميم فيما يختص بمنع المزيد من التآكل. حيث يمكن تحقيق هذا، تقريباً، بشكل كامل من خلال إزالة الماء من القطعة الأثرية والبيئة، ومن ثم منع التآكل الرطب. وحالما يتم الجفاف، فإنه يمكن وضع حواجز مثل الشمع أو طلاء اللك لمنع دخول الماء مرة أخرى، لكن حيث إن هذه الطريقة ليست ناجحة دائماً، فإن استخدامها محدود. إذا أزيل الأكسجين من الجو، يمكن السيطرة على عملية الأكسدة، بشكل خاص تفاعل امتصاص الأكسجين. وأينما توجد مشيرات التآكل، تجرى محاولات لإزالتها، مثل أيونات الكلوريد، وهي من الأنواع القوية التي يمكن أن تدمر الخامدية. بعد إزالتها في بعض الأحيان يضاف اللك الشفاف أو الشمع لمنع إعادة

التلوث وحماية السطح الهش. يجب توخي الحذر لمنع اللمعان ( القسم ٣,٤,٣ ) أو تراكم الطبقة التي تعوق الدراسة أو التصوير.

وبطريقة أخرى ، من الممكن إضافة مواد كيميائية للعملية نفسها لمنع التآكل المتواصل. هذه المواد الكيميائية التي تعرف بالموانع (inhibitors)<sup>(١٤)</sup> ، يمكن أن تكون في شكل ترسبات أو طبقات تتكون فوق القطعة الأثرية المعدنية ، بحيث يصبح خامداً ، ومن ثم يمنع المزيد من التآكل. أيضاً يمكن أن تعمل الموانع كأبخرة ، عن طريق رش القطعة الأثرية المعدنية بمزيجاتها منها ، وهنا تعرف باسم موانع بخارية ( vapour phase inhibitors ) (VPIs) ، ويتوقف عمل المانع على وجوده. يجب ملاحظة أن التركيز العالي لهذه الأبخرة سام.

في كثير من الأحيان من الصعب العمل على استقرارية القطع الأثرية المركبة من أكثر من مادة ( القسم ٣,٥ ) ، مثل المعادن مع المواد العضوية ، حيث إن هذه المركبات تتطلب معالجات مختلفة جداً ، وهي عادة ، لا يمكن فصل بعضها عن بعض. في المدى القصير ، يجب أن تناسب الاستقرارية (عن طريق التحكم في البيئة) ، مع الجزء العضوي وهو المرجح أن يتلف بسرعة. وعندما تكون القطعة الأثرية المركبة رطبةً ، فمن الأفضل أن تخزن في جو رطب بحيث يُعزل الأكسجين ( القسم ٣,٤,١,٣ ) .

## (٥,٢) الحديد وسبائكه

### (٥,٢,١) طبيعة القطع الأثرية<sup>(١٥)</sup>

من النادر أن يكون الحديد نقياً والمستويات القليلة من المكونات الأخرى يمكن أن توجد خصائص مختلفة جداً داخل السبيكة الناتجة. على أن الفسفور يعمل على تقسية المعدن وتقويته إلا أنه يجعله هشاً عندما يتعرض للطرق البارد؛ أما الكبريت فيحدث الهشاشة فقط. ويعد الكربون العنصر السببكي الذي يشكل أكبر أهمية ، فهو

يؤثر بشكل كبير على خصائص السبائك المختلفة المتكونة عندما يكون بتركيز يتفاوت ما بين صفر إلى ٥٪. إن أكثر المراحل شيوعاً هو الحديد الخام (Ferrite)، والأسمنت الهش الصلب (مركب كارييد الحديد) (iron carbide)، وبيرايت (تصفح الحديد الخام والأسمنت) (pearlite)، والجرافيت (الكربون الخام).

الحديد الذي يتشكل بطريقة الصهر البدائي هو كتلة إسفنجية (spongy) أو كتلة حديد (Bloom) يمكن تقويتها في شكل كتلة صلبة عن طريق الحدادة (التشكيل بالحرارة والتطرق). وعندما يتم تسخين كتلة الحديد في جو مختزل وفي تماس مع الكربون، مثلما يحدث أثناء الصهر، فإن الحديد في السطح يصبح سبيكة مع الكربون. وعندما يتم تشكيل كتلة الحديد، تصبح مناطق السبيكة موزعة في كل الجسم وينجم عنه معدن له تركيب متغاير إلى أقصى حد، لكنه يحتوي على كربون بنسبة ٠,١٪ في المتوسط. ولرفع محتوى الكربون، عن قصد، في كل كتلة الحديد، يتم ذلك عن طريق التسخين، وتعرف هذه الطريقة باسم "الكربنة" (carburization) وهي عملية بطيئة جداً ومكلفة، وتتطلب كميات كبيرة من الفحم؛ لذا فإن الأداة أو المدية من حديد مشغول تشكل في القطعة الأثرية، ثم تقسى الأطراف فقط عن طريق رفع محتوى الكربون إلى حوالي ٠,٣٪ بطريقة الكربنة مما ينتج عنه منطقة فولاذية.

وهناك طرق أخرى اقتصادية لرفع محتوى الكربون في الحديد من خلال التلحيم، حيث يمكن لحم طبقات من الحديد المكربن (الفولاذ) على طرف الأداة أو السلاح الأثري المصنوع من الحديد المشغول. وللحصول على توزيع منتظم للفولاذ في كل القطعة الأثرية، يمكن صنعها من طبقات أو قضبان من الحديد المكربن التي تلحم بعضها مع بعض، ويتم حدادتها (الطرق والحرارة) تكراراً لتوزيع مركبات الكربون في كل القطعة الأثرية. ويطلق على هذه العملية اسم التكديس (piling). وهناك طريقة أكثر تعقيداً لزيادة القوة الميكانيكية للأدوات والأسلحة ألا وهي لحام قالب السبك،

هنا تلوى قضبان الحديد في شكل شعير ذرة (Barleycorns) ومن ثم تسطح ويلحم بعضها في بعض. أما شحذ وتلميع سطح القضبان الناتجة فسوف ينجم عنه شكل من أشكال الزخرفة\*. ونتيجة هذه الطريقة الزخرفية والقوة المتزايدة، يعود إلى دمج خبث الحديد في المعدن أثناء الطرق<sup>(١٥)</sup>.

واعتماداً على محتوى الكربون فيها، يمكن تقسية سبائك الحديد أكثر فأكثر عن طريق الطرق. ويدين الفولاذ في تقسيته العظيمة إلى تبريد السبيكة بسرعة أو إلى غمسه في الماء (quenched) من درجة حرارة ٧٢٠ درجة مئوية، حيث تتشكل مرحلة صلبة جداً تعرف بالمارتنزيت (martensite).

سيحتوي الحديد المصنوع بشكل بدائي على خبث حديد أكثر من الحديد الخام المحبوس داخل فجواته. هذا الخليط يتكون من شكل زجاجي ومن الفياليت ( fayalite  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ) المتبلور، ويتم التخلص منه، إلى درجة ما، بالطرق. على كل حال هناك دائماً نسبة معينة تظل في الحديد المشغول، والفولاذ المسحوب، في شكل طبقات على طول خط الطبقات ( اللوحة (١،٣).

معظم الحديد المصبوب، إذا ما تكون من صهر الحالة السائلة، يكون لونه رمادياً. حيث إنه يحتوي على قشور من الجرافيت الأسود؛ ويحتوي أيضاً على مستويات عالية من شوائب الفسفور والسيليكون. وبالمثل يحتوي الحديد المصبوب الأبيض على مستويات عالية من الكربون، لكنه هنا يتحد مع الحديد ليكون الأسمنتايت ( $\text{Fe}_3\text{C}$  cementite)، مستوى السيليكون فيه وأقل من الحديد الزهر الرمادي. وكلاهما هش تماماً وعليه يكونان غير قابلين للشغل، لكن يتمتعان بقوة ضاغطة أعلى من الحديد المشغول.

\* هذه الزخرفة الناتجة ليست مقصودة بل هي ناتجة عن لي القضبان أو الطبقات بعضها مع بعض مع الطرق ثم تظهر من خلال الشحذ والتلميع. المترجم.

وفي الآونة الأخيرة أُجري بحث وتقصى لدرجات الحرارة التي تكون آمنة لتسخين الحديد القديم دون أن يؤثر على معلومات علم المعادن ( metallurgical informaion). وهذه في حدود ٣٨٠ إلى ٤٠٠ درجة مئوية، ولكن بالنسبة للدراسات الأثرية فقد اتضح أن التسخين المطول عند درجة حرارة ١٠٠ مئوية قد يضر بها<sup>(١٦)</sup>.

وحيث إن من الممكن بسهولة لحام الحديد ساخناً، فقد استخدم بكثرة في القطع الأثرية، ويزال الأكسيد ميكانيكياً أو عن طريق النضح (fluxed off). وتسمح هذه الميزة، إضافة إلى وصل أطراف الجسم نفسه، بوصل قطع أخرى من الحديد ذات محتويات كربونية مختلفة، مما يسمح بالتحكم في خصائص الأماكن المختلفة داخل الجسم<sup>(١٧)</sup>. كذلك يمكن وصل الحديد بالنحاس الأصفر القاسي (القسم ١، ٥، ٥). ويمكن تصفيحه (الطلاء بالقصدير)<sup>(١٨)</sup> من أجل الزينة أو الحماية، لكن التصفيح من أجل الحماية لا يكون ناجحاً إلا عندما يكون الطلاء متقناً، أو عندما يكون القصدير والحديد في حالات خاصة جداً من (الرقم الهيدروجيني وفرق الجهد pH/E<sub>H</sub>) مثل حامض الفواكه داخل علبة القصدير)، ما عدا ذلك، فإن الحديد سوف يبدأ بسرعة في المكان المكشوف. وقبل وضع اللحام أو المعدن الذي سيغطي الحديد، يجب إعداد السطح بشكل جيد، ويستخدم النضح لمقاومة نزعة الحديد الشديدة إلى التآكل وتكوين طبقات أكسيد معيقة.

(٥، ٢، ٢) طبيعة المادة التالفة

(٥، ٢، ٢، ١) من المواقع الأثرية الأرضية

الباتينا أو القشرة الرقيقة الحمراء أو البنية: بينما يمكن عمل الباتينا ذات الأكسيد الأزرق، أو الأسود أو البني، عن قصد، عن طريق التحكم في تسخين الحديد، فإن الباتينا البنية يمكن أن تتشكل طبيعياً في هواء جاف نسبياً لا يحتوي على ملوث. غير أن الرطوبة، ووجود محفزات التآكل عادة ما تجعل الباتينا تنمو في شكل قشرة سميكة من المعدن حسبما هو موضح لاحقاً. الكتلة الحمراء أو البنية (اللوحة

(٥،٣): هذه الحالة هي المظهر النموذجي للحديد الأثري الذي يكتشف في المواقع الهوائية الرطبة. وفي العادة يكون شكل القطعة الأثرية غير معروف كجسم معين، وقد تلتصق فيها الرمال والحجارة الصغيرة. تتكون الكتلة من أكاسيد الحديد والكربونات. في أغلب الحالات هي حديدك (Fe III) أو أكسيهيدروكسيد الحديد (FeO.OH)، ويكون الجزء الأكبر في شكل جيوتايث (goethite) ذات لون أحمر أو بني أو أصفر مع بعض الليبيدوكروسايت (Lepidocrocite) البرتقالية اللون، لكن يمكن أن تكون هنالك كميات كبيرة من الليمونايت المتحور (FeO. OH). السيديرايت (Siderite FeCO<sub>3</sub>) وكربونات الكالسيوم التي يمكن توجد أيضاً على الحديد من التربة الكلسية. وقد تم أيضاً التعرف إلى جاورسايت (jarosite) في شكل مسحوق شاحب أو أصفر، كبريتات الحديدك (NaFe<sub>3</sub>(OH)<sub>6</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>).



اللوحة رقم (٥،٣). كتلة عادية ضخمة حمراء أو بنية من الحديد من موقع أثرية مكشوف.



اللوحة رقم (٤، ٥): حديد مشغول متآكل كلياً، ويظهر الخبث كشكل غريب متليف كأنه خشب.

وعندما تصبح تراكمات خبث الحديد (القسم ١، ٢، ٥) مكشوفة فإنها تعطي الكتلة المتآكلة منظرًا ليفياً مثل الخشب (اللوحة ٤، ٥) ويجب التفريق بين هذا وبين عملية الاستبدال (القسم ٣، ٢، ٥) للخشب من قبل منتجات التآكل. عندما لا يمكن التعرف الفوري على مادة عضوية مستبدلة، فإنها، في بعض الأحيان، تظهر كأنها ناتجة عن تآكل في شكل مسحوق برتقالي مصفر.

**سطح أو طبقة مضغوطة بلون الطوب الأحمر:** إذا تم تسخين الحديد فوق درجة حرارة ٢٠٠ مئوية تتشكل طبقة حمراء فاتحة من الهيماتيت ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) وهذه طبقة واقية تماماً ويمكن أن تمنع المزيد من التآكل لوقت طويل. وبشكل مماثل، يمكن العثور على هذه الطبقة الحمراء الفاتحة داخل قشرة التآكل، عندما تتكسر. يمكن أن يكون الهيماتيت مؤشراً لحرق المادة المحيطة بالحديد قبل الدفن.

**اللون الأسود:** في كثير من الأحيان تظهر الأجسام الحديدية، بعد الكشف عنها من التربة الرطبة الحالية من الأكسجين، سوداء، وذلك لتشكيل كبريتيد الحديدوز (Fe II) بواسطة البكتيريا المختزلة للكبريت (القسم ٢، ٣، ٥). ويمكن أن تكون الطبقة صلبة ولا معة أو مثل الوحل، ويكون معظم المعدن، إن لم يكن جلده، قد صلباً.

**اللون الأزرق الفاتح إلى الأزرق-الأسود:** يمكن أن يحدث هذا التفاوت الكبير في اللون نتيجة لترسبات الفيغانايت (Vivanite) (فوسفات الحديد)، وبعد الحفر مباشرة يمكن أن تظهر المادة بيضاء. حيث تظهر في شكل فوسفات الحديدوز ( $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ).

يمكن أن يشكل الفيغانايت طبقة حامية لدرجة كبيرة فوق الحديد، مانعة لمزيد من التآكل لفترة طويلة من الزمن. وقد عثر على الفيغانايت في بعض القطع الأثرية من مواقع أثرية عضوية رطبة، ويمكن أيضاً العثور عليه في مساحات صغيرة على القطع الحديدية الأثرية من مواقع أثرية مختلفة، حيث يكون هناك مصدر للفوسفات.

ومن المحتمل أن تُكوّن التربة العضوية المشبعة بالأكسجين طبقات زرقاء سوداء أخرى تتألف، على سبيل المثال، من مركبات حديد الفينول (phenolic iron)، وتكون واقية بالقدر نفسه. يمكن أن تتضمن هذه الطبقات الواقية كبريتيداً أسوداً (اللوحة ٢، ٢).

### (٥, ٢, ٢, ٢) من المواقع الأثرية البحرية

**الكتل المتحورة للحديد المتحجر:** تتكون المتحجرات الحديدية لمنتجات التآكل الحديدي، وكربونات الكالسيوم والحطام عادة حول قطعة من الحديد الصدئ المشغول أو المصبوب. ويمكن أن تنتشر مادة التحجر عبر المواقع الأثرية، حيث تطمر أي مادة أخرى في طريقها، حتى يتم تغطية كل التربة بطبقة خرسانية صلبة. ويفيد هذا عملية حفظ المعادن، غير الحديدية، المظمورة والمواد العضوية على الرغم من وجود الحاجة لاستخدام المتحجرات تحت الماء لاستخلاصها، في حالات نادرة جداً.

في كثير من الأحيان تغطي سطح هذه المتحجرات قشرة رقيقة بيضاء أو بنية شاحبة، لكن في معظم الحالات تغطيها طبقة مفككة لمنتجات التآكل الصدئة، التي يمكن أن تلوث أيضاً ما حولها من القشور البحرية. وتحتوي هذه الطبقات الخارجية على نسبة عالية من الكالسيوم، وكربونات الماغنيسيوم والهيدروكسيد، التي تترسب من مياه البحر المحيطة، وأيضاً السيديرايت ( $\text{FeCO}_3$  Siderite)، لكن، في الداخل، تتكون تقريباً من الأكاسيد والأكاسيد المائية للحديد، كما في القسم (١, ٢, ٢, ٥). وكذلك يمكن أن يوجد ثاني أكسيد السيليكون ( $\text{SiO}_2$ ) وكبريتيد الحديد الأسود ( $\text{FeS}$ ). وتحتوي المتحجرات التي في داخل الطين البحري، حيث يكون الأكسجين نادراً نسبياً، على نسبة أعلى من ليبيدوكروسايت ( $\text{Lepidocrocite } \gamma\text{-FeO.OH}$ )، والماغنيتايت السوداء ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )، وكبريتيد المغناطيس (magnetic sulphide)، والبيرهوتايت

(pyrrhotite). يمكن أن توجد مركبات أخرى غير مستقرة في الأحوال الجوية، ومن ثم تشكل صعوبة في التعرف إليها.

يميل الحديد الأثري البحري، المشغول، مثل الذي على اليابسة، إلى التآكل على طول خطوط طبقات خبث الحديد الذي يحتويها، بحيث يكون للمعدن المتآكل، عندما ينكشف، سطح ليفي يشبه الخشب.

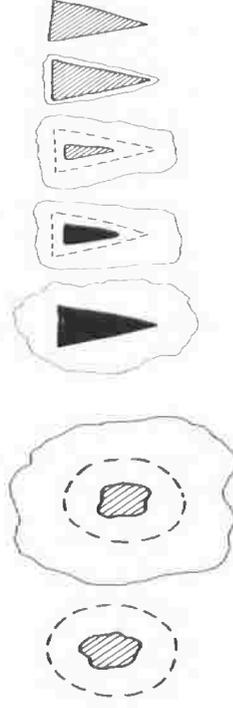
**اللون الأسود:** يمكن أن يظهر الحديد الأثري المستخرج من البحر على شكل الطين ولونه، كما في القسم (١، ٢، ٢، ٥)؛ بينما من المرجح أن يحتفظ الحديد المصبوب بشكله تحت هذه الأحوال، إلا أن الحديد المشغول قد يخفني تماماً للأسباب المذكورة لاحقاً.

**اللون الأخضر:** الصدأ الأخضر، خليط من أكاسيد الحديد والحديدوز المائية، يوجد في كثير من الأحيان، على الحديد المصبوب والمشغول البحري، لكنه شوهد أيضاً داخل قشور التآكل للحديد المشغول المستخرج من المواقع البرية.

(٥، ٢، ٢، ٣) **تآكل الحديد ومركباته**

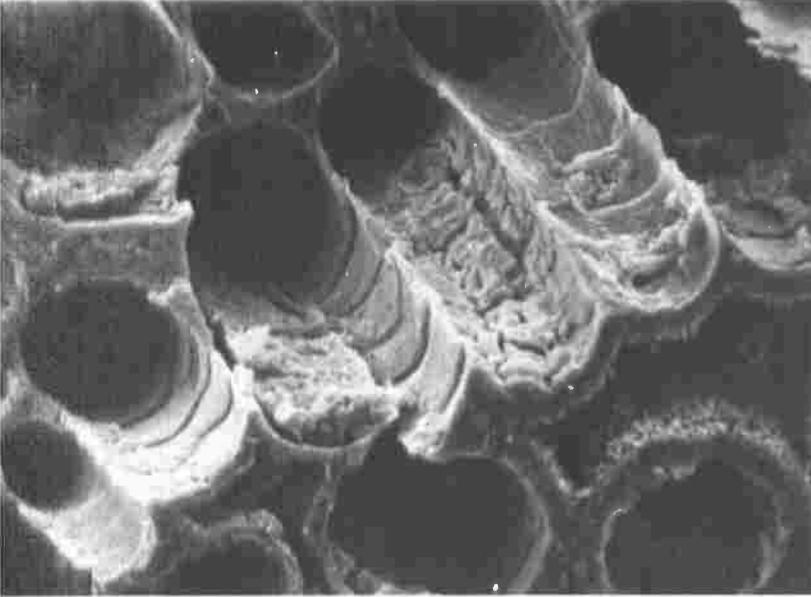
في البيئة الرطبة المشبعة بالأكسجين يميل الحديد المشغول إلى التآكل من خلال فقدان المعدن من سطح القطعة الأثرية؛ ومن ثم يتواصل التآكل إلى داخل المعدن بشكل متواز أكثر أو أقل مع السطح (الشكل رقم ٥، ٥). وهذا في المقارنة مع النحاس، الذي يميل للتآكل من داخل الحبيبات، أي داخلياً (الشكل رقم ٥، ٥-٢، ٢). أيونات الحديد الذائب تتحرك بعيداً عن المعدن أو تنتشر، أو ترسب في شكل أكاسيد حديدية وكربونات، كما في التربة القلوية أو المحايدة يلاحظ أن حجم الصدأ أكبر بكثير من تلك التي في المعدن الذائب.

- أ- قطاعات عرضية لنصل حديد مشغول:
- ١- محفوظ جيداً: يغطيه التلطيخ.
  - ٢- السطح الأصلي لا يزال محفوظاً بواسطة المعدن: مغطى بطبقة من الصدأ.
  - ٣- السطح الأصلي محتجز داخل طبقة سميكة من الصدأ: بقي قليل من المعدن أو لم يبق شيء منه.
  - ٤- السطح الأصلي محتفظ به داخل طبقة سميكة من الصدأ: المركز الآن فارغ لم يبق فيه شيء من المعدن.
  - ٥- السطح الأصلي محتجز بواسطة السطح الداخلي للقشرة التحتية السميكة: المركز فارغ تماماً لم يبق فيه شيء من المعدن (عادة توجد هذه الحالة في مياه البحر المشبعة بالهواء).



- ب- قطاعات عرضية لطلقة مدفع من الحديد المصبوب:
- ١- السطح الأصلي المتبقي محتجز في حدود الجرافيت: مغطى في متحجر سميك جداً: تبقى بعض المعدن (يوجد في مياه البحر المشبعة بالهواء).
  - ٢- كما في (١) لكن بدون غطاء حجري (يوجد في الترسبات غير الهوائية).

الشكل رقم (٥, ٥). الأحوال العامة لأداة حديدية عثر عليها في الحفريات.



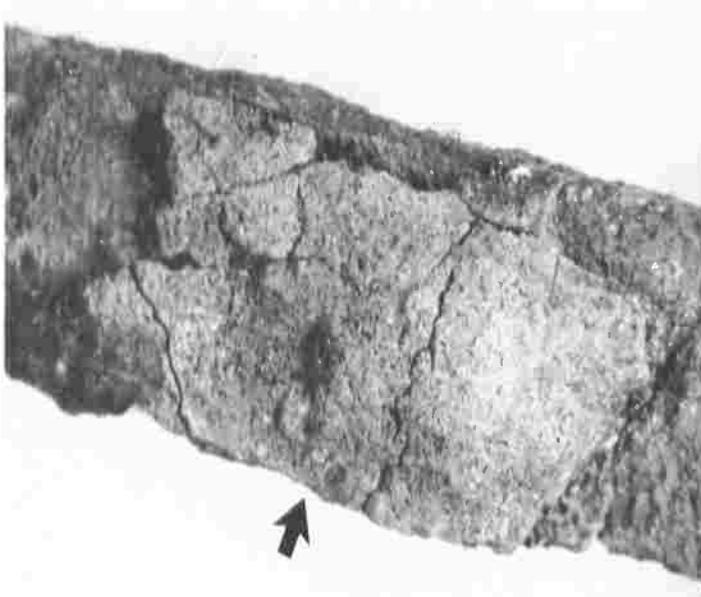
اللوحة (٥،٥). واجهة من شعر الصوف التي تشكلت بواسطة صدأ الحديد المتحرك.

ويمكن تمييز نتائج آليات الصدأ هذه في القطع الأثرية التي يعثر عليها في الحفريات. أولاً: إذا ما تعرضت الأيونات إلى هجوم بسيط فقط، فإن السطح المعدني تحت طبقة الصدأ، سوف يصاب بتقشرات ويصبح الصدأ أكثر أماناً. ثانياً: قد تظهر القطع الأثرية الحديدية في شكل كتل من الأكاسيد يلصق على طبقاتها الخارجية الرمل والحجارة... إلخ من التربة. والوجه الإيجابي الوحيد هنا هو استبدال المواد العضوية بمنتجات التآكل ودمجها في الكتل الضخمة<sup>(١٩)</sup>. وإذا كان الخشب مرتبطاً مع الحديد أثناء حدوث الصدأ، فإن منتجاته المتحركة تظهر متحركة داخل الخشب التالف وترسب في خلاياه<sup>(٢٠)</sup>. ولذلك بعد فترة من تلف الخشب، من الممكن الاحتفاظ بسجل لتكوينه، ويمكن أيضاً حفظ جزء من شكله بواسطة الصدأ. من هذه المعلومات، في بعض الحالات، يمكن التعرف إلى أنواع الخشب باستخدام مجهر المسح الإلكتروني (scanning

(electron microscope (SEM). وبالمثل يمكن حفظ الحبوب، والقرون، والعظم والتعرف إليها، أما بالنسبة للصوص، فإن مخلفات الصدأ تكون على سطح النسيج (اللوحة ٥،٥) مع ذلك يمكن التعرف إليه. وإذا كان النسيج جزءاً من قماش فإن المعلومات المتعلقة بالنسيج يمكن استرجاعها. أما بالنسبة للجلد التالف فالسهولة أقل في تفسيره (اللوحة ٥،٦). هذه الكتل من الأكاسيد، يمكن أن تحدث تقشرات وتشوهات للسطوح الداخلية.

تحت الأكاسيد، ذات القشرة الخارجية الملونة، يمكن العثور، في كثير الأحيان، على الماجنتايت السوداء (magnetite  $Fe_3O_4$ ) التي تتكون في مناطق قليلة الأكسجين. وعندما يكون التآكل كاملاً، يستبدل المعدن كله بالماجنيتايت السوداء الكثيفة التي تبطن منطقة أكبر أو أقل من الأكاسيد البنية. هناك جدل كبير حول ما إذا كان مستوى السطح الأصلي والطبوغرافيا يوجدان داخل هذه الكتل من الصدأ. ويشعر بعض المختصين<sup>(٢١)</sup> بأنه من غير الممكن العثور عليها، حيث لا توجد آلية فيزيائية كيميائية يمكن من خلالها إثبات ذلك. على كل حال، سيتم توضيح (القسم ٥،٢،٣) أنه يمكن الكشف عن السطح الأصلي عملياً بواسطة التنظيف الاستقصائي الحذر؛ حيث يمكن رؤية السطح منطقة كثيفة من التآكل الذي لا يتضمن حبيبات رملية... إلخ، خلافاً للجزء الأكبر التحتي، (اللوحة ١،٢).

لصدأ الحديد مهمة فيما يتعلق بالترميم تتمثل في المادة التي لا يمكن رؤيتها؛ أي الكيمياء التي تكون داخل القشرة وتدل على أسباب تدهور القطع الأثرية بعد الكشف عنها (القسم ٥،٢،٥). حيث إن هذه الكيمياء لا تكون مرئية في القطع الأثرية الحديدية المكشوفة حديثاً، فسوف تناقش في هذا القسم لاحقاً.



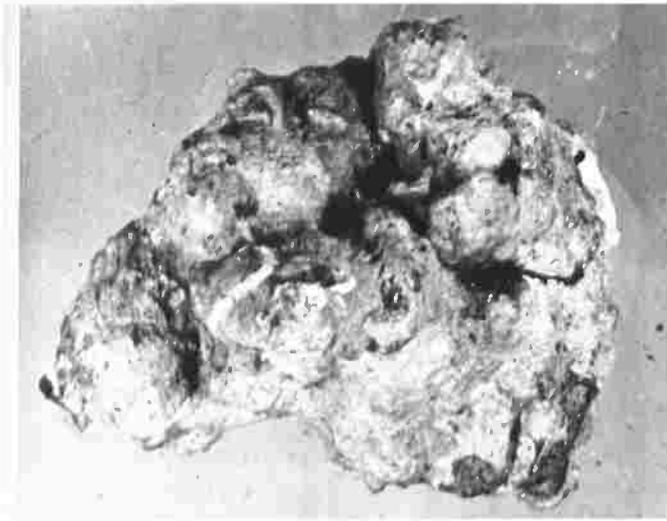
اللوحة (٥, ٦). طبقة من الصدأ الضخمة البرتقالية الصفراء على مدية حديدية قد تشير إلى بقايا غمد خنجر جلدي محفوظ بطريقة الاستبدال.

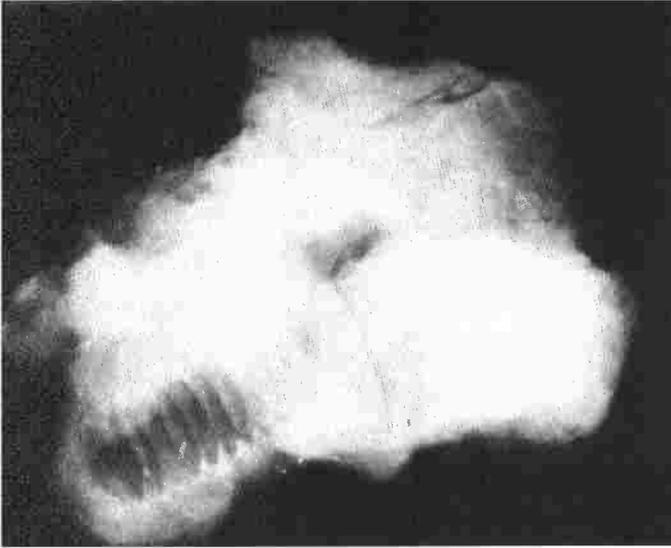
وجد في بعض المواقع الأثرية الرطبة المشبعة بالأكسجين، الموجودة في كل من البحر واليابسة، أن كل الحديد المؤكسد للقطعة الأثرية قد زحف إلى البيئة المحيطة. ويعني هذا أن هناك تحت المتحجر الحديدي أو كتلة الأكسيد الضخمة فراغ أو تجويف حيث كانت القطعة الأثرية. وتوجد هذه الظاهرة كثيراً في المواقع الأثرية البحرية، حيث تتبدد القطع الأثرية الحديدية المشغولة الصغيرة نهائياً خلال مئات السنين. في بعض الأحيان، فإن التجاويف تشكل تمثيلاً دقيقاً لحجم القطعة الأثرية وشكلها، وبناء عليه فإن هذا يمثل قالباً لعمل نموذج للقطعة الأثرية (قسم ٢, ٤, ٢, ٥) (لوحة ٥, ٧).

وبخلاف الحديد المشغول، فإن الحديد المصبوب المستخرج من البحر يظل على الدوام صلباً، على الرغم من كونه متأكلاً تماماً ومغلفاً داخل قشرة المتحجر الحديدي.

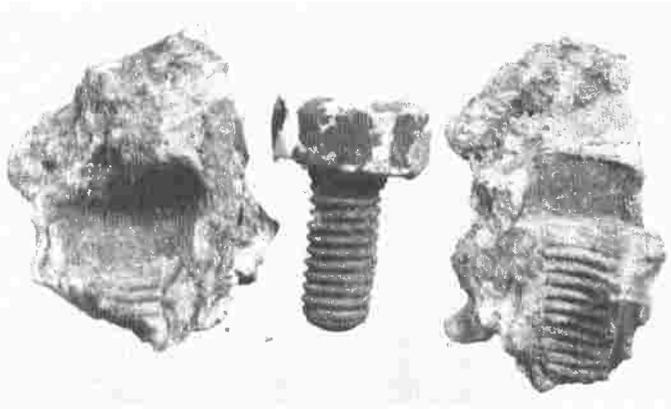
وتحت هذه القشرة، يكون سطح القطعة الأثرية المتآكل ليناً جداً، وفي كثير من الأحيان يتألف من طبقة من الصدأ وملحقات لامعة صغيرة. وهذه هي تقشرات جرافيت الحديد المصبوب الرمادي الذي تمكّن من البقاء، حيث إنه كان الجزء المهبط (النبيل) من خلية الصدأ المجلفن للحديد/الكربون، بينما يتآكل الحديد الوضيع بشكل واضح. ويتم الاحتفاظ بأكاسيد الحديد والكربونات المتكونة في موقعها بين تقشرات الجرافيت، ومن ثم فإن القطعة الأثرية تحتفظ بشكلها وإن كان في حالة تعمدن (mineralized). في هذه الحالة يقال إن الحديد المصبوب قد تحول إلى جرافيت (اللوحة ٥,٨).

وفي الحديد المصبوب الأبيض، تتكون خلايا صدأ مجلفنة داخلية مماثلة بين المعدن والمناطق الأكثر نبلاً لكربيد الحديد (cementite)، مرة أخرى تحتفظ القطعة الأثرية بشكلها الأصلي.





(ب)

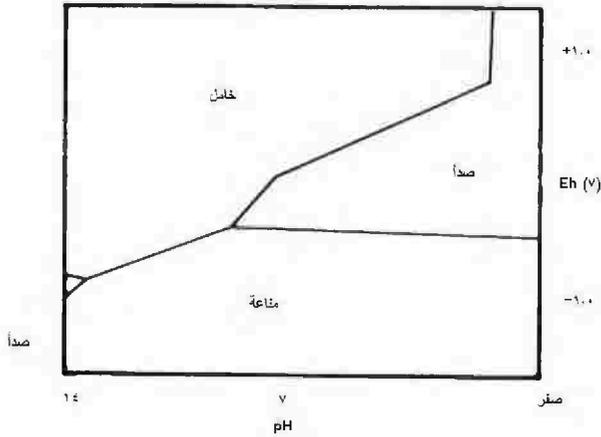


(ج)

اللوحة (٥,٧). عقدة صغيرة من حديد متحجر. (أ) بالشكل الذي وجدت عليه. (ب) صورة أشعة توضح الفراغ محتفظاً بشكل المسامير. (ج) قالب لفراغ في مطاط السيليكون وقد تم فتح المتحجر بالقطع.



اللوحة (٥,٨). جزء من مدفع تم استخراجه من موقع أثري بحري حيث انفصل جزء من أجزائه الخارجية، التي تحولت إلى جرافيت، من مركز الحديد المصبوب المتبقي.



الشكل رقم (٥,٦). مخطط ليوريا التخطيطي للحديد في الماء عند درجة حرارة ٢٥ مئوية.

**حفظ الحديد:** عند التحول لدراسة الأحوال التي يمكن فيها الكشف عن المعدن الحقيقي، فإنه يمكن القول عندما يكون الحديد "وضيماً" بشكل أساسي، إن هذا لن يحدث إلا إذا كانت هناك سيطرة على البيئة، على سبيل المثال بطبقة الفوسفات أو عند غياب الأكسجين.

مخطط بوربيا (القسم ٢، ٣، ١، ٥) كما هو موضح في (الشكل رقم ٦، ٥) مفيد في فهم الحالة المطلوبة لعمليات حفظ القطع الأثرية. ويمكن هنا ملاحظة أن حفظ الحديد الأثري يتم عن طريق السيطرة على الأحوال البيئية كما في التربة ذات الاحتمالية العالية للاختزال أو الأكسدة والرقم الهيدروجيني (pH) حيث تنعدم التهوية في وجود قشور أكسيد أو كربونات، أو عن طريق المناعة في التربة ذات الاحتمالية المنخفضة للاختزال أو الأكسدة، حيث يكون الأكسجين منخفضاً. غير أن هذا لا يمثل كل الصورة المعقدة لعملية الصدأ، فنشاط البكتيريا المختزلة للكبريت أو وجود أيونات الكلوريد أو التعزيز بواسطة الفوسفات في الترسبات ذات الاحتمالية المنخفضة للاختزال أو الأكسدة يمكن أن تعوق عملية الحفظ. يبدو أن القطع الحديدية من المواقع البحرية، بشكل خاص، لا يمكن أن توجد محفوظة بشكل حقيقي<sup>(٢٢)</sup>. وهذا الموضوع معقد جداً، وقبل التوصل إلى استنتاجات قد لا تفي بالغرض يجب القيام بعمل المزيد من البحث في هذا المجال.

### (٥، ٢، ٣) الفحص

إن الفحص النظري لقشرة الصدأ مهم جداً للتعرف إلى الأشكال الكاذبة للمواد العضوية، يجب تحديد ما إذا كانت المادة العضوية هي قطعة أثرية (سواء كانت جزءاً من القطعة الأثرية الحديدية أو مرتبطة بها فقط)، أو ما إذا كانت ذات صلة أكثر بالدراسات البيئية.

لا يوصى بشدة باستخدام الأشعة السينية لتصوير الأدوات الحديدية ( القسم ٣,٣,١,٣)، حيث إن الصدأ السميكة العادي وطبقات القشور تحجب شكل القطعة الأثرية الأصلي وخواصها (اللوحتان ٥,٣ و ٥,٩). وعادة ما يتم عمل مسح لمعظم الأدوات الحديدية، إن لم يكن كلها، من الحفريات؛ وتصنف باستخدام التصوير الإشعاعي وتعتبر هذه كسجل لهذه القطع الأثرية، إذا لم يكن هناك المزيد من عملية الترميم. ويمكن تصنيف الأدوات الحديدية إلى قطع أثرية تتطلب تنظيفاً استقصائياً، وقطع لا تحتاج إلى تنظيف خبث الحديد. أما القطع الأثرية التي تتطلب تنظيفاً فهي القطع غير المعروفة، وتلك المطلوبة للعرض، وكذلك القطع التي يمكن أن تكشف عن معلومات أكثر أثناء التنظيف. وتدخل في الفئة الأخيرة القطع الأثرية التي عمل لها تصفيح أو قد تكون لحمت بالنحاس الأصفر، والقطع الأثرية مثل المفاتيح، والقطع التي يتم وصلها، والمبارد (جمع مبرد) التي تحتوي على بقايا مادة مكشوفة<sup>(٢٣)</sup>، ... إلخ، حيث إن هذه الخواص لا تظهر دائماً على صور الأشعة وعليه يجب البحث عنها خلال التنظيف الاستقصائي. وعلى هذا المنوال، لا تكون المواد العضوية المستبدلة مرئية دائماً. ليس من السهل دائماً تفسير صورة الأشعة حيث إنها ثنائية الأبعاد. فالأنصال والأشرطة على سبيل المثال تظهر في الصور متشابهة، مما يتطلب تنظيفاً استقصائياً للكشف عن مقاطعها العرضية. غير أنه عند الكشف عن السطح الأصلي تحت القشور الحاجبة، يتم تسجيل شكل القطعة الأثرية حيث إن الأشعة السينية تميز بين شكل الصدأ المضغوط والكثيف. علاوة على ذلك، يمكن الحصول على معلومات تقنية مفصلة كثيرة. ويمكن أيضاً مشاهدة طريقة لحام القطعة الأثرية حتى وإن كانت طبقة الصدأ سميكة، وكذلك لحام الوصلات وثقوب البرشام، والبنية الداخلية للقطع الأثرية الصلبة مثل الأقفال. ومن الممكن تحديد حالة القطع الأثرية من خلال صور

الأشعة سواء كانت متآكلة حتى في حالة الفراغ، أو تعرض السطح الأصلي للتشوه، أو كانت هناك بقايا للقطعة الحديدية ( اللوحة ١٠، ٥). ويمكن الحصول على المزيد من المعلومات حول صور الأشعة للأدوات الحديدية في مرجع كورفيلد (Corfield)<sup>(٢٤)</sup>.



(أ)

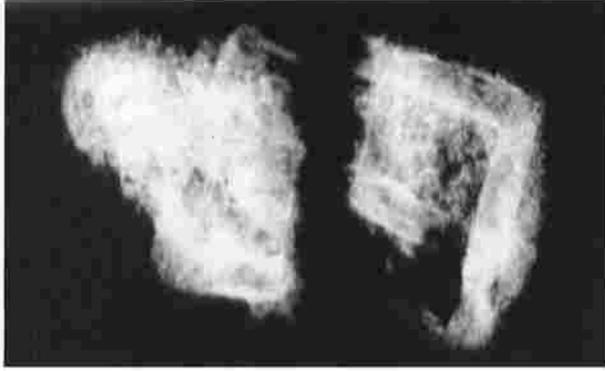


(ب)

اللوحة (٩، ٥). صور أشعة للأدوات الحديدية تكشف خواص لم تكن مرئية عند التنظيف الاستقصائي:

أ- شريط من حديد اتضح أنه مبرد.

ب- الكشف عن طبقة صفيح على قفل وأشغالٍ داخلية.



اللوحة (٥، ١٠). صورة أشعة لكتلة من الصدا الحديدية تكشف شكل الإبريم الذي أصبح معظمه فراغاً. نوقش السطح الأصلي للأدوات الحديدية في القسم (٥، ٢، ٢، ٣). الحديد المصبوب يمكن حفظه في الجرافيت اللين. أما الحديد المشغول فمن المحتمل أن يظل السطح الأصلي باقياً ك معدن ، لكن في هذه الحالة يكون مشوهاً جداً بواسطة التنقر. وبالنسبة للأدوات الحديدية التي تآكلت إلى أن تحولت إلى كتلة ، فإن من الممكن العثور على السطح الأصلي داخل الكتلة. وعلى هذا السطح يمكن العثور على التصفيح ، الذي من الممكن أن يتشوه بالتقشرات التحتية إن وجد ( اللوحة ١، ٢ )

تقتصر الدراسات المعدنية على المعادن المتآكلة كلياً ، لكن في بعض الأحيان يتم التعرف إلى الأجزاء الصغيرة المتبقية من المعدن وكذلك بنية القطع الأثرية حتى وإن كانت متآكلة بشدة<sup>(٢٥)</sup>.

#### (٥، ٢، ٤) التنظيف

##### (٥، ٢، ٤، ١) الحديد من المواقع البرية

تحدثنا فيما سبق عن الخاصتين اللتين تجعلان من نظافة الأعمال الحديدية المتآكلة بشدة عملاً متخصصاً ويستغرق وقتاً طويلاً ، وهما الفحص الدقيق للحصول على الدليل المتبقي في منتجات التآكل ، وانعدام التمييز الكيميائي بين الصدا السطحي وذلك الذي يحفظ السطح الأصلي (القسم ٥، ٢، ٢، ٣). استخدام المواد الكيميائية وطرق

التحليل الكهربائي، لترميم القطع الحديدية، لا يمكن أن تطبق، ومن ثم تصبح الطرق الميكانيكية اليدوية باستخدام الأدوات الصغيرة، أو بشكل أكثر شيوعاً يمكن أن يستخدم الترميل (air abrasion)\* فقط مع عدسة مكبرة، مما يجعل النظافة أمراً مضمناً (اللوحة ١١، ٥). ويعني هذا أنه يمكن تنظيف مساحات محدودة فقط من القطعة الأثرية لأغراض النشر، أو مساحات تكشف عن مقاطع عرضية أو عينات للطلاء ... إلخ (اللوحة ١، ٢). وتشكل هذه النظافة الجزئية درجة من المجازفة، حيث قد يتم تفسير بعض الخواص خطأً أو قد لا تكشف عن شيء، لكن يمكن الاعتماد عليها أكثر من استخدام صور الأشعة فقط (القسم ٣، ٢، ٥). وقد تكون هذه القطع الأثرية المنظفة جزئياً غير مقبولة للعرض، حيث يتطلب مزيداً من العمل، لكن يجب تذكر أن الأعمال الحديدية المتآكلة بشدة مهما خضعت لمستوى من التنظيف لن تبدو مثل القطعة الأصلية. عندما يكون الصدأ شديداً بحيث تصبح القطعة الأثرية مفرغة جزئياً، فإن التنظيف للكشف عن طبقة رقيقة مع المحافظة على سطحها يغدو صعباً جداً، إن لم يكن مستحيلاً (اللوحة ٤، ٥).

القطع الحديدية، المحتوية على طبقة رقيقة فقط من الصدأ تحت المعدن، تعدّ أمراً نادراً في المواقع الأثرية، لكنه أمر شائع في القطع التاريخية والأثنوجرافية. من الممكن استخدام طرق التعرية لهذه القطع (القسم ٤، ١، ٥) بإذابة أكاسيد الحديد. ويمكن تحقيق هذا بواسطة الأحماض، لكن لأن الحديد معدن وضعيع (القسم ٢، ٣، ١، ٥)، فإنه قد يذوب أيضاً في العديد من الأحماض ومن ثم يصبح منمشاً. وفي العادة تبنى مزيلات الصدأ التجارية على أحماض عضوية كإحماض خفيفة أو أحماض فسفورية، لكن في كثير من الأحيان، تترك طبقة مرئية من الترسب على سطح المعدن. ولا نجد

\* الترميل جهاز ضغط هواء مع رمل خاص لتنظيف صدأ الحديد. المترجم.

هذه العيوب في التنظيف بطريقة التحليل الكهربائي (القسم ٤، ١، ٥)، حيث إن الحديد محمي مهبطياً بواسطة التيار الكهربائي من التتميش، ولا تتكون ترسبات. غير أن هذه الطرق كافة تكشف وبلا هوادة، عن الحفر الموجودة على سطح المعدن وهي لا تروق للنظر وتجعل الطلاء أو التصفيح ... إلخ يتفاعل أو يستبدل (اللوحة ١، ٣). وفي هذه الأيام، ولهذا السبب، لا تستخدم طريقة التعرية مع الحديد الأثري على الإطلاق. ويفضل في هذا السياق الطرق الميكانيكية الكاشطة.

اقترحت أنواع مختلفة من طرق النظافة، منها طريقة التسخين أو التبريد لتشظي الصدأ في الحديد الأثري المشغول، لكن كما قيل إن أي طريقة للتنظيف أو لعمل الاستقرارية تتضمن تعرية أو حرارة زائد يجب استبعادها (١، ٢، ٥).



اللوحة (١١، ٥). دقة التنظيف الاستقصائي الميكانيكي للقطع الحديدية تكشف عن السطح الأصلي والطبقة التي فوقه (انظر اللوحة ١، ٣).

## (٢, ٤, ٢, ٥) الحديد من المواقع البحرية

قبل التصوير إشعاعي أو استخدام المجال المغناطيسي القوي ، يمكن افتراض أن المتحجرات التي تغطي القطع الحديدية المشغولة الصغيرة فارغة ؛ في هذه الحالة كذلك تستبدل عملية التنظيف بالصب ( القسم ٣, ٢, ٢, ٥). في الماضي ، كان الجبس أو رايتنج البوليستر مستخدمين ، لكن الآن يفضل المطاط المرن مثل السيليكون أو مطاط البوليسلفايد (polysulphide)<sup>(٢٦)</sup>.



اللوحة (١٢, ٥). تنظيف قطعة حديدية بحرية متحجرة بالمطرقة والإزميل. (ملاحظة يجب لبس نظارات الوقاية).

عندما يكون المتحجر صلباً ، كما هي الحال في القطع الأثرية الكبيرة ، تزال القشور المتحجرة من القطع الأثرية قبل التخزين ، وإلا أصبح من الصعب تحقيق الاستقرار (القسم ٢, ٦, ٢, ٥) ، حيث كثيراً ما تكون المتحجرات جزءاً من السطح الأصلي للقطعة الأثرية ، سواء كانت حديداً مشغولاً أو حديداً مصبوباً. ويمكن تحقيق ذلك بأدوات مثل المطرقة والإزميل بيد خبير (اللوحة ١٢, ٥). ومع الأسف فإن اتخاذ القرار في تنظيف القطع المعدنية ، التي يجب أن لا تزال من الموقع أو عدم تنظيفها تعد

مشكلة شائكة. ومن القواعد التي يجب اتباعها أنه لا ينبغي أبداً إزالة المتحجرات، لأن السطح المتآكل اللين للقطعة سيفقد مصدر وقايته الوحيد ضد البيئة البحرية. ويضع هذا الأمر المنقب في حيرة، وذلك لأنه قد تكون هناك معلومات مهمة عن الحطام وتاريخه البحري، لأنه لا يمكن الحصول على المعلومات إلا بتنظيف هذه العمل الحديدي. لذا فإن تنظيف أجزاء مختارة من القطعة الأثرية يبدو ضرورياً، على الرغم من أن أياً من هذه الإجراءات قد ينجم عنها تدمير نهائي للقطع الأثرية.

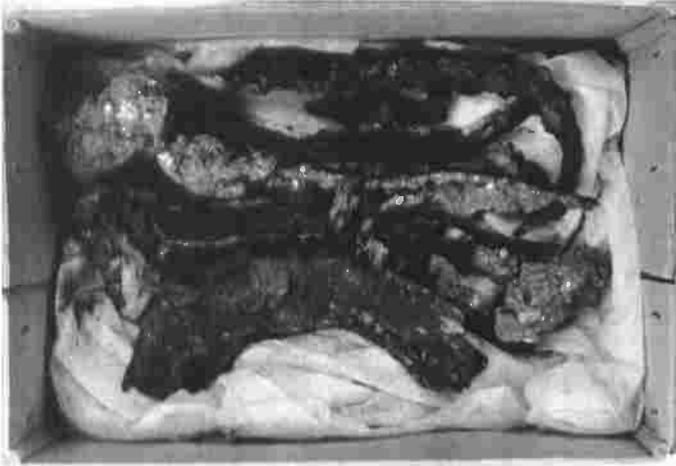
(٥,٢,٥) التلف بعد الحفر

(٥,٢,٥,١) تفكك القطع الأثرية المتآكلة

في بعض الحالات توجد الأجسام الحديدية المتآكلة بشدة مستقرة بعد الحفر، لكن في كثير من الأحيان نجد أنه، وبعد بضعة أسابيع أو سنين، تتحلل القطع الأثرية سواء التي لا تزال في شكل كتلة أو في شكل أشكال كاذبة لمنتجات تآكل حديدي نظيفة (اللوحة ٥,١٣). تنشطر القطعة الأثرية، في حالة الحديد المشغول، على طول اتجاه الألياف لتكشف عن نقاط برتقالية - بنية داكنة. وفي بعض الحالات، من المستحيل تركيب بعض القطع المتكسرة في بعض، حيث إن الشكل قد تغير. وقد لوحظ أن القطع الأثرية التي لا تزال تحتفظ بالحديد المعدني، على الرغم من أن هذا نادر، إلا أنها من المرجح أن تتفكك، أما القطع الأثرية المتآكلة تماماً أو المجوفة فتبدو مستقرة<sup>(٢٧)</sup>.

**البحث:** إن سبب التفكك هذا هو واحد من الاهتمامات الرئيسة لأبحاث الترميم في الوقت الحالي، مع أنه لم يحرز إلا بعض التقدم في هذا المجال. ويقترح تورجوز (Turgoose)<sup>(٢٨)</sup> أنه أثناء جفاف قشرة التآكل المشبعة بأيونات الحديدوز وأيونات الكلوريد، فإن الأكسجين يخرقها، وفي البيئة الرطبة يقوم الأكسجين بأكسدتها إلى بيتا الحديدك (أو أكسيهايدروكسيد) ( $\beta\text{-FeOOH}$ ) ذي اللون البرتقالي القاتم، وهذا يسمى أكاجانيت (akaganeite). ويكون هذا في عمق طبقات الصدأ الداخلية ويتسبب في انشطار القطعة الأثرية. وعندما لا يتبقى حديد معدني، فإنه من

غير المرجح أن تكون هناك كميات كافية من الحديدوز ليتكون الأكاجانيت ولذلك لا يحدث تفكك وتكسر للقطعة الأثرية في هذه المرحلة. غير أنه عندما لا يتبقى حديد معدني، فإن مصدر الحديدوز يستمر من صدأ المعدن، الذي ستتطرق إليه لاحقاً. يحتوي الحديد، المستخرج من البيئات البحرية، مستويات عالية من أيونات الكلوريد ومن ثم يكون عرضة لهذا التلف بشكل كبير. كما أن الحديد الأثري، من المواقع البرية، أيضاً يحتوي، في كثير من الأحيان، مواد تساعد في تلفه. ولا يزال غير واضح الكيفية التي تتخذها أيونات الكلوريد في عمل ذلك<sup>(٢٩)</sup>، يظهر أنها تكون محمولة في الماء وموزعة عبر القشرة، لكن أيضاً يتم امتصاصها في أكاسيد الحديد ويمكن حتى تحبس داخل تركيبها البلوري، كما هو الحال في الأكاجانيت. هذا المنتج غير مستقر، وبعد مرور فترة من الزمن سوف يتحول إلى  $(\alpha\text{-FeO.OH})$  جيوتايت (goethite)، محررة أيونات الكلوريد المحبوسة والتي يمكن عندئذ تؤدي إلى مزيد من التآكل المعدني. اقترح آخر<sup>(٣٠)</sup> هو أن التفكك يتفقم بواسطة انكماش الصدأ نتيجة لجفافه ولتشقق طبقات التآكل نتيجة درجات الحرارة المتقلبة، الذي يحدث بعد الحفريات. مرة أخرى<sup>(٣١)</sup> يمكن أن تُفكك بلورة الأملاح، القابلة للذوبان، عند جفافها قشور الصدأ المسامية، وبالطريقة بنفسها التي تتلف بها الأواني الفخارية أو الحجرية (القسم ١، ٢، ٤).



اللوحة (١٣، ٥). تآكل ما بعد الكشف عن القطع الأثرية يتسبب في تفكك الحديد المشغول.

**ملخص البحث:** لا يزال البحث الخاص بتفكك الحديد المعمول غير مكتمل. هناك سبب مُرجَّح أن التآكل المتواصل للحديد الأثري نتيجة لوجود الكلوريدات والماء والأكسجين، لكن إزالة الماء قد تسبب أيضاً التلف. لا يزال العمل في هذا المجال يحتاج إلى المزيد من البحث والتحري.

### (٥,٢,٥,٢) تآكل الحديد المعدني

في كثير من بقايا المعدن داخل القطع الأثرية المحفورة، يمكن أن تظهر ما يطلق عليه بـ "دموع" أو "عرق" يرتقالي على السطح. وهذا البكاء، أو التعرق إشارة إلى التآكل المتواصل نتيجة لوجود الماء والأكسجين والكلوريدات (القسم ٢,٣,١,٥). هذه الدموع هي كلوريد الحديدوز (II) وكلوريد الحديدك (III) التي تتحلل مائياً إلى الأوكسي هيدروكسيدات البنية. وتحرر هذه أيونات الكلوريد التي تقوم بتنشيط التآكل، ومن ثم تتواصل الحلقة حتى يتم تحويل كل المعدن إلى الأوكسي هيدروكسيدات.

يمكن أن يبدأ الحديد الأثري، المحتوي على طبقة خاملة، مثل فوسفات الحديد، في التآكل بعد الكشف عنه، وهذا نتيجة لتشقق الطبقة الواقية، وربما نتيجة لدرجات الحرارة المتقلبة الموجودة في بيئات ما بعد الحفر. وبالمثل لا يمكن إخضاع الحديد الذي استقر بشكل جيد (القسم ٢,٦,٥,٢)، لأحوال بيئية متناهية بدون مجازفة التآكل. سيتآكل المعدن المكشوف إذا كانت الرطوبة النسبية المحيطية أكبر من ٨٠٪، لكن ينخفض هذا الرقم بشكل كبير عند وجود ملوثات غازية مثل ثاني أكسيد الكبريت. أما وجود أيونات الكلوريد، من الدفن، أو التلوث بواسطة المناولة، أو من الترميم السيئ؛ فسوف يسمح بالتآكل عند مستوى رطوبة نسبية أقل بكثير<sup>(٣٢)</sup>، ربما في نطاق ٢٠٪، بينما التآكل الموضوعي يمكن أن يحدث في هواء جاف نسبياً إذا ما كانت الأملاح والغبار الممتص للرطوبة متصلة بسطح المعدن.

**(٥, ٢, ٦) الاستقرارية**

وحتى يتضح خلاف ذلك، يجب افتراض أن كل الحديد المعمول والمكتشف غير مستقر، وأنه يجب عمل محاولات لمنع التلف الذي تم وصفه أعلاه والذي يمكن أن يحدث فوراً عند الكشف عنه أثناء التنقيب. منذ الوهلة الأولى يجب السيطرة على بيئة هذا الحديد المعمول المكتشف (القسم ١, ٤, ٣)، لكن السؤال ما هي المتغيرات التي يجب التحكم فيها، وما هي المستويات، التي تعتبر الأكثر جدلاً في ترميم الآثار اليوم. علاوة على ذلك، إن أعظم مشكلة في الترميم تقع في هذا المجال أيضاً، وبالتحديد تطوير أساليب يعول عليها للاستقرارية الجيدة للحديد الأثري. لكن الاستقرارية الوقائية الشاملة تفضل في بعض الحالات على الأساليب العلاجية غير الأخلاقية.

**(٥, ٢, ٦, ١) الأساليب وقائية**

**الحديد من المواقع البرية:** حتى الآن ليس من الممكن وصف نظام استقراري واحد يتفق عليه الجميع، لكن قد يكون هذا، بكل بساطة، انعكاساً لتنوع حالة الحديد المعمول المكتشف واستجابته لأحوال عدة من بيئات ما بعد التنقيب. وقد كان التجفيف الطريقة الطاغية في بريطانيا، والغرض منه هو إزالة الماء لمنع المزيد من التآكل وتفكك قشور الصدأ (القسم ٥, ٢, ٥). عند مستوى الرطوبة النسبية أقل من ٢٠٪ فإنه من غير المرجح أن يحدث تآكل ولا ينتج الأكاجينايت (akaganite). في الموقع، يمكن عمل هذه الرطوبة النسبية بسهولة باستخدام السيليكا جل، لكن في المخزن أو أماكن العرض يجب استخدام مزيلات الرطوبة لتجفيف مساحات كبيرة (القسم ١, ٤, ٣). ولسوء الحظ، لا يكون المؤشر الأزرق، في معظم السيليكا جل، ذاتي البيان، مفيداً بشكل خاص، حيث إنه يصبح قرمزيًا عندما تكون الرطوبة النسبية عند حوالي ٤٠٪، أي عندما يصبح الهواء رطباً جداً. عليه، وحتى يتوفر جل يحتوي

على مؤشر مختلف ، فإنه يتوجب دمج شرائح ورقية صغيرة تشير إلى قراءة رطوبة منخفضة تصل إلى ٢٠٪ داخل الحاويات المغلقة (اللوحة ١٤، ٥). وقد يكون الفشل الذي حدث من خلال هذه الأساليب نتيجة للتنفيذ غير الصحيح ، حيث يجب التقييد بالإرشادات المبينة في (القسم ١، ٤، ٣) بجدية. يعتبر التجفيف أسلوباً غير عادي ، حيث إنه لا يشبه بيئة الدفن بأية حال من الأحوال. علاوة على ذلك ، يمكن أن يقود إلى انكماش قشور التآكل ، وقد يعيق أساليب التنظيف اللاحقة. يمكن أن توضح البحوث المستقبلية أنها ليست الطريقة التي يجب تبنيها.

والتجفيف باستخدام المذيبات كان يفضل في الدول الاسكندنافية ، لكنه يتضمن خطر استخدام هذه الكيماويات في الموقع خلال النقل. يمكن أن يوفر التجميد الشديد طريقة بديلة ، لكن الأخطار التي يسببها تمدد الماء عند التجمد تتطلب التحقق.



اللوحة (٥، ١٤). اقتراح للتخزين ما بعد التنقيب للحديد المعمول - يفترض التجفيف بواسطة جيل السيليكا في صندوق من البولي إيثيلين المغلق محتويًا على شريط قياس الرطوبة.

بشكل متناقض ، إن الطريقة الأخرى للاستقرارية الوقائية للحديد المعمول من المواقع الرطبة هي إبقاؤه مبتلاً. ويساعد هذا في المحافظة على مستويات الأكسجين داخل قشرة الصدأ منخفضة ، بينما يعمل على تجنب المشاكل المتعلقة بالتجفيف. يمكن ولفترات قصيرة جداً إبقاء الحديد المعمول رطباً فقط بغلقه في الحاويات ؛ ويتم تخفيض سرعة أي تفاعل كيميائي ، الذي يمكن أن يحدث ، بحفظ الحاويات عند درجات حرارة منخفضة ، في الثلجة أو بإضافة مادة طيارة كاجحة (vapour phase inhibitor). بالنسبة لإعادة التغليف لفترات أطول في التربة أو وسط اصطناعي يحاكي بيئة الدفن داخل الحاويات المغلقة فهو احتمال وارد<sup>(٣٠)</sup>. وتدعم الأبحاث الحديثة<sup>(٣١)</sup> التخزين الرطب خالي الأكسجين. فقد اقترح<sup>(٣٢)</sup> أنه يمكن تخزين الحديد في محاليل كبريتيت الصوديوم (sodium sulphite  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) الذي يمنع تفاعلات الأكسدة ، وأن الكبريتيت القلوي (alkaline sulphite) يمكن أن يقوم بعمل استقرارية طويلة الأجل (القسم ٢، ٦، ٢، ٥) ، لكن هذا المحلول كاشف قوي جداً ويظهر أنه مدمر لبعض الحديد المعمول. يمكن إزالة الأكسجين من البيئة نهائياً عن طريق الإزالة بواسطة غاز خامل ، فقد استخدم من قبل التخزين في بيئة نيتروجينية للحديد المعمول الذي لا يمكن تجفيفه<sup>(٣٤)</sup>.

وقد تم أيضاً اقتراح استخدام محاليل موانع التآكل القلوية (القسم ٥، ١، ٥) لتخزين الحديد. لا يعطي سسكوكاربونات الصوديوم (sodium sesquicarbonate  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3$ ) بيئة قلوية (pH) كافية ، وعليه يجب استبداله بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) ، لكن لا يزال غير واضح مدى فعالية هذه الطرق في منع تآكل الحديد المعمول المتآكل بشدة<sup>(٣٥)</sup>.

\* هناك دراسة قام بها المترجم في رسالته للدكتوراه ١٩٩٩م (غير منشورة) استخدم فيها هيدروكسيد الصوديوم في معالجة الحديد المعمول في جونيترو، جيني. (Chloride Removal form Archaeological Iron and Akaganite ( $\beta\text{-FeOOH}$ ). Cardiff). (University 1999).

**الحديد من المواقع البحرية:** وحيث إن مستويات الكلوريد في هذه المادة سوف تكون عالية، فإن من المرجح جداً أن تحدث تفاعلات مدمرة تتضمن أيونات الكلوريد (القسم ٥, ٢, ٥) بعد التنقيب. عليه، من الضروري العمل على استقرارية الحديد البحري فوراً عند استخراجها من البحر، حتى ولو افترض أن قشور الصدأ فارغة يجب أن تعالج وكأنها تحتوي معدناً حتى يثبت خلاف ذلك. غير أن المتحجرات على القطع الأثرية الصلبة الكبيرة يجب أن تزال قبل التخزين وذلك لأنها تشكل حاجزاً جزئياً للتحلية.

إن أفضل طريقة للاستقرارية هي عن طريق التخزين الرطب، ولكن بسبب المستويات العالية للكلوريد، فإن التخزين يتطلب استخدام خطوات لمنع التآكل أكثر حرصاً من تلك المستخدمة على الحديد البري. قد يبدو هذا تناقضاً، لكن المحلول المؤكسد القوي سوف يكبح تآكل الحديد (القسم ٥, ١, ٥)، حيث تتكون شريحة أكسيد مقاومة تعمل على تحييد المعدن. وقد استخدم محلول ديكروميث البوتاسيوم القلوي (alkaline potassium dichromate) بنجاح في هذه السياق، على الرغم من أن هذه الطريقة لا يوصى بها حيث إن لها الكثير من المساوئ والعيوب، بغض النظر عن أن سمية أيون الكروميث الموجود هي خطر صحي مائل. هناك طريقة استقرارية أسهل وأقل خطورة باستخدام محاليل كاجحة عالية القلوية بنسبة pH (١٣, ١٠) حسب ما وصف أعلاه<sup>(٣٦)</sup>. حتى ولو كان تركيز أيون الكلوريد عالياً، بشرط أن يحتوي أكسجيناً ذائباً كافياً، فإن من المحتمل أن تتكون شريحة أكسيد واقية بشكل كاف. غير أن فعالية هذه المحاليل كانت موضع شك حديثاً<sup>(٣٥)</sup>. إذا ما تطلب معالجة الحديد المعمول بطريقة الكبريتيت القلوي (القسم ٥, ٢, ٦, ٢)، فبدلاً عن غمر الأجسام فوراً في هذا الكاشف القوي، فإن من الممكن تخزين الحديد البحري في محلول مخفف من محتزل كبريتيت الصوديوم المحايد لمنع التآكل قبل المعالجة.

بسبب المستويات العالية للملح، تكون الاستقرارية بواسطة التجفيف مناسبة فقط عندما يكون مضموناً، فإن الرطوبة وإن كانت قليلة سوف تسمح للكلوريدات بالاستمرار في تفاعلاتها المدمرة (القسم ٥، ٢، ٥). عليه، يمكن استخدام الاستقرارية بالتجفيف فقط بالنسبة للقطع الأثرية الحديدية المشغولة الصغيرة التي لا تحتوي على متحجرات، أو التي يمكن تحريرها من المتحجرات بسهولة، والتي سوف تناسب الحاويات المغلفة. لا يمكن تجفيف الحديد الزهر المتحول إلى جرافيت والحديد المشغول بشكل يعول عليه. يمكن استخدام التجفيف بالنسبة للمتحجرات أيضاً، حيث إنها لا تحتوي على معدن، ولكن، مثل الأجسام الحديدية المشغولة الصغيرة، يجب غمسها أولاً في ماء عذب لتجنب التلف الناتج عن تبلور الأملاح (القسم ٤، ١، ٢).

#### (٥، ٢، ٦، ٢) الأساليب العلاجية

كانت معظم أساليب الاستقرارية في الماضي تهدف إلى إزالة الكلوريدات، لكن لم يكن أي منها ناجحاً حتى ولو جزئياً. ولفهم الأسباب وراء هذا الفشل، أجرى باحثو الترميم دراسة حديثة لتحديد طبيعة الكلوريدات داخل الحديد المعمول المكتشف من الحفريات<sup>(٣٧)</sup>. وقد اتضح وجود الكلوريدات في قشرة الحديد المكتشفة من الحفريات حديثاً فقط في شكل أيونات مذابة في الماء، إلا أنها في الحقيقة تظل عالقة هنا بواسطة الشحنات الموجبة المحيدة المنتجة بواسطة التآكل المتواصل للمعدن المتبقي<sup>(٣٢)</sup>. عليه، يمكن لمعظم الأساليب، غير المنشورة، الخاصة بإزالة الكلوريدات بالماء الحار أن تزيلها فقط عندما لا يكون هناك أي بقايا من معدن، وهذه ليست القضية، حيث لا يمكن غسل الكلوريدات العالقة وإزالتها بأي كمية ماء في وجود المعدن؛ حيث إن الشحنات تزداد بكل بساطة أثناء زيادة سرعة التآكل في هذه البيئة الساخنة الرطبة المشبعة بالأكسجين. غير أنه يمكن إحراز بعض النجاح باستخدام غسيل يمنع نشاط

خلايا التآكل، إما بواسطة الغسيل الحار في جو خامل من النيتروجين<sup>(٣٨)</sup>، أو عن طريق دمج عوامل مختزلة، أو أنواع أخرى من موانع التآكل في محلول الغسيل<sup>(٣٩)</sup>.

اقترح آخر حول سبب فشل معالجات الاستقرارية هو أن الكلوريدات تحبس في منتجات تآكل كبيرة الحجم، ومن أجل تحريرها يجب أولاً اختزال الأوكسي هيدروكسيدات إلى المجنيتايت (magnetite) المضغوط. وأنه لو سمح للأكاجنايت (akaganite) بعد التنقيب أن تتشكل (القسم ١، ٥، ٢، ٥)، فإن الكلوريدات تصبح محتبسة في شبكة بلورية، وأنه من أجل تحريرها يجب اختزال الأكاجنايت إلى مجنيتايت. في عام ١٩٧٥ م، من أجل تحقيق هذا الاختزال، تم تطوير طريقة جديدة للاستقرارية باستخدام كبريتيت الصوديوم القلوي للحديد البحري<sup>(٤٠)</sup>، لكن كانت لها نتائج غير واضحة خاصة عندما استخدمت على الحديد المعمول البري<sup>(٤١)</sup>. قد ينجم نجاح هذه المعالجة من العامل المختزل الذي يمنع المزيد من التآكل ومن ثم يسمح لأيونات الكلوريد أن تتحرر، بدلاً عن اختزال الأوكسي هيدروكسيدات إلى مجنيتايت كما اقترح أولاً. بالتأكيد ليست هذه العملية ناجحة عندما يسمح للأكاجنايت بالتكون، ومن ثم يجب أن يتم تخزين القطع الأثرية التي تجب معالجتها بهذا الطريقة مبتلة منذ لحظة التنقيب\*.

إن استخدام المجالات الكهربائية، المطبقة في محاولة لتقليل مستويات الكلوريد، قد لاقى انتشاراً واسعاً. حيث إنه إذا ما استخدمت تيارات منخفضة جداً، يمكن أن يعمل دخول الإلكترونات في القطعة الأثرية بدلاً من التعرية (القسم ١، ٤، ٢، ٥)، ويمكن أن تمنع التآكل المتواصل خلال الغسيل، وهو أسلوب يعرف بإزالة الملح

\* لمزيد من التفصيل حول كيفية احتباس الكلوريدات داخل الأكاجنايت انظر للمترجم (Chloride Removal form) (Archaeological Iron and Akaganite (β-FeOOH). Cardiff University 1999).

الكاثودي (cathodic desalting)<sup>(٤٢)</sup>. وأن التيار الأعلى بقليل سوف يختزل الأوكسي هيدروكسيدات إلى المجنيتات، الذي قد ينجم عنه تحرير الكلوريدات<sup>(٤٣)</sup>. طريقة أخرى تهدف إلى منع التآكل أثناء إزالة الكلوريد هي استخدام المحلول غير المائي لإذابة الأملاح<sup>(٤٤)</sup> لكن يظهر أنها ليست فعالة جداً<sup>(٤٥)</sup>.

أخيراً، يمكن طرد الكلوريدات من الحديد في شكل غازات عند درجات حرارة عالية. فقد أثبتت هذه الطريقة نجاحها لاستقرارية الحديد الزهر البحري، حيث يمكن تخفيض درجة الحرارة المطلوبة إلى ٨٥٠ أو ٦٠٠ درجة مئوية عن طريق التسخين في جو مختزل للهيدروجين، أو حتى إلى ٤٠٠ درجة مئوية عن طريق التسخين لفترات طويلة<sup>(٤٦)</sup>. هنا لا يتم فقط تعرية الحديد الزهر فقط من أيونات الكلوريد، ولكن أيضاً تتم تقويته ويظهر قطعة أصلية جديدة، ويتم هذا عن طريق اختزال أكسيد الحديد في المنطقة الجرافيتية (القسم ٥,٢,٣,٣) لحديد معدني ومجنيتات. غير أن هذه الطريقة سوف تحدث بعض التغيير في التركيبة المعدنية للحديد الأثري عند درجات الحرارة العالية. قد يعتبر فقدان بعض المعلومات مسموحاً به في مقابل نجاح استقرارية الحديد الزهر البحري، الذي يعتبر تحقيقه في غاية الصعوبة بواسطة أية طريقة أخرى. أثير جدل<sup>(٤٧)</sup> عندما تم تطبيق هذه المعالجة على الفولاذ القديم والحديد المشغول، كما وضح في (القسم ٥,٢,١)، فإنه سيحتوي على الكربون في كل الاحتمالات. الكثير من التفاصيل المعدنية سوف تفقد إذا ما تسخين هذه المواد إلى أعلى من ٣٨٠ درجة مئوية. علاوة على ذلك، إذا ما حدث الاختزال عند درجة الحرارة المنخفضة هذه، فإنه من غير المرجح أنه سيتم طرد كل الكلوريد. ومقارنة بالطرق الأخرى لإزالة الكلوريد، فإن اختزال الهيدروجين يعتبر الأسرع نسبياً، لكن هذا وحده لا يتغلب على عيوب استخدامها في السبائك ذات الكربون المنخفض.

حالياً لا توجد طريقة مرضية تماماً لتخفيض مستويات الكلوريد في الحديد المعمول المكتشف، وفي معظم الحالات يجب تفضيل الأساليب الوقائية ( passive stabilization) للحديد المحمل بالكلوريد حتى يتم تطوير واختبار طرق استقرارية جيدة يُعوَّل عليها.

بتخفيض مستويات الكلوريد، فإنه من الضروري إزالة أكبر قدر ممكن من الماء من الحديد المعمول؛ وهذا يتحقق، بشكل أفضل، باستخدام الإزاحة بواسطة المذيبات بدلاً عن التسخين (انظر أعلاه). ومن ثم يتم عادة وضع عازل فوق سطح القطعة الأثرية لمنع إعادة التلوث بالكلوريدات، والغبار، والعوالق أثناء المناولة. إن دمج الأصباغ أو الجرافيت داخل الشمع أو اللك المطبق ليس مفيداً، حيث يجب السطح، وليس في صالح الفحص المستقبلي. في حالات نادرة في القطعة الأثرية حيث يكون السطح من الحديد المعدني، يمكن تغطيته بطبقة كيميائية واقية في شكل التانات (tannins) أو فوسفات (القسم ١، ٢، ٢، ٥)، أو حتى الدهان، عندما يكون الجسم معرضاً لا محالة لأحوال طقس قاسية. على كل حال، حيث إن هذه الطبقة الكيميائية تغير من لون الحديد وتحجب التفاصيل، وإنها لا تتحمل ولا يُعوَّل عليها، فإنه يوصى بأن تنقل القطعة الأثرية إلى بيئة يمكن التحكم فيها.

عقب الاستقرار الكيميائية، تغدو تقوية القطع الأثرية الهشة باستخدام المواد الاصطناعية (القسم ٢، ٢، ٤، ٣) أمراً ضرورياً، لكن اللجوء إلى الغمر في كتلة شفافة من الراتنج، كما تم اقتراحه يجب تجنبه لأسباب واضحة.

### (٣، ٦، ٥) السيطرة البيئية طويلة الأجل

لدراسة هذا الموضوع يجب تقسيم الحديد المعمول إلى نوعين، بالتحديد ذلك الذي يوجد مستقراً أو تمت استقراريته بشكل جيد، وذلك الذي يكون مستقراً فقط

بوسائل التحكم الوقائية للبيئة. فإذا كان الحديد المعمول من الفئة الأخيرة، عندها تطبق الاستقرارية طويلة الأجل لما لا نهاية كما جرى وصفه في القسم (١, ٢, ٥). ويعرف أن هناك على الأقل بعض الحديد المكتشف من المواقع البرية يتحمل التخزين إلى عشر سنوات في بيئة جافة، لكن التخزين الرطب المطول من المرجح أن يثبت بأنه غير مرضي. على نحو مغاير، إذا كان الحديد المعمول، في الفئة الأولى، يتطلب سيطرة على الرطوبة النسبية، فإنه يجب معالجته كمادة حساسة. ويعني هذا أنه لا يسمح لدرجة الحرارة ولا للرطوبة النسبية أن تتأرجح بشكل كبير. ولمنع حدوث تآكل للمعدن المتبقي، يجب المحافظة على الرطوبة النسبية تحت ٦٥٪، وتتم مناولة السطوح المعدنية فقط بواسطة القفازات، ويمنع الغبار من السقوط عليها. وكما هو الحال بالنسبة للقطع الأثرية الأخرى كافة، فإن التلوث الزائد مدمر، وفي الحالات المتطرفة للتلوث الجوي، ثنائي أكسيد الكبريت أو رذاذ الملح، فيمكن منع التلوث فقط بالمحافظة على درجة رطوبة منخفضة جداً. يمكن استخدام موانع بخارية (vapour phase inhibitors) (القسم ٥, ١, ٥) في حاوية مغلقة، لكن بعض هذه الموانع المناسبة للحديد يمكن أن تتسبب في تآكل النحاس، لذلك يجب استشارة المختصين عند استخدامها.

### (٥, ٢, ٧) الخلاصة

إن الحديد المعمول (ironwork) وخاصة الحديد المشغول (wrought iron) والقطع الأثرية من البحر ربما هي الأكثر إشكالية من بين المواد المكتشفة الأخرى، فيما يتعلق بكل من النظافة الاستقصائية والاستقرارية. ويُأمل أن تحدد الأبحاث الجارية وسائل تطوير أساليب ترميم أكثر إرضاءً من المتوفرة حالياً.

إن المعالجة الوحيدة التي يجب أن يتلقاها الحديد في الموقع هي المناولة الحذرة والاستقرارية الوقائية، وإن هذه يجب أن تبدأ بأسرع ما يمكن بعد الكشف عنها. وحيث إن أسلوب استقرارية الحديد المعمول من المواقع البرية يختلف بين مختلف مختبرات

الترميم، فإن من الضروري أن يناقش ذلك مع المختبر الذي ستجرى فيه معالجة الحديد قبل البدء في عملية التنقيب، وذلك لتحديد الطريقة المناسبة لاستقرارية القطع الحديدية الأثرية. وعند الإخفاق في ذلك يقترح تجفيف الحديد المعمول (القسم ١، ٣، ٤)، وهي عملية يجب أن تبدأ في غضون ثمان وأربعين ساعة من الكشف. ويكون العكس صحيحاً بالنسبة للعمل الحديدي البحري؛ فيجب حفظه مبتلاً (القسم ١، ٦، ٢، ٥) من لحظة إخراجه من البحر. مرة أخرى تعتبر المشورة أساسية.

لا يمكن القيام بنشر ملائم للحديد المعمول بدون صور الأشعة، فبدون هذا التصوير فإن الكثير من الأدلة يفقد أو يفسر خطأً. وبالمثل فإن النظافة الاستقصائية تعتبر أساسية للتقييم المؤهل للموقع ولا يمكن تنفيذه بدون استخدام صور الأشعة. يجب عمل عرض للحديد المعمول بالإشارة إلى كل من القطعة الأثرية وصورة الأشعة الخاصة بها؛ إذا ما استخدمت القطعة الأثرية لوحدها فقد تفسر قشور الصدأ خطأً، وإذا كانت صور الأشعة لوحدها فقط، فقد تشوه ويفقد البعد الثالث لصورة الأشعة. ولا يستدعي تكرار القول، بالنسبة لنشر الحديد المعمول وعرضه، إن العلاقة يجب أن تكون قوية بين المنقب والمرمم والقائم على المتحف.

في غياب الطرق المقتنعة للاستقرارية الجيدة للحديد، تعتبر السيطرة على بيئة التخزين والعرض أمراً لا بديل له. وحيث إن الحديد المعمول مادة حساسة، فإنه يجب مراقبة حالته بشكل منتظم وبلا حدود.

### (٥، ٣) الرصاص وسبائك

#### (٥، ٣، ١) طبيعة القطع الأثرية

لدى الرصاص النقي نقطة انصهار منخفضة تصل إلى ٣٢٧ درجة مئوية، وحيث إن درجة حرارة إعادة بلورته (القسم ١، ١، ٥) أقل من درجة حرارة الغرفة

العادية، فإنه لا يستجيب لعمل التقسية. الرصاص اللين غير مناسب للأوعية ذات الجدران المجوفة الرقيقة ... إلخ. وبالنسبة لهذه الأوعية ولأجسام الصب الأخرى، تستخدم سبائك أفسى وأقوى. مثل هذه السبيكة هي بيوتر (pewter)\*، ولكونها تتألف في معظمها من القصدير فإنه سيتم مناقشتها في (القسم ٤، ٥). في كثير من الأحيان توجد الفضة في الأجسام الرصاصية في نسب صغيرة، حيث إن المعادن لها نوع خام مشترك؛ وكل من هذه والشغل على البارد يزيد من مقاومة تآكل القطع الأثرية الرصاصية. أيضاً قد يحتوي الرصاص ذو الدرجة المنخفضة على شوائب مثل الكلوريدات والكبريت، يمكن أن تصنع الوصلات في الأجسام الرصاصية إما بواسطة اللحام البارد أو بواسطة اللحام الناعم (القسم ١، ٢، ١، ٥) وتعني النعومة النسبية للمعدن وحتى سبيكة القصدير والرصاص أنه يمكن الكتابة عليها أو ختمها بسهولة.

(٥، ٣، ٢) طبيعة المادة التالفة

(٥، ٣، ٢، ١) المظهر

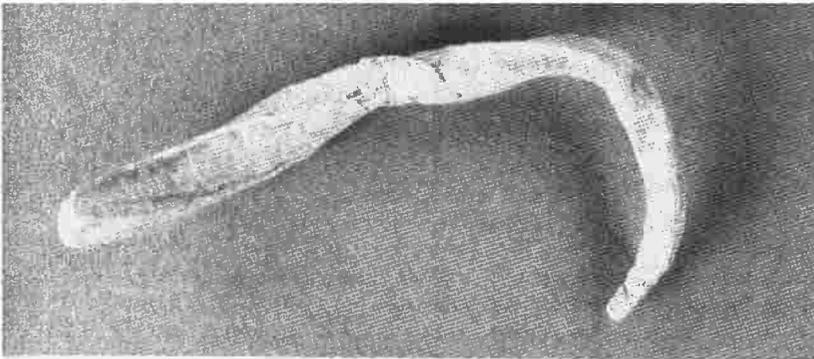
**سطح قاتم أو بني لامع:** في الجو، ستكون طبقة رقيقة واقية من أكسيد الرصاص (PbO) فوق المعدن، وفي بعض الأحيان يمكن أن تحتوي هذه الطبقة على كبريتات الرصاص الأكثر قتامة.

**طبقة بيضاء رقيقة أو متغيرة اللون** (اللوحة ١٥، ٥ أ): هذه في العادة سيروسيت (serussite)، (كربونات الرصاص) ( $PbCO_3$ ) أو هايدروسيروسيت (hydrocerussite)، كربونات الرصاص القلوية ( $2 PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$ ) التي تتكون ببطء في وجود الهواء والماء، لها تركيبات واقية مصنوعة من بلورات لاصقة مضغوطة. وهي تتكون على الرصاص من التربة الرطبة الكلسية وأيضاً على الرصاص المكتشف من البحر وفي كلتا

\* سبيكة من القصدير والنحاس. المترجم.

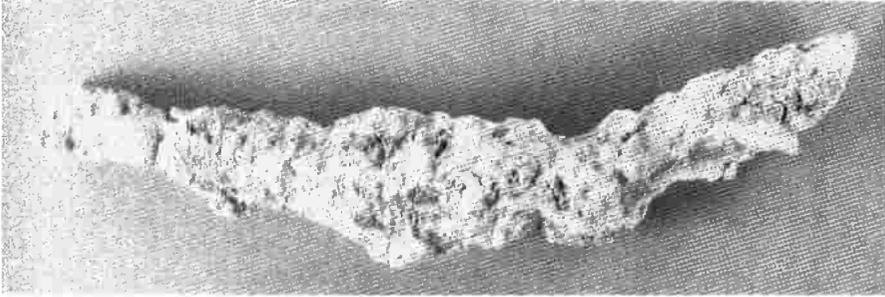
الحالتين تحمي المعدن من تآكل أكبر. وقد تشمل هذه الطبقة كبريتات الرصاص، أنجليسيت (anglesite)\*\*، والليدهيليت (leadhillite) وتتلوث بالفوسجينيت ( $PbCl_2.PbCO_3$ ) والكلوريدات الأخرى في البحر.

الطبقة البيضاء أو المتغيرة اللون (اللوحة ١٥، ٥ب): مرة أخرى هذه القشرة بشكل رئيسي سيروسييت أو هايدروسيروسييت لكن يمكن أن يتغير لونها بالأكسيدات؛ الليثراج (litharge) ( $\alpha PbO$ ) القرمزي أو الأحمر أو البني، الماسيكوت (massicot) الأصفر ( $\beta PbO$ ) أو البلاتنيراييت (plattenrite) البني ( $PbCO_2$ ). وقد يشوبها اللون الرمادي، بواسطة الجالينا (galena) السوداء ( $PbS$ ) وتصبح متشققة أفقياً ورأسياً، وتصبح الفجوات مليئة بالتربة والجذور. ويحدث التآكل الذي يكون هذه القشور فقط في التربة القلوية حيث إن الكربونات تذوب في الرقم الهيدروجيني (pH) الحمضي. في التربة القلوية حيث تكون الكربونات متفرقة، يظهر أن الرصاص يتآكل إلى أكاسيد بنية محمرة مع القليل من الكربونات إن وجدت، وقد تظل بقع من معدن الرصاص في هذه القشرة المتشققة.



(أ)

\*\* خام من كبريتات الرصاص. المترجم.



(ب)



(ج)

اللوحة (٥, ١٥). رصاص متأكل.

أ- طبقة بيضاء رقيقة من كربونات الرصاص.

ب- طبقة من كربونات الرصاص سميكة تحت السطح الأصلي

وفوقه.

ج- طبقة واقية من كبريتيد الرصاص الأسود من ترسب غير هوائي.

الرصاص الأسود أو الذهبي الباهت (اللوحة ٥, ١٥ ج): في البيئات غير الهوائية، سواء بحرية أو برية، المحتوية على بكتيريا نشطة مختزلة للكبريت (القسم ٢, ١, ١, ٢)، فإن الرصاص يسود بواسطة كبريتيد الرصاص، والجالينا. يمكن أن تكون

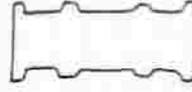
هذه طبقة واقية لاصقة ، أو فقط تلتصق بدون رصاص. في كثير من الأحيان ، يظهر الرصاص من هذه الترسبات باللون الذهبي الباهت ؛ قد يكون هذا نتيجة لترسب النحاس وكبريتات الحديد<sup>(٤٨)</sup>.

**التقشرات التحتية :** في الأحوال التي يتم فيها الاحتفاظ جيداً بالرصاص (القسم ٥،٣،٢،٢) ، توجد متحجرات تحتية من كربونات الكالسيوم (الكالسيت والأراجونيت) (calcite and aragonite) ؛ في ماء البحر ، تكون مصحوبة بحيوانات بحرية عالقة.

#### (٥،٣،٢،٢) مضامين التآكل

في وجود الهواء والماء والأحماض العضوية ، يتآكل الرصاص بسرعة كبيرة ، حيث إن جميع منتجات التآكل الرئيسة للأملاح العضوية مثل الخلات والفورميك قابلة للذوبان (الشكل رقم ٥،٧). ويحدث تآكل سريع مماثل في المياه العذبة الحمضية عندما تتكون طبقات الكربونات الواقية<sup>(٤٩)</sup>. إذا سادت هذه الأحوال في ترسب ما ، فمن غير المرجح أن يكون للرصاص القدرة على البقاء (الصمود) إلى أكثر من نصف قرن من الدفن. وعلى النقيض ، يقاوم الرصاص كثير التآكل بواسطة مياه البحر والترية الطباشيرية. كثيراً ما يتم الاحتفاظ بالتفاصيل الطبوغرافية للسطح الأصلي بواسطة شريحة التآكل أو قشرته. غير أن هذه القشرة تشوه في بعض الأحيان وتكون التفاصيل المتبقية فقط في مركز المعدن التحتي حيث يستطيع الصمود. وسيكون هذا المعدن المتبقي به نقر كثير ويحتفظ فقط بتفاصيل ضئيلة. ويبدو أنه ، وبالعكس الحديد ، يتم العثور على مستوى من سطح "أصلي" داخل قشرة تآكل الرصاص المشوهة. يمكن أن يتغلغل التآكل عميقاً داخل الرصاص ، حتى إلى الحدود الحبيبية ومن ثم يصبح أكثر هشاشة مما يظهر.

١- تم حفظه جيداً بواسطة شريحة رقيقة من منتجات التآكل.



٢- تم الاحتفاظ بالسطح الأصلي بواسطة سطح المعدن الذي يبدو متأكلاً قليلاً، مغطى بطبقة من منتجات التآكل أو متحجرات مختلفة السماكة.



٣- يتم الاحتفاظ بالسطح الأصلي بواسطة السطح المكشوف لمنتجات التآكل: المعدن المتبقي (إن وجد) متشطر بواسطة الشقوق.



الشكل رقم (٥,٧). الأحوال العامة للرصاص الذي يتم العثور عليه في الحفريات، قطاع عرضي لرمز.

### (٥,٣,٣) الفحص

يمكن تقدير كمية الرصاص في السبيكة ببساطة بواسطة الوزن، ويمكن معرفة وجوده على سطح قطعة ما أنه عندما ينكشف المعدن اللامع ويحك به على ورق فإن الرصاص سوف يُعلم على الورق، بعكس القصدير والبيوتر الناعم فهما لا يقومان بذلك. وحيث إن التفاصيل الطبوغرافية مثل العلامات المنحوتة أو الأختام أو السطح الأصلي كثيراً ما يتم الاحتفاظ بها بواسطة قشرة التآكل، وكثيراً ما يتم الحصول على أقصى قدر من المعلومات حول الجسم الرصاصي بدون إزالة منتجات التآكل. يمكن أن يكون الرصاص المتآكل هشاً جداً حيث يكون التآكل قد تغلغل عميقاً داخله، عليه يجب توخي الحذر للتمييز بين منتجات التآكل والتراب داخل فتحات القشرة. إذا ما تبقى الكثير من المعدن الرصاصي، فإن صور الأشعة السينية لا تساعد كثيراً، حيث إن هذا المعدن يمتص الأشعة السينية مما يمنع كشف الشريحة التحتية. في حالات استثنائية، يمكن استخدام التصوير النيوتروني (القسم ٣,٣,١,٣).

## (٥,٣,٤) التنظيف

## (٥,٣,٤,١) تنظيف الرصاص من المواقع البرية

كما هو معتاد يتكون التنظيف الاستقصائي لهذه المادة من الإزالة اليدوية للتربة التحتية والمتحجرات بدون خلع قشور التآكل أو المادة داخل الفتحات التي تحتويها. عندما تكون القشرة مشوهة ويوضح الفحص أن مركز المعدن متبقٍ، فإنه من أجل الفحص والعرض قد يصبح من الضروري تعرية القطعة الأثرية (اللوحة ١٦, ٥). كالمعتاد يتم تنفيذ هذا النوع من التنظيف بواسطة التحليل الكهربائي<sup>(٥٠)</sup> (القسم ٥,١,٤,٢)، وذلك لعدة أسباب؛ أولاً: حيث إن معظم منتجات تآكل الرصاص غير قابلة للذوبان، فإن أي كاشف يذيب القشرة سوف يهاجم الرصاص أيضاً. وتمتد هذه المشكلة إلى استخدام عامل نزع أيونات\* (sequestering agent) (القسم ٣,٣,٢,١) disodium EDTA<sup>(٥١)</sup>، حيث إنه إذا ما تبقّت آثار من هذا بعد المعالجة فإنه قد يحدث تلف طويل الأجل نتيجة للأحماض العضوية (القسم ٥,٣,٢,٢). ثانياً: يمكن أن يعمل التنظيف الميكانيكي على تلطيخ أو خدش الطبقة الهشة جداً للمعدن التي تحت قشرة التآكل. ثالثاً: ليس هناك سطح "أصلي" يمكن العثور عليه داخل القشرة ميكانيكياً. علاوة على ذلك، وحيث إن الرصاص ومنتجات التآكل الخاصة به سامة، فإن الغبار الناتج خلال التنظيف الميكانيكي سام أيضاً. في بعض الحالات، القطع الأثرية التي تتطلب معالجة موضعية بـ "التعرية" يمكن معالجتها فقط بالتحليل الكهربائي (القسم ٥,١,٤,٢) باستخدام قلم كأنود\*\*.

\* مادة تحجز الأيونات بالاتحاد معها. المترجم.

\*\* عكس كتود. المترجم.



(أ)



(ب)

اللوحة (١٦، ٥). تعربة رصاص متأكل:

أ- شارة رصاصية من القرون الوسطى توضح متحجرات حاجبة تغطي سطح القطعة المحفوظة بشكل جيد.

ب- الشارة بعد التعرية تكشف تفاصيل السطح الأصلي المحتفظ به في المعدن المتقعر بواسطة التآكل.

(٢، ٣، ٤، ٥) تنظيف الرصاص البحري

ليس من الضروري عادة تنظيف الرصاص البحري، وذلك لأن متحجرات السطح نادراً ما تحجب. غير أنه في كثير من الأحيان يكون للسبائك الرصاصية أو

المراسي الرومانية علامات تميز تشوهه بواسطة قشور التآكل. في هذه الحالة، يمكن تنفيذ الإزالة الميكانيكية للكشف عن المعدن بواسطة أدوات خشبية تقلل من مجازفة إتلاف الرصاص. مثل هذا التنظيف محدود جداً وتنفذ فقط عندما تكون المعلومات التي سيتم الحصول عليها أساسية لمعرفة تاريخ البقايا أو هويتها أو القطعة الأثرية، حيث إنه قد ينتج عنها تلف دون الاستفادة من المعلومات المكشوفة. الإزالة الميكانيكية لقطع الترسبات الكربونية الصغيرة، الملتصقة بقوة، من الرصاص، التي قد تكون غير متآكلة، يمكن أن تسبب تلفاً. هذا ما يحدث تقريباً بواسطة أية مواد كيميائية تستخدم لإذابة الكربونات. وبشكل غير معروف، فإن حامض الكبريتيك المخفف، الذي يتم تحميده سلفاً، له أقل تأثير متلف، حيث إنه يتفاعل ليكون طبقة غير قابلة للذوبان، لكنها مرئية من كبريت الرصاص على سطح المعدن المكتشف، مما يمنع المزيد من الهجوم.

#### (٥,٣,٥) تلف السبائك الرصاصية بعد أعمال الحفر

عادة ما تكون السبائك الرصاصية وقشور التآكل، بعد التنقيب، مستقرة كيميائياً، ما لم تصبح ملوثة بالأحماض العضوية، إما من جراء معالجات الترميم الطائشة أو من التخزين غير الحكيم. مصادر هذه الأحماض هي بعض الشموع، واللح، ومواد التنظيف الكيميائية، والورق، والكرتون، والصوف القطني، والخشب (خاصة السنديان)، والطلاء، وتشطيبات النسيج، والمواد اللاصقة. وبوجود قليل من الرطوبة فقط، فإن هذه الأحماض تسبب التآكل الذي وُصف في القسم (٥,٣,٢,٢). وحيث إن أملاح الرصاص العضوية لا تُزال بواسطة الغسيل، فإنها تقوم بمزيد من التفاعل محولة الرصاص في غضون شهور إلى كربونات بيضاء ناعمة تداعى

عند اللمس (اللوحة ٥.١٧ أ). يمكن أن يتفاعل الرصاص المحتوي على شوائب الكلوريد والكبريت مع الأكسجين والرطوبة مما يعيق القطعة الأثرية المتأكلة سلفاً<sup>(٥٢)</sup>. في العادة لا تكون قشور تآكل الرصاص المحتوية على تفاصيل عن السطح الأصلي (القسم ٥,٣,٣) قوية في بنيتها ويمكن أن تتدمر بالمناولة. علاوة على ذلك، فإن الجفاف بعد التنقيب قد يقود للتداعي. وحتى عند مستوى حرارة منخفض نسبياً، مثل التي تنجم عن الضوء، يمكن أن تسبب في انهيار القطع الأثرية الرصاصية وتشويهها.

#### (٥,٣,٦) الاستقرارية

#### (٥,٣,٦,١) الأساليب الوقائية

تقتصر استقرارية الرصاص في معظمها على تجنب الحرارة، وسوء المناولة، والتلوث بواسطة الأحماض العضوية. يمكن تحقيق الحالة الأخيرة عن طريق تخزين القطع الأثرية، حالما تجف، في صناديق مغلقة من البولي برويلين التي لا تحتوي على مواد تفرز أبخرة حمضية عضوية، حيث يجب تجنب الورق الخام، والكرتون، والصوف القطني... إلخ. على نحو مغاير، يمكن وضع الأجسام داخل مظاريف ورقية خالية من الحامض يتم تشبييعها بكاربونات الكالسيوم لامتناس أيّة أبخرة. عند العرض، يجب عدم السماح بتلوث الرصاص مرة أخرى، في هذه الأحوال، تشمل مصادر الحمض العضوي خزائن السنديان، والطلاء والملابس. وقد ذكر سابقاً اختبار المواد المشتبه في أنها تنفث أبخرة عضوية (القسم ٥,٤,١,٣).

وجد أنه عندما يتلوث الرصاص أو يحتوي على شوائب كلوريد وكبريت، فإنه يمكن إبطاء التآكل عن طريق تجفيفه إلى مستوى منخفض جداً من الرطوبة النسبية

بواسطة السيليكا جل ، يتم تحقيق الاستقرارية طويلة الأجل فقط بواسطة الأساليب العلاجية أدناه.

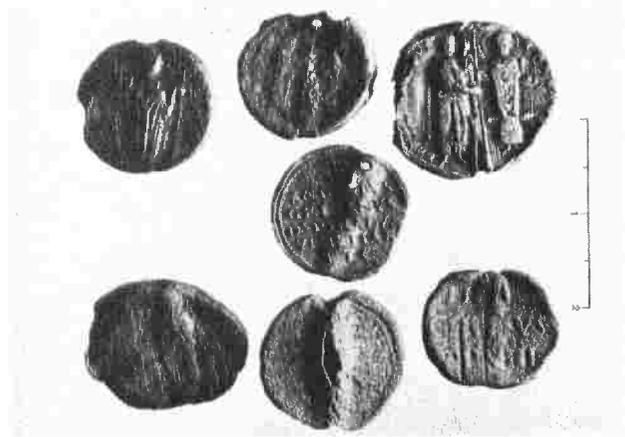
### (٢, ٦, ٣, ٥) الأساليب العلاجية

يمكن تقوية قشور الكربونات المتداعية فقط بواسطة الرايبنج الذي لا يحتوي على أحماض عضوية أو يتحلل ليكون أحماضاً عضوية ، ومن ثم يتم استبعاد العديد من الشمع ، و(بولي فينيل الكلوريد) (PVC) ، ... إلخ. وقد تم ابتكار أسلوب يسمى "الاختزال المقوي" لاختزال كربونات الرصاص إلى رصاص مما يجعل معظم القطع الأثرية المتآكلة أقوى ومظهرها أكثر جاذبية للنظر<sup>(٥٠)</sup>. بخلاف ما يحدث عند اختزال الحديد المتآكل (القسم ٢, ٦, ٣, ٥) أو خام الرصاص ، لا يتم استخدام الحرارة والجو المختزل ، وبدلاً عن ذلك ، يتم تطبيق تيار كهربائي منخفض جداً يكون اتجاهه بالضبط عكس تيار التآكل (القسم ٢, ٣, ١, ٥). هنا يتم أخذ الإلكترونات بواسطة أيونات الرصاص ، مختزلة إياها إلى رصاص. وهذا إجراء عسير ويتضمن اعتبارات أخلاقية (القسم ٣, ٢, ٤, ٣). وحيث إن هذا الأسلوب هو وحده الذي يزيل الأحماض العضوية من القشرة الملوثة المتداعية ، فإنه يجب استخدامه لاستقرارية هذا النوع من القطعة الأثرية (اللوحة : ٥, ١٧ ب).

عادة يمكن منع تلوث السطح وتآكل الرصاص النظيف عن طريق تطبيق طبقة من الرايبنج الاصطناعي ، لكن ، كما هو الحال مع المقويات ، فإن الاختيار يقتصر على تلك الخالية من الأحماض العضوية.



(١)



(٢)

اللوحة (١٧، ٥):

١- أختام رصاصية، متآكلة في المخزن، متحولة إلى كربونات رصاص بيضاء ناعمة، استطاعت الصمود فقط لأن المسحوق يبقاها متماسكة بعضها مع بعض بواسطة طبقة شمع مسودة قديمة.

٢- الأختام نفسها بعد اختزال كربونات الرصاص بواسطة التحليل الكهربائي إلى رصاص مرة أخرى.

**(٥,٣,٧) إعادة التشكيل**

على الرغم من أنه من الممكن تشكيل الرصاص بدون الحاجة إلى تلدين، إلا أن إعادة التشكيل هي صنعة الأخصائي. إن الرصاص الذي يظهر معافى قد يحتوي على تآكل متغلغل في أعماقه (القسم ٥,٣,٣)، مما يؤدي إلى هشاشة القطعة الأثرية من داخلها، ومن ثم يعيق إعادة التشكيل بدون خطر التشقق. علاوة على ذلك، فإن أية قشرة محتوية على تفصيل للسطح، مثل الحروف، قد تداعى أو تصبح متشققة.

**(٥,٣,٨) الخلاصة**

الأجسام المصنوعة من الرصاص أو سبائكه لا يمكن تنظيفها أو إعادة تشكيلها بدون تلف إلا بحذر شديد في المختبر. إجمالاً، لا تتطلب القطعة الأثرية المستخرجة من الموقع الأثرية تحكماً بيئياً كبيراً، ومناولة حذرة وتجنباً للحرارة التي ربما هي الأكثر أهمية. عندما يعتقد أو يخشى أن يكون الرصاص ذا نوعية سيئة، فإنه يجب تخفيفه (القسم ٣,٤,١). غير أنه على المدى البعيد، يصبح دور الأحماض العضوية كمحفزات للتآكل هاماً؛ وعليه يجب توخي الحذر لتجنب تلوث القطعة الأثرية المكتشفة بأبخرة الأحماض العضوية أو المحاليل. وحالما تتلوث، يوجد ملاذ متطرف وحيد هو الاختزال القوي للاستقرارية. إن تنظيف القطع الأثرية الرصاصية لا يحتاج عادة لعمل مجهد، حيث يمكن فعلياً الاحتفاظ بالتفاصيل كافة التي تتم مشاهدتها عند التنقيب والكشف عنها.

**(٥,٤) القصدير وسبائكه****(٥,٤,١) طبيعة القطع الأثرية**

للقصدير نقطة انصهار منخفضة جداً تبلغ (٢٣٢ درجة مئوية) وقدرة تبلل جيدة ومن ثم فهو يستخدم في كثير من الأحيان للصب أو كغطاء. غير أن قطع

القصدير الأثرية المصبوبة تكون في كثير من الأحيان في شكل سبائك من أجل التقوية وأيضاً من أجل الاقتصاد، لتعطي البيوتر (pewter)<sup>(٥٣)</sup>. ويغطي هذا المصطلح مجالاً واسعاً من سبائك الصب التي تتكون من ٢٥-٥٠٪ من الرصاص (الروماني)، إلى أقل من ٢٥٪ من الرصاص (القرون الوسطى)، إلى القصدير مع كمية صغيرة من النحاس، ببسموث (bismuth) أو حجر الكحل (antimony) (الناعم، الموجود في القرون الوسطى والحديثة). يجب اعتبار السبيكة التي بها رصاص أكثر من ٢٥٪ سامة. عادة يشار إلى غطاء سبائك القصدير "بالقصدير" (tinning)، ولأنها غالباً ما تكون كلها، تقريباً، من القصدير الصافي، فإنها من المرجح أن تكون سبائك قصدير ذات نقطة انصهار منخفضة؛ ويكون المعدن المكوّن للسبيكة هو الرصاص، لكن أيضاً يمكن استخدام حجر الكحل، والنحاس والزنك. حيث إن لسبائك القصدير الرصاص والرصاص القصدير نقاط انصهار منخفضة، أي أن ٦٣٪ منها قصدير، تبلغ ١٨٣ درجة مئوية إلا أن جميعها يستخدم كثيراً كلحام مرن (القسم ١، ٢، ١، ٥).

#### (٥، ٤، ٢) طبيعة المادة التالفة

القصدير اللامع أو بيوتر بطبقة لامعة: على الرغم من أنه معدن قاعدي، إلا أن القصدير والقصدير تشكّل سطحاً لامعاً حتى بعد مرور سنين عدة، نتيجة لتكوّن شريحة رقيقة من أكسيد القصدير الواقي {٤} (tin IV oxide SnO<sub>2</sub>) الذي يقاوم حتى هجوم الحامض. تساعد طبقة الأكسيد هذه في حفظ القصدير حتى عندما يتوجب عليه تكوين مصعداً في خلية الجلفنة (القسم ٢، ٣، ١، ٥)، فعندما تستخدم لتغطية سبائك النحاس. عندما يتحد مع أكسيد الرصاص، ومن المحتمل الكبريتيد، فإن أكسيد القصدير يعطي البيوتر، خاصة من البحر، وهو طبقة رمادية ناعمة.

النقاط السوداء، أو الخفر، أو النتوءات الصغيرة: إذا ما احتوت بيئة رطبة على محفزات تآكل مثل الكلوريدات أو الكبريتات، فإن تخشياً موضعياً للسطح يظهر في شكل نقاط سوداء<sup>(٥٤)</sup>. إذا ما تواصل التآكل تتكون الحفر. وبشكل مغاير، يتواجد الكاسيتيريت ( $\text{SO}_2$  cassiterite) ويظهر في شكل نتوءات صلبة.

القشرة الرمادية أو البيضاء أو البنية: التآكل المتواصل الذي تسببه المحفزات يمكن أن ينتج قشرة من الكسيتيريت مع أكسيد القصدير {٢}. وقد تم التعرف إلى الرومارشيت الأسود ( $\text{SnO}$  romarchite)، والهيدروروماشيت الأبيض ( $\text{SnO} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  hydroromarchite) على القصدير من الماء العذب<sup>(٥٥)</sup>. يمكن أن تتلون هذه القشور بواسطة معادن أخرى موجودة مثل النحاس لتتحول إلى لون أخضر، أو يمكن أن تتجفف بواسطة الفتحات. سوف تحتوي القشور على سبائك محتوية على رصاص منتجات تآكل الرصاص (القسم ١، ٢، ٣، ٥)، يمكن أن يظهر البيوتر من المواقع البحرية بسطح رمادي مرن منقط بالنتوءات كما سبق ذكره أعلاه. هذا البيوتر الذي يظهر مشوهاً في بعض الأحيان وأحياناً أخرى محتوياً على باتينا، يبدو إنه اعتماداً على نسبة الرصاص في السبيكة أكثر من ما هو معروف في البيئة. في الحالات المتطرفة، يمكن أن تشقق القشور، وتتلى وتتشظى.

المسحوق أو العجين الرمادي أو الأبيض أو البني. قد يتواصل التآكل حتى عبر القطعة الأثرية أو اللحم محيلاً إياها إلى مسحوق يتداعى في نهاية المطاف. في بعض الحالات، يمكن أن تبقى متماسكة في التربة بقوة بواسطة الأملاح مثل السيليكات، وفي كلتا الحالتين يكون من الصعب التعرف إلى هذه القطع بأنها كانت في الأصل معدنية.

هناك أمثلة قليلة من البيئات البحرية، وربما أن منتج التآكل الرئيسي الذي هو أكسيد القصدير ( $\text{SnO}_2$ ) يشكل ترسبات مثل العجين. وهذه عادة تصمد فقط عندما

تتم حمايتها بواسطة الترسبات أو المتحجرات البحرية. أيضاً يتشكل كل من الروماشيت (SnO) والفارلاموفيت الأصفر (varlamoffite)  $(\text{Sn.Fe})(\text{O.OH})_2$  في البيئات البحرية، لكن حتى الآن لم يتم ملاحظتها إلا مع البرونز والنحاس الأصفر المتآكل، أيضاً تم العثور على الكلوريدات المهدرجة (hydrated chlorides).

**الحفر المعزولة المحتوية على مسحوق رمادي:** نادراً ما يشاهد هذا النوع من التحلل ويجب أن لا يربك ذلك المرمم مع تلك المذكورة أعلاه. ويحدث فقط عندما تكون درجة الحرارة أقل من ١٣ درجة مئوية، عندما يتغير التركيب البلوري للقصدير في أماكن منعزلة، حيث يحول المعدن اللامع إلى مسحوق رمادي يسمى "وباء القصدير" (tin pest). سبب هذا التغيير لا يزال غير واضح، لكن احتمال أن معظم القصدير المدفون يفقد من خلال التعرض الطويل لدرجات حرارة أقل من ١٣ درجة مئوية لم يجد قبولاً لدى بعض علماء المعادن<sup>(٥٦)</sup>.

### (٥, ٤, ٣) الفحص

إذا كان لقطعة أثرية من القصدير أو البيوتر طبقة أكسيد رقيقة، فإن طبوغرافية السطح الأصلي وأبعاده سوف تتم المحافظة عليها. وإذا كانت طبقة القشرة والصدأ شديدة، فليس من المحتمل وجود بقايا معدن ولا طبقة تآكل داخل القشرة، التي تحتفظ بتفاصيل السطح الأصلي، عليه فإن السطح الخارجي لمنتجات التآكل يجب أن يستخدم كمرشد للسطح الأصلي. ولحسن الطالع، لا يكون التمدد الحجمي لقشرة التآكل زائداً عادة.

أما على القطعة الأثرية الأخرى المصنوعة من معادن غير القصدير فإن أية "قصدرية" موجودة قد لا تكون مرئية، وحيث إنها أقل قاعدية من الحديد ومحمية بواسطة طبقة الأكسيد الخاصة به (القسم ١, ٢, ٣, ٥)، فإن القصدرية يمكن أن تصبح

مغطاة بمنتجات الحديد أو النحاس. وتساعد صور الأشعة السينية في هذا البحث ، لكن كثيراً ما تخفق في كشف الطبقات الرقيقة. أيضاً يجب البحث عن اللحام ، حيث إنه غني بالرصاص ، وعادةً ما يتآكل إلى مسحوق عندما يتصل بسبائك النحاس.

(٥,٤,٤) التنظيف<sup>(٥٧)</sup>

وكما هو الحال بالنسبة لسبائك الرصاص (القسم ٥,٣,٤) فإن القصدير يحتاج إلى القليل من التنظيف ، بخلاف إزالة التراب. ويجب أن لا تُزال التتواتر الصغيرة لأكسيد القصدير ، حيث إن تآكل المعدن المكشوف عرضة لأن يحدث بسرعة شديدة. ولأي سبب من الأسباب تطلب إزالة الكاسيتيريت ، فإن من الصعوبة تنفيذ ذلك كيميائياً حيث إنها غير قابلة للذوبان. تعدّ طبقة الباتينا على البيوتر مهمة جداً عليه يجب الاحتفاظ بها دائماً.

(٥,٤,٥) التلف بعد أعمال الحفر والاستقرارية

بعد الحفر ، عادة ما يعثر على سبائك القصدير مستقرة كيميائياً إما لأنها حفظت بواسطة طبقة الأكسيد ، أو لعدم وجود بقايا من معدن. وقد وجدت حالات "وباء القصدير" (القسم ٥,٤,٢) في القصدير التاريخي ، لكن مدى تآكل هذا النوع غير معروف. حالياً ، تتم استقرارية سبائك القصدير فقط بالسيطرة على البيئة ، عن طريق المحافظة على درجة الحرارة فوق ١٣ درجة مئوية ، واضعين في الاعتبار نقطة انصهار القصدير المنخفضة. أما البيوتر مثل الرصاص (القسم ٥,٣,٦,١) فيجب حمايته من الأحماض العضوية.

(٥,٤,٦) الخلاصة

كما بالنسبة للرصاص (القسم ٥,٣,٨)

## (٥,٥) النحاس وسبائكه

(٥,٥,١) طبيعة القطع الأثرية<sup>(٥٨)</sup>

درجة انصهار النحاس القرمزي ١٠٨٤ درجة مئوية، وسبب انخفاض هذه الدرجة نسبة لوجود الكميات الصغيرة للشوائب الطبيعية مثل الزرنيخ (arsenic)، أو حجر الكحل، أو القصدير، أو الرصاص، أو الحديد. إن الشغل المقسى على النحاس الزرنيخي أسهل بكثير منه على النحاس النقي، لكن إذا ما وجد في تركيبات أكبر من ٢,٥٪، فإن الزرنيخ قد يسبب هشاشة، وإذا كانت نسبة التركيز أكثر من ١٥٪، فإنه قد يرتفع إلى سطح السبيكة عند الصب معطياً إياها السطح "الفضي". إذا كان القصدير موجوداً بتركيزات أكبر من ٢٪، فإنه قد يعتبر تسيكاً متعمداً لإنتاج البرونز، الذي هو أصلب من النحاس النقي، حتى بدون شغل. إن خليط السبيكة الشائع بمقدار ١٠٪ من القصدير هو الأصفر المحمّر ويمكن تشكيله بارداً بسهولة. وعند نسبة ١٤٪، تجعل مرحلة الهشاشة البرونز الذهبي الحاصل أكثر قسوة لكن أكثر صعوبة في الشغل. عند تركيز أكثر من ٢٠٪، يبدو البرونز المعدني الجرسى غير القابل للشغل تماماً أكثر شحوباً. وعند تركيز أعلى من ٣٠٪، يمكن فصل القصدير في الصب ليعطي طبقة بسطح أبيض أو يكون برونزاً هشاً عالي القصدير، أي سبيكة المرايا المعدنية (speculum) الذي يستخدم في المرايا ... إلخ. ولتحسين خصائص الصب، يضاف الرصاص إلى البرونز. وبشكل مغاير، يكون للسبيكة ثلاثية العناصر المكونة من النحاس والقصدير والزنك (ينتج عن الأخير معدن أكثر شحوباً) قدرة طرق متزايدة. وهذه السبيكة قريبة في خصائصها من السبيكة الحديثة "معدن البندقية" من البرونز. ويعطي النحاس في شكل سبيكة مع الزنك على حاله نحاساً أصفر ذهبياً بنسبة حوالي ٢٠٪، بينما التركيزات الأعلى تعطي سبائك مبيضة. وحيث من المستحيل قياس

تركيبية سبائك النحاس بدقة بدون تحليل ، فإن في غياب هذا من الضروري الإشارة إلى السبائك بالاسم العام "سبيكة النحاس" بدلاً عن مصطلح محدد ، غير مثبت ومنحاز مثل "البرونز".

يمكن وصل سبائك النحاس (القسم ١, ٢, ١, ٥) بواسطة اللحام الصلب ، ويعرف هذا بلحام النحاس (brazing). في العادة يكون اللحام نفسه سبيكة نحاس ، عليه يمكن استخدام البرونز ذي النسبة العالية من القصدير للحم البرونز ذي النسبة المنخفضة من القصدير. إن لحم النحاس لسبائك النحاس (spelters) ، خاصة النحاس الأصفر يستخدم للحم الحديد أيضاً. وبشكل مغاير ، يمكن عمل الوصلات الأضعف في القطعة الأثرية من سبيكة النحاس بواسطة اللحام اللين.

يمكن وصل أجزاء من أجسام سبائك النحاس بعضها مع بعض ، بغير الطريقة الميكانيكية أو اللحام ، بواسطة الحرق أي صب جزء من الجسم مباشرة فوق القطعة المتكونة سلفاً. غير أنه لا يمكن لحم سبائك النحاس بعضها ببعض بسبب التصاق شرائح الأكسيد. داخل القطع المجوفة قد تكون هناك بقايا طينية محروقة في المركز ومغروسة في معدن هذه القطع ، بحيث تستخدم أطراف الأكاليل لتثبيت المراكز في موقعها أثناء عملية الصب. تصنع الأكاليل عادة من سبيكة ماثلة ولكن أقل التحاماً من معدن الصب ، ولكن إذا كانت من معدن أكثر وَضَاعَةً (في سلسلة الجلفنة) ، فإنها سوف تتآكل. في بعض الحالات ، تملأ ثقوب الغاز الواسعة التي يعثر عليها في المعدن أثناء الصب ، بالكثير من المعدن.

عادة يكون سطح القطع الأثرية المصنوعة من سبيكة النحاس (الأقسام ١, ٢, ١, ٥ إلى ٦) مذهباً ، أو فضياً أو حتى قصديراً<sup>(٥٩)</sup> وذلك من أجل حفظها أو تعزيزها. من المعروف أن طلاء اللك يستخدم في التحف لتغيير لون السطح. زيت

الترينتتين\* (turpentine) والزفت يعزز اللون الذهبي، وأخريات تنتج مسحة بنية محمرة، وأخرى منتجة لونا قائماً لإخفاء الإصلاحات. من المحتمل أن تكون الباتينا (الطبقة اللامعة)، المماثلة لتلك التي وُصِفَت في القسم ١، ٢، ٥، ٥، في التحف، قدمت عن قصد وأنه قد تم تغيير لون السطح عن طريق التبييض غير أن مثل هذه الممارسات لم تعرف بعد<sup>(١٠)</sup>.

(٥، ٥، ٢) طبيعة المادة المتآكلة<sup>(١١)</sup>

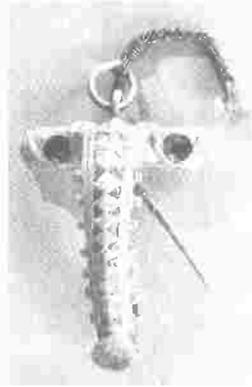
(٥، ٥، ٢، ١) المظهر

**المسودة والقائمة (اللوحة ١٨، ٥أ):** إذا ما استخدم الزفت كطلاء للـك، فإن هذا سوف يَسْوَدُ بمرور الزمن، لكن السبب العادي لاسوداد سبائك النحاس في الهواء هو تطور لغلّاف طبقي رقيق من أكسيد النحاس {١} الأحمر أو البني، الكوبرايت (cuprite  $Cu_2O$ )، مع احتمال وجود بعض أكسيد النحاس {٢} الأسود ( $CuO$ )، كبريتيد النحاس، والأكاسيد الأخرى من المعادن المشكّلة للسبيكة. غير أنه لم يتم التأكيد بالضبط تحليلاً على طبيعة الغلاف الطبقي.

**المعدن اللامع (اللوحة ١٨، ٥ ب):** في بعض المواقع المبتلة مثل الترسبات الحضرية، والبحرية، ومصب النهر، والساحل حيث يندر الأكسجين، فإن سبائك النحاس كثيراً ما تظهر لامعة وغير متآكلة تماماً. ويمكن أن يحدث بعض التنقر للسطح نتيجة للتآكل الموضعي. في حالات البيئات التي يكون فيها فرق الجهد (redox potential) منخفضاً، يمكن أن تظهر القطع الأثرية مغطاة بطبقة من النحاس؛ وهذا نتيجة لإعادة ترسب المعدن عقب تغير اللون السابق للسبيكة أثناء التآكل. يجب أن لا يختلط على المرء هذا المظهر للمعدن اللامع مع ترسب السطح الذهبي القائم لكبريتات النحاس أو الحديد التي يمكن العثور عليها على سبائك نحاس من بيئات مماثلة<sup>(١٢)</sup>. في

\* وهو زيت راينتيني. المترجم.

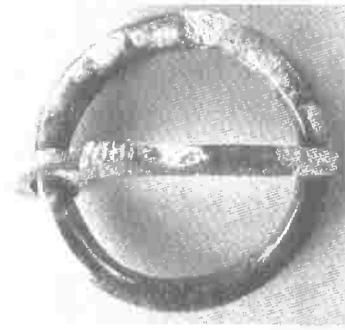
بعض الأحيان، يمكن رؤية بقع من المعدن الأبيض تحت قشور أو باتينا التآكل، ومن ثم تفسر عن طريق الخطأ بأنها قصدرة. وبينما في الحقيقة يكون المعدن الأبيض قصديراً غير أنه يكون قد ترسب خلال تآكل البرونز الذي يحتوي على نسبة عالية من القصدير كما في القسم (٢,٢,٥,٥).



(ب)



(أ)



(ج)

اللوحة (١٨, ٥). سبائك نحاس متآكلة:

- أ- طبقة واقية على قطعة أثرية تم دفنها فقط لمدة قصيرة من الوقت.
- ب- قطعة رومانية مطلية بالميخا تم استخراجها من ترسبات مستنقع خلال الحفريات في كارلايسلي (Carlisle) لا يبين تراكم منتجات التآكل، صنعت أجزاء هذه القطعة من سبائك نحاس مختلفة الألوان.
- ج- قطعة على شكل حلقة من سبيكة نحاسية عليها طبقة من الباتينا الخضراء الناعمة منقطة على جانب واحد بنتوء صغير من منتجات التآكل.

**الاسوداد:** إذا لم يعثر على المعدن لامعاً في ترسبات ذات فرق جهد وأكسجين منخفض (القسم ١-٥-٣-٢)، فإنه قد يكون أسوداً أو أزرقاً - أسوداً من جراء وجود كبريتات النحاس، مثلاً الكوفليت (covellite) (CuS) والشالكوسيت (chalcocite) (Cu<sub>2</sub>S)؛ والتعرف إلى هذه المنتجات صعب في كثير من الأحيان. يمكن أن تكون هذه الكبريتات طبقات واقية صلبة أو قشوراً فقاعية، لكن يمكن أن تنسلخ عن القشرة تاركة المعدن للدمار. إن أية طبقات سطح محتوية على فضة أو رصاص كثيراً ما تظهر سوداء من جراء وجود الكبريتات بعد الدفن في هذه الترسبات.

**الباتينا (patina)** (اللوحة ٥, ١٨ ج): تتكون الباتينا الملونة على سبائك النحاس عن طريق التآكل البطيء المتحكم فيه إما في وجود الرطوبة وثاني أكسيد الكربون والأكسجين، أو في مياه البحر. ويعتمد اللون على منتجات التآكل المتكونة والتي تعتمد جزئياً على البيئة وجزئياً على السبيكة. يتكون اللون الأخضر الأساس بواسطة الزمرد (emerald) أو الملاخيت (malachite) الأخضر القاتم، أو كربونات النحاس القلوية {٢} (CuCO<sub>3</sub>.Cu(OH)<sub>2</sub>)، بينما في البيئات الأكثر جفافاً، وعلى نحو أقل يتكون لون أزرق نتيجة كربونات نحاس قاعدية {٢} أخرى وهي الأزوريت (azurite) (2CuCO<sub>3</sub>.Cu(OH)<sub>2</sub>). وتُسود طبقة اللون الأخضر بوجود كبريتات النحاس والرصاص، وتغدو قائمة بواسطة منتجات تآكل الزرنيخ، وتصبح خفيفة اللون بواسطة كربونات الرصاص، ولكن بشكل خاص بواسطة الكاسيتريت، وأكسيد القصدير (SnO<sub>2</sub>). يوجد على بعض البرونز، الذي يحتوي على نسبة عالية من القصدير، باتينا بيضاء إلى رمادية تسمى "باتينا الماء" وتتألف بشكل رئيسي من أكسيد القصدير. مما يشير الدهشة أن توجد باتينا سوداء على برونز مماثل، أيضاً، حالياً يخضع هذا الاسوداد إلى دراسة لتحديد ماهيته وما إذا كان يتكون اصطناعياً أو طبيعياً. يمكن جعل طبقة الباتينا أكثر احمراراً عن

طريق طبقة تحتية لأكسيد النحاس، الكوبرايت، التي قد تنكشف في بعض السطوح. في بعض الأحيان تشوه الباتينا بواسطة التآكل الصلبة لمنتجات التآكل، وسبب هذه التآكل وجود مناطق معزولة من التآكل عن أخرياتها كما سيناقش أدناه. الباتينا الخضراء - الصفراء التي يوجد على سبائك النحاس المكشوفة للجو مختلفة التركيب كيميائياً، فهي بشكل رئيس كبريتات النحاس القلوية، البروكانتيت (brochantite)  $(\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2)$ . وحتى قبل عصر الصناعة، كان هناك قدرٌ كافٍ من كبريتيد الهيدروجين وثاني أكسيد الكبريت في الجو ليتسبب في تكوينها.

**القشور الخضراء أو المزرقة:** تحتوي هذه القشور، والتي تكون شائعة في القطع الأثرية المكتشفة من المواقع الأثرية، في كثير من الأحيان على المعادن نفسها مثل الباتينا أعلاه، لكن وبحسبها قد تكونت تحت أحوال مختلفة، فإنها تشكل تقشرات غير منتظمة وخشنة بدلاً عن السطوح الناعمة. عليه، وعلى سبيل المثال، إن التلون الأخضر للعديد من القشور الموجودة على سبائك النحاس يمكن أن تبدو قائمة نتيجة لوجود الملاخيت. وكما في مثل المعادن المذكورة أعلاه، فإن العديد من القشور تحتوي على معادن كلوريد مثل كلوريد الفضة القلوي  $(\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2)$  الذي يشكل بلورات كبيرة خضراء قائمة من الباراكاميت (paratacamite) أو الأتاكاميت (atacamite). أيضاً يتم العثور على أكاسيد القصدير ومنتجات تآكل الرصاص على السبائك وأيضاً مجموعة من منتجات تآكل النحاس السامة التي تتكون نتيجة لبيئات دقيقة معينة.

**القطع الأثرية البحرية المحتوية على تقشرات<sup>(١٣)</sup>:** يعتبر النحاس في شكل محلول ساماً لمعظم أشكال الحياة البحرية؛ لذا فإن وجود المخلوقات البحرية المتقشرة على سطح النحاس، أو البرونز أو النحاس الأصفر هو مؤشر جيد على أن المعدن مستقر وخالٍ من التآكل النشط. غير أنه يمكن العثور في بعض الأحيان على المتحجرات

التي تتكون كلها تقريباً من كربونات الكالسيوم وأكسيكلوريدات النحاس (II) (الباراتاكاميت ... إلخ) مختلطة مع أكاسيد الرصاص. وقد تصبح هذه الأكاسيد كثيفة جداً بحيث تصبح جزءاً لا يتجزأ من القواقع والهيكل والأنواع الأخرى من الترسبات البحرية. أيضاً يمكن أن تتشكل قشور رقيقة من كربونات الكالسيوم. هناك نوع آخر من أشكال التقشر يحدث إذا ما تأكل الحديد بالقرب من النحاس وسبائكها، حيث إن هذه عادة ما تستقر بصلاية داخل قوقعة المتحجر الحديدي. ويعمل هذا على حمايتها تماماً ويقلل من التآكل إلى مستويات غير ملحوظة.

#### (٢, ٢, ٥, ٥) التآكل ومضامينه

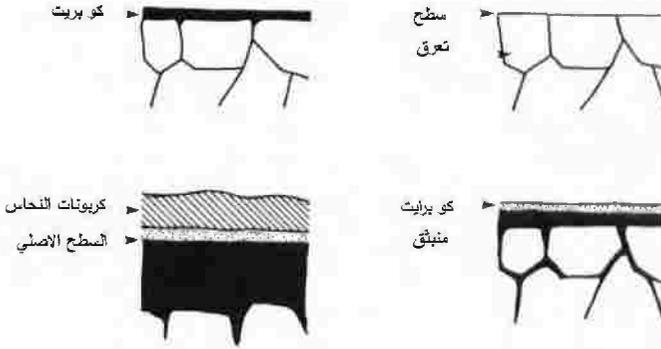
على الرغم من أن النحاس يقارب استقرارية المعدن النبيل الحقيقي، إلا أنه من المرجح أن يتآكل هو وسبائكها في العديد من البيئات الأثرية. وقد بين بحث جديد في هذا المجال أن تآكل القطع الأثرية مختلف جداً وفي بعض الحالات معقد جداً. غير أن العديد من القطعة الأثرية التي يتم اكتشافها تعرض أوجه تشابه في تركيب منتج التآكل وسيتم وصف هذا أولاً.

في وضع غير معقد ولكن لسوء الطالع غير عام، يمكن اعتبار النحاس بأنه يتآكل على طول طرفي حبيبات المعدن، أي حدود الحبيبات، وحيث إن لها طاقة أعلى، فإنها تصبح بمثابة مصعداً لمركز الحبيبات (القسم ٢, ٣, ١, ٥).

عندما تقع القطعة الأثرية المعدنية أولاً في الترسب، فإن هجوم التآكل يتأخر بواسطة طبقة لا مفر منها تقريباً من الأكسيد سوف تكتسبها خلال استخدامها في الأزمنة الغابرة. غير أن التآكل يحدث ببطء في الترسب الرطب المشبع بالأكسجين. أثناء ذوبان النحاس على طول حدود الحبيبات يتكون الكوبرايت ( $Cu_2O$ ) بشكل رئيس ومضغوط ليملاً هذه المساحات المتآكلة.

ويتواصل التآكل، يجبر النحاس المتآكل على الهجرة خارج سطح القطعة الأثرية ثم على الترسب فوقه ككوبرايت ثانوي. وتكون المنطقة الخارجية لهذا الكوبرايت عرضة للتفاعل مع الكيماويات الأخرى في البيئة، ومن ثم تتكوّن طبقة من الكربونات القلوية ومن المحتمل أن تكون طبقة كلوريدات قاعدية. وبذوبان المزيد من النحاس من خام المعدن المتضائل، فإنه إما أن يترسب داخلياً ككوبرايت أو يهاجر إلى الخارج ليرسب في قشرة التآكل النامية (الشكل ٥,٨).

هنا ثلاثة خواص يختلف فيها تآكل النحاس عن تآكل الحديد؛ في المقام الأول: يكون حجم منتجات التآكل مماثلاً للمعدن، ومن ثم فإن قشرة التآكل لا تكون على الإطلاق كبيرة جداً. ثانياً: إن التآكل مؤلف من حبيبات متداخلة ومن ثم فإن بعض منتجات التآكل يمكن أن تترسب داخل المعدن، ثالثاً: تطور طبقات الصدأ واضح.



الشكل رقم (٥,٨). مقاطعات توضح التآكل على سبيكة النحاس.

عندما تتكون بشور النحاس الذاتية ببطء تتطور طبقة الباتينا، ولكن عندما يكون سريعاً، تتكون طبقة من القشور. في بعض الأحيان تتآكل مناطق معينة من السطح أسرع من النتوءات الصغيرة الأخرى لمنتجات التآكل المبطنة للحفر في المعدن (الشكل

رقم ٥.٩). يقود هذا عادة إلى فقدان جزئي للسطح الأصلي داخل التواءات الصغيرة. آليات هذه الظواهر تحت البحث حالياً.

في البرونز، ذو النسبة العالية من القصدير، عادة ما تكون قشور التآكل غنية بأكسيد القصدير الملطخ بلون أخضر إلى درجة أقل أو أكبر من جراء وجود أملاح النحاس. في بعض الحالات، كما سلف ذكره، يظهر السطح الأصلي مظلاً. وبسبب تركيبات المرحلة المعقدة وعدم قابلية ذوبان أكسيد القصدير، يتم الاحتفاظ هنا بالقصدير على حساب النحاس الذي هو عكس ما هو متوقع (القسم ١، ٣، ١، ٥).

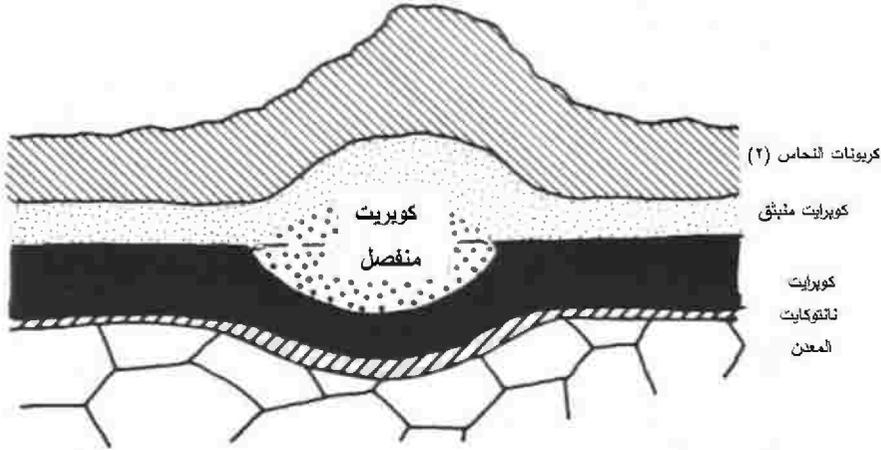
من المعروف أن أيونات الكلوريد تسهل تآكل النحاس. وهي تهجر عبر طبقات الأكاسيد الواقية المثيرة للتآكل، وتكوّن طبقة بيضاء شمعية من كلوريد النحاس (I)، والنانتوكيت (nantokite) على سطح المعدن المتآكل. وبمرور الوقت، يتفاعل النانتوكيت ببطء مع الماء لينتج كوبرايت (cuprite).

عادة تصمد القطع الأثرية المصنوعة من سبيكة النحاس للدفن في الترسبات المشبعة بالأكسجين، سواء كمعادن أو كمنتجات تآكل (الشكل ٥.١٠). غير أنه، وعندما يكون تآكل الكلوريد سريعاً، تكون قشرة التآكل مسامية للدرجة التي ينفذ فيها الأكسجين والماء إلى المعدن ويتفاعل مع النانتوكيت، مكوناً باراتاكاميت. في بعض الحالات، يكون التفاعل سريعاً جداً بحيث لا تتكون بلورات، وبدلاً عن ذلك تتطور بلورات دقيقة من الباراتاكاميت في شكل مسحوق أخضر شاحب غير ملتصق. ولا تظل طبقة التآكل بعدها متماسكة ومن ثم قد تتداعى القطعة الأثرية.

في الترسبات الحمضية الغنية بالأكسجين على نحو متطرف، مثل التربة المسامية المكونة من الحصى، قد تتكون منتجات تآكل قابلة للذوبان، وربما لا يمكن الكشف عن أي شيء ينحص القطعة الأثرية سوى التلطيخ الأخضر.

أما الوضع في الترسبات التي بها فرق الجهد والأكسجين منخفضان فهو مختلف؛ لا تتكون طبقات أكسيد و كربونات. حتى في الأحوال الحمضية هنا، يكون تأكل النحاس ضعيفاً جداً، لكن عندما تتواجد الكبريتيدات، تتم عادة مهاجمة طبقات النحاس، وتصبح منقرة ومغطاة بالكبريتيدات السوداء. ومما يدعو للدهشة، أن مياه المستنقعات المحتوية على نباتات نصف متفحمة غير ضارة بالنسبة للنحاس، مثل هذه الظاهرة قد تكون نتيجة لوجود مثبطات التآكل الطبيعية في هذه المستنقعات<sup>(٦٧)</sup>.

في قطعة أثرية معينة، في البيئة البحرية، تتطور قشور رقيقة من الكالسيوم، تتكون كمنتجات جانبية للتآكل، تعزز منطقة الكاثود لخلية التآكل (القسم ٢، ٣، ١، ٥). عند الكاثود، يتم تحرير أيونات الهيدروكسيل بحيث تكون هناك زيادة طفيفة في الرقم الهيدروجيني (pH). ويؤثر هذا التغيير على نظام الكربونات الذي يقوم بدور الحمول (القسم ١، ٢، ٢)، ومن ثم يتم ترسيب كربونات الكالسيوم عند نهاية سلسلة التفاعلات.



الشكل رقم (٥، ٩). مقطع عبر نتوء صغير على سبيكة نحاسية متآكلة (وفقاً ل: ليدهييسر (Leidheiser)<sup>(٦٦)</sup>.

## (٥,٥,٣) الفحص

حيث إن النحاس سام بالنسبة للكائنات الحية ، فمن الشائع العثور على بقايا عضوية مثل الحبوب والألياف محفوظة من التآكل البيولوجي بالمقربة من القطع الأثرية المتأكلة المصنوعة من السبائك النحاسية (اللوحة ٢,٣). وهي في العادة تكون مشبعة بأملاح النحاس الملطخة باللون الأخضر ، أو يتم استبدالها كلية بواسطة منتجات تأكل ، وتحفظ كأشكال خادعة<sup>(٦٨)</sup>.

في القطع الأثرية ذات السطح الباتني ، فإن السطح المرئي ، غير المتشوه بواسطة التواءات الصغيرة ، سيمثل بشكل أكيد السطح الأصلي. لكن في القطع الأثرية المتقشرة ، سيتم التحكم في شكل السطح بالصدأ والتواءات الصغيرة غير المنتظمة. خلال التنظيف الاستقصائي لهذا النوع الثاني ، كثيراً ما يتضح أنه قد تم الاحتفاظ بالسطح الأصلي داخل طبقة الكوبرايت ، أي بواسطة الانفصال بين المعدن المترسب داخلياً والمستخلص (القسم ٥,٥,٢,٢) (اللوحة ٥,١٩). عندما تكون التواءات الصغيرة متنوعة جداً لا تبقى هناك طبقة أكسيد متماسكة ويفقد السطح الأصلي (اللوحة ٥,٢٠). في القطع الأثرية المتقشرة ، فإن أي معدن متبقٍ لن يحتفظ بتفاصيل السطح ومن ثم يتعرض لتقرض شديد.

تغطي المواد المرافقة للقطعة الأثرية (اللوحة ٥,٢١) مثل الطلاء الذهبي ، والفضي ، والقصدرة ، والحشوة والمينا ، التي على السطح الأصلي بقشور التآكل ، لكن عندما يتواصل ذوبان المعدن من تحت ، فإنها قد تنفصل في هذه القشور أو حتى في التربة المحيطة. بالقرب من السطوح الأصلية ، تم العثور على ترسبات سوداء أو زجاجية تبين من خلال التحليل أنها بقايا للـك قديم<sup>(٦٩)</sup>.

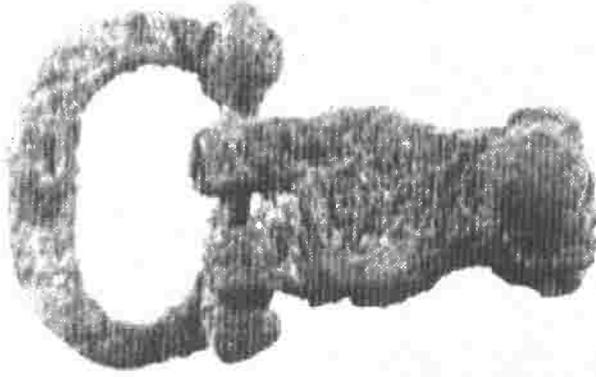
في السبائك النحاسية، يجب ملاحظة أن لون أي معدن متبقٍ وتركيبه، سواء كان لامعاً (القسم ١، ٢، ٥، ٥) أو وجد تحت طبقة الباتينا أو القشور، قد يكون مضللاً. وهذا بسبب ثراء السطح (القسم ٢، ١، ٥)، أي أن تقشر واحد من مكونات السبيكة أثناء التآكل سوف يقود إلى تغيير في اللون. وعليه سوف يظهر النحاس الأصفر أكثر قرمزية ويعاني من نقص في الزنك، مما يعمل على تشويه التفسير البصري وتحاليل السطح. كما يمكن أن يترسب النحاس الخام من جديد فوق سطح الجسم (القسم ١، ٢، ٥، ٥).

يتم إجراء تحاليل للباتينا وقشور التآكل لعدة أسباب. على سبيل المثال، لاكتشاف ما إذا كان من الممكن التعرف إلى القطع الأثرية المزيفة من خلال منتجات التآكل الاصطناعية الخاصة بها مقارنة بالطبيعية، ولتخمين نوع الموقع الذي جاءت منه القطعة الأثرية، ولتفسير الموقع الذي تم استخراج القطع الأثرية منه أو لتحديد التركيب الأصلي حتى ولو لم يتبق معدن.

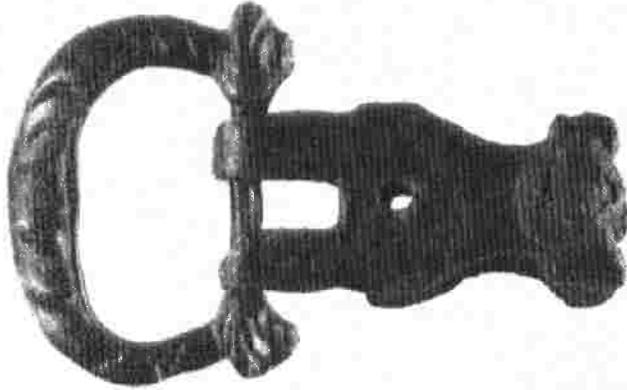
- ١- محفوظ جيداً: مغطى بطبقة رقيقة أو باتينا خضراء.
- ٢- معظم السطح الأصلي محفوظ داخل طبقة من منتجات التآكل، مغطى بباتينا ناعمة إلا عندما تنفجر التواءات الصغيرة، فإن المعدن المتبقي يصبح متنقراً.
- ٣- السطح الأصلي محتفظ به داخل طبقات سميكة من منتجات التآكل: مغطى بقشرة خضراء كبيرة، يتبقى القليل من المعدن أو لا يتبقى.



الشكل رقم (٥، ١٠). الأحوال العامة لسبائك النحاس التي يتم العثور عليها في الحفريات: قطاع عرضي لدبوس كبير.



(أ)

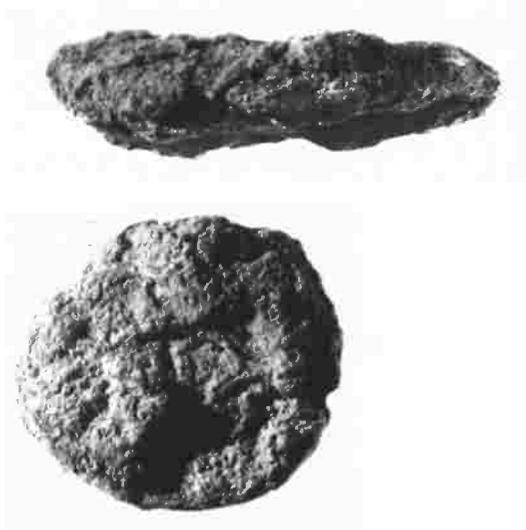


(ب)

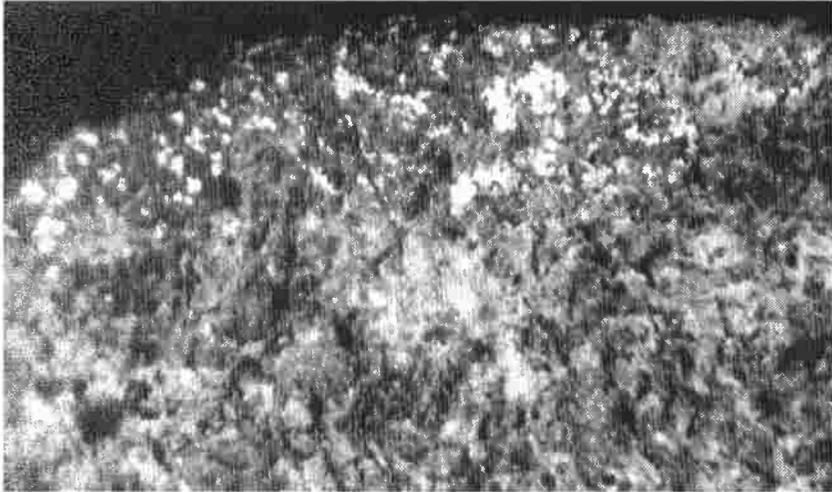
اللوحة (٥, ١٩). السطح الأصلي لإبريم من سبيكة نحاس تم الاحتفاظ به في طبقة كوبرايت:

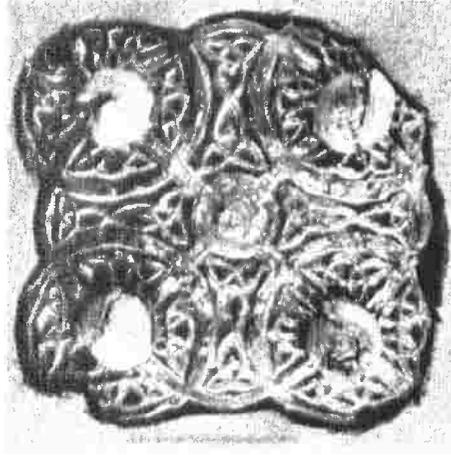
أ- الإبريم قبل التنظيف الاستقصائي يوضح قشرة خضراء مبطنة.

ب- تم الكشف عن السطح الأصلي بواسطة التنظيف الميكانيكي.



اللوحة (٥, ٢٠). عملة معدنية من سبيكة النحاس متآكلة تماماً، طبقات التآكل مشوهة لدرجة لا يمكن عندها استعادة أي تفصيل للسطح الأصلي.





(ب)

اللوحة (٥, ٢١): مواد التزيين على سبائك النحاس:

أ- بقايا فضة (تظهر بيضاء) على العملة المعدنية المتآكلة، آخر بقايا السطح المطلي بالفضة.

ب- بقايا طلاء بالذهب (يظهر أبيض) على سطح لوحة كتاب من العصور الوسطى الأولى (يبين هذا قبل إجراء التنظيف الاستقصائي في اللوحة ٥, ٢٢).

خلال الفحص، يساعد التصوير بالأشعة في التعرف إلى العملات المعدنية، والنقوش، والخصائص التقنية بما في ذلك جواهر الطين، الذي صنعت منه القطعة الأثرية، وعلامات الأدوات المستخدمة، وفي الكشف عن اللمسات التزيينية (اللوحة ٥, ٢٢). وحيث إن قشرة القطع الأثرية المصنوعة من سبائك النحاس تكون عادة قليلة، فإن التصوير بالأشعة يعتبر أقل ضرورة مما هو عليه بالنسبة للأعمال الحديدية. غير أنه وحتى على القطع الأثرية ذات السطوح الجميلة اللامعة، فإن التصوير بالأشعة يمكن أن يكون مفيداً في تحديد حالة القطعة الأثرية مما يكشف ما إذا بقي شيء من قلب المعدن أم لا، على الرغم من أن السطح محفوظ جيداً، ويمكن معرفة الحالة التي يمكن أن تحدث إذا كان التآكل منتظماً وبطيئاً.

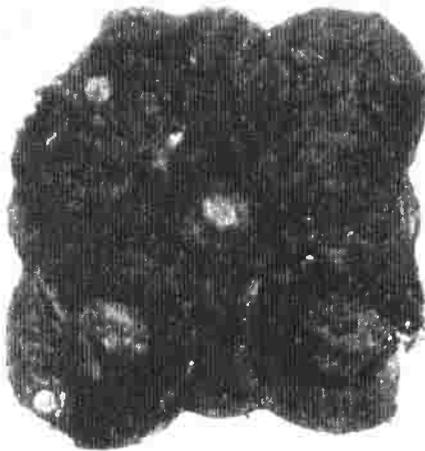
## (٥,٥,٤) التنظيف

يعتمد اختيار طريقة التنظيف على ما هو المطلوب من القطعة الأثرية (نوع ما من المعلومات، للعرض، للدراسة... إلخ)، ومن أي شيء صنع، وما هي الحالة التي هو عليها. وحيث إن مواد التنظيف الكيميائية لا تميز بداية السطح الأصلي داخل طبقة من الكوراييت، فإنها يمكن أن تدمر هذه المعلومات وتفكك مكونات السطح (الطبقات المعدنية، المينا،... إلخ) إذا ما استخدمت بطريقة غير حكيمة. عليه، تنظف القطع الأثرية التي تحتوي على قشور تأكل ميكانيكياً فقط باستخدام الأدوات البسيطة مثل الدبابيس والمشارط مع استخدام بسيط فقط للمواد الكيميائية (بحذر شديد) لتليين الطبقة التحتية للمعادن النحاسية (٢). وتكون هناك حاجة للمهارة والممارسة لتحديد السطح الأصلي ولإزالة منتجات التآكل التحتية بدون إحداث تلف (اللوحة ٥,٢١، ب، ٢٢-٥ أ، ١٩,٥). وعندما توجد التواءات الصغيرة، ومن أجل الاحتفاظ بسطح متماسك بدلاً من الكشف عن حفرة، يكون من الضروري ترك بعض الكوراييت التحتي بارزاً قليلاً عن السطح الأصلي.

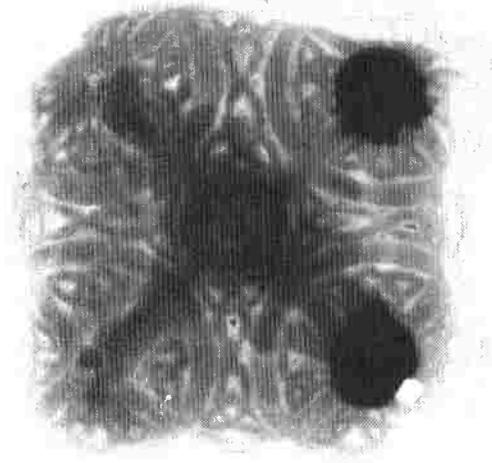
في الماضي تم استخدام طريقة التعرية أو الإزالة الكلية لمنتجات القشور بشكل كبير. غير أن المعدن الذي يتم الكشف عنه، حسبما تم نقاشه في (القسم ١,٢,٥,٥)، سوف يكون منقرأً، والسطح متضاثلاً... إلخ، وعليه يكون غير قابل للعرض أو الدراسة بشكل مرض (اللوحة ٥,٢). علاوة على ذلك، اتضح أن المواد الكيميائية التي تستخدم لإذابة التآكل تعمل على تقشر المزيد من العناصر من قلب المعدن<sup>(٧٠)</sup>.

لا يمكن استخدام التنظيف بواسطة الإلكتروليت (القسم ٤,١,٥) حيث إن النحاس المذاب من القشرة يتحول بسهولة إلى نحاس معدني يميل لطلاء القلب المكشوف في المعدن القرمزي. عليه، في يومنا هذا، نادراً ما تستخدم التعرية لتنظيف

المواد الأثرية. وبشكل خاص، وللعديد من الأسباب، يجب توخي الحذر فيما يختص بتنظيف العملات المعدنية المصنوعة من سبائك النحاس قبل الإقدام على العمل وذلك لتجنب هدر الوقت على مادة غير ضرورية، ولتجنب فقد معلومات غير متوقعة ولتجنب تعريض استقرارية القطعة المعدنية للخطر. مثل هذه الأهداف تتطلب تعاوناً (القسم ١،٣)، فمن الضروري تجميع أقصى قدر من المعلومات المتعلقة بالعملية المعدنية في كل من مجال العملات المعدنية الأثرية ومجال علم الآثار، والتركيب المتوقع ورمز العملة المعدنية وأساليب التنظيف. التنظيف الميكانيكي المتقن مع الاستخدام الحكيم للمواد الكيميائية تحت المجهر، من أجل تليين تقشرات النحاس التحتية، قد يكشف عن الطلاء المنفصل بالفضة (اللوحة ٥،٢١ أ)، واللك التالف ... إلخ، والسطح الأصلي داخل طبقة الكوبرايت. الاستخدام العنيف للفرشاة اليدوية، والاستخدام الزائد عن الحد للمواد الكيميائية القوية أو قلة المعرفة بعلم العملات المعدنية قد تقود إلى كارثة. وقد تم التطرق لهذا الموضوع الجدلي بتوسع في فعاليات الندوة التي عقدت في عام ١٩٨٠م<sup>(٧١)</sup>.



(أ)



(ب)

اللوحة (٥, ٢٢). صور أشعة لسبيكة نحاسية.

أ- لوحة كتاب من العصور الوسطى الأولى قبل التقصي.

ب- صورة أشعة للوحة الكتاب من منطقة برو أوف بيرسي (Brough of Birsay) في أوركني (Orkney) تكشف عن تصميم معقد ولم يعثر على طلاء بالذهب أثناء التنظيف الاستقصائي.

### (٥, ٥, ٥) التلف المعثورات بعد استخراجها

يبدو أن العديد من النحاس سبائكه اللامعة المتقشرة أو سبائك النحاس المستقرة، حيث إن التآكل يحدث في وجود معدن متبقٍ فقط وعندما تكون الرطوبة النسبة أعلى من ٨٠٪. ويكون هذا الرقم أقل في الهواء الملوث، خاصة إذا كان ملوثاً بالكلوريدات. في القطع الأثرية البحرية، ينشط التآكل بوجود الكلوريدات ويكون ملحوظاً بشكل كبير موضعياً حيث تحفظ هذه الكلوريدات في المتحجرات الكلسية والحديدية. غير أنه، إذا كان النانوكيت (CuCl) موجوداً داخل أي باتينا أو قشرة، يمكن أن يحدث نوعاً من التآكل مدمراً جداً يعرف بـ "مرض البرونز" عندما تكون الرطوبة النسبية عند مستوى منخفض يبلغ ٣٥,٥٠.



المياه وانكماش القشرة، يدخل الهواء ومن ثم الأكسجين، وعندما يتغلغل في النانتوكيت يحدث التلف. غير أنه حتى ولو كان النانتوكيت موجوداً يمكن أن تبقى القشرة أو بشكل أخص الباتينا الكثيفة مستقرة لسنين عديدة بعد التنقيب طالما أن كثافة المعادن (minerals) التحتية تمنع دخول الأكسجين والماء. ولكن إذا فقدت هذه المعادن كثافتها ولم تعد تمنع دخول الماء والأكسجين، ربما نتيجة للتشقق بواسطة المناولة، أو التنظيف أو تقلب درجة الحرارة المتواصل، فإن مرض البرونز يمكن أن يحدث إذا كانت درجة الرطوبة النسبية في المحيط أكثر من ٤٠٪.

تتضمن بعض الأنواع الأخرى للتلف في مرحلة ما بعد التنقيب تكوّن الترسبات البيضاء لكاربونات الرصاص على البرونز الذي يحتوي على رصاص بكثافة من التآكل بواسطة الأبخرة الحمضية العضوية (القسم ٥،٣،٥)، وظهور البلورات الشعرية البنية أو السوداء على سبائك النحاس، لكن هذه أكثر ندرةً من مرض البرونز.

(٥،٥،٦) الاستقرارية

(٥،٥،٦،١) الأساليب الوقائية

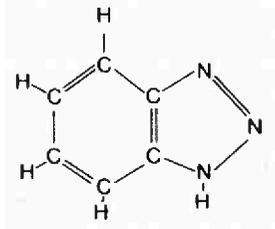
بالنسبة للقطع الأثرية التي لا تحتوي على كلوريد ولكن تحتوي على معدن، فإنه يمكن منع المزيد من التآكل، عن طريق المحافظة على الرطوبة النسبية في معدل أقل من ٧٥٪، ومنع التلوث، بواسطة الكلوريدات والغبار، عن طريق تكييف الهواء أو الحاويات المسدودة بإحكام (القسم ٣،٤،١،٤). بالنسبة للقطع الأثرية الصغيرة التي تحتوي على نانتوكيت، فإنه يمكن منع مرض البرونز عن طريق إزالة الماء أو الأكسجين من النظام، وحيث إن من الصعب إزالة الأخير، فإنه يوصى بطريقة تجفيف سبائك النحاس. ويجب أن يتحقق هذا خلال ثمان وأربعين ساعة من الكشف عن القطعة الأثرية باستخدام جل السيليكا. كما أن اللجوء إلى إزالة الماء بواسطة تخزين القطعة الأثرية

في مذيب عضوي ضروري فقط بالنسبة للمينا المشبعة بالماء (القسم ١, ٦, ٤, ٤)، والقماش المحفوظ (القسم ١, ٥, ٦, ٦)، وأن أياً من هذه لا يمكن تجفيفها أو تخزينها مبللةً إذا لم يتم التخلص من الأكسجين. أيضاً يمكن وضع القطعة الأثرية في بيئة باردة جداً (أقل من ١٠ درجات مئوية تحت الصفر) لمنع حدوث مرض البرونز، لكن هناك خطر لم يختبر بعد يتعلق بتمدد الثلج. وقد اقترح لضمان منع التلف، ألا تعرض سبائك النحاس لمثبط بخاري (vapour phase inhibitor) (القسم ٥, ١, ٥). عليه يمكن وضع الورق النشاف المشبع بالبينزوتريازول (benzotriazole) (القسم ٥, ٥, ٦, ٢) داخل حاوية التجفيف المغلقة، لكن استخدامات هذه الطريقة محدودة.

تشكل القطع الأثرية الكبيرة من المواقع البحرية مشكلة أكبر حيث إن المعدن غير مستقر جداً. إذا كانت صغيرة بالدرجة الكافية فإنه يمكن تخزينها في أحواض من البينزوتريازول (القسم ٥, ٥, ٦, ٢)، لكن إذا كانت كبيرة ولا يمكن تخزينها في تلك الأحواض، فإنها تنظف لإزالة أية متحجرات سميكة، وتلف في مادة ماصة مشبعة في هذا المثبط، ومن ثم تغلف في البولي إيثيلين.

### (٥, ٥, ٦, ٢) الأساليب العلاجية

إن أكثر طريقة شائعة لاستقرارية سبائك النحاس مستخدمة اليوم في بريطانيا هو التثبيط (القسم ٥, ١, ٥). وقد حدث هذا بشكل كبير نتيجة لتطور المثبط البينزوتريازول (بي تي إيه) (benzotriazole (BTA))<sup>(٧٣)</sup> (الشكل رقم ٥, ١٢). في عام ١٩٦٧م، تم اقتراح استخدام هذه المادة الكيماوية في المواد الأثرية بواسطة السيد ماديسن (Madsen)، على الرغم من أنه كان يستخدم تجارياً من قبل لمدة سبع عشرة سنة. وأن الميكانيكية الفعلية للتثبيط لا تزال قيد الدراسة لكن يبدو أن جزيئات البينزوتريازول يتم امتصاصها في الكوبريت وتختلط مع النانوكيت، مما يجعلها خاملة وتشكل حاجزاً مائياً يحمي أي نحاس متبقٍ.



الشكل رقم (١٢، ٥). تركيب جزئي البنزوترايزول.

يطبق المثبط عن طريق غمر القطعة الأثرية في محلول (بي تي إيه) مخفف في الماء أو الكحول. ويستخدم التفريغ الهوائي لضمان أن المحلول يتغلغل عبر الباتينا أو القشرة حتى النانوكيت أو قلب المعدن. عليه، لا يتطلب إزالة طبقات التآكل الخارجية أولاً، حيث إن إزالة الشحم في المذيب هي المتطلب الوحيد. ويعني هذا أنه يمكن استخدام المثبط قبل الفحص والتنظيف. في بعض الأحيان، لا يكتمل التفاعل بغمرة واحدة، وقد يتطلب معالجة القطعة الأثرية عدة مرات قبل تحقيق الاستقرار. وقد كانت بعض سبائك النحاس، وبشكل خاص ذات مستويات من النانوكيت، صعباً تحقيق استقراريتها بواسطة الـ (بي تي إيه). غير أن دراسة حديثة<sup>(٧٤)</sup> أوضحت أن المعالجة المسبقة بكاربونات الصوديوم لرفع الرقم الهيدروجيني (pH) يمكن أن تتغلب على هذه المشكلات. بعد المعالجة، يتم طلاء القطعة الأثرية باللك لمنع الانشطار المادي لطبقة الـ (بي تي إيه) والتلوث بواسطة الأوساخ والعرق. كما يفقد الـ (بي تي إيه) استقرارته إذا ما تعرض للأشعة فوق البنفسجية، ولمنع حدوث هذا عبر الزمن، يستخدم لك يسمى إنكرالك (Incralac)<sup>(٧٥)</sup> متوفر تجارياً يحافظ على الـ (بي تي إيه) ويحتوي على معامل حجب للأشعة فوق البنفسجية. ومن ثم يمكن تعريض القطعة الأثرية لرطوبة نسبية تبلغ تقريباً ٧٠٪ بدون حدوث المزيد من التلف. في كثير من الحالات يتوجب معالجة القطع الأثرية بعد سنين عديدة ومن ثم يجب مراقبة حالتها بشكل دوري.

يجب توجيه كلمة تحذير هنا: إن لدى الـ (بي تي إيه) إمكانية أن يتحول إلى مادة مسرطنة ومن ثم يجب عدم عمل محاليل منه أو استخدامه من قِبَل أفراد غير مؤهلين. ويجب ارتداء القفازات عند فحص القطعة الأثرية المعالجة بمادة الـ (بي تي إيه) على الرغم من هذا الأمر لم يثبت بعد.

استخدام الـ (بي تي إيه) لوحده أو عَقَبَ المعالجة بـكربونات الصوديوم قد فاق الآن تقريباً الطرق الأخرى كافة لاستقرارية سبائك النحاس الأثرية. تحاول الطرق الأخرى إزالة النانوكيت من القشرة، وحيث إنها غير قابلة للذوبان بسهولة وتقع تحت طبقات التآكل الأخرى كافة، فإن هذا الأمر ليس بسيطاً. تحاول بعض الطرق مثل التي تستخدم سيسكوكربونات الصوديوم (sodium sesquicarbonate) إذابة النانوكيت عبر القشرة، لكن هذا يستغرق عدة سنين وله تأثيرات جانبية غير مرغوبة. وتتطلب الطرق الأخرى أن يتم نزع الطبقات العليا (القسم ٤, ٥, ٥) أولاً قبل إزالة النانوكيت كيميائياً أو بواسطة التحليل الكهربائي. وينتج عن كل هذه الطرق تقشر للسيبكية المتبقية<sup>(٧٦)</sup>. بالنسبة للقطع الأثرية الكبيرة جداً التي تنقطع فيها الباتينا بواسطة تفجرات مرض البرونز، فإن المعالجة التي تتجنب غمر القطعة الكبيرة في الـ (بي تي إيه) ممكنة عن طريق حُفر الباراتاكاميت وتفاعل النانوكيت المكشوفة عند قاعدتها مع أكسيد الفضة، حيث يتم حجبها عن الجو بواسطة كلوريد الفضة.

من أجل المساعدة في استقرارية النحاس البحري وسبائك النحاس، من الضروري إزالة المتحجرات الكلزية والحديدية المشبعة بالكلوريد. يتم ذلك بأفضل شكل ميكانيكياً، على الرغم من أنه يتوجب استخدام حامض الستريك، مع (thiourea) كمثبط لمنع التحفر الحمضي وترشح المعدن التحتي، حيث كان حامض الستريك يستخدم في معالجة الأماكن المقاومة.

## (٥,٥,٧) الخلاصة

يتآكل النحاس وسبائكه بالشكل الذي من المرجح أن يتم فيه الاحتفاظ بمستوى السطح الأصلي وطبوغرافيته، إما بواسطة الباتينا الخارجية أو داخل قشرة الصدأ. في كثير من الأحيان تكون الباتينا والقشور أكثر هشاشة مما تبدو، كما أن التنظيف غير الدقيق وحتى المسح بواسطة الإصبع، يمكن أن يدمر معلومات مهمة. وينطبق هذا بشكل خاص على العملات المعدنية. عليه يجب أن يقتصر التنظيف على المختبر. هنا يتم تجنب أساليب التعرية، وتفضل الأساليب الميكانيكية. عادة يمكن حدوث تلف للنحاس وسبائكه عن طريق التجفيف (القسم ١, ١, ٤, ٣)، لكن يجب أن يتم في ظرف ثمان وأربعين ساعة من التقييب، لكن هناك استثناءات ملحوظة (القسم ١, ٦, ٥, ٥). بالنسبة للاستقرارية طويلة الأجل، اتضح أن الـ (بي تي إيه) مؤثر بشكل ممتاز لكن حتى عندما تتم المعالجة هكذا، يجب تجنب الرطوبة النسبية العالية جداً وتقلبات درجات الحرارة (خاصة بالنسبة للطلاء بالمينا) (القسم ٣, ٤, ٢). يجب مناولة المعدن اللامع والقطع الأثرية المعالجة بالـ (بي تي إيه) بواسطة القفازات.

## (٥,٦) الفضة وسبائكها

(٥,٦,١) طبيعة القطع الأثرية<sup>(٧٧)</sup>

عادة ما تحتوي الفضة (عند نقطة الانصهار ٩٦٠ درجة مئوية) على ٥٪ من الشوائب مثل النحاس والرصاص وحتى الحديد، لكن يتم عملها في سبائك عن قصد من أجل تقويتها أو الحط من قدرها. الفضة الإسترليني (Sterling) تتكون على الأقل من ٩٢,٥٪ من الفضة بينما قد تكون الفضة الخام نقية ٨٠٪، وتحتوي السبائك الأقل قيمة على أقل من ٥٠٪ من الفضة ويطلق عليها مصطلح البيلون (billion). ويكون

المظهر الأبيض اللامع المميز للفضة جلي الوضوح في تلك السبائك ويميل إلى القمامة وتغير اللون بزيادة محتوى الفضة. وكثيراً ما يتم جعل الفضة الأقل قيمة مثل البيلون أكثر نبلاً عن طريق التبييض. من بين أساليب التزيين الأخرى المطبقة للفضة طلاؤها بالذهب أو تطبيق سطوح صفراء أخرى (القسم ٢, ٢, ١, ٥) وتبطن بالنيلو (niello) الأسود (القسم ٥, ٢, ١, ٥). لا يلتصق الزجاج جيداً بالفضة ومن ثم فإنه من النادر أن يعمل له طلاء بالمينا.

عند شغل الفضة قليلة القيمة، يتأكسد محتوى النحاس، وبينما يتم عادة إزالته من السطح، فإن قد يظل في مكان ما تحت السطح في شكل "بقعة حرق". خلال استخدامها في السابق، يمكن أن تطور الفضة باتينا سوداء ذات قيمة، ويمكن أن تتكون بالكشف عن بقعة الحرق أثناء تلميع الفضة التحتية.

يمكن لحم الفضة النقية على البارد لكن يجب لحم السبائك إما بواسطة اللحام اللين أو القاسي (القسم ١, ٢, ١, ٥)، حيث يتم عمل "لحام الفضة" بواسطة سبيكة من الفضة والنحاس، وفي بعض الأحيان الزنك. في العادة يكون "التفضيض" الذي يطبق على معادن أخرى سبيكة الفضة مع القصدير (القسم ٢, ٢, ١, ٥).

#### (٥, ٦, ٢) طبيعة المادة التالفة<sup>(٧٨)</sup>

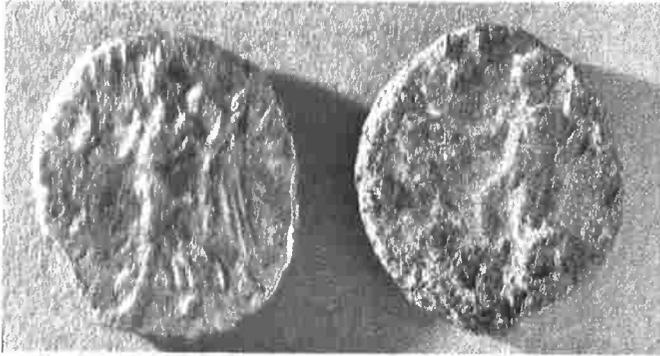
**السطح المسود** (اللوحة ٥.٢٣ أ): حتى في الهواء الجاف، تتلطح الفضة بطبقة من أكسيد النحاس (القسم ١, ٢, ٥, ٥)، ويسبب وجود الكبريت، في شكل كبريتيد الهيدروجين أو أكسيد الكبريت، حتى أقل من جزأين من المليون، اسوداد الفضة ذاتها من خلال تكوين طبقة واقية من كبريتيد الفضة، الأرجنتايت ( $Ag_2S$  argentite). يوجد هذا الكبريتيد، الذي يوجد على الفضة، تقريباً في كل البيئات بما في ذلك البحر. في الحالات النادرة، يمكن للطبقة الرقيقة الواقية من الكبريتيد أن تفسل، ومن ثم يتواصل التآكل حتى تصبح كل القطعة الفضية عبارة عن كبريتيد فضة.



(ب)



(أ)



(ج)

اللوحة (٢٣، ٥). سبائك الفضة المتآكلة

أ- قطعة نقود معدنية عليها بقعة من الكبريتيد الواقي. التكسر يبين الحالة

الهشة لمعظم الفضة القديمة.

ب- قشرة منتفخة من كلوريد الفضة على قطعة معدنية.

ج- القطعة المعدنية اليمنى تبين قشرة من منتجات تآكل النحاس على

الفضة. قطعة مماثلة (اليسرى) بعد التنظيف الاستقصائي.

**القشرة المنتفخة السوداء أو الرمادية أو القرمزية أو الأرجوانية أو البنية** (اللوحة ٥,٢٣ ب): تتكون هذه القشور من خليط من سيرارجرايت (cerargyrite) شمعي رمادي، "فضة القرن"، وكلوريد الفضة (AgCl) والبرومييرايت (bromyrite) اللامع البني، وبرومييد الفضة (AgBr)، تتلخخ بمظهر قرمزي وأرجواني أو مسود بوجود كبريتات الفضة والنحاس. ويتفاوت هذا التوازن للكوريد مع البرومييد، لكن يمكن توقع وجود مستويات عالية من البرومييد في القطع الأثرية من الترسبات الغنية بالمواد العضوية. وتقود مستويات التآكل المنخفضة إلى تكون طبقة من الباتينا، أما المستويات العالية فتؤدي إلى قشرة سميكة، وفي بعض الأحيان منتفخة لا يتبقى فيها أي معدن. يمكن أن تغطي الأجسام البحرية بمثل هذه القشرة التي تشمل أيضاً منتجات تآكل النحاس، وأكاسيد الحديد و كربونات الكالسيوم. وتحت ذلك يمكن أن يوجد مركز معدن غير مغطى أو قالب مجوف مثل الذي يعثر عليه داخل المتحجرات الحديدية (القسم ٥,٢,٢,٣).

**القشور الخضراء (اللوحة ٥,٢٣ ج):** يتآكل النحاس في سبيكة الفضة ويرسب منتجات تآكل نموذجية في كل من سطح الفضة وحيبياتها (القسم ٥,٥,٢,١). عند عمليات الحفر، قد لا يظهر هناك فرق بين سبيكة الفضة المتدنية وسبيكة النحاس. في الأحوال الحمضية، حيث تذوب منتجات تآكل النحاس، فإن من المحتمل أن يسود المتبقي من الفضة.

**القشرة الهشة (اللوحة ٥,٢٣ أ):** في كثير من الأحيان يكون الجسم الفضي اللامع أو المتآكل أكثر هشاشة مما يتوقع. هناك أكثر من سبب لهذا، فمثلاً، يمكن أن يكون نتيجة لتحويلات مرحلية عبر الزمن أو لتآكل بين الحبيبات داخل السبيكة.

## (٥, ٦, ٣) الفحص

عند وجود قشرة تأكل، من الممكن استنتاج شيء ما حول تركيب السبيكة الأصلية (القسم ٥, ٦, ٢)، فقد تنطوي القشرة الخضراء السميكة على سبيكة فضة أو نحاس، بينما تدل فضة القرن الشمعية الباهتة على فضة نقية. ويمكن رؤية تفاصيل السطح الأصلي على ظهر قشرة كلوريد الفضة في حالة مشوشة ومنتفخة، لكن في العديد من الحالات، يمكن العثور على تفصيل أكثر دقة داخل القشرة، يكون معظمه لسبائك النحاس (القسم ٥, ٥, ٢, ٢).

تتآكل الفضة من خلال الحبيبات نتيجة لترسب بعض كلوريد الفضة من داخل القطعة الأثرية والبعض الآخر من الخارج، ستكشف إزالة الطبقة الخارجية لفضة القرن عن السطح الأصلي الذي يظهر فضياً. وتتواصل التآكل، تفقد الفضة، لكن يظل السطح الأصلي محفوظاً لعدم استمرارية التآكل داخل القطعة الأثرية. في حالة قطعة أثرية، فضية بشكل أساسي وبها نحاس بشكل ثانوي، حيث لا يحتوي السطح الخارجي لصدأ النحاس على معلومات، يمكن الاحتفاظ بالسطح الأصلي بشكل ممتاز في هذه الحالة بواسطة القسم غير المتآكل من الفضة في السبيكة، حيث تصبح الفضة أكثر نبلاً من النحاس، ويمكن وقاية الفضة من خلال تحويلها إلى كاثود (القسم ٥, ١, ٣, ٢). إن تحليل سبائك الفضة المتآكلة صعب تفسيره، فالسطح الغني بالفضة يمكن أن يؤدي إلى العديد من الظواهر، مثل التآكل، والتبييض المتعمد، والشغل، والتبريد خلال التصنيع أو حتى تفضيض سبيكة النحاس. من المحتمل أن يحدث مزيد من الخلط لهذا التفسير بواسطة إعادة ترسيب الفضة على سطح السبيكة المتآكلة في بيئات مختزلة معينة.

ويساعد التصوير بالأشعة في تحديد موقع النقش، والنيلو، والطلاء بالذهب، والسطح الأصلي حيث يحتفظ بهذا في قشرة التآكل بواسطة الفضة.

## (٤, ٦, ٥) التنظيف

حالما يتم تحديد أن اسوداد السطح ليس عن قصد ولا من أجل الحصول على الباتينا، فإنه يجب إزالته فقط عندما يتطلب وضع القطعة الأثرية للعرض. حيث إنها ليس واقية فقط، ولكن في كل مرة تتم إزالته، تتكون طبقة جديدة يتم إزالتها لاحقاً وهكذا يتواصل تآكل المعدن. عند الضرورة، تتم الإزالة هذه بطريقة ميكانيكية بواسطة عجائن ناعمة جداً لينة وكاشطة، لكن عادة ما تكون القطع الأثرية المحفورة هشة جداً ومتشققة لا تتحمل هذه المعالجة. لهذا تستخدم المواد الكيميائية عدا النيلو بالطبع، التي يشك في أنها كبريتيد فضة في حد ذاتها.

يجب توخي الحذر عند إزالة قشور كلوريد الفضة حيث يحتفظ، وكما تم توضيحه في (القسم ٥, ٦, ٣)، بالسطح الأصلي بواسطة الفضة الضعيفة أو بواسطة عدم استمرارية التآكل داخل فضة القرن. في بعض الأحيان يتم تنظيف هذه المواد ميكانيكياً عندما تزال الطبقة الخارجية بمهارة كبيرة من السطح الأصلي. وعلى نحو بديل، من أجل تجنب خدش أي فضة متبقية، تستخدم المواد الكيميائية تحت المجهر، ويتم إيقاف التنظيف حالما تظهر عدم الاستمرارية أو سطح الفضة.

تُزال قشور صدأ الفضة الأكثر صلابة من فضة القرن كيميائياً، حيث من الصعب تجنب خدش المعدن المبطن، عند استخدام الطريقة اليدوية. علاوة على ذلك، من المرجح أن يُحْتَفَظَ بالسطح الأصلي بوجود الفضة (القسم ٥, ٦, ٣)، والذي من غير المرجح أن يتعرض لهجوم المواد الكيميائية المستخدمة في إذابة أملاح النحاس.

بما أن الفضة معدن نبيل فإنها مفيدة في التنظيف، حيث تظل غير متأثرة بالمواد الكيميائية المستخدمة، لكن المشكلة هي أن الفضة الذائبة (وحتى النحاس) من المرجح أن يختزل ويصبح طلاء فضياً (أو نحاسياً) يغطي القطعة الأثرية أثناء التنظيف. ومن ثم

فإن المواد العازلة (sequestering agents) (القسم ١, ٢, ٣, ٣) مثل الثورينا، التي تزيل هذه المعادن من المحلول، تستخدم سوياً مع المواد الكيميائية المستخدمة لإذابة قشور الصدأ. وتكون أوعية الغمس التجارية التي تحتوي أحماضاً مؤكسدة قوية جداً للفضة الأثرية، ومن ثم يفضل استخدام الأحماض العضوية أو عوامل معقدة مثل ثيوسلفات الأمونيوم (ammonium thiosulphate  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) لأجل كسر القشرة. طريقة أخرى هي اختزال قشور تآكل الفضة المبطنة إلى فضة في شكل مسحوق ناعم، يمكن إزالتها بالفرشاة للكشف عن السطح الأصلي. يمكن تنفيذ هذا بالتحليل الكهربائي (القسم ٢, ٤, ١, ٥)، أو بمعامل اختزال كيميائي مثل دايتونايت الصوديوم (sodium dithionite  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) الذي يستخدم لمعالجة القطع الفضية البحرية<sup>(٧٩)</sup>.

#### (٥, ٦, ٥) التلف بعد عمليات التنقيب

تُسودُّ كل من فضة القرن وبروميد الفضة عند التعرض للضوء، لكن يمكن أن تتغير من اللون الأبيض إلى اللون القرمزي، أو الرمادي أو الأسود في غضون ثوان بعد الكشف عن القطع الأثرية. وعلى المدى البعيد، يمكن أن تحتزل الأشعة فوق البنفسجية الاصطناعية فضة القرن إلى فضة معطية لمعة معدنية. يوجد الكبريت في الهواء في شكل تلوث صناعي، لكن يمكن أن ينجم عن التلوث الموضعي العالي من المطاط، والطلاء، وبعض الأصماغ، والصوف، وبقايا الأقمشة، وأخشاب معينة. عليه، ليس من المستغرب أن تصبح الفضة اللامعة عادة قائمة، لكنه وما لم تكن نسبتها كبيرة في سبيكة مع النحاس، فإنه من غير المرجح حدوث تآكل آخر بعد التنقيب. تتعرض الفضة القديمة الهشة للتشقق نتيجة للمناولة السيئة.

## (٥,٦,٦) الاستقرارية

## (٥,٦,٦,١) الأساليب الوقائية

من أجل عدم تغير لون الفضة اللامع إلى قاتم، يجب إزالة الكبريت من البيئة. في الوهلة الأولى، يجب اختبار مواد العرض والتخزين كافة بحثاً عن الكبريت (القسم ٥,١,٥). في نهاية المطاف، يمكن إزالة الكبريت بواسطة تكييف الهواء، لكن بدرجة أقل، يمكن استخدام المواد الماصة لكبريتيد الهيدروجين موضعياً، مثلاً في فتحات التهوية، وفي المعارض أو الورق النشاف المستخدم لتغليف القطع الأثرية. وعلى نحو بديل، يمكن استخدام موانع بخارية (vapour phase inhibitor) (القسم ٥,١,٥) في الحاويات أو الصناديق المغلقة<sup>(٨٠)</sup>. أيضاً يجب تجنب الاقتراب من مصدر الكلوريد الذي سوف يعمل على تآكل الفضة. يمكن تنفيذ استقرارية الفضة، التي تحتوي على نسبة عالية من النحاس، بواسطة التخزين الجاف كما في (القسم ٥,٥,٦,١).

## (٥,٦,٦,٢) الأساليب العلاجية

في الماضي، من أجل إزالة هشاشة الفضة، استخدمت أنواع مختلفة من المعالجات الحرارية، لكن وحتى يتم نشر المزيد من البحوث في هذا المجال، فإنه يجب تجنبها. وقد تمت محاولات لتقوية المواد التي تآكلت كلياً إلى فضة القرن، من خلال اختزالها مرة أخرى إلى فضة. وقد تم تنفيذ هذا كيميائياً (انظر الملاحظة ٧٩) على العملات المعدنية بواسطة التحليل الكهربائي<sup>(٨١)</sup> على مثال واحد مشهور في المتحف البريطاني، وهو قيثاره من أور لكن لم تصبح أي من هاتين الطريقتين أسلوباً روتينياً. يمكن معالجة الفضة لحسر الهجوم بواسطة كبريتيد الهيدروجين من خلال تطبيق اللك أو الطلاء المحتوي على مثبت (انظر القسم ٥,١,٥ والملاحظة ٨٠). يتم تنفيذ استقرارية النحاس في الفضة بواسطة البينزوتريازول (القسم ٥,٥,٦,٢).

## (٥, ٦, ٧) إعادة التشكيل

في حالات معينة يتم إعادة تشكيل القطع الفضية المشوهة عند درجات حرارة عالية، لكن هذا الأسلوب محدود ولا يمكن استخدامه في الحالات التي يحدث فيها تآكل بين الحبيبات. ولا يستخدم مطلقاً حتى يتم إجراء فحص معدني صارم، من أجل البحث عن غياب هذا النوع من التآكل وتسجيل تركيبة المعدن التي قد تفقد بالتسخين.

## (٥, ٦, ٨) الخلاصة

على الرغم من أن الفضة معدن نبيل، إلا أنه عند التنقيب يمكن أن يكون هشاً وفي حالة تآكل سيئة، وحتى أسوأ من الرصاص. في الموقع، يجب مناولتها بكل حذر وتغلف بشكل ملائم. يمكن أن يكون السطح الأصلي محتفظ به داخل قشرة التآكل، ومن ثم فإن التنظيف يتم في المختبر. حيث إن الفضة معدن ناعم ولكن نبيل، فعندما يتعرض للكشف، تفضل طرق التنظيف الكيميائية على الطرق الميكانيكية. وتكون الفضة اللامعة أشد تأثراً بواسطة كبريتيد الهيدروجين، وحالم سُودّ، تنظف فقط عندما يستلزم عرضها، ويجب مناولتها بعدئذ بواسطة القفازات.

وللفضة مسلك مثل سبيكة النحاس، وهو كذلك. وتعالج بطريقة السبائك النحاسية الأخرى نفسها إلا التنظيف، حيث إن السطح الأصلي لسبيكة الفضة أو النحاس يحتفظ بها بنسبة عالية بشكل فريد بواسطة معدن الفضة النبيل. وتنجم مشكلات معالجة الفضة وتفسيرها وتحليلها من ظاهرة تراء السطح.

## (٥, ٧) الذهب وسبائكه

(٥, ٧, ١) طبيعة القطع الأثرية<sup>(٨٢)</sup>

من النادر أن يكون الذهب في القطع الأثرية نقياً. وأحد أسباب ذلك هو الشوائب من المادة الخام التي تكون في شكل معدن، وليس خاماً، إذا إن الذهب معدن

نبيل جداً. السبيكة التي تحدث بشكل طبيعي ومهم هي الإليكتروم (electrum) أو الذهب الأبيض، والذي يكون محتوي الفضة فيه أكثر من ٢٠٪. يمكن تخفيض هذا المستوى بواسطة التنقية إلى حوالي ١٪، معطياً معدناً بلون أحمر - أصفر قوي، ويصبح أكثر احمراراً عندما يتلوث بالنحاس. غير أن الذهب في العادة يتم تشكيله في شكل سبيكة من أجل القوة والاقتصاد مع الفضة أو النحاس، في الحالة الأخيرة يمكن أن تسمى السبيكة بالتومباجا (tumbaga). عندما يخلط الذهب بكل من الفضة والنحاس، يمكن صنع سبيكة رخيصة شاحبة الاصفرار تسمى برونز كورنيث (corinthian)<sup>(٨٣)</sup> أو الذهب الأخضر. يمكن أن يتغير لون سطح هذه السبيكة بواسطة الأكسدة أو التبييض لأجل الزينة. يعتبر الطلاء بالذهب (القسم ٢، ٢، ١، ٥) للسبائك الذهبية عموماً أمراً شائعاً، من أجل إعطاء القطع سطحاً ذهبياً نقياً قوي الاصفرار. اليوم، يقاس نقاء الذهب بالقيراط، حيث يمثل القيراط واحد من أربع وعشرين من الكل.

إن الذهب (نقطة الانصهار ١٠٦٣ درجة مئوية) من أكثر المعادن قدرة على الطرق ومطاوعة الشغل ويستخدم في الزينة، وبدون إحماء يمكن طرقه في شكل شرائح بسماك ٢، ٠ ميكرومتر فقط. ويمكن صبه بسهولة ويمكن لحامه (لصق) بواسطة اللحام البارد أو لحام الذهب، وهو سبيكة ثنائية تحتوي على ١٨٪ من النحاس أو واحد على ثلاثة، ولأنها تحتوي أيضاً على فضة فهي تعطي لوناً أفضل. وبشكل مغاير، يمكن وصل الذهب بواسطة أسلوب يدعى اللحام القاسي الغروي، حيث يتم اللصق مؤقتاً بواسطة عجينة يتألف من غراء، وملح نحاس، وماء وعندما يتم ذلك تسخن الوصلة حيث يتحد النحاس المعدني المختزل في شكل سبيكة مع الذهب مكوناً رابطاً. ويشمل ذهب الزينة الطلاء بالمينا والنيلو (القسم ٢، ١، ٥، إلى ٦).

## (٥, ٧, ٢) طبيعة المادة التالفة (٨٣-٨٤)

يمكن أن يكون تآكل سبيكة الذهب الرخيص سريعاً جداً، وذلك لتكوّن الخلايا المجلفنة مع معادن السبيكة.

**الذهب اللامع:** حيث إن الذهب معدن نبيل، فإنه لا يتفاعل في أي بيئة عادية، ومن ثم يتم العثور عليه غير متغير في الحفريات. فحتى الذهب الرخيص، إذا كانت كمية المعدن الأساسية الموجودة فيه قليلة أو أن البيئة تُدَوِّبُ منتجات تآكل المعدن الأساسي، فإن من الممكن العثور عليه لامعاً. وعندما تكون سبيكة الذهب الرخيص مطلية بواسطة النضب، فإن منتجات تآكل كبيرة قد تتكون في شكل كوبرايت أسود ( $Cu_2O$ ) تحت طبقة سطح الذهب. ويمكن أن يكون المعدن هشاً جداً للأسباب التي جرى وصفها بالنسبة للفضة الهشة (القسم ٥, ٦, ٢, ٥).

**قشور صدأ الفضة أو النحاس أو الحديد:** سبيكة الذهب الرخيص المحتوية على واحد أو أكثر من هذه المعادن يمكن أن تكون محمية بواسطة منتجات تآكل هذه المعادن.

## (٥, ٧, ٣) الفحص

هناك محاولات من خلال فحص منتجات التآكل وألوان المعدن للتعرف إلى السطح إن وجد، وعمّا إذا كان حدوثه عن قصد أم لا. وبالمثل، تتم دراسة محتوى كل السبيكة لكن لا يمكن استخدام الكثافة النوعية فقط التي تستخدم في العديد من البرامج التحليلية للقطع التي تحتوي على قشور تآكل أو ثقوب نفخ الصب. وتمثل دائماً السطوح الأصلية للقطع الأثرية، على الرغم من أن اللون مريبك في كثير من الأحيان، بواسطة الذهب المتبقي غير المتآكل.

## (٥, ٧, ٤) التنظيف

لا ينظف الذهب على الإطلاق، بدون استخدام المجر، حيث يكون خطر خدش طبقة السطح أو خدش المعدن الناعم كبيراً. يجب توخي الحذر في الموقع لمنع

الأيدي من مسح سطح القطع الأثرية. وحتى في المختبر، يتم الإبقاء على التنظيف الميكانيكي في أدنى حد، بينما يجب استخدام المواد الكيميائية التي تزيل النحاس والفضة بشكل جيد، لمنع تقشر المعادن الرخيصة وإذابة منتجات التآكل الداخلية.

#### (٥,٧,٥) التلف بعد التنقيب والاستقرارية

الذهب نفسه لا يتلف، ولكن السبائك تعاني من تآكل المعدن الرخيص كما سبق ذكره سلفاً في أقسام هذا الفصل، ويجب تنفيذ استقرارياتها تبعاً لذلك. يمكن أن يكون الذهب هشاً وضعيفاً جداً، ومن ثم يجب مناولته بكل حذر.

#### (٥,٧,٦) إعادة التشكيل

كمثل الفضة، يمكن إعادة تشكيل قطع ذهبية معينة إلا عندما يكون هناك تفصيل دقيق للسطح أو عندما يكون التآكل داخلياً. مرة أخرى، سوف تفقد المعلومات المعدنية بمثل هذه المعالجة.

#### (٥,٧,٧) الخلاصة

يجب ألا يُلمَّع الذهب إلى درجة اللمعان، يسمح فقط بالغسيل الخفيف. يجب أن يضمن التغليف عدم حدوث خدوش. أيضاً يجب عدم تنظيف سبائك الذهب الموجودة في شكل قشرة مع منتجات تآكل النحاس ويجب معالجتها كسبائك نحاس في المختبر (القسم ٥,٥,٦).