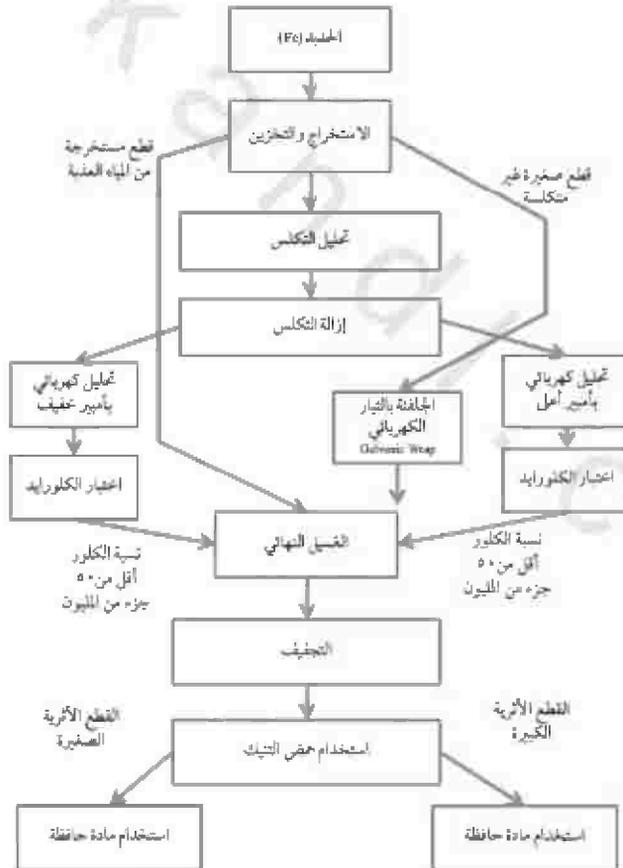


**الحديد الأثري (Fe)**  
**Archaeological Iron (Fe)**



الشكل (٨). رسم بياني يوضح معالجة الحديدية.

طرق معالجة قطع الحديد الأثرية  
كما وردت في الكتب المتعلقة بالترميم  
المصدر الأساسي : (Clarke and Blackshaw, 1982: 18-20)

- ديثونيت الصوديوم القلوي..... عوامل سمية
- انقسام الكبريتيت القلوي..... عوامل سمية
- نشادر (سائل)..... عوامل سمية
- عملية التقوية..... درجات حرارة عالية وتغير في البنية الدقيقة
- EDTA..... لمعالجة السطح
- ديتريكس C
- الانقسام بالتحليل الكهربائي..... نتائج جيدة مع بعض العوامل السمية الناتجة عن التحليل الكهربائي
- كثافة التيار العالي : ١ ، أمبير / سم<sup>2</sup>
- كثافة التيار المعتدل : ٠.٥ ، أمبير / سم<sup>2</sup>
- كثافة التيار المنخفض : ٠.٠١ - ٠.٠٥ ، أمبير / سم<sup>2</sup>
- أمبير منخفض / تحليل كهربائي خفيف..... ينصح بها
- أمبير أعلى / تحليل كهربائي خفيف..... ينصح بها
- الغلاف الجلفاني (التنظيف الكهروكيميائي)..... ينصح به
- فرن الانقسام الهيدروجيني..... سريع - مكلف - يمكن أن يسبب حرائق البلازما المنخفضة الضغط
- الانقسام الجلفاني في الموقع..... لتثبيت وليس للمعالجة
- التنظيف السطحي الميكانيكي..... للمعالجة السطحية
- حمض أرثوفوسفوريك..... للمعالجة السطحية
- الجبونيت
- الهلام البحري
- تنظيف الحديد
- حمض الفوسفوريك..... للمعالجة السطحية
- أوسفو
- فوسفولين المنغنيز
- فوسفولين الزنك

الشكل (٩). خلاصة طرق معالجة الآثار الحديدية.

معاملات العزل..... للمعالجة السطحية

ثيرفانيد

ميتاكن

ديكويست

الغسل بواسطة كربونات الصوديوم..... بطي، يطبق على القطع الأثرية التي لم يصبها الكلور

الغسل بواسطة السوكليت..... ينصح باستخدامه مع القطع الأثرية الصغيرة القابلة للتفتت

حموض التفتير..... للمعالجة السطحية

الأوكزاليك

ثيوجليكوليك

السيتريك

مودالين

بايوكس

التنظيف السطحي..... للمعالجة السطحية

التغطية بمحض التانيك..... للمعالجة السطحية

طريقة فيرتان

الغسل..... عملية بطيئة وتشتمل على بعض الخطوات ذات السمية

هيدروكسيد الليثيوم

هيدروكسيد الصوديوم

الشطف بواسطة تدفق الماء..... عملية بطيئة وتحتاج إلى مصدر للماء الجاري

تابع الشكل (٩).

### نظرية أنواع الحديد

#### Types of Iron—Theory

يعدّ الحديد من أكثر المعادن التي استخدمها بنو البشر، وذلك لوفرتها وفعاليتها. وعلى الرغم من أن الحديد الناتج عن الحجارة النيزكية قد أثار اهتمام البشر، الذين عاشوا أوائل العصر البرونزي، إلا أن هذه المادة لم تُكتشف كمعدن خام نفيس إلا بعد تلك

الفترة بزمان طويل، حيث استخدم الحثيون، الذين عاشوا في آسيا الصغرى كميات من الحديد مع بداية القرن الرابع عشر قبل الميلاد، ثم شاع استخدام الحديد مع نهاية الألف الأول قبل الميلاد؛ وذلك لأن الحديد يستخلص من عناصر طبيعية أخرى، بخلاف الكثير من المعادن الأخرى، فهو يأتي غالباً على شكل أكاسيد معدنية أكثرها شيوعاً الهيماتيت (hematite) والمجنيتيت (magnetite). أما أكبر مشكلة قد يواجهها المرمم حالياً فتتجلى في كيفية المحافظة على الحديد وخاماته الفولاذية، ومنعه من العودة إلى صيغ الأكسيد الأكثر ثباتاً، من خلال تأكله.

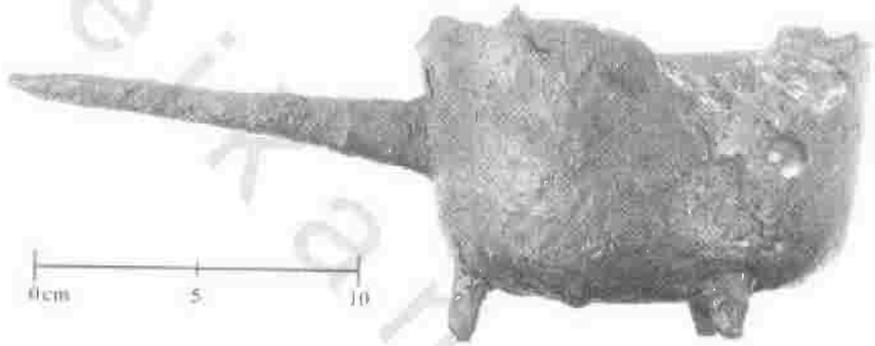
يمكن إنتاج الحديد بثلاثة أشكال أساسية، هي: حديد القوالب (pig) (أو تماسيح الحديد)<sup>(٨)</sup>، وحديد الصب (cast) (أو حديد الزهر)، والحديد المطاوع (wrought) مرتبة تنازلياً حسب نسبة الكربون فيها أو تصاعدياً تبعاً لنقاوة المعدن. أما الفولاذ (steel) فهو عبارة عن مزيج من الكربون والحديد. ولم تبرز أهمية الفولاذ تاريخياً إلا بعد إنتاجه على نطاق واسع خلال أواسط القرن التاسع عشر. إلا أن هذا لا يعني أن الفولاذ لم يتم إنتاجه منذ فجر التاريخ ليرافق مسيرة تصنيع الحديد، إذ ثمة كميات ضئيلة منه تم إنتاجها خصيصاً لتصنيع أدوات، مثل: الأنصال الحادة.

(٨) ظهر مصطلح حديد التماسح، ويسمى باللغة الإنجليزية حديد الخنزير (pig iron)، عندما كانت الأفران الصغيرة تعمل بالنفخ النباتي بالقرب من الغابات والمناطق الزراعية، وكان الحديد المنصهر يخرج من فتحة الفرن لينساب في قنوات قاعها من الرمل مع فتحات صغيرة على جانبيها لقنوات أصغر متعامدة على القناة الأساسية، وكان الحديد المتجمد - عندئذ - يشبه الخنازير حديثة الولادة وهي جالسة على الجانبين المتقابلين ترضع من الأم، والحديد الناتج أو المتجمد في كل قناة صغيرة كان يطلق عليه خنزير (Pig) (الدعشان، محمد عز. ١٤١٩هـ. الحديد والفولاذ الاستخلاص والتصنيع. جامعة الملك سعود - النشر العلمي. ص ٣١١-٣١٢). أما لماذا سمي بالتماسح بدلاً عن الخنزير فيظهر أن العرب تفرزت من ذلك، وأن الحديد الناتج فيه شبه من التماسيح فسمي بحديد التماسيح (الترجم).

يمكن إنتاج قوالب الحديد (حديد التماسيح) بصهر خام الحديد واختزاله (reduced) داخل فرن (وكلمة اختزاله هنا هي مصطلح فني يعني اكتسابه للإلكترونات)، أما مصطلح حديد الخنازير فهو مصطلح مجازي لتشبيه الحديد بصورة صغار الخنازير وهي تلتف حول أمهاتها؛ لأن الفرن، الذي يستعمل لصهر الحديد، كان يعتمد على إسالة الحديد بفعل الجاذبية نحو قوالب تحيط بقاعدة الفرن، ثم أصبحت الأفران أكثر فعالية بمرور الزمن، وذلك بعدما تطورت من شكل الموقد ويصيص النار، الذي كان شائعاً خلال العصور الوسطى، إلى الأفران العالية التي ظهرت خلال القرن الرابع عشر، بعد أن اتضح أن إدخال كميات كبيرة من الهواء داخل الفرن يساعد على تسخين المعدن الخام بسرعة عالية، كما يعمل على صهره بفعالية أكبر. وتحتوي كافة أشكال الأفران العالية بلا استثناء على الحديد بشكله الخام والفحم الحجري، أو الفحم النباتي والحجر الجيري، حيث يتم إدخال الهواء داخل تلك الأفران مما يساعد على احتراق الفحم الحجري والنباتي ويؤدي إلى إطلاق غاز أول أكسيد الكربون، ثم تتحد ذرات أول أكسيد الكربون (monoxide) مع ذرات الأكسجين المنبعث من الحديد الخام فتتحول إلى غاز ثاني أكسيد الكربون (carbon dioxide)، وعندها يتحول الحديد الخام إلى معدن، أما بالنسبة للكالسيوم الموجود في الحجر الجيري فإنه يساعد على صهر المعادن، حيث يساعد على خفض درجة حرارة انصهار الشوائب، الموجودة في الحديد الخام، لتقترب من درجة حرارة الحديد بعد تحوله إلى معدن، الأمر الذي يسمح للحديد المنصهر مع شوائبه أن يتحول إلى حديد التماسيح، وذلك عند وصوله إلى القسم الأدنى من الفرن.

ويحتوي حديد التماسيح على نسبة من الكربون تتراوح ما بين ٣-٦٪، ولهذا السبب يعدّ هذا النوع من الحديد هشاً حيث لا يصلح لصنع الأدوات الحديدية، ولذلك فإنه من النادر وجوده في المواقع الأثرية، حيث كان يتم نقله بالسفن، في بعض

الأحيان ؛ لتنقيته ، كما كان يستخدم أيضاً على شكل أثقال تساعد على حفظ توازن السفن الحربية. ويتميز حديد التماسيح بلونه الأسود وسطحه الحشن ، وعلى الرغم من إمكانية تلميع جميع أشكال الحديد ، بحيث يمكن أن تتخذ شكل قاعدة معدنية مفضضة ، إلا أنه من النادر لهذا النوع من الحديد أن يأتي على هذه الشاكلة في القطع الأثرية.



الشكل (١٠). قدر معدني صغير من حديد الزهر يعود للقرن الثامن عشر وقد تم الحصول عليه من موقع أثري في المياه العذبة. لاحظ آثار التأكسد التي سببت تآكل الحافة مما يشير إلى أن القطعة الأثرية قد وجدت ونصفها مطبور في التراب حيث تعرض هذا الجزء لتأثير مخفضات من الكبريتات اللاهوائية إلى جانب الجراثيم الأولية التي تعمل على إنتاج غاز الميثان.  
تصوير: كريس فالمانو

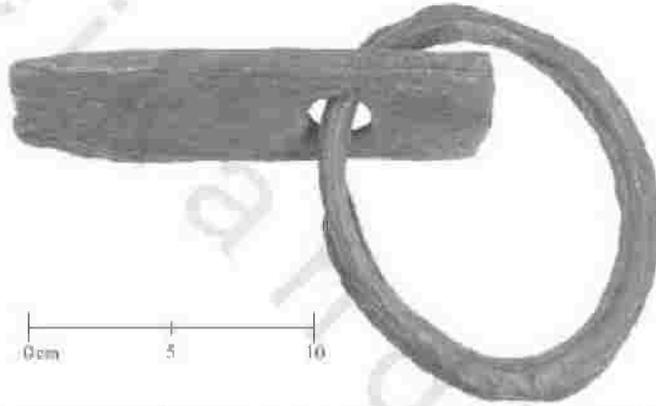
يعدّ حديد الزهر أحد أشكال حديد التماسيح بعد تنقيته ، إذ يحتوي على نسبة عالية من الكربون تتراوح ما بين ٢-٦٪ ، لكنه مع ذلك يبقى هشاً ولا يمكن تصنيعه ، بل يتم تحويله إلى أشياء أخرى ، مثل : المقالي والقدور بكافة أشكالها والمواقد والمدافع وأجزاء من بعض الآلات ، إضافة إلى الكرات الخاصة بالمدافع. ويتميز حديد الزهر بصلابته إلا أنه سريع الكسر؛ نتيجة لبنيته المؤلف من بللورات متناهية في الصغر. في الماضي كانت قذائف المدافع تنكسر عند ضرب الأهداف ، ولهذا السبب يعتقد معظم

الذين يعملون بالسباكة اليوم أن أسهل طريقة لإزالة شبكة الأنابيب المصنوعة من حديد الزهر هي تحطيمها بالمطارق. ويتميز حديد الزهر بلونه الأسود، وهو بذلك يشبه حديد التماسيح، كما يمكن أن يتمتع بلمس خشن أو ناعم، تبعاً للقالب الذي وُضع فيه، ويتأكسد هذا النوع من الحديد على طبقات تبدأ من السطح وتمتد نحو الداخل، الأمر الذي قد يؤدي إلى تكسر الحديد وتقشره. أما الطريقة المثلى لمنع تآكل حديد الزهر فتقوم على تبريد هذا النوع من الحديد ضمن قالب مصنوع من كربون الغرافيت (carbon graphite) عقب سبكه، مما يمنحه تلك البنية البلورية. أما حين يتآكل الحديد ومن ثم يتم نقله خارج ذلك القالب عندها يمكن للقطعة الأثرية الحديدية أن تحتفظ بشكلها، إلا أن الطبقة الخارجية قد تتحول إلى مجرد طبقة رقيقة من الغرافيت، وفي هذه الحالة تقوم عملية صيانة سطح القطعة الأثرية على المحافظة على طبقة الغرافيت الخارجية الرقيقة.

يعدّ الحديد المطاوع (wrought iron) أنقى أنواع الحديد؛ لأن معالجته تتم بواسطة استخدام أجود أنواع حديد التماسيح، حيث تتم تنقية هذا النوع وسبكه فوق قاعدة رملية مذابة؛ وذلك بهدف إنتاج كتلة الحديد، أو قضبان الحديد ذات الطرق الأولى، وهذا ما نسميه بالحديد الصب (bloomery iron or blooms)، ويساعد الخبث السيليكوني (الرميل)، المضاف إلى الحديد المطاوع في تصنيعه وتشكيل الأدوات الحديدية. ولم يسجل التاريخ العثور على كميات كبيرة من الحديد المطاوع أو الفولاذ، إلا بعد أن قام هنري كورت في العام ١٧٨٤م، باستخدام آلات تساعد على رق الحديد، إضافة إلى اتباع طريقة تسويت الحديد بهدف تنقية كميات كبيرة.

ويعدّ الحديد المطاوع من أكثر أنواع الحديد القابلة للطرق، وذلك لعدم قابليته للتكسر، كما يعدّ من أكثر الأنواع نقاوة، إذ تقل نسبة الكربون فيه عن ٠.٢٪ كما يحتوي على شوائب سيليكونية، التي تأتي على شكل رواسب دقيقة يمكن أن تظهر

على السطح الحبيبي للمعدن بعد تصنيعه. ويمتاز الحديد المطاوع بلونه البني الفاتح أو الداكن، كما تتمتع القطع الأثرية المصنوعة من الحديد المطاوع بمظهرها الحبيبي، الذي يشبه مظهر الخشب إلى حد كبير، ويمكن لسطح هذه القطع الأثرية أن يتآكل بشوائبه السيليكونية. كما يمكن للحديد المطاوع أن يتشكل في أي شكل من الأدوات، التي يمكن الانتفاع بها، وتميز بصلابتها كالقفل والمسامير والمرساة.



الشكل (١١). قطعة من الحديد المطاوع مصنوعة على شكل رزمة تعود للقرن التاسع عشر لاحظ المظهر الحبيبي للحديد المطاوع الذي تآكل مع شوائبه السيليكونية.

تصوير كريس فالشانو.

أما الفولاذ فقد تم إنتاجه بكميات قليلة لتصنيع نصل الأسلحة، وذلك مع بداية تاريخ تصنيع الحديد وحتى فترة لاحقة من منتصف القرن الثامن عشر، مع ظهور فولاذ البوتقة (الذي يحتوي على كميات محددة من الكربون، تم استغلالها لصناعة الحديد المطاوع). أما القطع الفولاذية فتعد أكثر مرونة من تلك المصنوعة من الحديد، إذ إنها تعود إلى وضعها الأصلي بعد ضغطها نحو الأسفل، كما تعد أخف وأمتن من القطع الحديدية. إلا أن الفولاذ لم يصنع على نطاق واسع إلا بعدما قام الإنكليزي

"هنري بسمر" بتسجيل اختراعه الخاص بتصنيع الحديد، وذلك في عام ١٨٥٦م، حيث يتم سكب الحديد المصهور، وفقاً لهذه الطريقة من الفرن العالي إلى دلاء مغطاة، ويطلق على هذه الطريقة اسم المحوّل. يضاف الكربون والمنغنيز إلى الحديد داخل المحوّل ليبدأ بعدها ضخ الماء إليه مما يساعد على حرق الشوائب، وهكذا يعمل المحوّل على تنقية الحديد وضبط نسبة الكربون، مما يؤدي إلى إنتاج الفولاذ. وخلال الربع الأخير من القرن التاسع عشر تمكن الأخوان الألمانيان ويليام وفريدريك سيمنز، إضافة نظيريهما الفرنسيين بيري وإميل مارتان، من تطوير طريقة "بسمر" وجعلها أكثر فاعلية وإنتاجية، وبذلك غدا القرن ذو الموقد المفتوح المصنّع الرئيس لإنتاج الفولاذ خلال القسم الأخير من القرن التاسع عشر.

يبدو الفولاذ بعد تصنيعه كمعدنٍ فضي، بيد أنه يتآكل بشكل أسرع من الحديد، إذ سرعان ما يكتسب اللون البني أو الأحمر أو البرتقالي للطبقة الصدئة التي تكسو الحديد، وذلك تبعاً للوسائل المتبعة في تصنيعه. ويحتوي الفولاذ على نسبة من الكربون تتراوح ما بين ٠.٥-٣٪، ويمكن أن تختلط به معادن أخرى كالنيكل أو الكوبالت أو المنغنيز أو الكروم، وهذه العناصر التي تشوب الفولاذ لها سماتها التي تميزها عن غيرها، كما لها استخداماتها الخاصة، وعموماً يمكننا القول إن التآكل يصيب الرقائق الكبرى للفولاذ، التي تعمل على نقشير سطح القطعة الأثرية، أما القطع الأثرية المصنوعة من الفولاذ فتشمل الدروع والسيوف ونصل بعض الأدوات كالقؤوس.

وعلى الرغم من أن حديد التماسي، وحديد الزهر، والحديد المطاوع، إضافة إلى الفولاذ جميعها مصنوعة من عنصر أساس هو الحديد، إلا أنها تختلف بميزاتها والغايات، التي استخدمت من أجلها خلال الحقبة التاريخية، لذا فلا عجب أن تختلف هذه المواد عن بعضها البعض بطريقة تحملها سواء على المستوى المجهرى الدقيق، أو على نطاق واسع، مما يعني أن القطع الأثرية المصنوعة من هذه المواد لا بد

وأن تختلف أيضاً من حيث طريقة ونوع التحلل الذي يصيبها، لذا يجب صيانتها بطرق مختلفة أيضاً.

يمكن تمييز القطع الأثرية المصنوعة من الحديد من خلال لونها، الذي يتراوح بين البني الغامق والأسود، إضافة إلى مستوى صلابتها ووزنها. ويمتاز الحديد والفولاذ بخاصيتهما المغناطيسية وبقدرتهما على نقل التيار الكهربائي، كما أن الحديد يتآكل بسرعة بعكس المعادن النفيسة، أما المواد التي تنجم عن تآكل الحديد فإنها تنتقل إلى السطح الخارجي لتتفاعل مع العوامل البيئية المحيطة، ومن ثم ترسب حالما تتعرض لرقم هيدروجيني قاعدي أكبر، حيث تقوم نواتج تآكل الحديد المترسبة (وهي في الغالب  $FeO(OH)$ ، والصدأ البرتقالي)، على تثبيت جميع المخلفات على القطعة الأثرية. أما حينما تكون التربة رطبة ومشبعة بالهواء عندها تتحول هذه الطبقات المتحجرة إلى كتل بُنية غير منتظمة الشكل نتيجة لتعلق الرمال والخصى بها، وقد تأتي هذه الطبقات المتحجرة بشكل يشابه القطعة الأثرية التي تغطيها، ويزيد تعقيد عملية التحجر والتكلس تحت سطح الماء مما يؤدي إلى اختفاء القطعة الحديدية الأثرية بشكل كلي، داخل غلافٍ من كربونات الكالسيوم (انظر القسم المتعلق بكيفية تشكل التكلسات).

وتساعد الخبرة علماء الآثار والمرممين على تخمين الاستخدامات الاعتيادية لكل نوع من أنواع هذه المواد، فمثلاً من الصعب تصنيع المسامير وحدوات الأحصنة من حديد الزهر؛ لأنه يمكن لهذا النوع من الحديد أن يتكسر خلال فترة قصيرة، وبالمقابل فإنه يستحيل تصنيع الأشياء المعقدة التي يجب أن تصنع وفقاً لقوالب معينة من الحديد المطاوع، وذلك لعدم إمكانية صبه في قوالب، وتعدّ العلامات التي تحملها القوالب إلى جانب نوع التحلل من أهم المؤشرات التي تدل على نوع الحديد. أما القطع الأثرية الأخرى كالدلاء المعدنية، أو العلب القصديرية فأغلب ما فيها مصنوع من الحديد، ومن ثم تم استخدام الفولاذ لصناعتها.

## نظرية تآكل الحديد

## Corrosion of Iron—Theory

يعدّ الحديد أكثر ثباتاً عندما يكون بشكله الطبيعي؛ أي حينما يكون أكسيداً، فإذا تم اختزال هذا الأكسيد ليتحول إلى معدن صاف تقريباً عندها يصيبه التآكل، ليعود من جديد إلى حالته الأكثر ثباتاً؛ أي عندما كان على شكل أكسيد، ولقد أدرك علماء المعادن هذه الحقيقة بمرور الوقت ومع نهاية القرن التاسع عشر تمكن هؤلاء العلماء من صياغة نظرية عامة حول الأكسدة والتآكل جاءت على الشكل التالي:



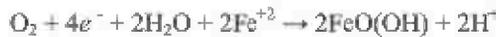
هذه المعادلة توضح أن الحديد في وجود الماء والأكسجين يتحول إلى صدأ (-ferrous oxy-hydroxide)، ويمكن ملاحظة ذلك بسهولة في أي مكان يستخدم فيه الحديد، إلا أن هذه المعادلة لم تشرح النتائج التي تمت ملاحظتها عند استخدام الحديد، وبخاصة تلك الكالاب الحديدية المستخدمة في السفن، فمثلاً حينما لجأ بناؤو السفن في بداية الأمر إلى استخدام غلاف نحاسي لتغطية قعر السفن الحشبية (كالسفينة الملكية Alarm - 1758 - 1762)؛ لحمايتها من الديدان الحلقية والمحاريات لاحظوا أن الكالاب الحديدية قد بدأت بالتآكل بسرعة كبيرة، وهذا التآكل الغريب أدى إلى تدمير السفن التجريبية تقريباً، ومنذ ذلك الحين أصبحت جميع الكالاب الموجودة داخل السفن تصنع من النحاس، أو من المواد التي تحالط النحاس بعدما كانت تلك الكالاب في الماضي تغطي بطبقة من النحاس فقط.

ثم لاحظ بناؤو السفن أنه من الممكن للكالاب الحديدية أن تتآكل بطريقة سريعة، حتى وإن كانت مطلية ومحمية من الأكسجين، وكذلك لاحظ مستخدمو الحديد أيضاً أن الحديد يتآكل بشكل أسرع إذا تعرض لمياه مالحة، أو إذا كان موجوداً ضمن بيئة بحرية، وإن هذه الملاحظات هي التي أوصلتنا إلى المفهوم الحالي اقتران

جلفاني<sup>(٩)</sup> (galvanic coupling) بفعل التيار الكهربائي (أي وجود احتكاك بين معدنين)، وللمفهوم الأكسدة الهوائية التفاضلية (differential aeration) (فتآكل الحديد لا يحتاج بالضرورة إلى التعرض للماء، أو الأوكسجين لتبدأ عملية التآكل)، وكذلك الأمر بالنسبة لتأثيرات أيونات الكلور السالبة (chloride anion)، التي تسبب أضراراً للمعادن. تقوم هذه العوامل مجتمعةً بدورٍ في تحلل الحديد، ولهذا يجب حماية جميع القطع الأثرية المستخرجة سواء من مواقع برية أو بحرية من تأثير الملح أو اقتران جلفاني (galvanic coupling) بين معدنين، وكذلك من حالة التهوية التفاضلية (differential aeration)، كما يجب على المرممين أن يعمدوا إلى عكس هذه العمليات بدرجة معينة؛ لحفظ الحديد وترسيخ حالة توازنه.

واليوم أصبحنا ندرك أن المعادلة البسيطة للأكسدة العامة تنطوي في الحقيقة على عمليتين. فعملية التآكل أو الأكسدة هي عملية تقوم على تحرك الإلكترونات الموجودة داخل وضمن المعادن، إلى جانب تحرر بعض الأيونات المعدنية (وهي الجزيئات المشحونة بالمعدن)، أما عملية الاختزال فهي عبارة عن عملية لجمع الإلكترونات، وهكذا فإن جميع المعادن التي تتعرض للتآكل تشكل بطارية ذات قطبين سالب وموجب، فعند الجهة الموجبة (+) للبطارية، أو ما يعرف باسم القطب الموجب. يمكننا أن نصوغ هذا التفاعل على النحو الآتي:

القطب الموجب +



(٩) في الأصل عملية لطلاء الحديد بطبقة من الزنك لوقايته من الصدأ، إما بغمره في حمام من الزنك المصهور، وإما بترسيب الزنك عليه من محلول (الترجم).

تشير هذه المعادلة إلى أن الحديد يقوم بإطلاق الإلكترونات إذا أتاحت له الظروف المناسبة، وعندها ستشحن ذرات الحديد بالأيونات، وهذه الأيونات المشحونة ستغادر مسارها، وعندما تصادف الأوكسجين، والطاقة، والماء فإنها تتحول إلى صدأ وتقوم بإنتاج أيونات الهيدروجين (hydrogen ions)، أو الحمض أيضاً. وباختصار يمكننا القول: إن نواتج تآكل الحديد هي: الصدأ والحمض والكهرباء.

ولابد أن تكتمل الدائرة لتعمل البطارية التي تعتمد على تيار كهربائي مباشر، أو بمعنى أصح: لابد من استخدام الإلكترونات، التي تم إطلاقها عند القطب الموجب، وهذا ما يحصل تحديداً عند القطب السالب للبطارية:

#### القطب السالب (-)



حيث تعمل الإلكترونات، التي أطلقت بفعل تآكل الحديد على اختزال الأوكسجين والماء فتتج عندئذ شوارد الهيدروكسيل، أو القواعد (قلوي) (base)، أما الطلاء والمواد العازلة للكهرباء فإنها تقوم بتقييد حركة الإلكترونات، كما تساعد على استقطاب التحول الكهربائي ما بين القطب الموجب والسالب مما يعمل على إبطاء التفاعل.

ولقد ساعدت هذه المفاهيم الجديدة، حول تآكل المعادن، على تفسير أحد أكبر الأسرار المتعلقة بحالة التآكل، والتي شاعت خلال القرن التاسع عشر، ألا وهو نظرية التهوية التفاضلية (differential aeration). فبالنظر إلى المعادلتين السابقتين يمكننا أن نخلص إلى نتيجة مفادها أن القطب الموجب والقطب السالب لأي تفاعل لا يمكن أن يكونا في ذات المكان، إذ ينبغي أن يكون كلا القطبين موصولين إلى مسار للإلكترونات ناقل للتيار الكهربائي، أما حينما يتآكل المعدن في سفينة مصنوعة من الفولاذ على

سييل المثال، فإنه من الممكن فصله عن القطب السالب، أو إبعاده إلى ركن قصي بعيداً عن المكان الذي يتم فيه اختزال الأوكسجين أو الماء؛ وهذا يعني أنه طالما كان أي جزء من أي قطعة أثرية حديدية معرضاً للأوكسجين، أو الماء فإنه لا بد له من أن يتآكل، ولكن ليس بالضرورة أن يحدث ذلك في منطقة التعرض ذاتها، إذ يمكن للرقاقة الغارقة من الطلاء الخاص بسطح حطام السفينة أن تتسبب بتآكل المعادن في أعماق أجزاء الحطام، كما يمكن للمسمار الحديدي أن يتأكسد داخل قطعة أثرية؛ نتيجة لتعرض رأس هذا المسمار للأوكسجين والماء.

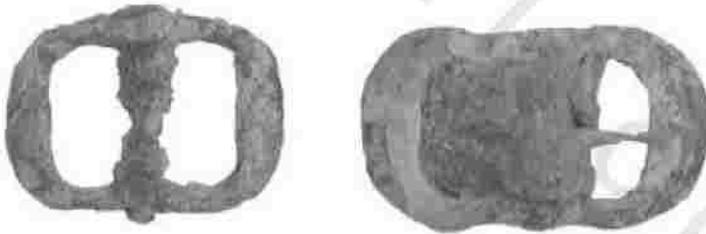
### نظرية اقتران جلفاني بين معدنين

#### Galvanic Coupling—Theoretical

كما رأينا من قبل فإن عملية التآكل في جوهرها عبارة عن حالة انتقال لأحد الإلكترونات، الذي سيبقى على هذا الموصل طالما استمر القطب الموجب بإنتاج الإلكترونات، التي يجري استهلاكها عند القطب السالب. أما حينما يحدث تماس كهربائي بين معدنين مختلفين فعندها يحدث ما يعرف بظاهرة اقتران جلفاني (Galvanic Coupling)، حيث يتحول أحد المعدنين إلى قطب موجب ويبدأ بالتآكل بسرعة كبيرة، في حين يبقى المعدن، الذي تحول إلى قطب سالب محمياً، وهذه الظاهرة هي إحدى أسرار عملية التآكل والأكسدة، التي شاعت خلال القرن التاسع عشر ومن ثم استطاع العلماء تفسيرها من خلال عملية انتقال الإلكترونات.

وتتمتع جميع المعادن بجهد كهربائي معتدل أثناء التآكل والأكسدة، ويمكن قياسه بالميللي فولت الكهربائي، إلا أن هذا الجهد الكهربائي يختلف باختلاف المعدن، وهو يعادل عدد الإلكترونات التي يتم إطلاقها عندما يتأين جزء صغير من المعدن، وهذا ما يجعل بعض المعادن تتآكل بسرعة أكبر من سواها، فالذهب، على سبيل

المثال، لا يتأكسد بالسهولة والسرعة ذاتها التي يتأكسد فيها الحديد، ولهذا فهو يعدّ معدناً نفيساً (noble). أما عند حصول تماس كهربائي بين معدنين مختلفين، أو إذا تم تصنيع هذين المعدنين بشكل يسمح بحصول هذا التماس كصناعة إيزيم حذاء من النحاس الأصفر يعلوه دبوس حديدي، أو عندما يتم تصنيع جرس من النحاس بلسان حديدي (انظر الصورة)، عندها سيقوم المعدن الأقل نفاسة بالتخلي عن الإلكترونات لصالح المعدن الأنفيس، وحسب التعريف يمكننا القول إن المعدن المانح للإلكترونات، الذي يعدّ أقل نفاسة (وهو الحديد في هذا المثال)، سيتآكل ويتأكسد في حين أن المعدن الأنفيس (وهو النحاس الأصفر الذي يخالط معدن النحاس) سيقوم بالاختزال، أو الحصول على الإلكترونات، وبما أن عملية الاختزال هي المعول عليها لتنقية المعدن من المواد الخام فإن هذه العملية ستعتمد أيضاً إلى إحباط عملية الأكسدة التي تحدث للمعدن النفيس، أو بكلام أصح ستتم حماية المعدن النفيس بحيث سيبدو وكأنه قد حافظ على شكله ورويقه الأصلي على الرغم من أنه كان مدفوناً أو مغموراً بالماء لمئات السنين.



الشكل (١٢). إيزيم من النحاس الأصفر يتوسطه دبوس حديدي لاحظ كيف أن الحديد قد تآكل بشكل كامل مخلفاً طبقة متحجرة في الوسط، في حين أن الإيزيم النحاسي الخارجي بقي بحالة جيدة نسبياً ويعود الفضل في ذلك إلى ظاهرة التزواج الجلفاني بين هذين المعدنين.

تصوير: كريس فالغانو

## نظرية تشكل التكلسات

## Concretion Formation—Theory

من النادر استخراج قطع حديدية غير متكلسة من المواقع الأثرية البرية أو البحرية، أما المواقع الأثرية التي تغطيها المياه العذبة سواء في البحيرات، أو الأنهار فيبدو أنها من الأماكن التي تخلف القليل من التكلسات (concretions)، بيد أنه بوسعها أن تشكل بعض الطبقات المتكلسة في بعض الأحيان، وذلك عندما ترسب كربونات الكالسيوم على القطعة الحديدية. وقد تبين أنه حتى الأنهار ذات المياه الحارة يمكن أن تشمل على قطع أثرية محفوظة داخل مادة متكلسة تعرف بالدرع (armoring)، وعلى الرغم من أن هذه التكلسات تبدأ بمجرد بدء أي عملية إلكتروكيميائية جراً تآكل الحديد، إلا أنها كثيراً ما تتحول إلى نظام أحيائي أيضاً، إذ تقوم الكبريتات بغزو الدروع والتكلسات، الموجودة ضمن الأحواض البحرية، حيث تعمل هذه الكبريتات على اختزال الجراثيم والأحياء الدقيقة.

تحتوي التكلسات المستخرجة من باطن الأرض دوماً على الرمل والصخر، اللذين يتحدا مع بعضهما البعض وينتجا بنية مؤلفة من أكسيد الحديد (ferrous oxide) والكربونات الحديدية (ferrous carbonate) (كربيد الحديد "cementite"). ويصف ج.م. كرونين هذه التكلسات بأنها كتل حمراء، أو بنية اللون، ولا يتم النظر إليها في الغالب على أنها شيء مستقل بحد ذاته (Cronyn, 1990: 179)، فهذه التكلسات الجافة غالباً ما تستخرج من المنطقة المحيطة بالحديد المطاوع، إلا أنه يمكن لهذه التكلسات أن تشكل عُقداً (nodules) صغيرة فوق سطح حديد الزهر.

ولا تذكر كتب العناية بالقطع الأثرية تفاصيل كثيرة حول عملية التكلس، التي تصيب الحديد فعلاً في المواقع البرية، إلا أن ما كتب يمكن أن يكون مشابهاً إلى حد ما لكيفية تشكل التكلسات فوق القطع الأثرية المتروكة في قاع البحار بلا تهوية، إلا أن

هاتين العمليتين شديداً الاختلاف عن بعضهما البعض، فهما وإن تشابهتا في بعض المواضع قد اختلفتا في أهمها.

تبدأ التكلسات بالتشكل، فوق القطع الأثرية المصنوعة من الحديد والمدفونة في التراب، فور توافر الأوكسجين والماء، وكلاهما متوفر لدى أغلب أنواع التربة وبكميات كبيرة. بعد ذلك يبدأ التكلس بالظهور على القطع الأثرية، التي تقوم بإطلاق الإلكترونات وأيونات الحديد والحمض. ومن أهم النقاط هنا الطبقة المجهرية البينية، التي يحدث عندها التلامس بين القطعة الأثرية والتربة، حيث تقوم الكربونات الموجودة في التربة، والتي تحيط بالقطعة الأثرية بالتحلل بفعل المادة الحامضية، التي تنتج نتيجة تآكل المعدن، بعدئذ تنحدر الكربونات وأيونات الحديد وتبدأ بمغادرة المنطقة الملاصقة للقطعة وسرعان ما يواجهها الأس الهيدروجيني القلوي الأعلى في التربة المحيطة. وكلما كانت درجة القلوية أكبر ساعد ذلك على ترسب أيونات الحديد والكربونات، التي تتحول إلى هيدروكسيدات الأوكسجين الحديدية (ferrous oxyhydroxides) (هو صلباً برتقالي اللون) وكربونات الحديد. وبهذه الطريقة تبدأ تلك الترسبات ببناء قشرة تشبه الصدفة حول القطعة الأثرية، وسرعان ما تتماسك بنية هذه القشرة بفضل حبيبات الرمل والحجارة والحصى الصغيرة المتوافرة في الجوار، بحيث تتحول هذه الطبقة المتكلسة حديثاً إلى قطب سالب (cathode)، حيث يقوم الماء والأوكسجين عنده بعملية الاختزال، بواسطة الشحنة الكهربائية، التي تغادر القطعة الأثرية. إذ تقوم القطعة الأثرية بتوليد شحنة يتولى نقلها كل من الأيونات (ions) التي تغادر القطعة، والحديد، وكيوتونات الهيدروجين (hydrogen cations)، إلى جانب أيونات أملاح التربة سالبة الشحنة (anions) بما فيها الكلوريدات، حيث تقتحم هذه الأيونات (anions) جسم القطعة الأثرية بشكل يصبح معه من الواجب إزالتها من القطعة، إذا أردنا تثبيتها خلال عملية الترميم.



الشكل (١٣). كتلة غوذجية لتكلسات بنية اللون محبطة بمسار حديدي مستخرج من موقع بري تحتوي الطبقة المتكلسة على الكربونات والرمل ونواتج تآكل الحديد وقد تحول معظم الحديد الذي في المسار إلى طبقات متكلسة.

تصوير: كريس فالفانو

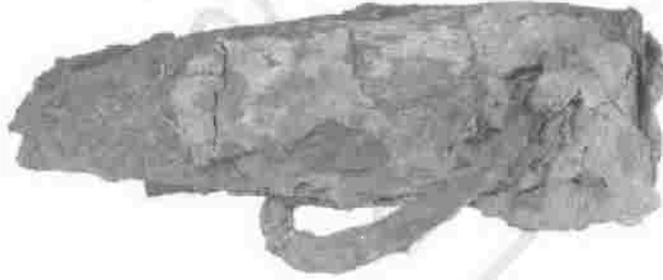
يشكل السطح الداخلي للطبقة المتكلسة بمحوضته وسطاً مثالياً للتآكل، فعلى عكس التكلسات التي تتشكل في مياه البحر، لا يبدو أن هذه الكتلة البنية الضاربة إلى الحمرة ذات الشكل المتبلور تعمل كعازل للكهرباء، كما أنها ذات مسامات تسمح بدخول الأوكسجين والماء، مما يساعد على استمرار عملية التآكل، وبما أن الإلكترونات، التي تنتجها القطعة الأثرية تُستهلك بنفس السرعة التي تُنتج بها فإن الدورة تستمر وتآكل القطعة الأثرية يتواصل. أما المادة الحمضية وأيونات الحديد والكربونات، التي تغادر تلك القطعة فإنها تساعد على زيادة وتوسيع الجزء المتكلس نحو الخارج، وذلك على حساب القطعة الأثرية.

ولكن يبدو أن عملية أخرى تفعل فعلها مع التكلسات المظمورة في التراب، وتتخذ هذه العملية شكل دورة تحفيز هدامة. وتحدث هذه الدورة كلما جفت التربة مع وجود نسبة قليلة من المياه المختزلة. في هذه الدورة المادة الحمضية ونواتج التآكل الناتجة عن القطعة الأثرية لا يمكنها مغادرة القطعة الأثرية فتعمل على زيادة الضغط تحت القشرة المتكلسة، ثم تبدأ التشققات تغزو سطح هذه القشرة، التي تنشأ فوق

القطعة الأثرية وتنفرد بكافة الاتجاهات فتسرب نواتج التآكل إلى داخل التكلسات. ولقد ثبت فعلياً أن التصدعات تظهر في العديد من الطبقات المتكلسة المظمورة في التربة، وهذه التصدعات تمتلئ فيما بعد بنواتج التآكل، وهنا لا بد لنا أن ندرك أن نماذج الحديد، التي تم تعدينها تشغل مساحة أكبر من تلك التي يشغلها الحديد الصلب، ولهذا السبب كان لا بد لنواتج التآكل أن تتوسع وتمتد. وتعدّ دورة الجفاف دورة هدامة للغاية بالنسبة للقطع الأثرية الموجودة في التربة، وكذلك بالنسبة للقطع الأثرية التي يتم نقلها إلى المختبر دون القيام بعملية إزالة التكلس، أو الغسل الكثيف لإزالة الأيونات سالبة الشحنة (anions).

وقد تتعرض بعض القطع الأثرية الحديدية، المدفونة في أعماق التراب بلا تهوية، إلى هجوم من قبل المواد الكبريتية، التي تقوم بعملية الاختزال إلى جانب البكتريا، التي تعمل على إطلاق غاز الميثان (methanogens)، وعندها لن تشكل الطبقات المتكلسة حول هذه القطع الأثرية التي يمكن أن تميزها من مادة كبريتيد الحديد ذات اللون الأسود والرائحة الكريهة. ومع ذلك لا بد أن تصاب هذه القطع الأثرية بالتآكل الشديد، على الرغم من عدم تعرضها للأوكسجين، إذ تعمل المواد الكبريتية الاختزالية والأحياء الدقيقة على تحويل الإلكترونات، التي تطلقها القطعة الأثرية، وبذلك تغدو هذه القطعة غير قادرة على الاستقطاب (Polarize)، غير أنها تستمر في إطلاق الإلكترونات (انظر القسم الخاص بالتكلسات في المحيطات). وقد لا تساعد شروط التربة الأخرى على تشكل الطبقات المتكلسة، لكنها تسمح بظهور طبقات واقية وعازلة للكهرباء فوق القطع الأثرية الحديدية، المدفونة في التربة العضوية الرطبة الغنية بالفوسفات (phosphate) (Cronyn, 1990: 181)، كما قد تساعد المركبات العفصية الحديدية العضوية (organic iron tannic compounds) على حماية الحديد، الذي لا تكسوه طبقات متكلسة، في حالة بيئة المستنقعات.

وتعد عملية إزالة التكلسات التي تتشكل على القطع الحديدية الأثرية، التي تم استخراجها من موقع بري، من أصعب العمليات وأعقدها، وخصوصاً إذا كان الرمل داخلاً في تركيبها، ويعود ذلك إلى أن نواتج التآكل والكربونات تلتصق بالقطعة الأثرية، مما يؤدي إلى تقشر أجزاء منها أثناء إزالة تلك المواد، ويمكن أن يكون نظام دورة التجفيف، الخاص بتشكيل التكلسات في التربة، قد أسهم بإزالة جزء من سطح القطعة الأثرية الحديدية. أما بالنسبة للتكلسات التي تتشكل في المحيطات، فإنها قلما تلتصق بالقطعة الأثرية، كما تسهل عملية إزالتها غالباً، وعند إزالتها يبقى سطح القطعة الأثرية الحديدية سليماً.



الشكل (١٤). كتلة من الحديد المطاوع على شكل رزة وقد تعرضت للتحلل نتيجة دورة التجفيف.

تصوير: كريس فالغانو

### نظرية كيفية تشكل التكلسات في المحيطات

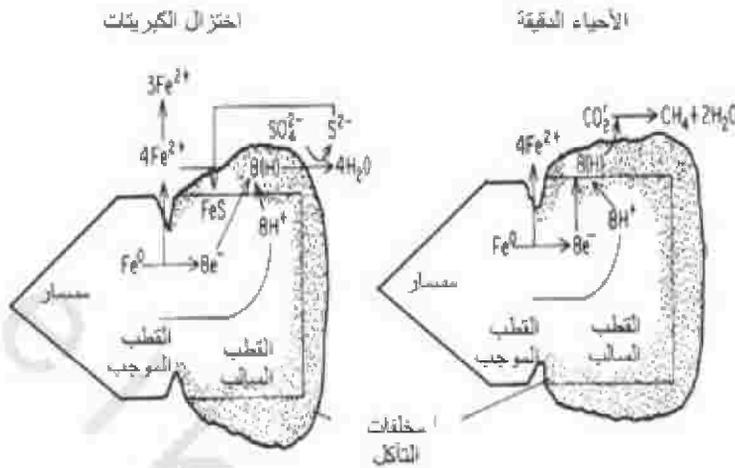
#### Oceanic Concretion Formation—Theory

إن أفضل الدراسات التي أجريت حتى الآن حول موضوع تشكل التكلسات في

المحيطات هي تلك التي قام بها كل من نيل نورث وإيان ماكليود ( Neil North and Ian

(MacLeod)، من متحف غرب أستراليا البحري (Western Australia Maritime Museum) (Pearson, 1987: 77-78)، إذ تُظهر الأبحاث التي أجراها كل منهما أن سبب تحول القطع الأثرية الحديدية الموجودة في أعماق المحيطات، وخلال وقت قصير إلى مستعمرات للأحياء الدقيقة، يكمن في أنها خالية من المواد السامة، وتبدأ هذه المستعمرات بتجمعات متشابكة ثم تتحول إلى طحالب مرجانية، وأخيراً تتكون طبقة من المرجان الصلبة بعد مرور بضعة أعوام، ويعكس التكلسات التي تتكون في التربة تشكل التكلسات في المحيطات من كربونات الكالسيوم، وتكون خالية من المسام كما تعمل على تثبيط تبادل الأيونات (inhibit ion exchange).

وعلى الرغم من كل هذا تستمر الأيونات في الانتشار داخل القشرة المتكلسة وخارجها، بوتيرة بطيئة، حيث تنتقل أيونات الحديد  $Fe^{+2}$  و  $Fe^{+3}$  و  $H^+$  موجبة الشحنة (cations) إلى الطبقة المتكلسة، في الوقت الذي تنتقل فيه أيونات الكلوريد  $Cl^-$  سالبة الشحنة (anions)، الموجودة دائماً في الوسط الملحي الموجودة في مياه البحار والمحيطات، إلى القطعة الأثرية. وقد تحتوي بعض القطع الأثرية الحديدية المستخرجة من المياه المالحة على نسبة من الكلوريدات تتجاوز ١٠٪ من وزن تلك القطع. وعندما تنتشر أيونات وحمض الحديد خارج القطعة الأثرية وتواجه بيئة قلوية تبدأ تلك الأيونات بالترسب على شكل أكاسيد (oxides) وماءات الأكسيد (hydrated oxides) وكلوريدات الهيدروكسيل (hydroxy chlorides)، ثم تحل بعض أيونات الحديد محل الكالسيوم، الموجود في طبقة كربونات الكالسيوم المتكلسة، وتشكل بذلك كبريد الحديد (cementite)، الذي يعدّ من أفسى أنواع الطبقة المتكلسة الأصلية.



الشكل (١٥). الاختزال بفعل الكبريتات والأحياء الدقيقة الموجودة في مسمار حديدي مدفون في منطقة غير معرضة للهوية.

(رودجرز، ١٩٨٩: ٣٣٧).

وفي الوقت الذي يتحول فيه سطح القطعة الأثرية دوماً إلى نظام بيئي خاص ببعض الكائنات، يمكن القول إن هذا الأمر ينطبق أيضاً على السطح الداخلي للطبقة المتكلسة، فخلال إحدى مراحل تشكل التكلسات تعتمد الجراثيم الدقيقة والكبريتات الاختزالية إلى غزو الجزء الداخلي للطبقة المتكلسة، حيث تعيش تلك الكائنات ضمن الوسط الحمضي، كما تأخذ الإلكترونات التي تطلقها القطعة الأثرية وتنتج كبريتيد الحديد وغاز الميثان، وبما أن الإلكترونات الناتجة عن تآكل الحديد لا يمكن لشيء أن يوقفها، لذا يتم إنتاج أيونات الحديد بنسب متصاعدة.

وقد تواصل عملية التآكل والتكلس عملها إلى أن تختفي القطعة الأثرية بمرور الوقت مخلفة وراءها قالباً أجوف (hollow cast) داخل الطبقة المتكلسة، ونتيجة لعدم وجود دورة للتجفيف في المياه البحرية، فقد تبقى الطبقة المتكلسة سليمة نوعاً ما، حيث تبدو أشبه بنسخة مطابقة للقطعة الأثرية الأصلية.

ويختلف تشكل التكلسات اللاهوائية في المحيطات قليلاً عن عملية التكلس التي تحدث في قاع البحار، فالتكلسات اللاهوائية تتشكل عندما تطلق قطعة حديدية مدفونة أيونات الحديد والحمض، بحيث تصبح البيئة المجهرية الملاصقة للقطعة الأثرية مشبعة إلى حد الإنحمام بكاربونات الكالسيوم المتحللة؛ وذلك بسبب وجود الحمض، وحينما ترنحل تلك المياه المشبعة عن القطعة الأثرية تتعرض هذه القطعة لوسط قلوي وتبدأ كربونات الكالسيوم بالترسب على سطحها الخارجي، بحيث تساعد على تعلق الرمال والمرجان والصخور والقطع الأثرية الأخرى القريبة بالسطح الخارجي للقطعة الأثرية. ويمكن التمييز بسهولة بين التكلسات، التي تشكلت في قاع المحيطات، وتلك التي تشكلت في قاع البحار، وذلك من خلال الحصى والقطع الصخرية العالقة بها، إلى جانب غياب المرجان والحار، الذي قد يعلق بالطبقة الخارجية للتكلسات التي حدثت في المحيطات.

أما من الداخل، فإن حال الطبقة المتكلسة القاعية الثانوية يشبه إلى حد بعيد حال الطبقات المتكلسة، التي تتكون في قاع البحار، فكلاهما سرعان ما يتحول إلى مستعمرات خاصة بالكبريتات الاختزالية والجراثيم الدقيقة، التي تعمل على إطلاق غاز الميثان، ولا بد أن تتحلل القطعة الأثرية بمرور الوقت، ولكنها هنا أيضاً تعتمد إلى ترك تجاوزيف من كبريد الحديد في قاع البحر.

ولا يمكن أن نختتم هذا الحديث حول الطبقات المتكلسة دون أن نؤكد الحقيقة القائلة: إن استيعاب عملية تشكل الطبقات المتكلسة، وفهم العمليات التي تحدث من أهم الأمور، التي يجب أن يحيط بها كل من فني الترميم وعالم الآثار، إذ يحتاج المرمم إلى هذه المعلومات ليحسب مدى تأثير عامل الزمن على القطعة الأثرية، حيث يمكن لعملية تثبيت الحديد أن تستغرق وقتاً طويلاً، وقد لا تحتاج عملية إزالة التكلسات سوى إلى فترة زمنية قصيرة من عملية التثبيت. كما أن حالة القطعة الأثرية وكمية الكلور التي تشربتها، تحدد الوقت اللازم لإجراء عملية المعالجة بالكامل، ويمكن للمرمم أن يحدد

حالة القطعة في كثير من الأحيان، من خلال نسبة الحديد الموجودة في الطبقة المتكلسة. وبالطريقة نفسها يتوجب على علماء الآثار أن يكونوا قادرين على الاستفاضة في شرح عملية تشكل الموقع، بمجرد النظر إلى كيفية تكلس الحديد - إن وجد - في الموقع الأثري.



الشكل (١٦). طبقة متكلسة مجوفة مأخوذة من موقع أثري في المحيط حيث تآكل الحديد الموجود في القطعة الأثرية وانتقل إلى الطبقة المتكلسة مخلقاً فجوة تشبه شكل القطعة الحديدية الأثرية التي كانت موجودة هناك فيما مضى.

تصوير: كريس فالغانو

### نظرية مخطط بوربا البياني

#### Pourbaix Diagram—Theory

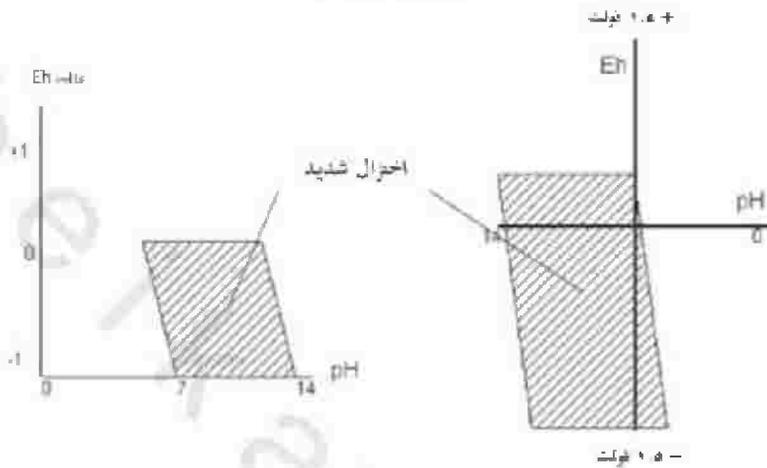
سيتم التركيز في الجزء الأخير من هذا النقاش النظري على وصف الأداة التي يستخدمها كل من المرممين وعلماء الآثار لوصف موقع ما، فمخطط بوربا البياني (Pourbaix Diagram) ما هو إلا صورة توضيحية تعمل على بيان نوع بيئة وظروف الموقع الأثري، وذلك من خلال نظرة واحدة، ويمكن استخدام هذه الطريقة أيضاً على

نطاق أضيق عند وصف الظروف المحيطة بقطعة أثرية ما، أو بالمنطقة التي تحيط بهذه القطعة الأثرية، ويمكن إنشاء هذا المخطط بطرق عدة، إلا أنه يشمل دائماً تمثيلاً بيانياً لنسبة الرقم الهيدروجيني (pH) مقابل الفولتية الكامنة (Eh) المتعلقة بالإلكترود القياسي للهيدروجين (pH/Eh). فنسبة الرقم الهيدروجيني (pH) أو الهيدروجين الجزئي هو مقياس لنسبة الحموضة والتي يرمز إليها بالأرقام ١-١٤، التي تشير إلى اللوغاريتم السلبى لتركيز أيونات الهيدروجين. أما قيم نسبة الحموضة فتكون ما بين ١ إلى ٧، وذلك عند جهة الحموضة، ومن ٧ إلى ١٤ عند جهة القلوي. ويعدّ الرقم الهيدروجيني ٧ نسبة محايدة. والفولتية الكامنة (Eh)، المتعلقة بالإلكترود القياسي للهيدروجين، يقال لها (Redox Potential)، وهي الضغط الذي تسببه الإلكترونات (الفولتج "voltage")، التي تتحرر من القطع الأثرية الموجودة في الموقع الأثري. ويمكن قياس كل من (Eh) و (pH) بالتر، أو بوسائل أبسط كشرائط المعايرة الكيميائية، وهذا بالنسبة الرقم الهيدروجيني (pH). أما الحد النظري للقطعة الأثرية المعدنية، التي تقوم بإطلاق الإلكترونات فهو حوالي ١.٥ فولت، وبهذا يتحول مقياس (Eh) إلى زائد أو ناقص ١.٥ فولت باعتبار الصفر نسبة محايدة.

ولتفسير المخطط البياني لا بد من معاينة المناطق التي تشكلت، إذ تعدّ أنسب المناطق لحفظ القطع الأثرية هي تلك التي تتمتع بوسط قلوي / اختزالي، في حين أن معظم حالات تفسخ وتحلل القطع الأثرية تقع في وسط حمضي / مؤكسد، أما المناطق الأخرى التي تنتشر فيها أوساط قلوية / مؤكسدة أو حمضية / اختزالية فهي عبارة عن أوساط بيئية مختلطة، حيث تختلف عملية الحفظ باختلاف القطع الأثرية وبالظروف المحيطة بكل قطعة من هذه القطع.

## مخطط بوريا البياني

بوضعين مختلفين



بيانات التقدير الإحصائية - تعدد نتائج الملاحظة على المعادن

الشكل (١٧). يظهر الوضعان المختلفان لمخطط بوريا البياني لمساحات واقعة ضمن إطار الفولتية الكاملة المتعلقة بالإلكتروليت القياسي للهيدروجين/ نسبة الحموضة، التي تساعد على حفظ القطع الأثرية.

## نظرية التحليل الكهربائي

## Electrolysis—Theory

تم ابتداء طرق كثيرة على مرّ السنين للحدّ من آثار التآكل، أو حتى عكس آثارها، التي تظهر على القطع الحديدية الأثرية، التي تم استخراجها. وقد نجحت الكثير من طرق المعالجة الكيميائية والكهروكيميائية والحرارية في اختزال الحديد وتثبيت القطع الأثرية، إلا أن الطريقة التي تفوقت على كافة الطرق الأخرى، من حيث التكلفة وسهولة التطبيق وعدم الإضرار بالبيئة والصحة، هي طريقة التحليل الكهربائي، أو طريقة التنظيف الكهروكيميائي، الذي يأتي على صورة تغليف جلفاني.

أما المبدأ الذي يتم اتباعه أثناء عملية التحليل الكهربائي (electrolysis) أو الاختزال الإلكتروليتي (electrolytic reduction) فهو مبدأ بسيط للغاية، إذ يقوم على

وصل تيار كهربائي مباشر بالقطعة الأثرية وفطب موجب لمادة قابلة للانحلال بالماء، ثم يتم وصل القطعة الأثرية بالنهاية السالبة لتحويل إلى قطب سالب، في حين يتم ربط القطب الموجب بالقطب الموجب لمصدر التيار الكهربائي المباشر، وهذا بدوره سيقوم بعكس تدفق الإلكترونات الموجودة في القطعة الأثرية بشكل ظاهري، كما سيعمل على اختزالها. وبعملية اختزال القطعة الأثرية تُختزل أيضاً نواتج التآكل الظاهرة على القطعة الأثرية. وعلى الرغم من أنه لا يمكن لعملية التحليل الكهربائي أن تعطي الطاقة اللازمة لإعادة تحويل نواتج التآكل إلى الحديد بعناصره الأساسية، إلا أنه يمكن اختزال تلك النواتج إلى أكسيد الحديد الأسود (المجنيتات) (magnetite) وهو من أكثر أنواع الحديد ثباتاً بعد تعدينه.

وتتوسع أكاسيد المعدن المتآكل دوماً نحو الخارج، وذلك لتحتل مساحة أكبر من مساحة المعدن الأصلية، وبالمقابل فإن عملية اختزال، أو تسخين المعدن بهدف تنقيته تساعد على انكماشه؛ لأن نواتج التآكل يتقلص حجمها في الوقت الذي يتم فيه اختزالها كهربائياً (أي يتم جمع إلكتروناتها). ويحدث ذلك لأن نواتج التآكل تتحول من أكاسيد وهيدروكسيدات مختلفة (صدأ) إلى أكسيد الحديد الأسود (المجنيتات)، وهذا ما يجعل حجمها أصغر. ويساعد تقلص حجم هذه النواتج على جعل سطح القطعة الأثرية مكشوفاً أثناء عملية الغسل بالماء، التي تقوم بها المادة القابلة للانحلال بالماء، وفي ذلك الوقت تبدأ الكلوريدات وغيرها من الأيونات، سالبة الشحنة الموجودة في ذلك الوسط، التي توغلت داخل القطعة الأثرية بالخروج عبر مسامات القطعة والصدوع الصغيرة التي عليها، كما تأخذ بالارتشاح خارج القطعة الأثرية لتصل إلى محلول التحليل بالكهرباء، وذلك لعدم وجود أية نواتج للتآكل لتعترض طريقها.

ولهذا تعدّ عملية تحليل الحديد كهربائياً مجرد عملية بسيطة قوامها الغسل بالماء ليس إلا، وفي هذه الحالة سيصبح لون سطح القطعة الأثرية داكناً نتيجة لوجود أكسيد الحديد الأسود الثابت (المجئيات)، في حين تبدأ الأيونات الضارة، سالبة الشحنة، بالخروج تدريجياً من القطعة أثناء غسلها.

### منهجية تخزين القطع الأثرية

#### Artifact Storage—Methodology

لا بد أن تكون جميع القطع الحديدية الأثرية المستخرجة، قد تعرضت للتآكل بصورة أو بأخرى، وعلى الرغم من أن سرعة تآكل القطع تختلف من قطعة لأخرى، فقد يجف بعضها بواسطة غطاء عازل للكهرباء، والبعض الآخر منها تم استخراجها من وسط اختزالي إلا أن عملية استخراج القطع الأثرية بحدّ ذاتها تقوم بتغيير كل ما في القطعة الأثرية، فالقطع الأثرية المستخرجة من مواقع أثرية جافة، التي تترك لتجف لوقت أطول لا بد وأن توضع ضمن عملية تحاكي دورة التجفيف، وعندها ستزداد نسبة الحمض الموجودة في الطبقة الكلسية، التي تبدأ بالتصدع ومن ثم تتصدع القطعة الأثرية ويأخذ سطحها بالتقشر، إذ حتى القطع التي لم تبد أي نوع من أنواع التآكل الفعلي، والتي تحفظ في مكان تقل فيه الرطوبة النسبية تبدأ باكتساب أيونات سالبة الشحنة نتيجة بقائها داخل التربة، حيث تبدأ هذه الأيونات السالبة، مثل:  $Cl^-$  بعملية التآكل من الداخل بعد مرور سنوات طويلة على استخراج القطعة الأثرية، ويتخذ هذا النوع من التآكل شكل قطرات صغيرة بنية اللون تظهر على سطح القطعة الأثرية. أما القطع الأثرية المتكلسة، التي تم استخراجها من المحيطات فتظهر عليها آثار التآكل بشكل فعلي، ولذا فهي تحتاج إلى عملية تثبيت. وتكون جميع القطع الحديدية الأثرية

المتآكلة محاطة بيئةً مجهزة حمضية، ويساعد هذا الوسط الحامضي على استمرار عملية إتلاف القطعة حتى بعد فترة طويلة من استخراجها.

ولهذا كان لابد لعملية تثبيت القطعة الأثرية أن تبدأ منذ لحظة استخراج القطعة، ويمكن تطبيق عملية تخزين القطع الأثرية مع كافة أنواع القطع الحديدية، سواء تلك التي استخرجت وهي جافة، أو عندما كانت رطبة، أو تلك التي تم استخراجها من المحيط، كما يجب البدء بعملية التخزين منذ لحظة استخراج القطعة من الموقع الأثري؛ إذ ينبغي تغليف جميع القطع الحديدية الأثرية، سواء أكانت متكلسة أم لا، برقاقة من الألمنيوم ومن ثم وضعها في محلول قاعدي، وذلك فور استخراجها (والاستثناء الوحيد يكون مع القطع الأثرية المركبة - انظر الفصل الثامن)، كما يجب إحكام إغلاق الرقاقة ولكن ينبغي لها أيضاً أن تسمح بوصول المحلول إلى المنطقة الواقعة ما بين الرقاقة والقطعة الأثرية.

أما محلول التخزين هذا فهو عبارة عن كمية من المياه العذبة، التي تمت إضافة مادة قلوية إليها؛ وذلك ليعمل على تحييد الحمض الموجود على سطح القطعة الحديدية الأثرية، فالمادة القلوية من أمثال كربونات (carbonate)، أو بيكربونات الصوديوم (صودا الخبز) (sodium bicarbonate "baking soda")، هي مواد زهيدة الثمن ويسهل الحصول عليها، إضافةً إلى كونها آمنة ومتعددة الاستعمالات؛ لأنه من الممكن استخدامها أثناء عملية التحليل الكهربائي، وهكذا فإنه يمكن لأي محلول قلوي أن يمنع حالة التآكل، إلا أن محاليل التخزين، التي تزيد نسبتها عن ٥٪ وذلك بفعل وزن مادة كربونات الصوديوم (٥ غرامات من كربونات الصوديوم في ٩٥ مل من الماء)، أو نفس النسبة من بيكربونات الصوديوم تُنتج رقم هيدروجيني (pH) يقترب من ١٣، ولهذا فهي تساعد على تثبيت القطع الأثرية بانتظار معالجتها.



الشكل (١٨). حالة التآكل بالارتشاح التي تظهر على مدفع من حديد الزهر يعود للقرون السابع عشر، ويمكن تمييز هذه الحالة من القطرات الداكنة التي تظهر مع زيادة الرطوبة النسبية.

تصوير: كريس فالغانو

تبدأ الرقاقة فعلياً بعملية إرجاع القطعة الأثرية أثناء تخزينها بناء على طريقة اقتران جلفاني؛ لأن قابلية الألمنيوم للتآكل أكبر من الحديد، ولهذا يبدأ الألمنيوم بمنح إلكتروناته للحديد مما يساعد على اختزاله (انظر القسم المتعلق بالجلفنة والاقتران الجلفاني). وينبغي أن يتم إعداد محلول التخزين إما من مياه الأمطار، أو المياه خالية الأيونات، أو المياه المقطرة، أما مياه الصنبور فتحتوي على أيونات الكلور سالبة الشحنة، ولذلك فهي تساعد على تآكل الحديد. وبما أن المخاوف المتعلقة بحدوث حالة الانهيار التناضحي (osmotic collapse) (مثل ما يحدث للخشب) غير موجودة أصلاً، لذا فإنه لا مانع من وضع القطع الحديدية الأثرية داخل مياه التخزين القلوية مباشرة، أما بالنسبة للقطع الأثرية غير المتكلسة والقطع الأثرية الجافة، وحتى القطع الأثرية

المغطاة بالتكلسات الترابية، فإنها على الأرجح ستقوم باكتساب الفوائد الموجودة في محلول التخزين مباشرة، وذلك عندما تحترق سطح القطعة الأثرية بسهولة، ومن ثم تعتمد إلى تحييد معظم المادة الحمضية الموجودة فيها، في حين تبدأ رقاقة الألمنيوم عملية تبادل الأيونات النافعة مع القطعة الأثرية.

تزيد التكلسات غير المسامية، التي تشكلت في المحيطات من التعقيدات المرتبطة بعملية تخزين القطع الحديدية، ولم يتم التوصل حتى الآن إلى إجابة شافية حول ما إذا كان محلول التخزين القلوي يتغلغل وسط الطبقة الحمضية ذات الحماية العالية والموجودة على سطح القطعة الأثرية، مما يعني أنه ليس هناك أي داع لتغليف هذه الأجزاء المتكلسة برفاقة معدنية، وبالنسبة للطبقة الحمضية التي توجد تحت التكلسات فإنها تتحول أيضاً إلى موطن لعوامل الاختزال الكبريتية وللجراثيم، التي بمقدورها أن تتحمل حالة انعدام التهوية في نسبة حموضة تصل إلى ٤.٨ (pH). أما التكلسات التي تشكلت في قاع البحار، أو في القاع فينبغي إزالتها بأسرع وقت ممكن، وذلك مباشرة بعد استخراج القطعة الأثرية، وإلا فإن تلك التكلسات ستستمر في مقاومة حالة التآكل حتى أثناء التخزين.

ويجب منع أي تماس داخل محلول التخزين بين المعادن المختلفة، التي قد صنعت منها القطعة الأثرية؛ لمنع حدوث حالة اقتران جلفاني، حيث يقوم المعدن الأقل قيمة بالتآكل؛ ليعطي إلكتروناته للمعدن الأنفس، الذي سيقوم بدوره بعملية الاختزال وبذلك سيصبح محمياً، وفي هذه الحالة يقوم محلول التخزين بدور المادة المنحلة بالماء بالنسبة لعنصري الاقتران الجلفاني وعندها يكون معدل التآكل قد بلغ أعلى مستوياته.

وتعدّ مرحلة تخزين القطع الأثرية الحديدية مجرد حل مؤقت لمشكلة تثبيت القطعة الأثرية؛ لأن الحديد بحدّ ذاته يتمتع ببنية مسامية فهو يمتص كميات كبيرة من الأيونات سالبة الشحنة، وهذا ما يجب إزالته أثناء المعالجة لضمان متابعة تثبيت القطعة الأثرية.

### منهجية قطع الحديد الأثرية المكتشفة في المياه العذبة

#### Fresh Water Recovered Iron Artifacts—Methodology

كثيراً ما يتم استخراج القطع الأثرية من المياه العذبة - بحيرات وأنهار - وهي بحالة جيدة بحيث لا تظهر عليها نواتج التآكل، ويندر وجود تكلسات عليها. وقد تساعد الخبرة في التوصل إلى قرار بشأن عدم حاجة هذه القطع الأثرية لأي عملية اختزال بواسطة التحليل الكهربائي؛ لأن وضعها مستقر بشكل طبيعي، وعندها يتم إرسال هذه القطع الحديدية لتتم معالجتها من خلال مرحلة الغسل الأخيرة.

### منهجية قطع الحديد الأثرية الصغيرة الخالية من التكلسات

#### Small Non-Concreted Iron Artifacts—Methodology

تعدّ هذه المجموعة من أصغر مجموعات القطع الأثرية، التي وردت في الجدول صفحة (١٢٥)، فهي عبارة عن مجموعة من الكلاليب والدبابيس وقطع الزينة الصغيرة، كما قد تشمل حلياً صغيرة مصنوعة من الحديد، وهي تبدو بحالة جيدة ونادراً ما تحتوي على تكلسات، ولو كانت هذه القطع موجودة في مياه مالحة لكان من المستحيل استخراجها.

### منهجية الجلفنة

#### Galvanic Wrap—Methodology

تعمل مرحلة الجلفنة التي تعرف بالتنظيف الكهروكيميائي (Clarke and Blackshaw, 1982: 18) وفقاً لمبدأ الاقتران الجلفاني بين معدنين بفعل الكهرباء، فيما أن إمكانية تآكل رقاقة الألمنيوم أقل من الحديد، لذا يمكن استخدام هذه الرقاقة لتعمل كقطب موجب بهدف اختزال الحديد في القطعة الأثرية. وتعدّ عملية الجلفنة خطوة في غاية البساطة، حيث يتم تغليف القطعة الأثرية بإحكام بواسطة رقاقة من الألمنيوم ووضعها ضمن

مادة منحلّة بالكهرباء موجودة داخل كأس أو أنبئة زجاجية ، وهنا لابد من التأكد من أن المادة التي تنحل بالكهرباء تفصل ما بين الرقاقة والقطعة الأثرية. ويمكن لمحلول تخزين الحديد (الذي يحتوي على نسبة ٥% من كربونات ، أو بيكربونات الصوديوم) ، أن يعمل كمادة منحلّة بالكهرباء ، وبالنسبة للتوقيت الزمني لهذه العملية فليس ثابتاً إلا أنه لابد للنتائج أن تظهر خلال بضعة أيام ، كما يجب الانتهاء من هذه العملية في غضون بضعة أسابيع. أما إذا لم يكن معروفاً تماماً ما إذا كانت القطعة الأثرية تفقد ثباتها أم لا ، فعندها يجب الجلفنة معها إلى أجل غير محدود.



الشكل (١٩). عملية حفظ موفقة تقريباً أجريت على مكواة مسطحة تعود للقرن التاسع عشر بعدما تم استخراجها من موقع أثري في المياه العذبة.

تصوير: كريس فالغانو

أما نتائج عملية الجلفنة فيجب أن تشمل على سطح واضح المعالم ، والتخلص من أي كمية من الكربونات مهما صغرت ، وتحول لون سطح القطعة الأثرية إلى لون

قائم، وذلك نتيجة اختزاله إلى مادة أكسيد الحديد الأسود الذي يعد شكلاً ثابتاً وغير قابل للتفاعل من أشكال الحديد المعدن والذي يتكون غالباً على سطح القطع الأثرية الحديدية بعد إرجاعها، كما لا بد من اختفاء كافة أنواع الهيدروكسيد الأوكسجيني الحديدي الفعال (الصدأ البرتقالي) خلال هذه العملية.

### عملية تحليل التكلسات - منهج العمل

#### Concretion Analysis—Methodology

بما أنه من الصعب تحليل الكتل المتكلسة البرية ذات اللون البني، لذا ثمة إجراءات في غاية البساطة لمعرفة ما إذا كانت القطعة الأثرية الموجودة داخل تلك الطبقات المتكلسة مازالت سليمة أم لا، فمحاولة معرفة وزن القطعة الأثرية عند حملها باليد تضع المرمم غالباً في حيرة من أمره بشأن الوضع الطبيعي للقطعة الأثرية، وهل ما زال سليماً أم لا، إذ عندما تكون التكلسات خفيفة للغاية، بشكل يجعل المرء يشك فيما إذا كانت تحتوي على معدن الحديد، فهذا يعني أن المعدن قد تآكل على الأرجح بشكل كلي مغلغلاً وراءه فجوة على شكل القطعة الأصلية، وفي هذه الحالة يمكن ثقب الطبقة المتكلسة وملء التجويف بمادة الراتينج وذلك بغية إعادة تشكيل القطعة الأثرية، وإذا خامرنا أي شك حيال وجود معدن داخل الطبقة المتكلسة عندها يمكننا أن نضع مغناطيساً فوق هذه الطبقة، وهو بدوره سيقوم بجذب الحديد المعدني فقط وليس أكاسيد الحديد.

كما يمكن استخدام أداة قياس الأطوال الراتنجية، التي تحتوي على عدة عدادات وتستخدم لمعرفة مدى استمرارية الدارات، أو لمعرفة درجة المقاومة، حيث تعدّ هذه الأداة وسيلة تشخيص أكثر تعقيداً إلى حدّ ما من بقية الأدوات المستخدمة لمعرفة مدى سلامة القطعة الأثرية، ولتفعيل هذه الأداة لا بد من إزالة التكلسات من على القطعة

الأثرية في موضعين صغيرين، ومن ثم يتم تقريب مسباري هذه الأداة من القطعة الأثرية عند هذين الموضعين، فإذا سجل العداد دارة متصلة بمقاومة قليلة، أو بدون مقاومة فهذا يعني أن القطعة الأثرية تحتوي بشكل عام على نسبة من المعدن تكفي للقيام بعملية الترميم، وهنا تجدر الإشارة إلى أن القطعة الأثرية قد تحتوي في بعض الحالات النادرة على ما يكفي من المعدن لضمان استمرارية الدارة، إلا أن نسبة المعدن فيها قد لا تكفي للقيام بعملية الاختزال بواسطة المواد التي تنحل بالكهرباء، وهذا يعني أنه إذا انتابنا الشك بهذا الخصوص عندها يتوجب علينا القيام باختبار التصوير الشعاعي (radiographic)، الذي سنتحدث عنه لاحقاً. وعلينا أن نذكر أيضاً أن نسبة نجاح الاختبارات التي ذكرناها آنفاً تصل إلى ٩٩٪، بالنسبة للطبقات المتكلسة التي يتم فحصها، ولهذا السبب يعدّ جهاز التصوير الشعاعي (X-ray machine) من الكماليات بالنسبة لمختبرات التدخل الأدنى.

أما بالنسبة للتكلسات الأكثر تعقيداً، والتي تعدّ مهمة من الناحية الأثرية، فيجب التفكير ملياً قبل إخضاعها للتصوير الشعاعي؛ لأن آلات التصوير الشعاعي الطبية لا تتمتع غالباً بالقوة اللازمة للوصول إلى الجزء المتكلس والملوث في القطعة الحديدية، فإذا كان المرمم بحاجة لصورة شعاعية، فما عليه إلا أن يلجأ إلى الآلات الشعاعية الصناعية، التي بمقدورها أن تقدم صوراً شعاعية تتراوح قوة التيار الكهربائي أثناء إنتاجها ما بين ١٢٠ إلى ٣٥٠ كيلوفولت. كما يمكن للصور التي تنتجها أداة الكشف بأشعة إكس أن تكشف أدق تفاصيل القطعة الأثرية، مثل: التشكيلات الداخلية التي لا يمكن الوصول إليها بأي وسيلة أخرى، وإذا كان التلف والتحلل قد أصاب القطعة الأثرية بأضرار جسيمة، عندها تصبح أشعة إكس الوسيلة الوحيدة لاسترجاع المعلومات المتعلقة بهذه القطعة، وغالباً ما يكشف المسح السريع بواسطة أشعة إكس ما إذا كانت القطعة الأثرية بحاجة إلى تصوير شعاعي أم لا، أما بعد ظهور

الصورة الشعاعية فيمكننا أن نستنتج بأنه كلما كان لون ظل القطعة الأثرية فيها داكناً أكثر دل ذلك على زيادة كثافة القطعة وأصبح من السهل ترميمها، أما التناقض فيحدث حينما تتمتع بعض القطع الحديدية الأثرية بحالة جيدة للغاية بحيث يتم الاستغناء عن إعادة تشكيلها بواسطة الراتينج، وفي الوقت ذاته تكون هذه القطع متحللة للغاية بشكل يصعب معه ترميمها باتباع الطرق المذكورة في هذا الكتاب.

يمكن فحص وتحليل الطبقات المتكلسة المستخرجة من مواقع أثرية موجودة تحت سطح الماء باتباع الطرق التي سبق وأن أتينا على ذكرها بخصوص الكتل المتكلسة البرية ذات اللون البني، إذ ينبغي في البداية معرفة وزنها بشكل تقريبي وذلك عند حملها باليد، حيث يمكن للتكلسات المحيطية أن تكون أخف بكثير من الكتلة المتكلسة البنية؛ لأنه من الممكن للحديد الموجود داخلها أن يكون قد اختفى برمته نتيجة الوسط المحيط، وفي هذه الحالة يكون وزن كربيد الحديد وكربونات الكالسيوم قليلاً جداً مقارنة بوزن هذين العنصرين في حالة وجود الحديد، أما إذا كان الشك يساورنا حيال وجود الحديد أو عدم وجوده عندها يمكن للمغناطيس وللأداة ذات العدادات المتعددة أن تفي بالغرض إلى أن تنتهي عملية التحليل. وفي بعض الحالات النادرة يمكن اللجوء إلى التصوير بالأشعة في حال تمت مشاهدة قطع أثرية أخرى داخل الطبقة المتكلسة، أو حتى في حال الشك بوجود تلك القطع الأثرية داخلها.

### منهجية إزالة الطبقة المتكلسة

#### Concretion Removal—Methodology

تعتمد عملية إزالة الطبقة المتكلسة الموجودة فوق القطع الأثرية المستخرجة من مواقع جافة، أو من المحيط على صلابة القطعة، وذلك تبعاً لتحليل الطبقة المتكلسة الخاص بها.

أما بالنسبة للقطع الثقيلة المصمتة فإن بضع طرققات من المطرقة يتم توجيهها إلى سطح القطعة الأثرية بزاوية قدرها ٩٠ درجة قد تكفي لإزالة معظم الطبقة المتكلسة، في حين يمكن أن تتناثر أجزاء الطبقة المتكلسة، التي تشكلت في المحيط عند اللجوء إلى هذه الطريقة، أما الكتل المتكلسة ذات اللون البني فتحتاج إلى المزيد من العمل المختبري الدقيق. ويمكن إزالة معظم أجزاء الطبقة المتكلسة في الحقل شريطة أن يتم إعداد التحليل المناسب لها في وقت سابق، وبالنسبة للترتبات الخاصة بنقل كميات كبيرة من الطبقة المتكلسة فتعد من فضول الأمور، كونها مكلفة وقد تسبب المزيد من التآكل بالنسبة للقطع الأثرية المستخرجة من المحيطات.

يمكن القيام بعملية تنظيف دقيقة في المختبر، باستعمال أدوات فعالة كالمثقاب الهوائي، أو الكهربائي (انظر الفصل الأول)، وتقوم أعواد الأسنان وفراشي الأسنان باستكمال عملية التنظيف، التي بدأت مع المثقاب الهوائي، تماماً كما تكون عملية الغسل بمياه جارية خالية من الكلور متممة لما سبقها من خطوات، وقد تسبب هذه الخطوة حالة من الفوضى العارمة داخل المختبر، لذا يفضل القيام بها خارجه في حال تسنى ذلك.

أما إذا تم ترك الطبقات المتكلسة لتجف لأي سبب من الأسباب، أثناء مرحلة التخزين، فسينجم عن ذلك نتائج عدة: أولها أن دورة تجفيف القطعة الأثرية المستخرجة من موقع جاف قد تتوقف، أما بالنسبة للطبقات التي تكلست في المحيطات فيمكن أن تمتص الكربون الموجود في ذلك الوسط، وبذلك تصبح أكثر صلابة. وفي حال وجود طبقة متفحمة فوق القطعة الأثرية فإنها ستلتصق بالطبقة المتكلسة بقوة، وعند إزالة هذه الطبقة المتكلسة فإن طبقة الغرافيت (حديد الزهر) ستتكسر وسيختفي معها سطح القطعة الأثرية.

تُستخدم فرشاة ذات شعيرات ناعمة لتنظيف القطع الأثرية المصنوعة من حديد الزهر، أو تماسيح الحديد، بعد إزالة الطبقات المتكلسة عليها، وقد يبقى النسيج الكربوني ظاهراً على سطح القطعة الأثرية بحيث يبدو تماماً كالقطعة الأصلية، إلا أنه لا يتمتع بتلك الصلابة التي تساعد على مقاومة أي خدش.

بعد الانتهاء من عمليات الفك والغسل والتنظيف، يمكن للقطع الأثرية أن تنال نصيبها من آخر عملية للتنظيف بضغط الهواء مع الرمل (الرمالة)، وعملياً يعتمد حجم حجرة ضغط الرمالة على الهدف المرجو منها، حيث تستخدم هذه الحجرة في المجال الصناعي لتفتيت الرمل، أما في المختبر فيقل الاعتماد على الوسائل التي تحتوي على مواد كاشطة، وتستخدم عادة كريات سيليكات الألمنيوم لهذه الغاية، إذ تتحطم هذه الكريات فور اصطدامها بالقطعة الأثرية التي تبدأ بتشرب أكبر طاقة ممكنة أثناء عملية التحطم (لا بد من استبدال الكرات بعد فترة قصيرة من استعمالها)، ويتراوح حجم حبات الرمل هذه ما بين الناعم والمتوسط والمنتظم، وبالطبع فإنه كلما زادت نعومة سطح القطعة، التي يجب العمل عليها زادت العناية الواجب اتخاذها أثناء مرحلة التفتيت، ويجب ألا تخضع القطع المصنوعة من حديد الزهر أو تماسيح الحديد داخل وحدة التفتيت لأكثر من ٥٠ رطلاً من الضغط لكل بوصة مربعة، وهنا لا بد من استخدام وسائل التفتيت الكاشطة سواء الناعمة منها أو المتوسطة، حيث تبدأ وحدة التفتيت بـ ٢٥ رطلاً من الضغط، ومن ثم تزداد هذه النسبة إذا كانت عملية التفتيت غير مجدية، كما يجب أن ترتفع الفوهة عن القطعة مسافة ٤ إلى ٦ بوصات.

ويمكن للحديد المطاوع أن يتحمل بسهولة ما بين ٥٠ إلى ١٠٠ رطل من الضغط، مع حبيبات من الحجم المتوسط أو المنتظم، كما يجب المحافظة على المسافة ما بين الفوهة والقطعة الأثرية كما هي الحال مع حديد الزهر، ويجب تفتيت المساحات

الصغيرة المتكلسة فوق القطعة. وبعد ذلك لابد من معاينة القطعة الأثرية بالكامل قبل البدء بتنظيفها.

وتعتمد قوة الضغط أثناء عملية تفتيت الفولاذ اعتماداً كلياً على حالة المعدن، وعندها يمكن أن تتراوح نسبة الضغط ما بين ٢٥ إلى ١٠٠ رطل، وبالطبع فإنه كلما زادت صلابة المعدن زاد الضغط، الذي يمكن ممارسته على ذلك المعدن. ولا يمكن أن تعدّ حجرة التفتيت جزءاً من التجهيزات الأساسية لمختبر التدخل الأدنى، ولكن إذا تم استخراج القطع الأثرية وترميمها في ذلك المختبر، بشكل دوري ومتكرر عندها تصبح هذه الحجرة إلى جانب المثقاب الهوائي من التجهيزات الأساسية الواجب شراؤها، بعد المعدات المخبرية الرئيسة.

### منهجية التحليل الكهربائي بقوة تيار كهربائي ضعيفة

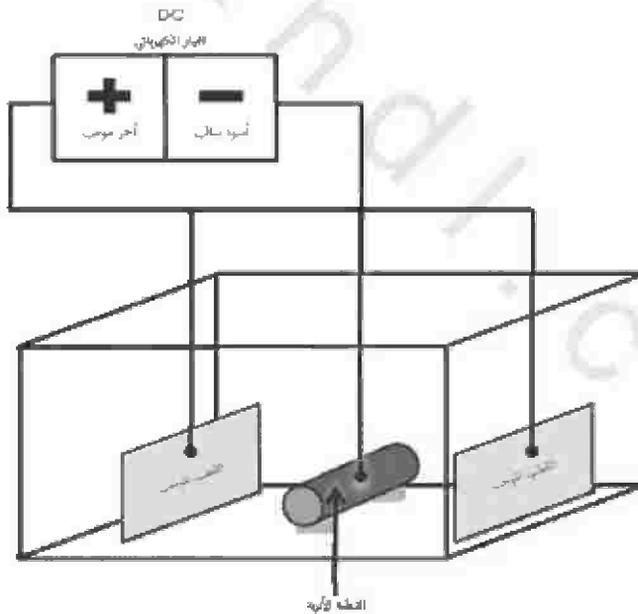
#### Low Amperage Electrolysis—Methodology

يُنصَح بتطبيق عملية الاختزال بمادة منحلّة بالكهرباء، أو ما يعرف بالتحليل الكهربائي بقوة تيار كهربائية ضعيفة على حديد الزهر وحديد التماسيح، وذلك منعاً لحدوث حالة التقشير لأي طبقة خارجية متفحمة يمكن أن تغطي القطعة الأثرية، فإثناء عملية التحليل الكهربائي ينطلق غاز الهيدروجين من القطعة الأثرية وذلك عند سطحها المعدني، فإذا كانت قوة التيار الكهربائي محدودة عندها تقل كمية الغاز المنبعثة، وبذلك تقل الكمية شيئاً فشيئاً بحيث يمكن أن يؤدي ذلك إلى إتلاف الطبقة الخارجية المتفحمة.

إن عملية التحليل الكهربائي هي عملية إلكتروكيميائية يتم من خلالها اختزال نواتج التآكل المتراكمة على الطبقة الخارجية للقطعة الأثرية إلى شكل أكثر ثباتاً من الحديد المعدني؛ لأن نواتج التآكل التي تم تعدينها تتمتع بمساحة سطحية ضئيلة مقارنة

مع المساحة التي يخلفها الصدأ العادي، الذي يساعد على توسيع مساحة السطح المسامي للقطعة الأثرية، ويتم خلال هذه العملية غسل القطعة الأثرية لإزالة أيونات الكلوريد، التي تغلغلت في المعدن، التي ستنقل حتماً إلى المحلول الذي يحتوي على مواد تنحل بالكهرباء.

وتعدّ الأدوات الخاصة بهذه العملية بسيطة إلى حدّ ما، ففي البداية يتم وضع القطعة الأثرية النظيفة داخل أحد الأحواض التي تستخدم لهذا الغرض، ويجب التأكد خلال هذه المرحلة من أن مروحة العادم الموجودة في المختبر تعمل أثناء انطلاق غازي الهيدروجين والأكسجين، خلال القيام بهذه العملية؛ لأنهما يحتويان على مركبات قابلة للانفجار.



الشكل (٢٠). التجهيزات الخاصة بعملية الاختزال بالتحليل الكهربائي يجب ألا تكون القطعة الأثرية على تماس مع القطبين الموجبين، بل ينبغي أن يحيط هذان القطبان بالقطعة الأثرية.

قام بالرسم التوضيحي: ناثان ريتشاردز

بعد ذلك يتم إعداد المحلول المنحل بالكهرباء، بإضافة كمية كافية من الماء إلى الحوض وتكون هذه الكمية أكبر قليلاً من الكمية اللازمة لغمر القطعة الأثرية، أما المحلول الخاص بعملية التحليل الكهربائي فيتم إعداده بخلط كمية من كربونات الصوديوم تتراوح نسبتها ما بين ٠.٢٥٪ إلى ٠.٥٪ ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) كربونات الصوديوم التجارية)، أو محلول بيكربونات الصوديوم ( $\text{NaHCO}_3$  - صودا الخبز)، وهذا ما يعادل ٠.٢٥ إلى ٠.٥ غرام من الصودا لكل ٩٩.٧٥ - ٩٩.٥ مل من الماء (يعدّ مقدار ١٠٠ مل من الماء كافياً). وتساعد النسبة المثوية للمحلول على ضبط قوة التيار الكهربائي، أو كمية الكهرباء التي تتدفق ضمن تلك المنظومة، إذ كلما أضفنا كمية أكبر من كربونات أو بيكربونات الصوديوم أصبح بمقدور الأيونات الحرة أن تحمل كميات أكبر من الكهرباء، ومن هنا كان لا بد من تسجيل قوة تيار كهربائي أكبر مع المحلول الذي تكون نسبته ٠.٥٪ في حين لا يتم ذلك مع المحلول ذي نسبة ٠.٢٥٪؛ لأن قوة التيار الكهربائي التي يسجلها شاحن البطارية مع المحاليل الخفيفة التي تكون نسبتها ما بين ٠.٢٥٪ إلى ٠.٥٪ يجب أن تكون أقل من ١ إلى ٧ أمبير، وذلك يعتمد على مساحة سطح القطعة الأثرية (انظر الملاحظة المتعلقة بالمواد المنحلة بالكهرباء ذات التركيز القليل).

وبعد إعداد المحلول ووضعه في الحوض ينبغي وضع قطبين فولاذيين موجبين من الحجم المتوسط بشكل مجاور للقطعة الأثرية، وهنا يجب التأكد من عدم وجود تماس ما بين القطبين الموجبين والقطعة الأثرية؛ لأن ذلك من شأنه أن يخلق دائرة معيبة، ثم يتم ربط القطبين الموجبين بالنهاية الموجبة (الأحمر) لمصدر توليد التيار الكهربائي المباشر بواسطة مشابك مسننة، بحيث يتم شحن هذين القطبين، عند تثبيت المشبك الخاص بمصدر توليد التيار الكهربائي المباشر إلى إحدى هذين القطبين الموجبين، إلى جانب

ربط صفيحتي القطبين بسلك توصيل صغير ومسنن ويشكل عرضي ليتصل بالتالي بالمشابك، وإن وضع تلك المشابك على رأس هذين القطبين خارج المحلول يغني عن الحاجة لتبديلها؛ لأنها تتعرض للتآكل بسهولة عند وضعها داخل المحلول.

ويجب أن تكون جميع التوصيلات مصنوعة من معدن صقيل مكشوف؛ وذلك ليتم ربطها بهذين القطبين الموجبين، فقد لا تساعد المشابك المسننة، التي يتم وضعها على الأسطح المطلية، أو المتآكلة على نقل التيار الكهربائي، وفي هذه الحالة يمكننا أن نستخدم مبرداً أو ورق صنفرة لتكوين نقطة تماس صفيلة ومكشوفة عند هذين القطبين. بعد ذلك يتم ربط القطعة الأثرية بالنهاية السالبة لمصدر توليد التيار الكهربائي المباشر (الأسود)، ويكون ذلك باستخدام مشبك مسنن (إذ إن هذا المشبك سيكون محمياً كما سيتم اختزاله مع القطعة الأثرية لذا لا ضير من أن يتعرض هذا المشبك للتآكل)، ويجب أن تكون نقطة التماس مؤلفة من معدن صقيل ومكشوف، ولذلك يجب تنظيف الأجزاء البعيدة للقطعة الأثرية وإزالة نواتج التكلس والتآكل من عليها، وكذلك من المشبك المتصل بالقطعة الأثرية، أما الخطة البديلة فتقوم على إزالة غلاف السلك ثم ربطه حول القطعة الأثرية، بحيث يمكن له أن يتصل بها مباشرة وأن يحدث مع القطعة الأثرية تماساً كهربائياً كافياً.

أما المشكلة التي غالباً ما تعيق عملية التحليل الكهربائي فتتجلى في المقاومة الكهربائية التي تبديها نقاط التماس؛ لأنه إذا لم تكن نقاط التماس على شكل معدن صقيل ومكشوف، عندئذ لا يمكن للدائرة أن تكتمل وستنتهي العملية بالفشل، ويمكن التحقق من استمرارية التوصيلات باستخدام المقياس متعدد المؤشرات، الذي يستخدم لقياس المقاومة، حيث يتم وضع مسباري هذا الجهاز على تماس مباشر مع جانبي المشبك المسنن، بحيث يكون التيار في أوجهه عند الجانب الأول ويضعف بعد خروجه

من الجانب الآخر، فإذا كانت قيمة المقاومة التي يظهرها الجهاز تساوي الصفر فهذا يعني أن عملية الاتصال مستمرة.

ويمكن لكل من حديد الزهر وحديد التماسيح أن يكونا عرضة لعملية تحليل كهربائي ذات قوة تيار ضعيفة مقدارها ٦ فولت، كما يجب أن يتحرك مؤشر قوة التيار الكهربائي عند مصدر توليد التيار المباشر ما بين ٠ إلى ٤ أمبير، بعد ذلك بفترة وجيزة تبدأ طبقة رقيقة من الضباب الذي تكوّن فقاعات الهيدروجين بالانبعاث من القطعة الأثرية.

### منهجية التحليل الكهربائي بقوة تيار كهربائي عالية

#### Higher Amperage Electrolysis—Methodology

يتم تطبيق هذه الطريقة على القطع الأثرية المصنوعة من الحديد المطاوع فقط؛ لأن هذا النوع من الحديد من المستبعد أن يتعرض للتلف - بخلاف حديد الزهر وحديد التماسيح - مع زيادة نسبة التيار والغازات التي تتولد نتيجة لذلك. ويتم عادة تخفيض نسبة الغاز المنبعثة إلى الحد الأدنى؛ لأنها تتعارض أحياناً مع مادة الكلور الموجودة في الماء أثناء عملية الغسل، لكنها قد تساعد في بعض المواضع على تنظيف الأثرية الموجودة داخل التشققات والصدوع، كما تعمل على إزالة الطبقات المتكلسة الصعبة.

وتكاد تكون المعدات والطريقة اللازمة للقيام بعملية التحليل الكهربائي بواسطة قوة تيار كهربائي عالية مشابهة تماماً لتلك التي تتم مع قوة تيار كهربائي منخفضة، إذ أن الفرق الوحيد بينهما يكمن في أن نسبة أكبر من محلول كربونات، أو بيكربونات الصوديوم (٠.٥٪ إلى ١٪) تستخدم مع التحليل الكهربائي بواسطة قوة تيار كهربائي عالية. كما يتم تحويل مصدر الطاقة الكهربائية بقوة ١٢ فولت بدلاً من ٦ فولت، وبما أن معظم مصادر توليد الطاقة لا تستطيع أن تولد أكثر من ١٠ أمبير كقوة للتيار

الكهربائي دون أن يتم إغلاقها أوتوماتيكياً، لذا تمت زيادة نسبة كربونات، أو بيكربونات الصوديوم؛ لأنها تستطيع أن تحمل شحنة كبيرة قبل أن يتم إغلاق شاحن البطارية في نهاية الأمر. ويمكن أن يشعر المرء بوخز خفيف لا يصل لدرجة خطر الموت أي بصعقة كهربائية خفيفة عند وضع البد داخل المحلول الخاص بعملية التحليل بالكهرباء؛ لأن قوة توليد الطاقة الكهربائية فيه تساوي ١٠ أمبير عند القوة التي تساوي ١٢ فولت.

ملاحظة حول المحاليل ذات التركيز القليل التي تستخدم

للقيام بعملية التحليل الكهربائي

**Note on Light Concentration Electrolyte**

تستخدم مختبرات الحد الأدنى من التدخل محاليل مخففة للغاية للقيام بعملية التحليل الكهربائي؛ وذلك لأسباب عدة، أولها: أن مصادر توليد التيار الكهربائي المباشر، التي تستخدم في تلك المختبرات هي عبارة عن شواحن بطاريات يمكن الحصول عليها من أي مستودع للخردوات، أو قطع السيارات، ولا يمكن لهذه الشواحن أن تتحكم بقوة التيار الكهربائي، كما أنها تعمل على تزويد الطاقة الكهربائية بالقدر المحدد لها (٦ أو ١٠ أمبير مثلاً). أما المحاليل المخففة التي تستخدم للتحليل الكهربائي فتحتفظ بشحنة التيار، التي يمكن للشاحن أن يستوعبها (١-٦ أو ١٠ أمبير)، بحيث تبدو على القطعة الأثرية كثافة تيار ضعيف للغاية، فالهدف الذي يمكن ملاحظته عند القيام بعملية التحليل الكهربائي يتمثل بإطلاق أقل قدر من غاز الهيدروجين؛ وذلك لأن إطلاق الغاز بشكل كبير يتعارض مع عملية غسل القطعة بطريقة التحليل الكهربائي. أما الطريقة المثلى لإطلاق الغاز بأدنى مستوياته فتم بقوة

تيار كهربائي تتراوح ما بين ٥٠ ميلي أمبير إلى ٢ أمبير، وذلك تبعاً لحجم القطعة الأثرية (كلما كبرت مساحة السطح زادت قوة التيار الكهربائي).

يُعدّ الاعتماد على شواحن البطاريات كمصدر لتوليد طاقة التيار المباشر عملية مجدية، إذ إنه يحقق أفضل النتائج بأقل التكاليف، حيث يمكن تحمل نفقاتها، كما تعدّ سهلة الاستعمال (حيث يمكن تركيب لوحة المفاتيح ببساطة ثم اختيار قيمة ٦ فولت)، ولقد أثبتت التجارب أنه لا داعي للقلق بشأن حالات اشتداد التيار، التي ينجم عنها كمية من الغاز تكفي لتفشير الطبقات الخارجية للقطعة، وفي حال استمرت هذه الحالة يمكن تعديل الشواحن بسهولة بواسطة مكثف (ضمن ٣٣٠٠ مايكرو من النطاق الحامل)، بحيث يتم ربطه بواسطة أسلاك معدنية بين القطبين السالب والموجب للتيار المتدفق، وذلك إذا رغبتنا بجعل التيار الكهربائي يتدفق بسلاسة.

وتعمل كمية الصودا التي يتم تحديدها بدقة على حلّ الكثير من المشكلات التي تقع في المختبرات، فالتخلص من بقايا محاليل الصودا القلوية المخففة للغاية والخالية من المواد السامة لا يعدّ مشكلة، وعندما يصيب هذا المحلول العين فإنه لا يحدث أية أضرار، أما بعض المواد الكاوية التي تنحل بالكهرباء كهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) فيمكن أن تسبب حروقاً جلدية في حال وقوع تماس مباشر مع القطعة الأثرية بعد مرور عدة أسابيع على عملية الغسل بالماء. ويمكن تطبيق عملية التحليل الكهربائي باستخدام محلول كربونات، أو بيكربونات الصوديوم المخفف على القطع الأثرية التي تحتوي على مركبات من الخشب والحديد (انظر الفصل الثامن)؛ وذلك لأن المادة المنحلة بالكهرباء لا تسبب ضرراً يذكر على الخشب خلال الفترة الزمنية المحددة لعملية المعالجة. كثيراً ما تترسب الكربونات غير المنحلة على القطع الأثرية في بعض المختبرات عند استعمال تركيزات عالية من الصودا التي تستخدم كمادة منحلة بالكهرباء، إذ تعدّ

التركيزات العالية مسألة غير ضرورية وفعاليتها ضعيفة؛ لأنه لا بد من تحييد تلك التركيزات قبل التخلص منها، وبذلك ستحمل كمية كبيرة من الشحنات الكهربائية مما يساعد على تقليل انبعاث الغاز إلى الحد الأدنى.

وفي الختام تبين أن معظم المختبرات تعتمد على المواد المنحلة بالماء ذات التركيز العالي لاختزال ما تأكل من القطبين الموجبين، وبعد ذلك الحَلّ معقولاً إذا كانت أحواض المعالجة مصنوعة من الفولاذ القابل للطرق، حينما يتم استخدام الحوض نفسه على أنه قطب موجب. بيد أن الأقطاب الموجبة التي تستخدم في مختبرات الحد الأدنى من التدخل تكون عبارة عن مجرد معادن خردة موضوعة داخل الحوض، حيث تتم التضحية بهذين القطبين الموجبين، اللذين تم الحصول عليهما بسهولة ويضمن بحس أيضاً؛ وذلك لحماية كل من فني الترميم والقطعة الأثرية، بذلك تصبح كلفة القطبين الموجبين أمراً لا يستحق الاهتمام، وهنا تجدر الإشارة إلى أنه حينما يتآكل القطب الموجب عندها تتحول المياه المستخدمة للمعالجة إلى مياه غير صافية حيث تبدأ الرغوة بتغطية سطحها، ثم يصبح لونها أحمر نتيجة لاحتوائها على نواتج التآكل، إذن هذا ما يجب علينا أن نتوقعه أثناء تلك المرحلة، وبعد ذلك يبدأ محلول التحليل بالكهرباء بالاستقرار ثم يصبح صافياً مرة أخرى بعد مرور بضعة أيام.

### اختبار الكلوريد - منهج العمل

#### Chloride Testing—Methodology

بما أن المبدأ الذي تقوم عليه عملية التحليل الكهربائي يعتمد على اختزال نواتج التآكل وغسل الأيونات سالبة الشحنة من الحديد، التي هي في معظمها عبارة عن أيونات الكلوريد، لذا ينبغي للمحلول الخاص بعملية التحليل الكهربائي أن يعطي مؤشراً واضحاً عن الوقت اللازم للوصول إلى عملية الغسل بالماء، وعلى الرغم من

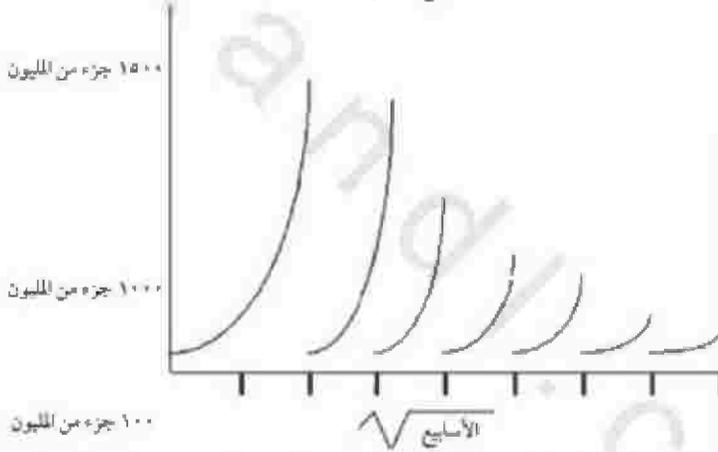
أنه يمكن القيام بذلك نظرياً، إلا أنه لم يتم إنشاء أي روابط تحليلية ما بين بداية مرحلة عودة حالة التآكل ضمن القطعة الأثرية إلى نشاطها وكمية الكلوريد، التي تتم إزالتها بغسل القطعة أثناء المعالجة، أو بين كمية الكلوريد الموجودة في المحلول الخاص بعملية الغسل وكمية الكلوريد، التي لا تزال موجودة في المعدن.

وقد تبرز مشكلات أخرى عند استعمال نسبة الكلوريد كمؤشر للمدة الزمنية اللازمة للقيام بعملية المعالجة؛ لأن نسبة الكلوريد التي يمكن حسابها لأي قطعة أثرية صغيرة موضوعة داخل حوض معالجة كبير لن تكون كافية لتغيير النسبة الكلية للكلوريد الموجود في المحلول الخاص بعملية التحليل بالكهرباء، وهذا ما قد يضل بعض المرممين، الذين قد يتوصلون إلى نتيجة مفادها أن القطعة الأثرية لا تحتوي على أي نسبة من الكلوريد، ولهذا علينا أن ندرك تماماً أن عملية اختبار نسبة الكلوريد ليست مجرد عملية حسابية، كما أنها ليست عملية ضرورية لإجراء التحليل الكهربائي، إذ تعتمد عملية اختبار نسبة الكلوريد على النسبة ما بين مساحة سطح القطعة الأثرية إلى حجم حوض المعالجة، وكمية الكلوريد الموجودة في القطعة الأثرية، وحجم القطعة الأثرية بالنسبة لحجم الحوض، وهل هي مسامية البنية أم لا. أما بالنسبة لعملية الترميم، التي نتحدث عنها في هذا الكتاب، فإننا ننصح بالقيام بعملية قياس نسبة الكلوريد وتمثيلها بخط بياني فقط مع القطع الأثرية الكبيرة التي قد تستغرق عملية معالجتها لشهور طويلة أو ربما لسنوات.

يمكن مبدئياً النظر لعملية اختبار نسبة الكلوريد على أنها خط بياني للكلوريدات، التي يتم قياسها بأجزاء المليون (ppm) في محلول الغسل، الذي تم تعيينه مقابل الزمن اللازم للقيام بتلك العملية، فعندما يتم إزالة الكلوريدات بالماء تتغير نسبتها داخل محلول الغسل إلى حد ما، ولذا فإنه لا يمكن لضغط للكلوريدات أن يشتد معيقاً بذلك إتمام عملية الغسل (انظر الشكل).

وعموماً فإنه عندما يكشف الاختبار الأسبوعي للكلورايد عن نسبة ١٠٠٠ إلى ١٥٠٠ جزء من المليون أو أكثر، فإن ذلك يفيد بأن المحلول قد تغير وبأنه قد تمت إزالة عناصر التآكل عن القطبين الموجبين بعد تنظيفهما. وقد تعدّ فكرة تنظيف وغسل القطعة الأثرية بواسطة فرشاة مصنوعة من النايلون فكرة رائعة، وذلك لإزالة التكتلات العنيدة وللتخلص من المخلفات ونواتج التآكل الرخوة الموجودة على سطح القطعة الأثرية.

الشكل التالي الخاص بغسل شوارد الكلورايد  
للقطع الأثرية الكبيرة فقط



الشكل (٢١). رسم بياني لعملية غسل الكلورايد من على القطع الحديدية الأثرية كبيرة الحجم، وذلك بأجزاء من المليون لنسبة تركيز أيونات الكلورايد مقابل الوقت المقاس بالأسابيع، والذي تم تقسيمه إلى مربعات (العدد الكلي: ٦٤ أسبوعاً).

وقد يشير التركيز بقيمة ٥٠٠ جزء من المليون بعد مرور عدة أسابيع على البدء بعملية المعالجة إلى ضرورة القيام بتنظيف المحلول، أو تغييره، كما يتعين تغيير المحلول في نهاية الأمر عند ١٠٠ جزء من المليون، وعندما يمكن استبدال المياه المقطرة، أو مياه

الأمطار، أو تلك الخالية من الشوارد بمياه الصنبور، وذلك للتخلص من أي مصدر خارجي يحتوي على الكلوريدات أثناء القيام بتلك العملية. وعندما تقترب نسبة تركيز أيونات الكلور من ٥٠ جزءاً من المليون فهذا يعني أن عملية المعالجة قد انتهت وأن القطعة الأثرية جاهزة لعملية الغسل النهائية.

ثمة طرق عديدة لقياس نسبة أيونات الكلوريد، غير أن بعض هذه الطرق ما هو إلا مصدر لإنتاج مواد كيميائية سامة، أما الاختبار الحقيقي، الذي قدمناه في هذا الكتاب فهو اختبار بسيط وآمن ولا يلوث البيئة، ويمكن القيام به بوضع عينة صغيرة من المحلول الخاص بالتحليل الكهربائي في كأس نظيفة ومدرجة حتى ٥٠ مل يوضع بها شريط معايرة الكلور (متوفر لدى المراكز المتخصصة ببيع المواد الخاصة بالأبحاث العلمية)، وعندما تقترب كمية المحلول الكافية إلى قمة الشريط، يمكننا عندئذ أن نقرأ ما هو موجود على خط المؤشر الأبيض، بحيث تتم مقارنة ذلك بما هو وارد في الجدول بخصوص أجزاء المليون لأيونات الكلوريد. وإذا تم البدء بعملية الاختزال بفعل المواد المنحلة بالكهرباء بالنسبة لمياه الصنبور، عندها يجب طرح نسبة التركيز العادية لأيونات الكلور الموجودة في مياه صنابير مدينة معينة من الرقم الذي يدل على نسبة الكلوريد الإجمالية؛ وذلك لحساب نسبة دقيقة للكلور اللازم لعملية الغسل بالماء، وبالنسبة للقطع الأثرية الأكبر حجماً كالمذبح، أو المرساة فتستغرق عملية الاختزال بواسطة التحليل بالكهرباء فيها فترة زمنية تزيد عن ٤ سنوات.

أما الفترات الزمنية البسيطة فيمكن اعتمادها كدليل جيد على المدة الزمنية اللازمة لمعالجة القطع الأثرية الصغيرة، التي لا يتجاوز حجمها حجم الدبوس، أو المسامير، أو الإبريم بحيث ينبغي ألا تتجاوز عملية تحليلها كهربائياً فترة أسبوع إلى ثلاثة أسابيع. ويجب ألا يتم تبديل المحلول أسبوعياً إلا حينما تتسخ القطعة الأثرية بشكل كبير بفعل الأملاح، كما يجب تطبيق نسبة ليتر واحد، أو أكثر من المحلول لكل قطعة أثرية،

أما بالنسبة للقطع الأثرية الكبيرة كالمزلاج و قطع آلة الصب والمسامير الكبيرة وسبطانات البنادق فيجب أن تخضع للمعالجة لفترة تزيد عن ثلاثة أشهر مع تبديل المحلول بمعدل مرة كل أسبوعين.

وختاماً، فإن الطريقة الوحيدة التي لا تقبل الجدل فيما يتعلق بمعرفة ما إذا كانت الفترة الزمنية الخاصة بعملية المعالجة بالتحليل الكهربائي، قد عملت على تثبيت القطعة الأثرية هي ببساطة مراقبة القطعة أثناء مرحلة التخزين، فإذا بدأت بالتآكل في أي وقت من الأوقات (حتى لو كان ذلك بعد مرور عدة سنوات)، أو عند ارتشاح أي سائل بني اللون ذي قوام زيتي منها فهذا يعني أن القطعة الأثرية بحاجة لمزيد من المعالجة بطريقة الاختزال.

### منهجية عملية الغسل النهائية

#### Final Wash—Methodology

بعد انتهاء القطعة الأثرية من عملية التحليل الكهربائي لابد وأن تخضع لعملية تنظيف نهائية بواسطة فرشاة ذات شعيرات مصنوعة من النايلون إلى جانب معجون مصنوع من بيكربونات الصوديوم ومياه مقطرة، أو خالية من الأيونات، حيث تضمن عملية غسل القطعة ونقعها بالماء المقطر لمدة ساعة إزالة بقايا معظم المواد المنحلة بالكهرباء إلى جانب التخلص من آثار البيكربونات.

ولتنظيف القطع الأثرية الصلبة لابد من غليها بمحلول يحتوي على كربونات، أو بيكربونات الصوديوم بنسبة ٢٪ وذلك لمدة ساعتين، ولكن ينبغي عدم القيام بعملية الغلي هذه إذا كان في القطعة بعض المناطق، التي يمكن أن تتعرض للكسر، أو التفتت. بعد ذلك يتم غسل القطعة بالماء ثم نقعها بمياه مقطرة، وهكذا تكون جميع القطع الأثرية في هذه المرحلة خالية من الكلوريد، لذا يمكن حملها باليد دون ارتداء القفازات الواقية من الآن وحتى نهاية عملية المعالجة.

## منهجية عملية التجفيف من الماء

## Dehydration—Methodology

ثمة طريقتان أساسيتان ينصح باتباعهما لتجفيف القطع الحديدية وهما طريقة التجفيف بواسطة الفرن، التي تستخدم مع الحديد المطاوع وطريقة التجفيف باستخدام المواد المذيبة وتستخدم مع حديد الزهر. ويعدّ الحديد المطاوع أقسى وأصلب من حديد الزهر، كما لا يحتوي على طبقة متفحمة مما يمنع تقشر سطحه أثناء عملية التجفيف، وعلى الرغم من أنه يمكن للحديد المطاوع أن يتآكل بفعل مخلفات السيليكات، إلا أنه لن يصاب بأية تصدعات متغلغلة في عمق القطعة الأثرية بأي حال من الأحوال كما هي حال بعض القطع المصنوعة من حديد الزهر، حيث تقوم هذه الصدوع بالضغط على القطعة عند تبخر المياه فيها مما يؤدي إلى تفتت القطعة في نهاية المطاف.

تبدأ عملية تجفيف القطع الأثرية المصنوعة من الحديد المطاوع بواسطة الفرن بتسخينه لدرجة ٣٥٠ فهرنهايت، أو ١٧٧ درجة مئوية، ومن ثم يجب إخراج القطعة الأثرية من المياه المقطرة ووضعها داخل الفرن لمدة ٢٤ إلى ٤٨ ساعة، بحيث تعتمد الفترة الزمنية اللازمة للتجفيف على النسيج السطحي للقطعة الأثرية، وإجمالاً فإنه كلما كان النسيج أخشن زادت الفترة المخصصة لعملية التجفيف، وغالباً ما تتشكل كمية ضئيلة من أكسيد الحديد البرتقالي قبل تبخر الماء أثناء القيام بهذه العملية، إلا أن ظهور هذه المادة لا يعدّ مشكلة حقيقية إذ يمكن تنظيفها بواسطة قطعة قماش بعد غمسها بالكحول، غير أن وجود الأكسيد لن يؤثر على المظهر الجمالي النهائي للقطعة الأثرية بأي حال من الأحوال.

وتعدّ عملية التجفيف بواسطة مادة مذيبة من أكثر العمليات دقة، والتي يمكن اتباعها لتجفيف القطع الأثرية المصنوعة من حديد الزهر، أو حديد التماسيح، إضافة إلى جميع القطع الأخرى التي تبدي حساسية إزاء الحرارة كالعلب المعدنية ذات

الأجزاء الملتحمة، أو القطع الأثرية التي لازالت تحتفظ بشيء من الطلاء، أو تلك التي خضعت لمعالجات سطحية. وتقوم عملية التجفيف بالمادة المذيبة على وضع القطعة الأثرية في ثلاثة حمامات متتابعة من الأسيتون والكحول الذي تغيرت خواصه الطبيعية، وتعدّ المذيبات العضوية من المواد القابلة للاشتعال لذا لابد من أخذ الحيطة والحذر وإبعادها عن مصادر النار، كما يمكن أن تتسبب بعدد من المشكلات الصحية لذا ينبغي عدم استنشاق الأبخرة المتصاعدة منها أثناء استعمالها كما يجب تجنب التماس المباشر بينها وبين الجلد لفترة طويلة.

وبالعودة إلى عملية التجفيف فإنه يجب ألا تقل مدة وضع القطعة في أي حمام عن الساعة، كما ينبغي عند إخراج القطعة من الحمام الأول وضعها داخل مادة مذيبة جديدة ومن ثم يتم تكرار العملية لضمان إزالة الماء كلياً، ومن الواضح أن هذه العملية أعلى وأخطر بكثير من عملية التجفيف بالقرن، إلا أن تأثيرها ألطف على القطع، التي تتم معالجتها. وهنا لابد من التذكير بضرورة تغطية أحواض المواد المذيبة وكتابة أسمائها عليها بشكل واضح، كما يجب حفظ المواد المذيبة التي تم استعمالها ضمن علب معدنية لتستخدم مع قطع أثرية أخرى.

### منهيجة استعمال حمض التانيك

#### Tannic Acid Application—Methodology

أكدت نشرات بيانات سلامة المواد أن حمض التانيك يتحول إلى مادة مسرطنة عند التعرض إليه لفترات طويلة، لذا يجب أن يقتصر استخدامه على العمليات التي تجري خارج المختبر في الهواء الطلق، أو داخل الغرف التي تمت تهويتها بشكل جيد، كما يجب ارتداء قفازات مطاطية وقناع واق أثناء استخدامه للمقيام بعملية المعالجة، ويتعين عدم وضعه على سطح القطعة الأثرية وذلك لأسباب تاريخية وجمالية.

يقتصر استخدام حمض التانيك على السطح الخارجي للقطعة الأثرية لسببين ، أولهما: أنه مادة تمنع حدوث أي تآكل للقطعة الأثرية رغم أنه مادة حمضية ؛ وذلك لأنه يعمل على تشكيل مركبات عضوية معقدة تساعد على تثبيت سطح القطعة الأثرية التي تتم معالجتها ، أما السبب الثاني فيرجع إلى أن هذا الحمض يعيد للقطعة الأثرية لونها الأسود الصحيح ، الذي عرفت به على مدى التاريخ .

وعند استخدام حمض التانيك ينبغي أولاً ترك القطعة الأثرية حتى تبرد بعد إخراجها من فرن التجفيف ، أو لتجف بفعل الهواء بعد تخفيفها بواسطة المذيبات ، ثم يتم مزج مقدار ٥٪ من حمض التانيك بالكحول (٥ غرامات من حمض التانيك في ٩٥ مل من الكحول) ، وبعد ذلك يتم وضع هذا المزيج بواسطة فرشاة فوق سطح القطعة الأثرية ، التي قد تحتاج إلى تغطيتها بذلك المزيج لعدة مرات ، وذلك للحصول على اللون الداكن الذي سيظهر على كامل القطعة الأثرية ، وينبغي تجنب استعمال الماء كمذيب لمادة حمض التانيك ؛ لسبب واضح وهو أن القطعة الأثرية قد تم تخفيفها من الماء للتو .

### منهجية تطبيق الحماية

#### Protectant Application—Methodology

لابد من إضافة حاجز نهائي مانع للرطوبة إلى السطح ، الذي يغطي معظم القطع الأثرية المصنوعة من الحديد ؛ وذلك لمنع الرطوبة من معاودة الدخول إلى القطعة مما يؤدي إلى تآكلها ، حيث ينبغي إضافة هذا الحاجز مباشرة بعد وضع مادة حمض التانيك ، أو بعد عملية التجفيف في حال عدم استخدام المادة الحمضية .

ويمكن تغطية القطع الأثرية الصغيرة ومتوسطة الحجم ببلورات شمعية دقيقة (يمكن الحصول عليها من المراكز التي تقوم بتأمين معدات ولوازم الترميم) ، أما الوعاء الخاص بالشمع فيجب أن يكون إناء واسعاً يتمتع بحواف عالية (يشبه في شكله مشواة

الديك الرومي)، بحيث يمكن وضعه عند أعلى الموقد، كما يجب أن يكون مجهزاً بأكثر من موقد واحد. وتتمتع حبيبات الشمع الدقيقة بدرجة حرارة عالية عند الذوبان بالنسبة للشمع حيث تصل إلى ١٧٥ فهرنهايت (٧٩ درجة مئوية)، وتتم عملية إذابة هذه الحبيبات الشمعية عند أعلى الموقد تم تثبيتها بتلك الأداة. وهنا لا بد من التنبيه إلى وجوب تشغيل مروحة العادم؛ وذلك لأن الدخان المتصاعد أثناء إذابة الشمع يمكن أن يسبب تهيجاً، أو تحسناً، وعند الانتهاء من عملية إذابة الشمع يمكن تحديد درجة حرارة متوسطة، أو منخفضة الحرارة، ولكن يجب أن تحافظ المادة الشمعية على درجة حرارة تتراوح ما بين ٢١٠ إلى ٢٢٠ فهرنهايت (٩٨,٩ إلى ١٠٤ درجة مئوية)، وتساعد سلة الأسلاك على تدعيم القطع الأثرية، التي تخضع للمعالجة كما تجنب المرمم البحث وسط المادة الشمعية عن القطعة الأثرية بواسطة أي أداة.

عند وضع القطعة الأثرية داخل المادة الشمعية المذابة تبدأ هذه المادة بإطلاق فقاعات كثيرة، وذلك لخروج المزيد من الماء من سطح القطعة الأثرية بفعل حرارة الشمع، وعادة ما تهدم تلك الفقاعات بعد مرور ساعتين، أو أقل من الزمن، وعند انتهاء مرحلة الفقاعات ما علينا سوى أن نجعل الموقد على وضع "درجة حرارة منخفضة"، ثم ننتظر لمدة ساعة وبعدها يمكن إخراج سلة الأسلاك والقطعة الأثرية من المادة الشمعية، بعد ذلك نضع السلة في وعاء حتى تتساقط منها قطرات الشمع الزائدة أثناء مرحلة التبريد، كما يجب أن تهدم بالأصابع بلطف قبل أن يجمد الشمع.

إلا أنه ثمة بعض المخاطر التي تحيط بعملية تغطية القطع الأثرية بالحبيبات الشمعية الدقيقة، فخطر التعرض للحروق وارد جداً حين التعامل مع المادة الشمعية المذابة لذا ينبغي أخذ الحيطة لمنع وقوع أي منها، كما ينصح بارتداء قفازات واقية من الحرارة العالية، وذلك أثناء العمل في مكان ما حول الموقد، وعلينا ألا ننسى خطر نشوب أي

حريق نتيجة التعامل مع المادة الشمعية الساخنة ، ولتجنب ذلك يجب أن يتواجد المرسم في الغرفة وأن يقوم بالمراقبة المستمرة للتأكد من وضع حبيبات الشمع الدقيقة.

وتعمل مرحلة التغطية بحبيبات الشمع الدقيقة على تخفيف القطعة الأثرية وحمايتها من رطوبة الجو، كما يمكن إعادة التغطية، أو إزالتها بأي وقت من الأوقات، وذلك بواسطة الماء المغلي، أو عند إدخال القطعة إلى الفرن، إلا أن تغطية القطع الأثرية الكبيرة بالشمع تعدّ عملية غير مجدية.

ويمكن أن تتم التغطية بواسطة مادة اللك المصفى (Shellac)، الذي يستخدمه المرسمون منذ سنوات ويستعملونه بطريقة ناجحة كونه يعمل كحاجز ضد الرطوبة، حيث يمكن وضعه على القطعة باستخدام فرشاة دهان، أو مرش، ويمكن ترقيق قوام هذه المادة، أو إزالتها بالكحول عند اللزوم.

تصبح القطع الأثرية بوضع آمن فور انتهاء عملية المعالجة حيث يمكن حملها والتعامل معها باليد، ولكن ينبغي حفظها ضمن شروط مناخية يمكن التحكم بها، إلا أنه ينبغي للحرارة النموذجية ألا تزيد عن بضع درجات كما يجب أن تتراوح الرطوبة النسبية بين ٤٠٪ إلى ٥٠٪.

### خاتمة

#### Conclusion

تمثل القطع الأثرية الحديدية تحدياً كبيراً لكل من عالم الآثار والمرسم؛ وذلك لأن القليل فقط من بين عمليات معالجة القطع الحديدية ينتمي إلى فئة العمليات، التي تتميز بكونها آمنة وخالية من المواد السامة فضلاً عن سهولة تطبيقها، حيث تعدّ العمليات التي تعتمد على تيار كهربائي ضعيف وعلى التحليل الكهربائي لشحنة خفيفة إلى جانب عملية الجلفنة من العمليات الآمنة والفعالة والسهلة، أما نتائج عملية

ترميم القطع الأثرية الحديدية المستخرجة من منطقة أثرية ما فيجب أن تكون كبيرة، في حين تكون عملية شرحها وتفسيرها عملية أسهل وأكثر دقة؛ وذلك لأن التنقيب الدقيق يكشف تفاصيل لم تتم مشاهدتها من قبل، وعندها يمكن إعادة معاينة القطعة الأثرية بعد تثبيتها حتى بعد فترات زمنية غير محددة أثناء مرحلة التخزين.

وتبدأ عملية ترميم الحديد وغيره من المعادن فعلياً مع مرحلة التخطيط الملائم، وذلك قبل استرجاع القطع الأثرية من مناطق برية، أو من الماء عبر أحد المشاريع الأثرية، وكما سيتضح لنا فيما بعد، فإن جميع القطع الأثرية المعدنية ستستفيد جراء عملية استعادة حالة الثبات حيث يتم وضع القطع الأثرية في هذه المرحلة داخل محلول تخزين قلوي، كما يتم تغليفها برفاعة من الألنيوم عند نقلها إلى المختبر.

### المراجع

- Adams, Christopher. "The Treatment of the BMW801D-2 Radial Aero Engine Rescued from the Loiret River." The Laboratories of Groupe Valectra: Electricite de France, 1992. [ECU-581]
- Aldaz, A., T. Espana-V. Montiel, and M. Lopez-Segura. "A Simple Tool for the Electrolytic Restoration of Archaeological Metallic Objects with Localized Corrosion." *Studies in Conservation* (1986): 175-176. [ECU-0386]
- Allsopp, Dennis & Kenneth J. Seal. "An Introduction to Biodeterioration: Metals." *An Introduction to Biodeterioration*. Edward Arnold, London 1986. [ECU-570]
- "All Right Troops—Fan Out and Find Every Last Artwork." *Smithsonian* Vol. 26 No. 1, 1995, pp. 140-149. [ECU-783]
- Alsop, Joseph. "Warriors from a Watery Grave." *National Geographic* 163 (1983): 820-827. [ECU-271]
- Ambrose, W.R. and M.J. Murrin. "Secondhand Metal Conservation and Industrial Archaeology of Shipwreck Artifacts." *Archaeometry: Further Australasian Studies* (Canberra, Australia) (1987): 280-291.
- Anon. "Facts Surface about Bugs and Disappearing Oil Rigs." *New Scientist* 87 (1980): 591. [ECU-0277]
- Anon. "Making a Meal of Iron." *Science News* 132 (1987): 104. [ECU-106]
- Anon. "Suggested Techniques and Equipment for Cleaning and Stabilizing of Corroded Iron Artifacts." [ECU-572]

- Argo, James. "A Qualitative Test for Iron Corrosion Products." *Studies in Conservation* 26, No. 4 (1981): 140-142. [ECU-166]
- . "On the Nature of Ferrous Corrosion Products on Marine Iron." *Studies in Conservation* 26 (1981): 42-4. [ECU-120]
- . "The Treatment of Corrosion with Amines." *Conservation News* 17 (1982): 7-9.
- Arrhenius, O. "Corrosion on the Warship *Wasa*." (Swedish Corrosion Institute Bulletin) 48 (1967).
- Ashton, John. "Conservation Notes: Maintenance of Japanese Swords." Australian War Memorial. [ECU-583]
- Ashworth, V. and R.P.M. Procter. "The Role of Coatings in Corrosion Prevention—Future Trends." *Journal of the Oil and Colour Chemistry Association* 56 (1973): 478-490. [ECU-133]
- Baker, H.R., R.N. Bolster, P.H. Leach, and C.R. Singleterry. "Examination of the Corrosion and Salt Contamination of Structural Metal from the USS *Tecumseh*." (Naval Research Laboratory Memorandum) (1987).
- Barker, B.D., K. Kendell, and C. O'Shea. "The Hydrogen Reduction Process for the Conservation of Ferrous Objects." *Conservation of Iron* (1982): 23-27. [ECU-279]
- Barkman, L. "Preservation of Large Iron Objects." *Proceedings* (First Southern Hemisphere Conference on Marine Archaeology) (1987): 127-128.
- Biasini, V. and E. Cristoferi. "A Study of Corrosion Products on Sixteenth and Seventeenth Century Armour from the Ravenna National Museum." *Studies in Conservation* Vol. 40 No. 4, 1995, pp. 250-256. [ECU-660]
- Birchena, L.E., and R.A. Meussner. "Principles of Gaseous Reduction of Corrosion Products." *NBS Special Publication* (United States) (1977): 3857.
- Black, J.W.B. "Choosing a Conservation Method for Iron Objects." *Conservation of Iron* (1982): 15. [ECU-281]
- Blackshaw, S.M. "An Appraisal of Cleaning Methods for Use on Corroded Iron Antiquities." *Conservation of Iron* (1982): 16-22. [ECU-280]
- Bobichon, C., C. Degrigny, F. Dalard, and Q.K. Tran. "An Electrochemical Study of Iron Corrosion Inhibitors in Aqueous Polyethylene Glycol Solutions." *Studies in Conservation*, Vol. 45 No. 3, 2000, pp. 145-153. [ECU-661]
- Bradley, G.W. and J.A. Smith. "Removal of Iron Oxide Deposits without Feric Ion Corrosion." *Materials Protection and Performance* 12 (1973): 48-52. [ECU-130]
- Brady, P.R., G.N. Freeland, R.J. Hine, and R.M. Hoskinson. "The Absorption of Certain Metal Ions by Wool Fibers." *Textile Research Journal* 44 (1979): 733-735.
- Bright, Leslie S. "Electrolytic Reduction of Two Large Cannon from the USS *Peterhoff*." (Unpublished Manuscript, North Carolina Department of Archives and History) [n.d.]. [ECU-423]

- Bright, Leslie S. "Preservation of a Cannon from the USS *Peterhoff*." (Unpublished Manuscript, North Carolina Department of Archives and History) (1967). [ECU-422].
- Bright, Leslie S. "Recovery and Restoration of Steam Machinery from the Snagboat *General H.G. Wright*." *Proceedings* (Underwater Archaeology Society for Historical Archaeology Conference) (1989): 121-143. [ECU-17]
- Brown, B.F., H.C. Burnett, et al., ed's. *Corrosion and Metal Artifacts: A Dialogue Between Conservators and Archaeologists and Corrosion Scientists* (U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards Special Publication No. 479, Washington D.C.) (1977).
- Brownsword, R. and E.E.H. Pitt. "A Medieval Weight from the *Mary Rose*." *International Journal of Nautical Archaeology* 15 (1986): 161-163. [ECU-157]
- Burgess, David. "Metals and their Conservation." *Chemical Science and Conservation*. London: Macmillan, 1990. [ECU-575]
- Butler, G. and H.C.K. Ison. *Corrosion and its Prevention in Waters*. New York: Robert E. Krieger, 1978.
- Campbell, Harry H. *The Manufacture and Properties of Iron and Steel*. New York: McGraw Hill, 1907.
- Campbell, H.S. "The Corrosion Factor in Marine Environments." *Metals and Materials* 1:8 (1985): 479-483. [ECU-135]
- Campbell, H.S. and D.J. Mills. "A Metallurgical Study of Objects Salvaged from the Sea." (Report CDC, BNF Metal Users Consulting Service) (December 1976).
- . "Marine Treasure Trove—A Metallurgical Examination." *Metallurgist and Materials Technologist* 9/10 (1977): 551-556. [ECU-0224]
- Cantelas, Frank. "Aircraft Corrosion." E-mail sent to Brad Rodgers, December 2001, Greenville, NC. [ECU-585]
- Carlin, Worth and Donald H. Keith. "An Improved Tannin-Based Corrosion Inhibitor-Coating System for Ferrous Artifacts." *International Journal of Nautical Archaeology*. Vol. 25 No. 1, 1996, pp. 38-45. [ECU-663]
- Carline, Worth, Donald Keith, and Juan Rodriguez. "Galvanic Removal of Metallic Wrought Iron from Marine Encrustations." *International Journal of Nautical Archaeology* Vol. 31 No. 2, 2002, pp. 293-299. [ECU-748]
- CCI Laboratory Staff. "An Inexpensive and Simple Tacking Iron." *CCI Notes* (Canadian Conservation Institute) 18/1 (1995). [ECU-551]
- CCI Laboratory Staff. "Care and Cleaning of Iron" *CCI Notes* (Canadian Conservation Institute) 9/6 (1995). [ECU-537]
- CCI Laboratory Staff. "Storage of Metals" *CCI Notes* (Canadian Conservation Institute) 9/2 (1995). [ECU-536]
- CCI Laboratory Staff. "Tannic Acid Treatment." *CCI Notes* (Canadian Conservation Institute) 9/5 (1989). [ECU-465]
- CCI Laboratory Staff. "Recognizing Active Corrosion." *CCI Notes* (Canadian Conservation Institute) 9/1 (1991). [ECU-354]

- Cheek, P. "Conservation of Cannon at Chatham Historic Dockyard." *International Journal of Nautical Archaeology* 15 (1986): 253-254. [ECU-156]
- Clarke, R.W., and Susan M. Blackshaw, eds. *Conservation of Iron*. (Monograph No. 53, National Maritime Museum, Greenwich, U.K.) (1982). [ECU-289]
- . *Conservation of Iron* (Monograph No. 53, National Maritime Museum, Greenwich, U.K.) (1982). [ECU-289]
- Corfield, Michael. "Radiography of Archaeological Ironwork." *Conservation of Iron* (1982): 8-14. [ECU-282]
- "Corrosion on Riotinto Pier at Huelva." *British Corrosion Journal* Vol. 28 No. 1, 1993, pp. 253-258. [ECU-664]
- "Corrosion in Saline and Sea Water." *Corrosion Prevention and Control*. Vol. 39 No. 4, 1992, pp. 99-104. [ECU-665]
- "Cor-trol Vapor Corrosion Inhibitors." Corroless North America, Stamford, CT. [ECU-584]
- Costerson, J. William, et al. "Bacterial Biofilm in Nature and Disease." *Annual Review of Microbiology* 41 (1987): 435-464.
- Dalard, F., Y. Gourbeyre, and C. Degrigny. "Chloride Removal from Archaeological Cast Iron by Pulsating Current." *Studies in Conservation* Vol. 47 No. 2, 2002, pp. 117-121. [ECU-666]
- Daniels, L., N. Belay, B.S. Rajagopal, and Paul J. Weimer. "Bacterial Methanogenesis and the Growth for CO<sub>2</sub> with Elemental Iron as the Sole Source of Electrons." *Science* 237 (1987): 509-511. [ECU-26]
- Dettner, Heinz W. *Elsevier's Dictionary of Metal Finishing and Corrosion* (1971).
- Dillmann, P., R. Balasubramaniam, and G. Beranger. "Characteristics of Protective Rust on Ancient Indian Iron Using Microprobe Analysis." *Corrosion Science I* Vol. 44 No. 10, 2002. [ECU-662]
- Duncan, S.I. "Chloride Removal from Iron: New Techniques." *Conservation News* 31 (1986): 21-23.
- Dunton, John V.N. "The Conservation of Excavated Metals in the Small Laboratory." *The Florida Anthropologist* 7:2 (1964): 37-43. [ECU-421]
- Edwards, Marc and Nicolle Sprague. "Organic Matter and Copper Corrosion By-product Release: A Mechanistic Study." *Corrosion Science* Vol. 43 No. 1, 2001. [ECU-667]
- Eriksen, Egon and Svend Thegel. "Conservation of Iron Recovered from the Sea." *Tojhusmuseets Skrifter* (1966): 8.
- . "Conservation of Iron Recovered from the Sea." *Tojhusmuseets Skrifter* (Abstract and Conclusion) (1966): 93-97. [ECU-0030]
- Evans, Ulick R. "The Rusting of Iron: Causes and Control." *Studies in Conservation* (London) No. 7 (1972).
- "Facts Surface about Bugs and Disappearing Oil Rigs." *New Scientist* 87 (1980): 591. [ECU-277]
- "F6F Hellcat Preservation Plan." Revision: A 950424. [ECU-589]

- Fem, Julia D., and Kate Foley. "Passivation of Iron." *Conservation in Archaeology and the Applied Arts* (Contributions to the 1975 Stockholm Conference, N. Brommelie and P. Smith, eds., IIC-London) (1975): 195-198.
- Foley, V.P. "Another Method for the Treatment of Ferrous Artifacts." *Florida Anthropologist* 18:3 (1965):65-68. [ECU-396].
- . "Suggested Design and Construction for Small Laboratory Electrolysis Apparatus." *Proceedings* (Conference on Historic Site Archaeology Papers 1965-1966, Vol. 1) (1967): 100-110.
- Ford, Bruce. "Materials for the Traditional Care of Japanese Swords." [ECU-592]
- Forth, Karl D. "Detox for Airplanes." *Aviation Equipment Maintenance* 10:8 (1991): 46-47. [ECU-365]
- Friendly, Alfred. "An Ocean Relic is Given New Life." *Smithsonian* 5:12 (1975): 90-95. [ECU-275]
- Fontana, Bernard L. "The Tale of a Nail: on the Ethnological Interpretation of Historic Artifacts." *The Florida Anthropologist Papers of the 5th Annual Historic Sites Conference*. Vol. 18 No. 3, Part 2, September 1965.
- Geckle, Robert A. "How Ultrasonics Gets the Dirt Out." *Metal Progress* 108 (1975): 35-39. [ECU-225]
- Gilburg, Mark R. "Storage of Archaeological Iron in Deoxygenated Aqueous Solutions." *Journal of the IIC-CG* 12 (1987): 20-27. [ECU-123]
- Gilberg, Mark R., and Nigel J. Seeley. "The Identity of Compounds Containing Chloride Ions in Marine Iron Corrosion Products: A Critical Review." *Studies in Conservation* 26 (1981): 50-56. [ECU-223]
- . "The Alkaline Sulphite Reduction Process for Archaeological Iron: A Closer Look." *Studies in Conservation* 27:2 (1982): 180-184. [ECU-123]
- . "Liquid Ammonia as a Solvent and Reagent in Conservation." *Studies in Conservation* 27 (1982): 38-44. [BCU-395]
- Green, Jeremy N., G. Henderson, and N. North. "A Carronade from the *Brig James*: Its History, Conservation, and Gun Carriage Reconstruction." *International Journal of Nautical Archaeology* [n.d.] [ECU-244]
- Greene, Virginia. "The Use of Benzotriazole in Conservation." (ICOM Committee for Conservation, Madrid) (1972).
- . "The Use of Benzotriazole in Conservation." *ICOM Proceedings* (Committee for Conservation, 4th Triennial Meeting, Venice) (1975): 1-10.
- Gregory, David. "Monitoring the Effect of Sacrificial Anodes on the Large Iron Artifacts on the Duart Point Wreck, 1997." *International Journal of Nautical Archaeology* Vol. 28 No. 2, 1999, pp 164-173. [ECU-670]
- Hamilton, Donny L. *Conservation of Metal Objects from Underwater Sites: A Study in Methods*. Austin: Texas Memorial Museum & The Texas Antiquities Committee, 1976. [ECU-4]
- . "Electrolytic Cleaning of Metal Articles Recovered from the Sea." *Science Diving International* (N.C. Flemming, ed., Proceedings of the Third Symposium of the Scientific Committee of the Confederation Mondiale des Activités Subaquatiques, London) (1973): 96-104.

- , *Basic Methods of Conserving Underwater Archaeological Material Culture*. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense Legacy Resource Management Program, January 1996. [ECU-610]
- Hansen-Hjelm, Nils. "Cleaning and Stabilization of Sulphide-Corroded Bronzes." *Studies in Conservation* 29 (1986). [ECU-0241]
- Hodges, Henry. "Iron and Steel." *Artifacts*. London: John Baker, 1964. [ECU-571]
- Hoyt, Cathryn. "Protecting Damaged Concretions Underwater." (Unpublished Manuscript, Bermuda Maritime Museum) (1986). [ECU-485]
- "Inhibition of Corrosion of Iron and Aluminum." *British Corrosion Journal* Vol. 31 No. 3, 1996, pp. 161–240. [ECU-671]
- Jobling, Jim. "The Conservation of Cast Iron Cannon from the Chandeleur Islands." *Proceedings* (Underwater Archaeology, Society for Historical Archaeology, Tucson, Arizona) Toni Carrell, ed. (1990): 97–100.
- Katzev, Michael J. and F.H. Van Doornick, Jr. "Replicas of Iron Tools from a Byzantine Shipwreck." *Studies in Conservation* 2:3 (1966): 133–142. [ECU-343]
- Keene, Suzanne, ed. *Corrosion Inhibitors in Conservation*. (Occasional Papers No. 4, United Kingdom Institute for Conservation, London) (1985).
- Keene, Suzanne, and Clive Orton. "Stability of Treated Archaeological Iron: An Assessment." *Studies in Conservation* 30 (1985): 136–142. [ECU-494]
- Knight, B. "Why do Some Iron Objects Break Up in Store?" *Conservation of Iron* (1982): 50–55. [ECU-286]
- Knowles, E. and T. White. "The Protection of Metals with Tannins." *Journal of Oil and Colour Chemists Association* 41 (1958): 10–23. [ECU-495]
- LaQue, F.L. "Corrosion by Sea Water: Behaviour of Metals and Alloys in Sea Water." *The Corrosion Handbook* H.H. Uhlig, ed., New York: John Wiley and Sons, 1975: 383–430.
- Lemer, G.M. "The Cleaning and Protective Coating of Ferrous Metals." *Bulletin of the IIC-AG* 12:2 (1972): 97–108.
- Lewis, W.D. *Iron and Steel in America*. Hagley Museum, Wilmington, Delaware, 1976.
- Logan, Judith A. "Conservation of Corroded Iron Artifacts—New Methods for On-site Preservation and Cryogenic Deconcreting." *International Journal of Nautical Archaeology* 16:1 (1967): 49–56. [ECU-153]
- , "An Approach to Handling Large Quantities of Archaeological Iron." *Proceedings* (ICOM Committee for Conservation, 7th Triennial Meeting, Copenhagen) (1984). [ECU-360]
- , "The Longest Treatment in the History of CCI." *CCI Newsletter* Spring–Summer (1989): 4–6. [ECU-50]
- , "Tannic Acid Treatment." *CCI Notes* 9/5 (1991). [ECU-351]
- Lucey, V.F. "The Mechanism of Dezincification and the Effect of Arsenic. I." *British Corrosion Journal* 1 (1965): 9–14. [ECU-141]
- MacLeod, Ian Donald. "A Microphotographic Review of Corrosion Phenomena from a Shipwreck." *ICOM Bulletin* 9 (1981): 92–96.

- , "In-Situ Corrosion Studies on the Duart Point Wreck, 1994" *International Journal of Nautical Archaeology* Vol. 24 No. 1, 1995, pp. 53–59. [ECU-672]
- , "The Application of Corrosion Science to the Management of Maritime Archaeological Sites." *Bulletin of the Australian Institute for Maritime Archaeology* 13:2 (1989): 7–16.
- , "The Electrochemistry and Conservation of Iron in Seawater." *Chemistry in Australia* 56:7 (1989): 227–229.
- , "The Longest Treatment in the History of CCI." *CCI Newsletter* (Spring-Summer 1989): 4–6. [ECU-50]
- , "Conservation Management of Iron Steamships—The SS *Xantho* (1872)." *Proceedings* (Fifth National Conference on Engineering Heritage, Perth) (1990): 75–80.
- , "In-Situ Corrosion Studies on Iron and Composite Wrecks in South Australian Waters: Implications for Site Managers and Cultural Tourism." *Bulletin of the Australian Institute for Maritime Archaeology* Vol. 22, 1998. [ECU-784]
- MacLeod, Ian Donald and Neil A. North. "350 Years of Marine Corrosion in Western Australia." *Corrosion Australasia* 5:3 (1980): 11–15.
- "Making a Meal of Iron." *Science News* 132 (1987): 104. [ECU-106]
- Mardikian, Paul and Ren'e David. "Conservation of a French Pistol from the Wreck of *Le Cygne* (1808)." *Studies in Conservation* Vol. 41 No. 3, 1996, pp. 161–169. [ECU-673]
- Morris, R. "Ferrous Clib Concretion on Small Gems." *International Journal of Nautical Archaeology* 13:1 (1984): 65–70.
- Moyer, Curt. "Archaeological Conservation Forum." *Newsletter* (Society for Historical Archaeology) (1990): 19–21. [ECU-305]
- "Navy Board's Report to the Admiralty on the First Coppering Experiment—31 August, 1763." *American Neptune* I (1941): 304–306. [ECU-116]
- North, Neil A. "Formation of Coral Concretions on Marine Iron." *International Journal of Nautical Archaeology* 5:3 (1976): 253–256. [ECU-61]
- , "Electrolysis of Marine Iron." *Proceedings* (First Southern Hemisphere Conference on Maritime Archaeology, Melbourne) (1977): 145–147.
- , "Corrosion Products on Marine Iron." *Studies in Conservation* 27:2 (1982): 75–83. [ECU-222]
- , "Electrolysis of Marine Iron." *Proceedings* (First Southern Hemisphere Conference on Maritime Archaeology, Melbourne) (1977): 145–147.
- , "The Role of Galvanic Couples in the Corrosion of Shipwreck Metals." *International Journal of Nautical Archaeology* 13 (1984): 133–136. [ECU-62, 595]
- North, Neil A. and M. Owens. "Design and Operation of a Furnace for H<sub>2</sub> Reduction of Marine Iron." *International Journal of Nautical Archaeology* 10:2 (1981): 95–100. [ECU-63]
- North, Neil A., M. Owens, and Colin Pearson. "Thermal Stability of Cast and Wrought Marine Iron." *Studies in Conservation* 21 (1976): 192–197. [ECU-387]

- North, Neil A. and Colin Pearson. "Alkaline Sulfite Reduction Treatment of Marine Iron." *Proceedings* (ICOM Committee for Conservation, 4th Meeting) (1975).
- , "Investigations into Methods for Conserving Iron Relics Recovered from the Sea." *Conservation in Archaeology and the Applied Arts* (IIC, London) (1975): 173–181.
- , "Thermal Decomposition of FeOCl and Marine Cast Iron Corrosion Products." *Studies in Conservation* 21 (1977): 146–157. [ECU-176]
- , "Washing Methods for Chloride Removal from Marine Iron Artifacts." *Studies in Conservation* 23 (1978): 174–186. [ECU-179]
- , "Recent Advances in the Stabilization of Marine Iron." *Conservation of Iron Objects Found in Salty Environments*, R. Organ, E. Nosek, and J. Lehmann, eds. (Historical Monuments Documentation Center, Warsaw, Poland) (1978): 26–38.
- , "Methods for Treating Marine Iron." *Proceedings* (ICOM Committee for Conservation, 5th Triennial Meeting, Zagreb) (1978): 1–10.
- , "Long Term Corrosion of Wrought and Cast Iron in Seawater." *Proceedings* (6th International Congress on Metallic Corrosion in Sydney 1975, Australian Corrosion Association 6) (1981): 269–283.
- Notoya, T. and G.W. Poling. "Protection of Copper by Pretreatment with Benzotriazole." *Corrosion* 35:5 (1979): 193–200. [ECU-151]
- O'Donnell, E.B. and Maureen M. Julian. "Conservation of Two Brass Gudgeons from the 1781 Wreck of HMS *Culloden*." *Proceedings* (16th Conference on Underwater Archaeology) (1985): 79–80. [ECU-68]
- Oddy, W.A. "Toxicity of Benzotriazole." *Studies in Conservation* 19:3 (1974): 188–189. [ECU-340]
- , "A Review of Procedures for the Conservation of Cast and Wrought Iron Found on the Sea Bed." *International Journal of Nautical Archaeology* 4 (1975): 367–370. [ECU-64]
- Oddy, W.A. and M.J. Hughes. "The Stabilization of 'Active' Bronze and Iron Antiquities by the Use of Sodium Sesquicarbonate." *Studies in Conservation* 15 (1970): 183–189. [ECU-390]
- Organ, Robert M. "The Consolidation of Fragile Metallic Objects." *Recent Advances in Conservation* G. Thanson, ed. (IIC, London) (1963): 128–134.
- Organ, Robert M. "Conservation of Iron Objects." *Historical Archaeology* 1 (1967): 52–54. [ECU-383]
- Parr, J. Gordon. "The Sinking of the *Ma Robert*: An Excursion into mid-19th Century Steelmaking." *Technology and Culture* 13 (1972): 209–225. [ECU-246]
- Pascoe, M.W. "Final Discussion." *Conservation of Iron* (1982): 68–69. [ECU-0283]
- , "Organic Coatings for Iron: A Review of Methods." *Conservation of Iron* (1982): 56–57. [ECU-285]
- Patscheider, J. and S. Veprek. "Application of Low-pressure Hydrogen Plasma to the Conservation of Ancient Iron." *Studies in Conservation* 31:1 (1986): 29–37. [ECU-190]

- Pearson, Colin. "Cannon Survive 200 Years Under the Sea." *Foundry Trade Journal* 132:2882 (1971): 307-310. [ECU-143]
- , "The Conservation of Metals." *The Conservation of Marine Archaeological Objects*. Butterworths, London 1987. ECU-567]
- , "The Preservation of Iron Cannon after 200 Years Under the Sea." *Studies in Conservation* 17 (1972): 91-110. [ECU-73]
- , "Restoration of Cannon and Other Relics from HMS *Endeavour*." (Department of Supply, Australian Defence Scientific Service Defense Standards Lab, Report No. 508) [n. d.] [ECU-72]
- Pearson, Colin and Neil A. North. "Methods for Treating Marine Iron." *Proceedings (International Committee for Conservation, IIC, 5th Triennial Meeting, Zagreb) (1978).*
- Pelikan, J.B. "Conservation of Iron with Tannin." *Studies in Conservation* 11 (1966): 109-114. [ECU-0389]
- Pourbaix, Marcel. "Significance of Protection Potential in Pitting Intergranular Corrosion and Stress-Corrosion Cracking." *Journal of Less Common Metals* 28 (1972): 51-69. [ECU-142]
- Rees-Jones, S.G. "Some Aspects of Conservation of Iron Objects from the Sea." *Studies in Conservation* 17:1 (1972). [ECU-0334]
- "Restoring Old Ironsides." *National Geographic* Vol. 191 No. 6, 1997. [ECU-785]
- Rinuy, A. and F. Schweizer. "Application of the Alkaline Sulphite Treatment to Archaeological Iron: A Comparative Study of Different Desalination Methods." *Conservation of Iron* (1982): 44-49. [ECU-287]
- Robinson, Wendy S. "Observations on the Preservation of Archaeological Wrecks and Metals in Marine Environments." *International Journal of Nautical Archaeology* 10:1 (1981): 3-14. [ECU-418]
- , "The Corrosion and Preservation of Ancient Metals from Marine Sites." *Nautical Archaeology*. Vol. 11 No. 3, 1982: 221-231. [ECU-574]
- Rodgers, Bradley A. "Conservation of the Chesapeake Bay Mystery Gun." *Underwater Archaeology Proceedings*, Society for Historical Archaeology Conference (1989): 134-137. [ECU-80]
- , "The Case for Biologically Induced Corrosion at the Yorktown Shipwreck Archaeological Site." *International Journal of Nautical Archaeology* 18:4 (1989): 335-340. [ECU-0079]
- , *The East Carolina University Conservator's Cookbook: A Methodological Approach to the Conservation of Water Soaked Artifacts*. Herbert, R. Paschal Memorial Fund Publication, East Carolina University, Program in Maritime History and Underwater Research, 1992. [ECU-402]
- Sanders, John W. "Swivel Guns of Southeast Asia." *Gun Digest*. Ken Warner, ed. Northfield, IL: DBI Books, Inc., 1982, pp. 68-75. [ECU-533]
- Schrier, L.L., ed. "Tannins to Control Corrosion." *New Scientist* (1961): 403.
- , *Corrosion*, Vol. 1, *Corrosion of Metals and Alloys*. John Wiley: New York, 1963.

- Schwarzer, J. and E.C. Deal. "A Sword Hilt from the Serce Limon Shipwreck." *MASCA* 4:2 (1986): 2-50.
- Scott, David A. and N.J. Seely. "The Washing of Fragile Iron Artifacts." *Studies in Conservation* 32 (1987): 73-76. [ECU-384]
- Sease, Catherine. "Benzotriazole: A Review for Conservators." *Studies in Conservation* 23 (1978): 76-85. [ECU-192]
- Selwyn, L.S., P.J. Sirois, and V. Argyropoulos. "The Corrosion of Excavated Archaeological Iron With Details on Weeping and Akaganeite." *Studies in Conservation* Vol. 44 No. 4, 1999, pp. 217-232. [ECU-674]
- Selwyn, L.S., W.R. McKinnon, and V. Argyropoulos. "Models for Chloride Ion Diffusion in Archaeological Iron." *Studies in Conservation* Vol. 46 No. 2, 2001, pp. 109-120. [ECU-675]
- Semczak, Carl M. "A Comparison of Chloride Tests." *Studies in Conservation* 22 (1977): 40-41. [ECU-126]
- Skinner, Theo. "The Conservation of Some Cast Iron Ammunition by the Alkaline Sulphite Method." (The Laboratories of the National Museum of Antiquities of Scotland II) [n. d.]: 1-19.
- Smith, C.A. "Early Corrosion Investigations." *Corrosion Protection and Control* 24:1 (1973): 6-13. [ECU-147]
- Smith, C. Wayne. "Iconography of the Archangel Michael on Pail Weights from Excavations at Port Royal Jamaica." *International Journal of Nautical Archaeology* Vol. 28 No. 4, 1999. [ECU-786]
- South, Stanley A. "A Method of Cleaning Iron Artifacts." *Newsletter of the Southeastern Archaeological Conference* 9:1 (1962): 17-18. [ECU-419]
- South, Stanley A. "Notes on Treatment Methods for the Preservation of Iron and Wooden Objects." (Unpublished manuscript, North Carolina Department of Archives and History, Brunswick Town) [n. d.]. [ECU-420]
- Southwell, C.R., J.D. Bultman, and A.L. Alexander. "Corrosion of Metals in Tropical Environments-Final Report of 16-Year Exposures." *Material Performance* 15:7 (1976): 9-25. [ECU-152]
- Staicopolus, D.N. "The Role of Cementite in the Acidic Corrosion of Iron." *Journal of the Electrochemical Society* 110:11 (1963): 1121-1124. [ECU-273]
- Stone, George C. *A Glossary of the Construction, Decoration, and Use of Arms and Armor in All Countries and in All Times*. Portland, ME: The Southworth Press, 1934. [ECU-534]
- Tower, Howard B., Jr. "Conserving Metal Artifacts: A Positive Solution in a Negative Situation." *Skin Diver* (July 1989): 19, 180-184. [ECU-425]
- Turgoose, S. "The Nature of Surviving Iron Objects." *Conservation of Iron* (1982): 1-7. [ECU-278]
- Tylecote, R.F. *A History of Metallurgy*. London: The Metals Society, (1976).
- Tylecote, R.F. and J.W.B. Black. "The Effects of Hydrogen Reduction on the Properties of Ferrous Materials." *Studies in Conservation* 25 (1980): 87-96. [ECU-175]

- Tyler, J.C. "The Recovery of the *Endeavour's* Cannons." *Australian Natural History* 16:8 (1969): 281-288.
- U.S. Government Printing Office. "Corrosion and Metal Artifacts: A Dialogue Between Conservators and Archaeologists and Corrosion Scientists." (NBS Special Publication 479; U.S. Government Printing office, Washington D.C.) [n. d.].
- Various. "Archaeological Conservation Forums: 'The Curse of Iron—current research,' In Massachusetts—Can the curse be lifted, Urban Archaeology." *SHA Newsletter* Vol. 19 No. 4, December 1986. [ECU-569]
- Videla, H.A. and M.F.L. de Mele. "Microfouling of Several Metal Surfaces in Polluted Sea Water and Its Relation with Corrosion." *Corrosion* 87 (Paper No. 365, NACE, San Francisco) (1987). [ECU-0490]
- Vincent, D. "Successful Conservation of *De Surville* Anchors." (*Art Galleries and Museums Associations of New Zealand*) 8:1 (1977): 4-5.
- von Wolzogen Kuhr, C.A.H. and L.S. Vander Vlugt. "The Graphitization of Cast Iron as an Electrochemical Process in Anaerobic Soils." *Water* 18:147 (1934).
- "The Role of Corrosion Inhibitors in the Conservation of Iron." *Conservation of Iron* (1982): 58-67. [ECU-284]
- Walker, Robert. "The Instability of Iron Sulfides on Recently Excavated Artifacts." *Studies in Conservation* Vol. 46 No. 2, 2001, pp. 141-152. [ECU-676]
- Washington Cannon Paperwork and Research. [ECU-604]
- Watkinson, David. "An Assesment of Lithium Hydroxide and Sodium Hydroxide Treatments for Archaeological Ironwork." *Conservation of Iron* (1982): 28-43. [ECU-288]
- Weaver, Martin. "Fighting Rust." *The Journal of the Association for Preservation Technology* 9:1 (1987): 16-18. [ECU-99]
- White, John R. "Cleaning Heavily Encrusted Iron Artifacts by Cacination and Induced Spalling." *Curator* 19:4 (1976): 311-315. [ECU-150]
- Williams, M.E., R.A. King, and J.D.A. Miller. "Sulfate-Reducing Bacteria, Surface Coatings, and Corrosion." *Journal of the Oil and Colour Chemistry Association* 56:8 (1973): 363-368. [ECU-0134]
- Wranglen, Gosta. *An Introduction to Corrosion and Protection of Metals*. New York: Chapman and Hall, 1985.