

## تحرّي التقصف الهيدروجيني لفولاذ تسليح الخرسانة المعالج بطريقة الفسفتة بهدف الحماية من التآكل

- \* الدكتور أحمد سليمان الحسن  
\*\* الدكتور حسان محيي الدين حامد  
\*\*\* عارف محمد السويداني

(قبل للنشر في 2004/8/11)

### □ الملخص □

رغم أن أغطية الفسفتة شائعة الاستعمال في الصناعة لحماية المعادن من التآكل، إلا أنها لم تستعمل سابقاً لمعالجة فولاذ التسليح. وبما أن معالجة السطوح المعدنية تتم عادةً في أوساط حمضية، فإن تولد الهيدروجين خلال مراحل المعالجة قد يؤدي إلى ظاهرة تدعى التقصف الهيدروجيني. وتهدف هذه الدراسة إلى المقارنة بين الخواص الميكانيكية لعينات فولاذ تسليح مفسفتة في مغاطس عدة (مغطس قياسي، مغطس قياسي مع إضافات)، وعينات أخرى غير مفسفتة تركت لأغراض المقارنة. وقد أجريت دراسة المقارنة من خلال تنفيذ مجموعة من الاختبارات الميكانيكية (شد، انحناء، إعادة انحناء) على العينات السابقة. وقد أظهرت نتائج الدراسة، أن معالجة العينات في مغاطس الفسفتة المختلفة لم يكن لها أي تأثير يذكر على الخواص الميكانيكية لهذه العينات.

**الكلمات المفتاحية:** التقصف الهيدروجيني، التآكل، أغطية الفسفتة، فولاذ التسليح، الخواص الميكانيكية، ديمومة الخرسانة.

\* أستاذ في كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق-دمشق-سوريا.

\*\* أستاذ مساعد في كلية الهندسة البتروكيميائية - جامعة البعث-حمص-سوريا.

\*\*\* طالب دراسات عليا في كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق-دمشق-سوريا.

## Detection of Hydrogen Embrittlement of Concrete Reinforcing Steel Treated by the Phosphating Method for Protection against Corrosion

Dr. Ahmad Al-Hassan\*

Dr. Hassan Hamed \*\*

Aref Al-Swaidani \*\*\*

(Accepted 11/8/2004)

### □ ABSTRACT □

The use of phosphate coating is well known in industry for protecting metals against corrosion, but it was never used before for treating the reinforcing steel. Hydrogen is generated during the treatment of metallic surface by acids, as in phosphating method. This generation may lead to a phenomenon called "Hydrogen Embrittlement".

This paper aims at a comparative study between phosphated and non-phosphated reinforcing steel samples. Many types of phosphating paths (standard, and standard with addition) were used for this purpose.

This study was conducted through mechanical tests. (tensile, bend and rebend) applied on the previous samples. The results showed that there were no variations in the mechanical properties during the phosphating process phases.

**Key words:** Hydrogen embrittlement; corrosion, phosphate coatings, reinforcing steel, mechanical properties, durability of concrete.

---

\*Professor- Faculty Of Civil Engineering, Damascus University –Damas- Syria.

\*\* Assistant Professor -Faculty Of Petrochemical Engineering, Al-Baas University –Homs-Syria.

\*\*\* Structural - Eng -Faculty Of Civil Engineering, Damascus University- Damas- Syria.

## مقدمة:

لا يزال التدهور المبكر (premature deterioration) للمنشآت الخرسانية المسلحة، أحد أهم المشاكل التي تواجه مهندسي الإنشاء (التشييد) حول العالم، علماً بأن تآكل فولاذ التسليح هو السبب الرئيسي لهذا التدهور المبكر [1،2،3]. علاوةً على ذلك فقد ذكر [Malric] بأن أكثر من (80%) من تصدعات المنشآت الخرسانية المسلحة كان سببه تآكل فولاذ التسليح [4].

وفي مواجهة هذه المشكلة، برزت في ميدان صناعة البناء عدة اتجاهات لمنع، أو الحد من تآكل فولاذ التسليح المغموس في الخرسانة. ومن أهم هذه الاتجاهات [5]:

- تحسين جودة الخرسانة
- زيادة ثخانة الغطاء الخرساني لفولاذ التسليح
- حماية سطح الخرسانة
- تطبيق الحماية الكاثودية
- حماية فولاذ التسليح عند السطح البيني للفولاذ والخرسانة

وقد طبقت الطريقة الأخيرة المذكورة للحماية بأكثر من حالة، منها على سبيل المثال حالة أغشية الالايوكسي الملتصق بالصهر (Fusion-bond epoxy coatings) وحالة الفولاذ المغلفن (Galvanized steel). وبغض النظر عن الاحتياطات الكثيرة المطلوبة في التعامل مع قضبان التسليح المطلية بالالايوكسي، ونقصان قوة التماسك بينها وبين الخرسانة، إضافة إلى استحالة تطبيق طرائق التشخيص أو الاختبار الكهروكيميائية على هذه القضبان، فقد أظهرت عدة دراسات تعرض مثل هذه القضبان لتآكلٍ شديد بعد ست سنواتٍ فقط من وضعها في الاستثمار [6،7]. أما الغلظة فهي أصلاً محدودة الحياة الاستثمارية نظراً لوظيفتها المرتكزة في الأصل على توفير الحماية لفولاذ التسليح عن طريق التضحية بذاتها [8].

وفي دراسة [9] لسلوك تآكل قضبان فولاذ التسليح المعالجة بطريقة الفسفة، والتي تعد واحدة من طرائق معالجة السطوح الأوسع انتشاراً في الصناعة حول العالم [10]، أظهرت هذه الدراسة نتائج إيجابية، فيما يتعلق بتحسين مقاومة تآكل القضبان المفسفة عند التعرض لأوساط عدوانية تجاوز فيها كثيراً محتوى الكلوريدات الحدود المسموح بوجودها في الخرسانة.

و رغم الحصول على هذه النتائج الإيجابية لمقاومة التآكل التي تبديها القضبان المعالجة بطريقة الفسفة، إلا أنه لا بد من إجراء العديد من الأبحاث والدراسات المتممة الأخرى للتحقق من مدى ملاءمة هذه المعالجة للاستعمال في حقل الخرسانة المسلحة. من بين هذه الدراسات، نظراً لمعالجة القضبان الفولاذية في أوساط حمضية خلال بعض مراحل تنفيذ عملية الفسفة، دراسة بيان مدى تأثير قضبان فولاذ التسليح بهذه المعالجة، خصوصاً من ناحية التحقق من حدوث ظاهرة التقصف الهيدروجيني (Hydrogen Embrittlement) التي يمكن أن تصيب الفولاذ خلال مراحل المعالجة بالحموض، والتي تؤدي بالنتيجة إلى هشاشة الفولاذ وانقطاعه عند تعرضه إلى إجهادات أقل بكثير من إجهاداته التصميمية.

إن الغرض من العمل الحالي هو تحري التقصف الهيدروجيني لفولاذ التسليح المفسفت من خلال التحقق من الخواص الميكانيكية لقضبان فولاذ التسليح (شد، استطالة، انحناء) بعد معالجتها بمحاليل فسفة مختلفة، وإجراء دراسة

مقارنة لهذه الخصائص بين عينات فولاذية (محلزنة، ملساء) مفسفة وأخرى غير مفسفة تم اختبارها كشاهد لأغراض المقارنة.

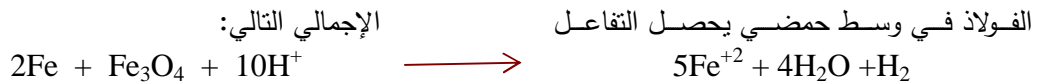
## خلفية نظرية:

### 1- التقصف الهيدروجيني (Hydrogen embrittlement):

التقصف الهيدروجيني للمعادن هو ظاهرة غير مفهومة، ولكن الاعتقاد الأكثر شيوعاً أنه يحدث عن طريق تنامي شق، يؤدي غالباً مع مرور الوقت إلى انكسارات في الأجزاء المعدنية دون وجود إجهاد مطبق خارجياً [11]. وعموماً فإنه قد جرى تعريف تقصف الفولاذ (embrittlement of steel) [12،13،14]، على أنه الضرر الذي يسببه الهيدروجين الذري (atomic hydrogen)، حيث يمكن للهيدروجين الذري (H) الناتج عن الاختزال الكاثودي للهيدروجين (H<sub>2</sub>) أن يتغلغل بواسطة الانتشار (diffusion) إلى داخل بنية الفولاذ، لم يتفاعل هو مع عناصر أخرى موجودة على سطح المعدن. وعندما يتجاوز محتوى الهيدروجين داخل الفولاذ عتبة معينة، فإن قدرة الفولاذ على التشوه (deformability) ستتناقص [14]. حيث أن الهيدروجين عندما ينتشر في الشبكة البلورية للفولاذ يجعل حركة الانفككات أو الانخلاعات (dislocations) بين الذرات داخل النسيج المعدني (metallic matrix) أكثر صعوبة، إضافة إلى أنه يخفض كذلك من طاقة الارتباط (cohesion energy) بين الذرات [12]، وإذا أصبحت هذه القدرة أدنى من التشوه المفروض فإن الفولاذ سيتشقق [14]، ويمكن أن ينكسر عند تعرضه لإجهادات أقل بكثير من إجهاد الخضوع (yield strength) للمادة، وهذه هي السمة المميزة للتقصف الهيدروجيني [15]، ومسار الانكسار في الفولاذ عادةً هو بين الذرات [11]، شكل رقم (1). إضافة إلى ذلك فإن ذرات الهيدروجين المتغلغلة داخل الفولاذ تميل إلى التجمع في قعر الشق، مما يؤدي إلى كبره وانتشاره [14]. وقد يخلط البعض بين التقصف الهيدروجيني والتآكل الشرخي الإجهادي (stress cracking corrosion) [12]، نظراً للنقاط المشتركة الكثيرة بينهما، إلا أنه يمكن التمييز بين هذين النوعين من التآكل عادةً من خلال الاستقطاب، فالاستقطاب الكاثودي يفاقم ظاهرة التقصف الهيدروجيني، من خلال زيادته لإنتاج الهيدروجين، في حين أنه يخفض من التآكل الشرخي الإجهادي من خلال تخفيضه الانحلال الأنودي. والاستقطاب الأنودي يفعل عكس ذلك تماماً [12]. لكن لا بد أيضاً من الإشارة إلى نقطة هامة، وهي أنه ليس بالضرورة وجود إجهاد مطبق في حالة التقصف الهيدروجيني [16].

وبشكل عام فإن الفولاذ الأكثر عرضةً لهذا النوع من الضرر، هو الفولاذ العالي المقاومة (high strength steel) [11،12،13،17]، أما الفولاذ الفيريتي المنخفض المقاومة ( $\sigma_R < 7000 \text{ kgf/cm}^2$ ) المستعمل عادةً في تسليح المنشآت الخرسانية العادية، فلا يصيبه عادةً مثل هذا النوع من الضرر. إلا أنه قد يحدث مثل هذا الضرر في الفولاذ العادي في الحالات التالية:

أ- أثناء عمليات التنظيف الحمضي للفولاذ (pickling) تمهيداً لمعالجته بهدف الحماية من التآكل [15،18،19]: إن تنظيف المعادن في وسط حمضي هو من أنواع المعالجة المولدة للهيدروجين، فعلى سبيل المثال عند معالجة الفولاذ في وسط حمضي يحصل التفاعل



حيث تختزل شوارد الهيدروجين إلى هيدروجين ذري الذي بدوره يتحد ليشكل غاز الهيدروجين [17،18].

ب- عند الإفراط في الحماية الكاثودية (cathodic overprotection): المقصود بالإفراط في الحماية الكاثودية هو تطبيق جهود استقطاب أعلى من الجهود المطلوبة، بزعم الحصول على حماية زائدة [11،12،17]. حيث يحصل عند الكاثود (سطح الفولاذ المحمي كاثودياً) تفاعل تفكك الماء (dissociation of water) الذي يولد الهيدروجين الذري (الوليد)، الناجم عن اختزال الهيدروجين الشاردي [11،17].

ج - في وجود غاز كبريت الهيدروجين ( $H_2S$ ) [16،20]: حيث ينتج هذا الغاز الهيدروجين الذري، من خلال انحلاله في طبقة الرطوبة المحيطة بالفولاذ، وتشرده إلى شاردتي كبريت الهيدروجين السالبة ( $HS^-$ ) وشاردة الهيدروجين الموجبة ( $H^+$ )، التي يتم اختزالها عند سطح المعدن إلى هيدروجين ذري ( $H$ ) بعد اكتسابها إلكترونات من المعدن المنحل [20].

وعلى وجه العموم تتلخص آلية حدوث هذا النوع من الضرر الذي يصيب الفولاذ العادي والذي يعرف عادةً باسم التبرثر (blistering)، بإعادة الاتحاد الكيميائي (recombination) للهيدروجين الذري في مستوى العيوب الداخلية للمادة وتلعب العيوب الداخلية أو التحجيفات المجهرية الدقيقة أو الشوائب الدخيلة على سطح الفولاذ دور الشرك الذي يقع فيه الهيدروجين الذري [13،21]، والهيدروجين الجزيئي ( $H_2$ ) المتشكل لا يستطيع الانتشار، مولداً بالتالي ضغوطاً قد تصل إلى قيم كبيرة، يمكنها أن تؤدي إلى حدوث تشوه لدن موضعي (localized plastic deformation) للمعدن، يؤدي إلى تشكيل انتفاخات أو بثور يمكن أن يصل قطرها إلى عدة سنتيمترات [12،15،21]. شكل رقم(2). وتشخيص هذا النوع من التآكل يتمثل في تحري وجود أية صدوع أو تمزقات (ruptures) في بنية الفولاذ، نظراً لحدوثه دون أي تشكيل للصدأ [14].

وللحيلولة دون حدوث مثل هذا النوع من الضرر لا بد من اتخاذ مجموعة من الإجراءات أو الاحتياطات [12]:

- تجنب جميع عمليات التآكل التي تولد الهيدروجين
- أخذ الإحتياطات أثناء تنفيذ الأغشية الإلكتروليتية (تجنب إختزال شاردة الهيدروجين)
- إجراء المعالجة الحرارية (heat treatment) لتخفيض قابلية أو درجة قابلية التأثر ( degree of susceptibility) بالتقصف الهيدروجيني، وهذا الإجراء يستعمل إما قبل أية عملية يمكنها أن تشحن الأجزاء المراد معالجتها بالهيدروجين، مثل عمليات التنظيف التي تسبق عمليات التحويل الكيميائي (chemical conversion) (الفسفة، الكرمة،..) [22]، أو بعد عمليات إنهاء السطح (surface finishing processes) [23]، أو بعد الفسفة مباشرةً وقبل تطبيق أي إنهاء تكميلي للسطح [24]، وهذا النوع من المعالجة الحرارية يختص بأنواع الفولاذ التي تمتلك إجهاد شد فعلي (actual tensile strength) يساوي أو يزيد على ( $10000 \text{ kgf/cm}^2$ ) تقريباً، أما الأنواع التي تمتلك إجهاداً أقل من ذلك فليس بالضرورة إجراء مثل هذا النوع من المعالجة الحرارية [22،23]
- مراقبة ظروف اللحام (للحام في الهواء الخامل) [12].

## 2- فسفة المعادن (phosphating of metals):

شهد العام (1906) ولادة فسفة المعادن صناعياً من خلال براءة الاختراع التي حصل عليها العالم الإنجليزي [T.W.Coslet] بعد نجاحه في فسفة معدن الحديد [25]. وشهدت هذه الطريقة ولا تزال تطورات كثيرة، إلى أن غدت تشكل في الوقت الحاضر إحدى طرائق المعالجة الكيميائية لسطوح المعادن الأوسع انتشاراً في الصناعة (البراغي، النوابض، قطع السلاح، السيارات، قطع الآلات الكاتبة، قطع نول الحياكة،..) [26،27] نظراً لكثرة

- تطبيقاتها العملية الهامة، وقلة تكاليفها [26،28،29،30]، إضافةً إلى تصنيفها كأصدقاء للبيئة واستعمالها كبديل للأغذية المحتوية على مركبات الكروم السامة أو الرصاص أو غيره من المعادن الثقيلة [10،31،32،33،34].
- من التطبيقات الشائعة لأغذية الفسفة يمكن أن نذكر على سبيل المثال [10،24،26،35]:
- استعمالها كمعالجة تمهيدية (pretreatment step) للسطح، تساعد في التصاق الطلاءات العضوية،
  - استعمالها لزيادة مقاومة التآكل،
  - استعمالها للمساعدة في عمليات تشكيل الفولاذ على البارد (cold forming) (سحب الأسلاك (wire drawing)، التشكيل بالبتق (extrusion)...)،
  - استعمالها لتحسين خواص التزليق (Lubrication) للسطح الفولاذي، أي بالتالي تخفيض الإحتكاكات (frictions).

والفسفة بكثير من الإيجاز، عملية كيميائية تسمح بتشكيل غطاء تحويل كيميائي عن طريق انحلال الفولاذ في محلول لحمض الأورثوفوسفوريك (Orthophosphoric acid)، حيث تترسب عادةً أملاح الفوسفات المتشكلة على سطح الفولاذ، على شكل طبقة بلورية منتظمة تلتصق بالسطح كملح غير منحل [36،37]. ويشترك جزء من الشوارد المنحلة للمعدن المراد معالجته في تفاعلات تشكيل الغطاء وتندمج فيه وتصبح جزءاً من الغطاء [36،37]، وهذا هو الخلاف بين أغذية التحويل والأغذية المرسبة كهربائياً (electrodeposited coatings)، والتي تترسب فيها مادة الغطاء على سطح المعدن دون أن يحصل مثل هذا الاندماج [37]. وآلية تشكيل غطاء الفسفة معقدة، وقد شرحها كثير من الباحثين بطرائق مختلفة [27،28،37،38،39،40،41].

وعادةً ما يتم تنفيذ هذه العملية الكيميائية بعدة طرائق، أهمها طريقتا التغطيس والرش [26،42]. وتصنف الأغذية عادةً حسب أوزانها إلى [30]:

- أغذية خفيفة الوزن (light-weight coatings): يتراوح وزنها بين (0.2-1.4 g/m<sup>2</sup>)، ويبيدي هذا النوع من الأغذية بنية غير متبلورة (amorph structure)،
- أغذية متوسطة الوزن (middle-weight coatings): يتراوح وزنها بين (1.4-7.5 g/m<sup>2</sup>)، ويبيدي هذا النوع من الأغذية بنية بلورية (crystal structure)،
- أغذية ثقيلة الوزن (heavy-weight coatings): يتراوح وزنها بين (7.5-30 g/m<sup>2</sup>)، ويبيدي هذا النوع من الأغذية بنية بلورية (crystal structure).

وهناك علاقة بين ثخانة الطبقة ووزن وحدة السطح من الغطاء، حيث يوافق (1µm) تقريباً ما بين (1.5g/m<sup>2</sup>) و(2 g/m<sup>2</sup>)، بالنسبة لمعظم أغذية الفسفة [30].

و رغم أن غطاء الفسفة، كما هو شائع، لا يقدم بذاته حماية كافية من التآكل [26،43،44]، حيث عادة ما يستعمل كغطاء وسيط (intermediate coating) لمواد الطلاء أو الزيوت أو الإنهاءات الأخرى، إلا أنه مع تطور تقنيات الصناعة، تجري أبحاث كثيرة في العالم بهدف تحسين خواص غطاء الفسفة فيما يتعلق بالحماية من التآكل وتلبية متطلبات الصناعة الحديثة، وقد أظهرت بعض هذه الأبحاث [9،43،45،46،47،48] نتائج مشجعة جداً في هذا الإطار.

## الحراسة التجريبية:

## 1- فسفة عينات فولاذ التسليح (phosphating of reinforcing steel specimens):

1-1- مدخل تجريبي:

- وفقاً للتصنيف الذي وضعته المنظمة الدولية للقياسات [24]، فقد وقع الاختيار على استعمال طريقة الفسفة بالزنك (قياسي ومع إضافات) لعدة أسباب، من أهمها:
- (a) تستعمل طريقة التغطية بفوسفات الزنك على نطاقٍ واسعٍ جداً لتغطية سطوح الفولاذ، بهدف تأمين حاجز حماية من التآكل، وتحقيق العزل الكهربائي [23]،
- (b) إن أغشية فوسفات الزنك على سطح الفولاذ، كما هو معروف لوقتٍ طويل، توفر مع أغشية فوسفات المنغنيز أعلى مستويات لمقاومة التآكل مقارنةً بغيرها من أغشية الفوسفات الأخرى [27،28،49]، حيث كانت الخیار الأول عندما يكون مطلوباً الحصول على مقاومة تآكل طويلة الأمد (long-term corrosion resistance) [49]،
- (c) إن سرعة تشكيل الغطاء في مغاطس فوسفات الزنك أكبر من تلك في مغاطس فوسفات المنغنيز [30]،
- (d) إمكانية تنفيذ عمليات الفسفة بالزنك في درجات حرارة أدنى بكثير من تلك التي تتطلبها عمليات الفسفة بالمنغنيز [30]، مع تفضيل استعمال أغشية فوسفات المنغنيز لتسهيل فعل التزليق (sliding action) [24]،
- (e) كمية الوحل الناتجة عن استعمال هذه الطريقة، أقل بكثير من تلك المتشكلة عند استعمال طريقة الفسفة بالزنك المعدل بالكالسيوم، إضافةً إلى أن طريقة الفسفة بالزنك المعدل بالكالسيوم تحتاج درجات حرارة عالية [27]،
- (f) استعمال الإضافات في مغاطس الفسفة بالزنك يحسن من جودة الغطاء، ويضيف مزايا أخرى للمعالجة، فعلى سبيل المثال فإن وجود شوارد النيكل في مغطس الفسفة، لا يحسن مقاومة التآكل فقط، بل يسرع أيضاً تفاعلات تشكيل الغطاء، إضافةً إلى أن هذه الشوارد يمكن أن تعمل كمراكز تنوي (Nucleation centers) لبلورات الغطاء [50]، وتعديل شكل وبنية (morphology) بلورات الغطاء لتصبح أكثر نعومةً [50،51،52]، وأضاف البعض المنغنيز، الذي قام بالوظيفة ذاتها التي يؤديها النيكل في ما يخص بالتتوي وتعديل المورفولوجية [46،47،48]. وأضيف كذلك النحاس إلى مغطس الفسفة بالزنك كبديلٍ للنیکل (تراكيز قليلة جداً من النحاس) لأسباب تتعلق بالبيئة والسلامة، وقد أبدت الأغشية الناتجة على الفولاذ حماية ممتازة من التآكل [27،53]. وهناك من أضاف أيضاً الألمنيوم، بقصد تحسين أداء غطاء الفسفة الناتج [33].
- وقد تم تنفيذ عمليات الفسفة بهدف الحصول على أغشية فسفة ثقيلة (heavy phosphate coatings) (أوزان كبيرة + ثخانات كبيرة للغطاء)، نظراً لأن ازدياد ثخانة الغطاء تشكل أحد الأسباب الهامة لتحسن مقاومة التآكل [30،54]. ونفسير ذلك هو أن غطاء الفسفة يعمل كحاجز ميكانيكي (mechanical barrier) في عملية التآكل، وهذا الحاجز يساهم بشكلٍ كبير في عملية الحماية التي يوفرها غطاء الفسفة من خلال إعاقته تغلغل الأجسام العدوانية [30]، ومقاومته انتقال العناصر الداخلة في تفاعلات التآكل [30،54]. وكمسرع للمعالجة أضيفت النترات ( $NO_3^-$ )، نظراً لأن الغاية من المعالجة الحصول على أغشية ثقيلة، والنتریت ( $NO_2^-$ ) لا يستطيع تكوين مثل هذه الأغشية [27]، إضافةً إلى أنه غير مستقر في المغطس [28]، أما الكلوريات ( $ClO_3^-$ ) فيعطي نواتج ثانوية ضارة (harmful by-products) [28].

1-2- العينات المعالجة:

تمت عملية الفسفة على نوعين من العينات الفولاذية:

(a) عينات فولاذية محلزنة عالية المقاومة تصنيع معمل حديد حماة (مدلفنة على الساخن) ، ماركة (RB 400)، بأطوال مختلفة (100-350-600 mm) وقطر (14 mm)، التركيب الكيميائي للفولاذ وحسب معمل حديد حماة موضح في الجدول رقم (1). وقد بلغ إجمالي العينات المحلزنة المعالجة (60) عينة، موزعة وفق مايلي:  
(15) عينة بطول (100 mm) (ثلاث عينات في كل مغطس)، تمت فسفتتها بهدف حساب وزن غطاء الفسفة المتشكل،

(15) عينة بطول (350 mm) (ثلاث عينات في كل مغطس)، تمت فسفتتها بهدف اختبار مقاومة الشد فيها بعد المعالجة،

(15) عينة بطول (600mm) (ثلاث عينات في كل مغطس)، تمت فسفتتها بهدف إجراء اختبار الانحناء

(15) عينة بطول (600 mm) (ثلاث عينات في كل مغطس)، تمت فسفتتها بهدف إجراء اختبار إعادة الانحناء.

(b) عينات فولاذية ملساء ماركة (PB 240) بأطوال مختلفة (350-450 mm) وقطر (10 mm)، تصنيع روسي. وقد بلغ إجمالي العينات الملساء المعالجة تسع عينات (ثلاث عينات لاختبار الشد، ثلاث عينات لاختبار الانحناء، ثلاث عينات لاختبار إعادة الانحناء).

3-1- التركيب الكيميائي لمحاليل الفسفة:

تم تغطيس العينات الفولاذية المراد فسفتتها في خمسة مغطس، وفق ما يلي (تراكيبها الكيميائية موضحة في الجدول رقم (2)):

(a) مغطس فسفة قياسي (بدون إضافات) [56،55]، (مج1)

(b) مغطس فسفة مع إضافة عنصر النيكل (Ni) في أحد أملاحه إلى مغطس الفسفة، (مج2)

(c) مغطس فسفة مع إضافة عنصر المنغنيز (Mn) في أحد أملاحه إلى مغطس الفسفة، (مج3)

(d) مغطس فسفة مع إضافة عنصر النحاس (Cu) في أحد أملاحه إلى مغطس الفسفة، (مج4)

(e) مغطس فسفة مع إضافة عنصر الألمنيوم (Al) في أحد أملاحه إلى مغطس الفسفة، (مج5)

و لايد من الإشارة هنا إلى أن تراكيز الحموض المستعملة هي:

(a) تركيز حمض الأورثو فوسفور (85%) وكثافته (1.70)،

(b) تركيز حمض الأزوت (70%) وكثافته (1.41)،

4-1- الظروف التجريبية للعملية:

تم تنفيذ عملية الفسفة ضمن الظروف الموضحة في الجدول رقم (3)، مع ملاحظة أن تنفيذها تم بطريقة التغطيس لعدة أسباب، أهمها أن غطاء الفسفة الناتج يكون أكثر غنى بمركب الفوسفوفيليت (المركب المسؤول عن زيادة مقاومة التآكل) في حالة المعالجة بالتغطيس منه في حالة الرش [57،39]، إضافة إلى أن المعالجة بالتغطيس هي الطريقة الوحيدة التي تسمح بتشكيل أغشية فسفة ثقيلة [28]

5-1- نظام المعالجة:

تم إنشاء نظام لتنفيذ عملية الفسفة يتألف مما يلي، الشكل رقم (3):

(a) حوض تغطيس مصنوع من مادة الستانلس ستيل أبعاده (700X135X150 mm)،

(b) أجهزة تسخين كهربائية،



- (c) منبع ماء،  
 (d) مصرف للمياه،  
 (e) منظم لدرجة الحرارة،  
 (f) خيوط مع مساند تعليق.

#### 6-1- مراحل المعالجة:

يمكن تقسيم مراحل المعالجة إلى المراحل التالية، نعرض لها بإيجاز:

1. شحذ وتسوية العينات: باستعمال المبرد اليدوي، تمت إزالة عيوب الصنع وأثار قص العينات (زوايا ناتئة وحزوز وعلامات أسنان المنشار... الخ) من سطوح العينات [58].
2. التنظيف القلوي: في هذه المرحلة تم استعمال منظف منزلي، كمحلول للتنظيف ذو قلوية ضعيفة (8~pH)، لتخليص سطوح العينات من الشحوم والمواد ضعيفة الالتصاق والأوساخ.. الخ، مع الإشارة إلى أن الوظيفة الأساسية لمحلول التنظيف القلوي، هي إزاحة أو استحلاب (empulsion) الزيوت التي ترتبط بها الملوثات الأخرى الموجودة [59].
3. الشطف الأول: تم تنفيذه بشطف العينات بماء غزير من مياه الشبكة العامة [39،43].
4. التنظيف الحمضي: باستعمال محلول لحمض كلور الماء الممدد بتركيز (10 % HCl)، درجة حرارته (40) درجة مئوية، تم تنظيف سطوح العينات تماماً من القشور والأكاسيد المختلفة والملوثات الأخرى [60].
5. الشطف الثاني: هذه المرحلة نفذت مباشرةً ودون إبطاء بعد مرحلة التنظيف الحمضي، لمنع جفاف الطبقة السطحية المتشكلة التي يمكنها أن تؤثر سلباً على المراحل اللاحقة، حيث جرى أيضاً شطف العينات بماء غزير من مياه الشبكة العامة [60].
6. التجفيف الأول: جرى تجفيف العينات بعد الشطف مباشرةً باستعمال مجفف هوائي (سيشوار) [60].
7. الوزن الأول: تم وزن العينات التي طولها (100 mm) بواسطة ميزان تحليلي بدقة (0.1 mg).
8. التغطيس في محلول الفسفنة: تم تغطيس العينات في مغاطس الفسفنة الخمسة، وفي الشروط المحددة المذكورة آنفاً.
8. الشطف النهائي: بعد إخراج العينات من مغاطس الفسفنة، تم شطفها بماءٍ منزوع الشوارد [39،60]. والغاية الأساسية من عملية الشطف هي إزالة المواد الكيميائية غير المرغوب بها من سطح المعدن، ويترك الشطف بماء غير نقي بقايا قد تؤثر على فعالية الغطاء [49].
9. التجفيف النهائي: تم تنفيذه بوضع العينات في فرن كهربائي مدة خمس دقائق في درجة حرارة مائة درجة مئوية [61]، وهذا التجفيف (Drying) يهدف إلى تخفيض خطر التقصف الهيدروجيني إلى الحدود الدنيا [19]، إضافةً إلى أنه يزيد من مقاومة التآكل التي يبديها الغطاء [53].
10. الوزن الثاني: جرى وزن العينات ثانيةً بعد عملية الفسفنة بالميزان التحليلي المذكور آنفاً.

#### 7-1- تحديد وزن غطاء الفسفنة:

بنهاية عملية المعالجة تم الحصول على غطاء فسفنة منتظم إلى حدٍ كبير، إضافةً إلى أنه لم تظهر بالعين المجردة أية انقطاعات أو فجوات أو مناطق غير معالجة، الشكل رقم (4)، وقد ظهر ذلك جلياً أيضاً من خلال التخانة المنتظمة لغطاء الفسفنة المحيط بالعينة الفولاذية، الشكل رقم (5). ولتحديد وزن غطاء الفسفنة

المتشكل، تم تقشير أو نزع الغطاء من العينات التي أطوالها (100 mm) بتغطيسها في محلول حمض الكروم (20 % CrO<sub>3</sub>) في درجة حرارة (90°C) مدة (90 sec) حيث جرى شطفها بعد ذلك بماء الشبكة وتجفيفها ومن ثم إعادة وزنها [61]، ونتائج القياس والحساب موضحة في الجدول رقم (4).

## 2- اختبارات الخواص الميكانيكية (mechanical properties tests):

نظراً لتحرر شوارد الهيدروجين أثناء تنفيذ بعض مراحل عملية الفسفة، وعلى وجه الخصوص في مرحلتي التنظيف الحمضي (Pickling)، وفي مرحلة التغطيس في محلول الفسفة، وتحول هذه الشوارد إلى الحالة الذرية، وإمكانية تغلغل هذا الهيدروجين الذري إلى داخل بنية الفولاذ، وما يمكن أن يسببه هذا التغلغل من نقصان في قابلية المط عند الشد (tensile ductility) [12]، إضافة إلى الشقوق (cracks) والانكسارات (fractures) مع مرور الوقت، لذلك تم إجراء مجموعة من الاختبارات الميكانيكية على عينات قضبان فولاذ التسليح (الأملس والمحلزن) المعالجة في مغاطس الفسفة المختلفة، لبيان مدى تأثير هذه المعالجة على خواصها الميكانيكية، وعلى عينات أخرى غير معالجة تم اختبارها لأغراض المقارنة. وهذه الاختبارات مفصلة في الفقرات اللاحقة.

### 1-2- اختبار الشد (tensile test):

جرى شدّ العينات الملساء والمحلزنة التي أطوالها مساوية إلى (350 mm)، في مخبر كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق، في درجة حرارة (20 °C) تقريباً، وذلك وفقاً لأسس الاختبار الواردة في كود المنظمة الدولية للقياسات (ISO 6935-1, 6935-2, 6892) [64,63,62]. وبعد انكسار العينة المختبرة على الشد، تم حساب الاستطالة المئوية من خلال تقريب القطعتين المفصولتين من العينة المختبرة من بعضهما بعناية، بحيث يتوضع محوراهما على استقامة واحدة، حيث تمّ بعد ذلك قياس التغير [62] في طول القياس (Lu-Lo) إلى أقرب (0.25mm)، حيث:

(Lu) هو طول القياس النهائي بعد الكسر (Final gauge length)،

(Lo) هو طول القياس الأصلي (Original gauge length)، والذي يساوي خمسة أمثال القطر الاسمي

(nominal diameter)، أي يساوي (50 mm) بالنسبة للقضبان الملساء، و(70 mm) بالنسبة للقضبان المحلزنة.

وتم حساب الاستطالة النسبية من تقسيم هذا المقدار على طول القياس الأصلي أي:

$$\text{Elongation}(\%) = (\text{Lu}-\text{Lo}) / \text{Lo}$$

وجرى تدوير قيمة الاستطالة النسبية بعد الكسر إلى أقرب (0.5 %) [62].

ولحساب إجهاد الخضوع ومقاومة الشد، تم استعمال المساحة الاسمية بالنسبة للقضبان الملساء، وتم حساب

القطر المكافئ للقضبان المحلزنة وفق العلاقة التالية (65):

$$\text{De} = 12.74 \sqrt{\text{m}/l}$$

حيث: De: القطر المكافئ (mm)

m: كتلة القضيب المحلزن (g)

l: طول القضيب المحلزن (mm)

### 2-2- اختبار الانحناء (bend test):

تم إجراء هذا الاختبار في أحد مخابر هيئات القطاع العام، في درجة حرارة (20 °C) تقريباً، وذلك وفقاً لطريقة الاختبار الواردة في كود المنظمة الدولية للقياسات (ISO 10065, 6935-1, 6935-2) [66,64,63]، حيث

تمّ ثني عينات القضبان الملساء بزواوية (170° - 160°)، بسرعة (3°/sec)، حول قلب التشكيل ذو القطر ( 20 mm)، بينما تمّ حني العينات المحلزنة بالزواوية والسرعة ذاتهما، إنما حول قلب التشكيل ذو القطر (52 mm) [66]، الشكل رقم (6)، وفي الحالتين كليهما أخذت قياسات زوايا الثني باستعمال منقلة (protractor). وفي نهاية اختبارات الانحناء، جرى فحص العينات بالعين المجردة (naked eye) بدقة، لتحريّ ظهور أية شقوق فيها.

3-2- اختبار إعادة الانحناء (rebend test):

تم إجراء هذا الاختبار أيضاً في أحد مخابر هيئات القطاع العام، في درجة حرارة (20 °C) تقريباً، وذلك وفقاً لطريقة الاختبار الواردة في كود المنظمة الدولية للقياسات (ISO 10065, 6935-2) [66,64]، والمواصفات الفرنسية\* (NF A 35-015) [67] حيث تمّ ثني عينات القضبان الملساء [67] بدايةً بزواوية (90°)، بسرعة (3°/sec)، حول قلب التشكيل ذو القطر (20 mm)، بينما تمّ ثني العينات المحلزنة بدايةً بالزواوية والسرعة ذاتهما [66]، إنما حول قلب التشكيل ذو القطر (75 mm) [65]، وفي الحالتين كليهما أخذت قياسات زوايا الثني باستعمال منقلة. وبعد ذلك تمّ وضع العينات الملساء والمحلزنة في فرن كهربائي في درجة حرارة (100 °C) لمدة نصف ساعة، بعد ذلك جرى تبريدها في الهواء إلى درجة الحرارة العادية، ومن ثمّ أعيد ثنيها باتجاه معاكس بزواوية (30°-25°). وفي نهاية اختبارات إعادة الانحناء، جرى فحص العينات بالعين المجردة (naked eye) بدقة، لتحريّ ظهور أية شقوق فيها.

\*ملاحظة: لا يوجد في كود المنظمة الدولية للقياسات (ISO) أي ذكرٍ لاختبار إعادة الانحناء للقضبان الملساء، في حين أن مثل هذا الاختبار ورد ذكره في المواصفات الفرنسية (AFNOR)، ولاحتياطات الأمان تمّ تنفيذ مثل هذا الاختبار للقضبان الملساء وفقاً للمواصفات الفرنسية.

## النتائج والمناقشة:

### 1- وزن غطاء الفسفة المتشكل:

يبين الجدول رقم (4)، نتائج حساب أوزان أغشية الفسفة المتشكلة على سطوح العينات الفولاذية المعالجة، وقد تراوحت هذه الأوزان بين (15-16.5 g/m<sup>2</sup>) تقريباً بالنسبة للأغشية المنفذة في مغاطس الفسفة المعدلة، أي المغاطس القياسية التي أضيفت إليها شوارد موجبة (cations) لتعديل خواصها، في حين كانت هذه الأوزان أقل في العينات المعالجة في مغطس الفسفة القياسي (بدون إضافات). وربما يعود ذلك إلى مساهمة هذه العناصر المضافة في تفاعلات تشكيل الغطاء، وترسبها على شكل مركبات كيميائية إضافية. نذكر من هذه المركبات على سبيل المثال [52،28]:

- الفوسفونيكوليت (Phosphonicollite: Zn<sub>2</sub>Ni(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O)، الذي يترسب على سطح الفولاذ عند إضافة النيكل إلى مغطس الفسفة بالزنك
  - الفوسفومنغاليت (Phosphomangallite: Zn<sub>2</sub>Mn(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O)، الذي يترسب على سطح الفولاذ عند إضافة المنغنيز إلى مغطس الفسفة بالزنك
- وعموماً كانت الأوزان جميعها ثقيلة، وقد تمّ الوصول إليها بهدف تشكيل ثخانة تعمل كحاجز ميكانيكي يساهم في إعاقه تفاعلات التآكل في حال حدوثها.

### 2- اختبارات الشد والاستطالة:

- يبين الجدول رقم (5) نتائج اختبارات الشد التي تم إجراؤها على العينات المحلزنة المعالجة بطريقة الفسفة إضافة إلى عينات أخرى غير معالجة تم اختبارها كشاهد للمقارنة. من الجدول يمكن ملاحظة الأمور التالية:
- إن جميع قيم إجهادات الخضوع الوسطية للمجموعات الخمسة كانت أكبر من الحد الأدنى المطلوب وفق (ISO 6935-2) البالغ (4000 kgf/cm<sup>2</sup>). ورغم وجود بعض العينات التي انخفض إجهاد خضوعها عن هذا الحد، إلا أنها في معظمها قد زاد إجهاد خضوعها على نسبة (95%) من هذا الحد، باستثناء عينة واحدة، معالجة في المغطس المضاف إليه عنصر الألمنيوم، بلغ إجهاد خضوعها ما نسبته (94%). ولا بدّ من الإشارة إلى أننا قد لا نستطيع أن نعزو هذا الانخفاض إلى عملية المعالجة في مغطس الفسفة، نظراً لوجوده أيضاً في إحدى العينات المرجعية المختبرة، حيث بلغ إجهاد خضوعها نسبة (96%) من الحد الأدنى المطلوب، إضافة إلى أن القيم في معظمها كانت قريبة من القيم التي تم الحصول عليها من اختبار العينات المرجعية.
  - إن جميع قيم مقاومات الشد الوسطية للمجموعات الخمسة كانت أكبر من الحد الأدنى المطلوب وفق (ISO 6935-2) البالغ (4400 kgf/cm<sup>2</sup>). علاوة على ذلك فقد بلغت في معظمها قيمة أكبر من (6000 kgf/cm<sup>2</sup>)، وهي الحد الأدنى المطلوب وفق (ASTM A 615M-01b) [68]، إضافة إلى أن القيم في معظمها كانت قريبة من القيم التي تم الحصول عليها من اختبار العينات المرجعية. مع ملاحظة أن القيم جميعها كانت أقل من (7000 kgf/cm<sup>2</sup>).
  - إن نسبة مقاومة الشد الوسطية إلى إجهاد الخضوع الوسطي كانت متقاربة بالنسبة للمجموعات جميعها بما فيها المجموعة المرجعية، حيث كانت في حدود القيمة (1.5) تقريباً، أي أنها جميعاً كانت أكبر من النسبة المطلوب تحقيقها في (ISO 6935-2)، البالغة (1.05) كحد أدنى.
  - إن جميع قيم الاستطالة النسبية (المئوية) الوسطية للمجموعات الخمسة كانت أكبر من الحد الأدنى المطلوب وفق (ISO 6935-2) البالغ (14%)، إضافة إلى أن القيم في معظمها كانت قريبة من القيم التي تم الحصول عليها من اختبار العينات المرجعية، حتى أنها قد زادت على هذه القيم بنسب متفاوتة تراوحت بين (8-28%)، الأمر الذي قد يستدعي القيام بدراسة خاصة أكثر عمقاً، لتفسير أسباب حدوث مثل هذه الزيادة.
- أما بالنسبة للقضبان الملساء المعالجة، فقد أظهرت القيم الواردة في الجدول (5) قيماً متقاربة بينها وبين العينات المرجعية، وهي جميعها بدون استثناء أكبر من القيم الدنيا المطلوبة وفق (ISO 6935-1)، فيما يخص قيم إجهادات الخضوع ومقاومات الشد والاستطالات النسبية. إضافة إلى أن نسبة مقاومة الشد الوسطية إلى إجهاد الخضوع الوسطي متقاربة في المجموعتين، حيث كانت في حدود القيمة (1.4)، أي أنها جميعاً كانت أكبر من النسبة المطلوبة في (ISO 6935-1) البالغة (1.10) كحد أدنى.

### 3- اختبار الانحناء:

بعد أن تم ثني عينات القضبان المعالجة بزواوية (170°) حول قلب التشكيل ذو القطر المذكور آنفاً، تم فحص مناطق الثني في العينات المختبرة بالعين المجردة، حيث لم تلاحظ فيها أية شقوق أو انكسارات أو شقوق عرضية، الشكل رقم (7) .

### 4- اختبار إعادة الانحناء:

بعد أن أُجري اختبار إعادة الانحناء لعينات القضبان المعالجة، وفق الخطوات المذكورة آنفاً، تمّ كذلك فحص مناطق الحني في العينات المختبرة بالعين المجردة، حيث لم تلاحظ فيها أيضاً أية شقوق أو تمزقات أو انكسارات أو شقوق عرضية، الشكل رقم (8).

## الاستنتاجات:

بالنظر إلى نتائج الاختبارات الميكانيكية في مجملها، يمكن أن نخلص إلى أن معالجة قضبان فولاذ التسليح في مغاطس الفسفة الحمضية لم تؤثر على الخواص الميكانيكية لهذه القضبان، ويمكن أن يعزى ذلك إلى أمورٍ عدة، يمكن تلخيصها بما يلي:

- إن إضافة المسرعات (المؤكسدات) إلى مغاطس الفسفة، يؤدي إلى التقليل من احتمالية التعرض لهجوم من الهيدروجين [49]، وذلك من خلال الدور الهام الذي تلعبه في تخفيض انطلاق وتحرر الهيدروجين إلى الحد الأدنى.
- عدم وجود أية عيوب على سطوح العينات المختبرة، يمكن من خلالها للهيدروجين الانتشار إلى داخل بنية الفولاذ.
- كان الفولاذ المستعمل في الاختبارات من النوع العادي، الشائع استعماله في أعمال الخرسانة المسلحة، حيث يتصف بقلّة احتمالية التعرض للتقصّف الهيدروجيني، على عكس أنواع الفولاذ عالي المقاومة، التي مقاومة الشد فيها أكبر من  $(7000 \text{ kgf/cm}^2)$ ، والتي تعد أكثر عرضةً لمثل هذا النوع من التآكل.

## التوصيات :

نظراً لخطورة ظاهرة التقصّف الهيدروجيني التي يمكن أن تصيب المعادن وتؤدي إلى خروجها من الاستمرار، إضافةً إلى كونها من أنواع التآكل التي لا تبدي أية علامات صبدأً، لذا لا بدّ من اتخاذ الاحتياطات الضرورية، للحيلولة دون إصابة فولاذ التسليح المراد معالجته بطريقة الفسفة، بهذا النوع من الضرر، من حيث إضافة المسرعات إلى مغاطس الفسفة، والتحقق من عدم وجود أية عيوب على سطوح هذه القضبان يمكن أن توقع في شركها الهيدروجين. مع التنويه إلى أن الممارسة الشائعة باستعمال فولاذ التسليح ذي مقاومة الشد التي تقل عن  $(7000 \text{ kgf/cm}^2)$ ، هي ممارسة صحيحة لتقليل احتمال حدوث ظاهرة التقصّف الهيدروجيني. ويوصى بإجراء دراسة معمقة لتأثير عملية الفسفة في نسبة استتالة الفولاذ.

## الجدول

جدول رقم (1) يبين التركيب الكيميائي لفولاذ العينات المحلّزة (معمل حماة)

الكربون C	السيلايسيوم Si	المنغنيز Mn	الفوسفور P	الكبريت S	المكافئ الكروني C <sub>eq</sub>
0.37	0.65	1.70	0.055	0.055	0.52

جدول رقم (2) يبين التراكيب الكيميائية لمغاطس الفسفطة المستعملة

Al <sup>+3</sup>	Cu <sup>+2</sup>	Mn <sup>+2</sup>	Ni <sup>+2</sup>	Zn <sup>+2</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	
0	0	0	0	0.15-0.20 mol/l	0.10-0.15 mol/l	0.30-0.35 mol/l	المغطس الأول
0	0	0	0.015-0.02 mol/l	0.15-0.20 mol/l	0.10-0.15 mol/l	0.30-0.35 mol/l	المغطس الثاني
0	0	0.015-0.02 mol/l	0	0.15-0.20 mol/l	0.10-0.15 mol/l	0.30-0.35 mol/l	المغطس الثالث
0	0.015-0.02 mol/l	0	0	0.15-0.20 mol/l	0.10-0.15 mol/l	0.30-0.35 mol/l	المغطس الرابع
0.015-0.02 mol/l	0	0	0	0.15-0.20 mol/l	0.10-0.15 mol/l	0.30-0.35 mol/l	المغطس الخامس

جدول رقم (3) يبين الظروف التي تمت فيها عملية الفسفطة

درجة الحرارة	فترة التغطيس	الرقم الهيدروجيني (pH)
80-90 oC	10-20 min	1.5-2.5

جدول رقم (4) يوضح نتائج قياس أوزان غطاء الفسفطة للعينات الفولاذية المعالجة

رمز العينة	الوزن بعد الفسفطة (g)	الوزن بعد التقشير (g)	مساحة السطح (m <sup>2</sup> )	فرق الوزن (g)	وزن وحدة لمساحة (g/m <sup>2</sup> )	وسطي الوزن (g/m <sup>2</sup> )
S1	121,7496	121,6998	0,004869	0,0498	10,22703	11,53
S2	116,8289	116,7701	0,004986	0,0588	11,79315	

							الأولى (فسفتة دون إضافات )
	12,56962	0,0615	0,004893	120,3886	120,4501	S3	
16,37	18,29238	0,0895	0,004893	120,1884	120,2779	1N	المجموعة
	13,92449	0,0704	0,005056	118,0002	118,0706	2N	الثانية (فسفتة + نيكل )
	16,90257	0,0827	0,004893	117,7974	117,8801	3N	
15,13	16,36601	0,0816	0,004986	121,0082	121,0898	1M	المجموعة
	15,75089	0,0789	0,005009	120,2013	120,2802	2M	الثالثة (فسفتة + منغنيز)
	13,27016	0,064	0,004823	116,5361	116,6001	3M	
15,52	15,95393	0,0762	0,004776	116,3805	116,4567	1C	المجموعة
	13,63242	0,0667	0,004893	113,153	113,2197	2C	الرابعة (فسفتة + نحاس)
	16,98691	0,0843	0,004963	118,2639	118,3482	3C	
15,03	16,41563	0,0807	0,004916	120,3197	120,4004	1A	المجموعة
	14,78831	0,0727	0,004916	116,2774	116,3501	2A	الخامسة (فسفتة + المنيوم)
	13,90873	0,0687	0,004939	119,6112	119,6799	3A	

جدول رقم (5) يبين نتائج اختبارات الشد والاستطالة للعينات المحلزنة

الاستطالة النسبية (%)	الإستطالة المطلقة (cm)	حد الإنقطاع (مقاومة الشد) (kgf/cm <sup>2</sup> )	إجهاد الخضوع (kgf/cm <sup>2</sup> )	القطر المكافئ (mm)	مقدار الإستطالة (cm)	حمولة الخضوع (kgf)	حمولة الإنقطاع (kgf)	الطول (cm)	الوزن (g)	رمز العينة	
34.0	2,36	6440,363	4198,799	13.88	9,3	9740	6350	34,9	414,6	S1	المجموعة الأولى (فسفتة دون إضافات)
36.5	2,495	6018,224	3910,491	13.71	9,35	8880	5770	35	405,3	S2	
34.0	2,355	6538,101	4280,581	13.79	9,25	9760	6390	35	410,4	S3	
<b>36.5</b>		<b>6332,23</b>	<b>4129,957</b>	<b>الوسطي</b>							
34.0	2,315	6529,115	4184,991	13.87	9,25	9860	6320	34,8	412,5	1N	المجموعة الثانية (فسفتة + نيكل )
37.0	2,547	6367,581	4177,242	13.71	9,4	9390	6160	34,8	402,9	2N	
37.0	2,533	5700,880	3836,612	13.73	9,4	8440	5680	34,7	403,3	3N	
<b>36.0</b>		<b>6199,192</b>	<b>4066,281</b>	<b>الوسطي</b>							
44.0	3,005	5498,851	3955,91	13.69	9,85	8090	5820	35,2	406,6	1M	المجموعة الثالثة (فسفتة + منغنيز)
34.0	2,345	6214,765	4032,482	13.71	9,2	9170	5950	35	405,5	2M	
36.0	2,495	5964,780	4074,486	13.81	9,4	8930	6100	35,1	412,4	3M	

38.0		5892,799	4020,959	الوسطى							
32.0	2,215	6348,838	4125,065	13.77	9,1	9450	6140	34,9	407,7	1C	المجموعة الرابعة (فسفتة+ نحاس )
29.0	2,037	6522,691	4249,931	13.92	9	9930	6470	34,8	415,9	2C	
36.5	2,499	6500,218	4267,888	13.70	9,35	9580	6290	34,7	401,5	3C	
32.5		6457,249	4214,295	الوسطى							
28.5	1,98	5991,712	4084,067	13.94	8,95	9140	6230	34,8	417	1A	المجموعة الخامسة (فسفتة + ألمنيوم )
33.5	2,32	6391,710	4272,354	13.76	9,2	9500	6350	35	408,3	2A	
34.0	2,39	5554,118	3752,432	14.02	9,4	8570	5790	34,75	421,2	3A	
32.0		5979,181	4036,284	الوسطى							
32.5	2,312	6484,829	4310,542	14.18	9,4	10230	6800	34,8	431	1R	المجموعة المرجعية للقضبان المحلزنة
26.0	1,783	6630,662	4393,813	13.83	8,7	9960	6600	34,6	408	2R	
30.5	2,127	5856,401	3832,209	13.94	9,1	8940	5850	34,8	417	3R	
29.5		6323,964	4178,854	الوسطى							
14.0		4400	4000	(ISO 6935-2) الحدود الدنيا لقيم إجهاد الخضوع ومقاومة الشد والاستطالة النسبية حسب							

جدول رقم (6) يبين نتائج اختبارات الشد والاستطالة للعينات الملساء (مغطس فسفتة دون إضافات)

الإستطالة النسبية (%)	الإستطالة المطلقة (cm)	حد الإنقطاع (مقاومة الشد) (kgf/cm <sup>2</sup> )	إجهاد الخضوع (kgf/cm <sup>2</sup> )	القطر الإسمي (mm)	مقدار الإستطالة (cm)	حمولة الإنقطاع (kgf)	حمولة الخضوع (kgf)	الطول (cm)	الوزن (g)	رمز العينة	
33.0	1,65	3808,9172	2713,376	10	6,65	2990	2130	35,05	214,1	1P	مجموعة القضبان
35.0	1,75	4050,9554	2777,07	10	6,75	3180	2180	34,75	212,2	2P	
37.0	1,85	4063,6943	2777,07	10	6,85	3190	2180	35	212,6	3P	الملساء المفسفتة
35.0		3974,522	2755,839	الوسطى							
32.0	1,6	4025,4777	2764,331	10	6,6	3160	2170	34,8	216	1R	مجموعة القضبان
35.0	1,75	4025,4777	2828,025	10	6,75	3160	2220	34,8	215	2R	
37.0	1,85	4076,4331	2815,287	10	6,85	3200	2210	35,1	216	3R	الملساء المرجعية
34.5		4042,463	2802,548	الوسطى							
20.0		2650	2400	الحدود الدنيا لقيم إجهاد الخضوع ومقاومة الشد والاستطالة النسبية حسب (ISO 6935-1)							

الأشكال



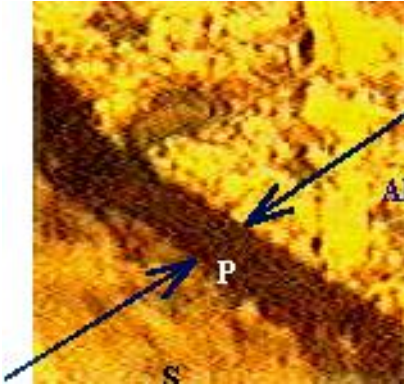


الشكل رقم (2) يظهر صورة لقطعة حديدية تعرضت لتقصف هيدروجيني من النوع (blistering) (12)

الشكل رقم (1) يظهر المسار الأكثر احتمالاً للشقوق التي يسببها هجوم الهيدروجين



الشكل رقم (3) يظهر صورة عامة لحوض التغطية المصنوع من الستانلس ستيل.

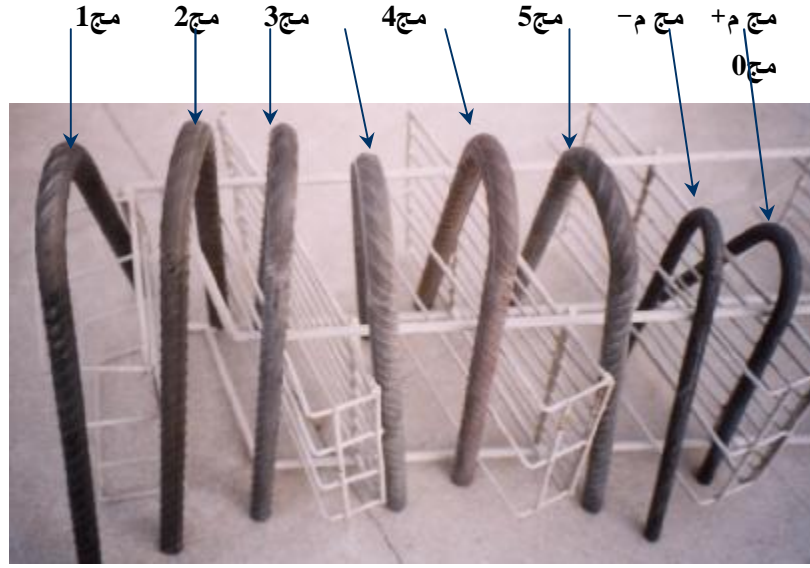


الشكل رقم (5) صورة مجهرية (تكبير 1130 مرة) لمقطع عرضي لعينة فولاذية مفسفة تظهر الشخانة المنتظمة للغطاء (قياسي + نيكل)، ((-S - الفولاذ، -P - غطاء الفسفة، -Al- غطاء من الألمنيوم)

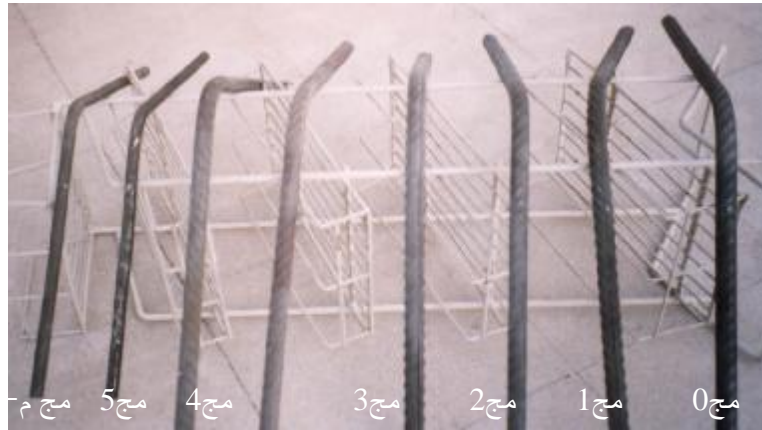
الشكل رقم (4) صورة للعينات المفسفة في مغاطس الفسفة المختلفة (الرمز 0 مج يشير إلى العينة المرجعية)



الشكل رقم (6) صورة لجهاز الانحناء وإعادة الانحناء



الشكل رقم (7) صورة للعينات (مفسفة، غير مفسفة) بعد حنيها، تظهر سلامة مناطق الحني (الرمز مج م+ يشير إلى عينة ملساء مفسفة، الرمز مج م- يشير إلى عينة ملساء غير معالجة)



الشكل رقم (8) صورة للعينات (مفسفة، غير مفسفة) بعد إعادة حنيها، تظهر سلامة مناطق الحني

.....

1. S. E. Hussain, Rasheeduzzafar, A. Al-Musallam, and A.S. Al-Gahtani, Factors Affecting Threshold Chloride For Reinforcement Corrosion in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1543-1555, 1995
2. D. J. Cleland, K. M. Yeho, and A. E. Long, Corrosion of Reinforcement in Concrete Repair, Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 4, pp. 233-238, 1997
3. K. Suda, S. Misra, K. Motohashi, Corrosion products of reinforcing bars embedded in concrete, Corrosion Science, Vol. 35, Nr. 5-8(1993)1543-1549
4. B..Malric, Utilization des inhibiteurs de corrosion dans la rehabilitation des ouvrages d`art: criteres d`utilization et exemples, 9<sup>ème</sup> colloque Recherche Québécoise sur les ouvrages d`art, Québec ,2002
5. S. Erdogdu, T.W. Bremner, and I.L. Kondratova, Accelerated testing of plain and epoxy-coated reinforcement in simulated seawater and chloride solutions, Cement and Concrete Research, V. 31 (2001), pp:861-867
6. A. Zayed, A. Sagues, R. Powera, Corrosion of epoxy-coated reinforcing steel, NACE, paper no. 379, Houston, 1989
7. L.L. Smith, R.J. Kessler, R.G. Powers, Corrosion of epoxy-coated rebar in marine environment, Transportation. Research. Board (403) (1993) 36-45
8. R. F. Strobel, H. O. Pedersen, Fusion Bonded Epoxy coating: The Proven Solution to Reinforcing Steel Corrosion, Proceedings of Buildings Deterioration in the Arab World and Methods of Repair, Riyadh, KSA, 29 Feb- 3 March, 1992, 468-480
9. A. Al-swaidani, S. Audisio, H. Idrissi; Comportement de l`acier phosphaté dans un milieu simulé au béton, rapport INSA, Lyon, France, 2003.
10. Chhiu-Tsu Lin, Green chemistry in situ phosphatiizing coatings, Progress in Organic coatings Vol. No. 42 (2001) 226-235.
11. L. Raymond, Evaluation of Hydrogen Embrittlement, ASM International, Metals Handbook, Vol 13(1990)283-290
12. M. Helie, Matériaux Métalliques: Phénomènes de Corrosion, Université d`Evry- Val d`Essonne, Département Sciences des Matériaux IUP 2-Genie des Matériaux, 2000
13. Pietro Pedferri, Cathodic protection and cathodic prevention, Construction and Building Materials, Vol.10, No.5(1996)391-402
14. A.Raharinaivo, «La Corrosion des Acier dans Le Béton., Quand?, Pourquoi ?, Comment ? »,pp: 16-25, Conférence, CEFRACOR, 12-13 Oct. 1998, France
15. B. Craig, Environmentally Induced Cracking, ASM International, Metals Handbook, Vol 13(1990)145-189
16. Francois Derrien, la corrosion des matériaux métalliques dans le bâtiment, CSTB ©1990, France
17. ACI Committee222, Corrosion of metals in concrete, ACI Manual of Concrete Practice, 1992
18. M. Wery, Décapage chimique des surface métalliques, Technique de l`Ingénieur, M 1 456-1(2000), France
19. BS 7371-1 1991 Coatings on metal fasteners, part 1: Specification for general requirements and selection guidelines
20. Neubearbeitete Und Auflage, E., Die Korrosion Der Metalle, Berlin, 1990

21. A. Brass, J. Chene, L. Coudreuse, Fragilisation des acier par l'hydrogène: mécanismes, Technique de l'Ingénieur, M 176-1(2000), France
22. ISO 9587:1999 Metallic and other inorganic coatings- Pretreatment of iron or steel to reduce the risk of hydrogen embrittlement
23. ISO 9588:1999 Metallic and other inorganic coatings- Post-treatment coating of iron or steel to reduce the risk of hydrogen embrittlement
24. ISO 9717 :1990(F), Couches de conversion au phosphate sur métaux- Méthode de spécification des caractéristiques.
25. T. W. Coslett, British Patent, 247 071, June 26, 1925
26. T. Gueguen, Phosphatation, Technique de l'ingénieur, M (1980), France.
27. J. Donofrio, Zinc Phosphating, Metal Finishing, V. 98(2000) 57-73
28. T. W. Cape, Phosphate Conversion Coatings, Metals Handbook, Vol. 13(1990) 383-388
29. L.Fedrizzzi, et al., Study of the corrosion behaviour of phosphatized and painted industrial water heaters, Progress in Organic Coatings, 42(2001)65-74
30. D. Weng, P. Jokiel, A. Uebleis, H. Boehni, Corrosion and protection characteristics of zinc and manganese phosphate coatings, Surface and Coatings Technology 88(1996)147-156
31. L.Veleva, et al., Corrosion electrochemical behaviour of epoxy anticorrosive paints based on zinc molybdenum phosphate and zinc oxide, Progress in Organic Coatings 36(1999)211-216
32. S.Maeda,et al., The role of chromate treatment after phosphating in paint adhesion, Progress in Organic Coatings 33(1998) 83-89
33. M. C. Deya, et al., The influence of the anion type on the anti corrosive behavior of inorganic phosphates, Surface and Coatings Technology 150(2002)133-142
34. B. del Amo, R.Romagnoli, V. F. Veterc, L.S. Hernandez, Study of the anticorrosive properties of zinc phosphate in vinyl paints, progress in organic coatings, vol.33(1998)28-35
35. P.K. Sinha, R. Feser, Phosphate coating on steel surfaces by an electrochemical method, Surface and Coatings Technology,161(2002)158-168
36. A. Bayon, Galvano Organo, Traitement de Surface, 437(1973)996
37. A. M. Pradel, W. J. Wittke, Phosphate Coatings, Oakite Products, Inc., Berkeley Heights, N.J.,USA, 1975, 497-510
38. N. Bretherton, G. E. Thompson and S. Turgoose, An Electrochemical investigation of the development of phosphate conversion coatings, Corrosion Science, Vol. 35, No.5-8(1993) 1297-1303
39. M. Bouzziri, Adhérence et Propriétés Physico-chimiques des Couches de Phosphate sur Aciers, Thèse, L'Université de Claude Bernard, Lyon I(1994)
40. P. Rombeaux, M. Jrome, J. Galland, Advances in Surface Treatments and Surface Finishing, Pergamon Press, 5 (1987) 85
41. G. Lorin, Galvano Organo, Traitement de Surface, 556 (1985) 459
42. G.Lorin, La Phosphatation des Métaux, Eyrolles, Paris (1973)
43. Guangyu Li, Liyuan Niu, Jianshe Lian, Zhonghao, A black phosphate coating for C1008 steel, Surface and Coatings Technology 176(2004)215-221
44. S. Rossi, F. Chini, G. Straffelini, P. L. Bonora, R. Moschini, A. Stampali, Corrosion protection properties of electroless Nickel/PTEE, Phosphate/MoS2 and Bronze/PTFE coatings applied to improve the wear resistance of carbon steel, Surface and Coating Technology, V. 173(2003)pp: 235-242

45. Advanced Zinc Phosphate/ Metal Pre-Treatment, Pollution Prevention, report, SERDP, N.J.,2003, pp:659-660
46. K. Ogle, A. Tomandl, N. Meddahi, M. Wolpers, The alkaline stability of phosphate coatings I: ICP atomic emission spectroelectrochemistry, Corrosion Science Vol. No. 46(4)(2004)979-995
47. A. Tomandl, M. Wolpers,, K. Ogle, The alkaline stability of phosphate coatings II: In situ Raman spectroscopy, Corrosion Science, Vol. No. 46(4)(2004)997-1011
48. K. Ogle, N. Meddahi, A.Tomandl, M. Wolpers, In situ measurement of phosphate layer stability in alkaline solution, 1<sup>st</sup> International Surface Treatments Institute of Franche-Comté` Conference: Automotive Industry, April 22-24, 2003-Besancon,France
49. G. Gorecki, Importance of Rinsing during pretreatment, Metal Finishing, Vol 98(6)(2000)93-95
50. D. Zimmermann, A. G. Munoz, J.W. Schultze, Microscopic local elements in the phosphating process, Electrochimica Acta 48(2003) 3267-3277
51. S. Maeda, Steel Surface Chemistry Affecting the performance of organic coatings, Progress in Organic Coatings, Vol. 11(1983)1-18
52. N. Satoh,Effects of Heavy Metal additions and crystal modification on the zinc phosphating of electrogalvanized steel sheet, Surface and Coatings Technology, 30(1987)171-181
53. H. S. Bender, G. D. Cheever, J. J. Wojtkowiak, Zinc phosphate treatment of metals, Progress in Organic Coatings, 8(1980) 241-274
54. W. Rauch, Die Phosphatierung von Metallen, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, Germany, 1988
55. G. Bikulcius, et al., Effects of magnetic fields on the phosphating process, Surface and Coating Technology 172(2003)139-143
56. V.Burokas, A.Martusienė, et G. Bikulcius, The influence of hexametaphosphate on formation of zinc phosphate coating for deep drawing of steel tubes ,Surface and Coating Technology 102(1998)233-236
57. R. Tournier, Galvano Organo, Traitement de surface, 9(1981) 518.
58. AS 1627.0-1997 Metal Finishing- Preparation and Pretreatment of Surfaces, Part 0: Method Selection Guide
59. AS 1627.1-1989 Metal Finishing- Preparation and Pretreatment of Surfaces, Part 1: Cleaning using liquid solvents and alkaline solutions
60. AS 1627.5-1994 Metal Finishing- Preparation and Pretreatment of Surfaces, Part 5: Pickling, descaling and oxide removal
61. AS 1627.6-1994 Metal Finishing- Preparation and Pretreatment of surfaces, Part 6 :Chemical conversion treatment of metals
62. ISO 6892:1998 Metallic materials- Tensile testing at ambient temperature
63. ISO 6935-1:1991, Steel for reinforcement of concrete- Part 1: Plain bars
64. ISO 6935-2:1991, Steel for reinforcement of concrete- Part 2: Ribbed bars
65. S.N.S: 1642 / p2 / 1996 Steel for the reinforcement of concrete- Part 2: ribbed bars
66. ISO 10065:1990, Steel bars for reinforcement of concrete-Bend and rebend tests
67. NF A 35-015 (1996), Armatures pour béton armé: Ronds lisses soudables.
68. ASTM A 615-01b Standard Specification for Deformed and plain billet-steel bars for concrete reinforcement