

تقدير العمر الافتراضي للعناصر المعدنية في محطات الطاقة الحرارية باستخدام اختبار البنية الحقلي (Replica test)

مصعب مصطفى رزوق¹، حسن فارس هدلة²

¹ مهندس في مركز الدراسات والبحوث العلمية.

² استاذ - قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة

دمشق drah.hadla@damascusuniversity.edu.sy

تاريخ الإيداع: 2022/8/16

تاريخ القبول: 2023/1/17



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب الترخيص CC

BY-NC-SA 04

الملخص

تطبق الاختبارات الميتالوغرافية الميدانية (Replica test) عند الحاجة لدراسة الزحف الحراري في التجهيزات المعدنية الصناعية خصوصاً محطات الطاقة، بهدف تجنب الكوارث (مثل انفجار فرن التحسين H01 في مصفاة حمص. كانون الثاني 2018). الزحف البنيوي للقطع المعدنية يمكن أن يقيّم من خلال تقسيمه إلى أصناف مثل: الغرفة graphitization، نمو الحبيبات، التكهّف cavities، الشقوق الميكروية، وغير ذلك. يظهر هذا البحث نتائج العمل الميتالوغرافي الحقلي المنفذ وفق طريقة (Replica test) المطابقة للمعيار الألماني DIN 54150 ويوضح مقدار وثوقية نتائج الاختبارات الميدانية لتوصيف البنية البلورية للمعدن المختبر، ومن ثم تقييم النتائج وفق المعيار العالمي VGB-TW 507.

الكلمات المفتاحية: البنية الميكروية، اختبارات حقلية ميتالوغرافية، الزحف الحراري،

محطات الطاقة.

Life Estimation of Metallic Element in Thermal Power Plants with Field Metallography Tests (Replica test)

Mossab Mostafa Razok¹, Hasan Fares Hadla²

¹Engineer in SSRC- Damascus.

² Professor - Department of Mechanical Design Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University
drah.hadla@damascusuniversity.edu.sy

Received: 16/8/2022

Accepted: 17/1/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract

In situ metallography (Replica test) is required when the thermal creep damage must be evaluated on industrial metallic equipment specially in power plant stations. In order to prevent catastrophic accidents (As example. The explosion of H01 furnace in Homs refinery station, January-2018). The metallurgical damage to be evaluated in metallic equipment could be classified as: graphitization, grain growth, cavities, micro cracks, etc. This paper shows the results of field work using in situ metallography (Replica test) according to standard method DIN 54150 and evidence of the reliability of the results for representing the bulk microstructure of the metallic component, and evaluate the results according to the VGB-TW 507 Standard.

Key Words: Microstructure, Field Metallography Test, Thermal Creep, Power Plant Stations.

المقدمة

تعد تقانة اختبار البنية البلورية باستخدام اللصاقة أو الطبعة (Replica test) من التقانات المهمة والنادرة، حيث تحتكر هذه التقانة من جهات قليلة الانتشار عالمياً. يمكن تعريف هذه التقانة بأنها عملية أخذ طبعة قابلة للنقل تعكس البنية الميتالوغرافية لسطح العينة المعدنية بعد تحضيرها بطرق خاصة، من ثم دراسة هذه الطبعة مخبرياً باستخدام المجهر الضوئي أو الإلكتروني.

تعد الاختبارات الوقائية أساس العمل في مجال عمل محطات الطاقة الحرارية كمصافي النفط ومحطات توليد الكهرباء الحرارية والمفاعلات النووية، وتشمل هذه الاختبارات الوقائية تلك المتعارف عليها تقليدياً بالاختبارات الإلتلافية كالاشعة السينية والأمواج فوق الصوتية...

لكن وللأسف عندما يتعلق الموضوع بالانهيار الذي يطال الهياكل المعدنية نتيجة الزحف الحراري، Thermal creep فإن تلك الاختبارات تكون متأخرة وغير مجدية، نتيجة السلوك الأسي المتسارع لنمو الإخلاعات البنيوية الناتجة عن الزحف الحراري للمعدن المستثمر في المنشأة.

لا تتوفر دراسات محلية أو عربية للموضوع. لكن عالمياً فتتضمن المراجع العلمية دراسات كثيرة تضع نماذج رياضية لتفسير الزحف الحراري و دراسة سلوك المواد تحت تأثير المعاملات المختلفة المؤثرة، نذكر بعضها:

- نموذج دورن (Dorn [1] 1995) المطبق في حال الإجهاد العالي و درجة الحرارة أقل من نصف درجة الانصهار.

$$f_1(\sigma) = C \exp\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)$$

$$f_2(\sigma) = k \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

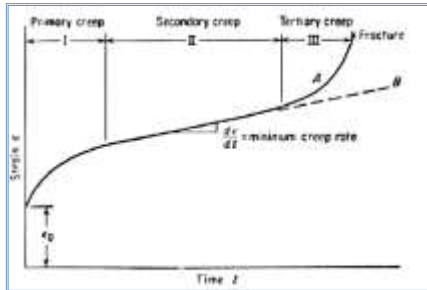
$$f_3(\sigma) = \sum a_i t^{n_i}$$

حيث Q طاقة التنشيط، R ثابت بولتزمان، σ_0 ، C ، a_i ، k ثوابت تتعلق بالمادة.

وقد كان هذا النموذج الأكثر استخداماً في المراجع العلمية من حيث النمذجة الرياضية لظاهرة الزحف حيث ركزت الدراسات اللاحقة على تقدير قيم الثوابت بحسب كل نوع من المعادن [4]. Jacob Teboho [3] Molokwane كذلك [4]. Ján Michel', Marián Buršák.

اعتمدت هذه النماذج على اختبارات مسرعة لظاهرة الزحف الحراري عن طريق جهاز اختبار الشد التقليدي لكن مع إضافة آلية تسخين محيطية بالعينة المختبرة. من ثم دراسة تغيير الخواص الميكانيكية مع كل من الزمن والحرارة. و ثم بعد ذلك استقراء النموذج الرياضي المذكور سابقاً.

يمثل (الشكل 1) المخطط النموذجي للزحف الحراري لعينة معدنية، حيث يوضح علاقة الزحف بالزمن $\epsilon = f(t)$. وفق مجلة تطورات في علم المواد، Journal Progress in Material Science [6].



(الشكل 1) منحني الزحف النموذجي. Dorn [1] 1995

يظهر (الشكل 1) المعلومات التالية:

أولاً: القيمة ϵ_0 المعبرة عن الزحف البدائي أو اللحظي الذي تتأثر به المادة في بداية وضعها تحت تأثير الحمل والحرارة معاً ويكون سريعاً بحيث لا معنى لقياس زمنه.

ثانياً: يظهر المخطط ثلاث مراحل استقرار هي:

1. مرحلة الزحف الأولي: وهي مرحلة انتقال الزحف

حيث تزداد مقاومة الزحف (Strain) بشكل واضح مع الزمن.

الوسط المستمر مع ادخال لمفاهيم طاقة الرابطة البلورية. وتتوافق هذه الدراسة مع النتائج التي حصل عليها (Stan T. Mandziej.[9]) الذي ركز على التحولات المتسارعة التي تطال بنية المعدن تحت حمل حراري ثابت، حيث تمحورت دراسته على المراقبة الطويلة للفولاذ المقاوم للصدأ والتي تمتد لعدة سنوات.

وتعد الدراسة المقدمة من قبل (Marián Buršák. Ján [10]) من أقرب الدراسات لما يسعى له هذا البحث، حيث قدم دراسة تربط بين الخواص الميكانيكية والبنية البلورية لخليطة CrMo وذلك عند تعرضها لزحف ناتج عن حمل حراري مرتفع.

قدم كل من (Hayhurst, Mustata [11, 12]) تحليلاً يظهر تعقيد ظاهرة الزحف الحراري، حيث أظهر نموذجاً تحليلياً ثلاثي الأبعاد عن طريق شبكة تحليلية لعينة مأخوذة من فرعة أحد الأنابيب. ومن خلال الربط بين العلاقات الموصفة لكل منطقة يظهرها وذلك باستخدام نمذجة العناصر المنتهية (Finite-Element modelling (FE)، فقد استطاع إيجاد توافق بين الفحص المجهرى للبنية البلورية وما يحدث على أرض الواقع من تلف للأنبوب الذي أخذت منه العينة وذلك تحت حمولة ميكانيكية (ضغط) ثابت.

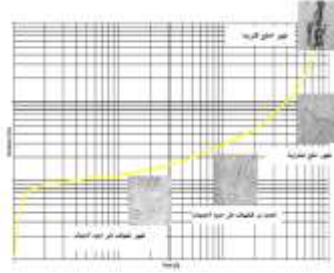
تفرض هذه الدراسة ما يلي:

يرتبط التحليل ثلاثي الأبعاد باستخدام العناصر المنتهية بشكل كبير بمدى ثخانة المنطقة المتأثرة حرارياً HAZ وحجم المنطقة الحساسة لنشوء الإنخلاعات. وترتبط ثخانة هاتين المنطقتين مباشرةً بالشكل الهندسي لمنطقة اللحام (الشكل، الثخانة، عمليات التحضير، وكذلك بإجرائية اللحام المعتمدة (خطوات اللحام، الزمن، الالكترود،...). بيّنت هذه الطريقة ارتباطاً كبيراً في النتائج، يمكن أن يخفض هذا الارتباط عن طريق الدراسة الميتالوغرافية للعينات المتعرضة لظاهرة الزحف.

2. مرحلة الزحف الثانية: وفيها تظهر المادة تغيراً خطياً ثابتاً لمقاومة الزحف ويكون المقدار $d\epsilon/dt$ المعبر عن معدل الزحف في حده الأدنى.

3. مرحلة الزحف الثالثة: ويظهر فيها تغير متسارع لمقاومة الزحف.

ثالثاً: لحظة الانهيار حيث تكون الفترة التي تسبق هذه اللحظة قصيرة جداً، إذ يظهر الانهيار وكأنه حدث مفاجئ. وقد قدمت الكثير من المراجع العلمية والتقنية عمليات مطابقة بين كل مرحلة من مراحل الزحف الحراري والطبيعة البلورية للمعدن بحيث يمكن تخيص ما اتفقت عليه معظم المراجع العلمية بما ورد في الدراسة المقدمة من قبل (Ray et J, Pet. [2])، الموضحة في الشكل (2).



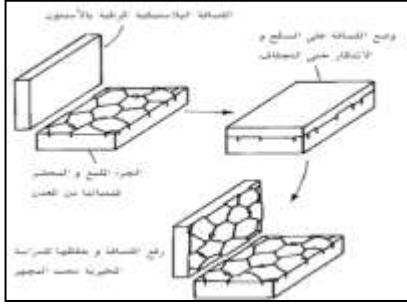
الشكل (2) مطابقة البنية الميتالوغرافية لمراحل الزحف (Ray et J, Pet.2014 [2])

أما من وجهة نظر تقنية فقد قدم (Uddeholm,[5]) دراسة عن طريقة تقييم اللصاقات الميتالوغرافية المأخوذة عن السطح المحضر للمعدن وذلك باستخدام تقانة اللصاقة العجينية و حدد مصادر الخطأ في عمليات القياس و أجرى مقارنة بين اللصاقة التقليدية واللصاقة العجينية، كما حدد معايير للمستثمر ليتمكن من تجنب الالتباس بين العيوب المعبرة عن الزحف الحراري أو التأكسد أو الزحف وبين تلك الناتجة عن عيب استثماري.

قدم كل من (C. Gourдина, S. Mariea, SChapuliotb [8]) نمذجة نظرية لنمو الخلع وتطورها بناءً على الخواص البلورية والترموديناميكية للمادة المعدنية وذلك وفق تغير الشكل البلوري وأبعاده. وذلك باعتماد ميكانيك

ملمعة كالمرآة، يعرض هذا السطح لمحلول تخريش كيميائي (Nital) ($2\% \text{HNO}_3 + 95\% \text{Alcohol}$) لمدة 15 ثانية، يتم بعدها أخذ صورة عيانية **macroscopic** للسطح باستخدام مجهرة محمولة، ثم توضع لصاقة من مادة بوليميرية معالجة بالأسيتون الذي يعطيها سطحاً عجينياً حساساً يسمح بأخذ طبعة على سطح المعدن. تمثل هذه الطبعة التضاريس الطبوغرافية للمعدن، تعكس هذه التضاريس الأطوار والعيوب البنيوية للمعدن المدروس.

يوضح الشكل (3) مراحل أخذ اللصاقات من الموقع، كما يوضح الشكل (4) التجهيزات المستخدمة.



الشكل (3) مراحل أخذ اللصاقات من سطح المعدن المراد دراسته (Ray et al., J Pet. [2])



الشكل (4) التجهيزات المستخدمة لأخذ اللصاقة (مأخوذة من الدليل الإرشادي الإلكتروني للتجهيزات)

يتم قياسها وتقييمها وفق عدة مستويات تقابل درجة الزحف الذي وصل له المعدن، ومن ثم يمكن تقدير العمر المتوقع

ركزت الدراسة على ما يحدث للمادة المعدنية نتيجة الحمل الحراري والضغط الثابت مع تقدم الزمن، لكنها لم تبين أثر العيوب التصنيعية على هذه الظاهرة، بين ([13] Bolton) في دراسته أهمية العيوب التصنيعية (فجوات ميكروية، خبث متبقي، كربيدات،...) في عملية بداية ظاهرة الزحف الحراري

مواد البحث:

أجري العمل التجريبي بشكل ميداني على عينات معدنية باستخدام تقانة اختبار اللصاقة **Replica test**، وقد أخذت اللصاقات من مواقع مختلفة في كل من مصفاتي بانياس وحمص خلال فترات متباعدة نسبياً (6 أشهر) ابتداءً من منتصف عام 2016 حتى 2022/3/23. كما تم عند كل قراءة ميتالوغرافية إجراء قياسات القساوة الديناميكية بمقياس قساوة فيكرز (HV) محمول للاستدلال على التغير الميكانيكي الحاصل.

تتم عملية الاختبار بتحضير المنطقة المراد فحصها من سطح المعدن (يفضل بجوار مناطق اللحام المعدني كونها الأكثر ضعفاً) وتدرج عملية التحضير من الجليخ الخشن للسطح حتى عمليات التلميع النهائي حيث نحصل على سطح

Transcopy



تؤخذ اللصاقات إلى المختبر، حيث تدرس تحت المجهر الضوئي بتكبير حتى 1000 مرة، ويتم تقييم النتائج بناءً على المعايير العالمية المعتمدة، حيث تصنف الصور البنيوية التي

الاستثمار في كلا المنشأتين. لذلك تم اختيار مفاعل التحسين (حيث يتم تعديل خواص الوقود المستخدم للسيارات عن طريق إضافات محددة والتسخين مع الضغط). يعطى التركيب الكيميائي لمعدن أنابيب أفران التحسين (بناءً على نتائج الاختبار الميداني المنجز باستخدام جهاز التحليل الطيفي XRF المحمول) وفق الجدول (1).

بهدف أخذ الاحتياطات اللازمة من قبل إدارة المنشأة (تبديل الأنابيب المعدنية، تكثيف عمليات المراقبة).

يوضح الشكل (2) الارتباط بين التقييم البنيوي والزحف.

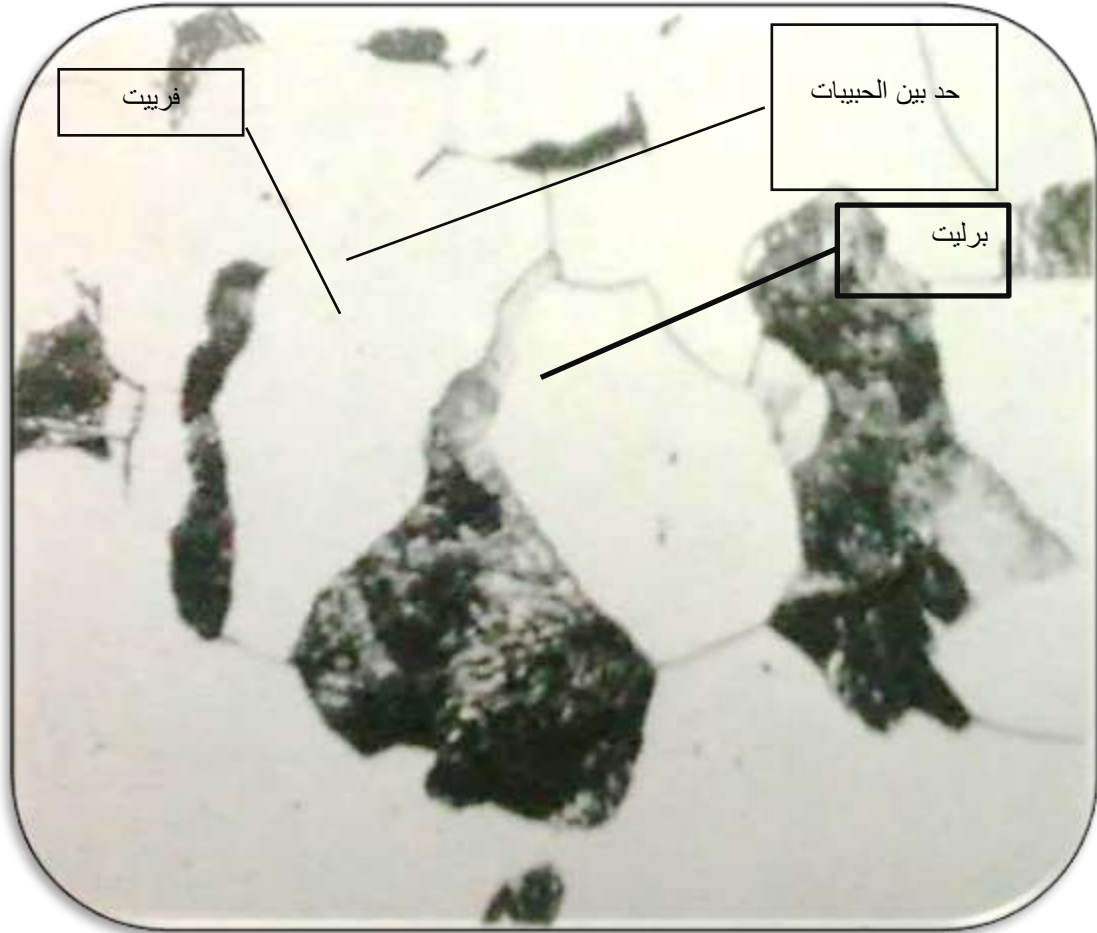
النتائج والمناقشة:

تمت الدراسة على عينات ذات تركيب متماثل في مصفاتي بانياس وحمص مع الأخذ بعين الاعتبار تقارب شروط

C %	Si %	Mn%	P %	S %	Cr %	Mo %	Fe %
0.11	0.82	0.40	0.02	0.02	1.23	0.54	Balance

الجدول (1) وهذا التركيب يوافق المعدن WP11 وفق المعيار الأمريكي ASTM/A213 والمستخدم لخزانات وأنابيب الضغط

العالي عند درجات الحرارة المتوسطة والعالية. ويتميز ببنية ميتالوغرافية في حالته الأصلية موضحة في الشكل (5).



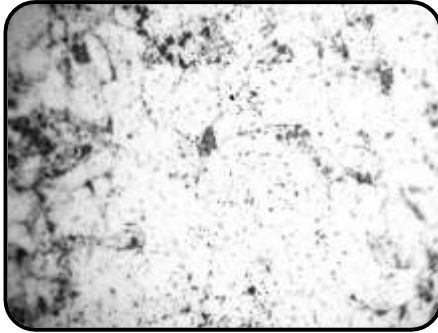
الشكل (5) البنية المجهرية للفولاذ WP11 بحالته الأصلية محضرة في مختبر الميالوغرافيا مأخوذة من مادة خام مستودعية، محلول التخريش نيتال 2%، التكبير 1000× البنية مولفة تقريباً من 15% برليت و85% فريت HV 210

الميتالوجرافية الحقلية الموافقة للمعيارية DIN 54150. وقد تم توصيفها وفق التصنيف المعياري VGB-TW 507 Standard المعتمد عالمياً لتصنيف درجات الزحف للمعدن (لاحظ الجدول (2) المحدد لمعايير التقييم المعتمدة)، وكانت النتائج كالتالي:

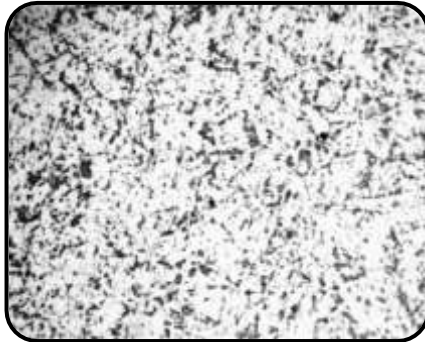
تمت المقارنة بين عينات ميتالوجرافية مأخوذة بتقانة اللصاقة (Replica) لمعدن أنابيب الأفران وذلك في موقعين من محطة بانياس ومقارنتها ببقايا أنابيب معدنية مأخوذة من أنابيب الأفران المتعرضة لحادث انفجار في مصفاة حمص وكانت النتائج بعد تحضير السطح وفق الإجراءات المعيارية للاختبارات

رقم العيب	تقييم الصورة الميتالوجرافية	الإجراء اللازم
1	عدم وجود أي مظهر للزحف	فحص روتيني
2	تكهفات منعزلة	إعادة الفحص بعد 20000 ساعة عمل
3	سلسلة تكهفات على حدود الحبيبات	إعادة الفحص بعد 15000 ساعة عمل
4	شقوق ميكروية	إعادة الفحص بعد 10000 ساعة عمل
5	شقوق ماكروية	تغيير فوري للعنصر المختبر

• العينة (A-4) : موقع مصفاة بانياس الفرن H.101-2 بجانب الدرزة للحامية. يوضح الشكل (11) صورة للصلاقة مأخوذة من هذا الموقع.



الشكل (6) البنية المجهرية للفولاذ العينة (A-1) التكبير 1000× فريتية في الغالب مع تكهفات منعزلة على حدود الحبيبات HV134



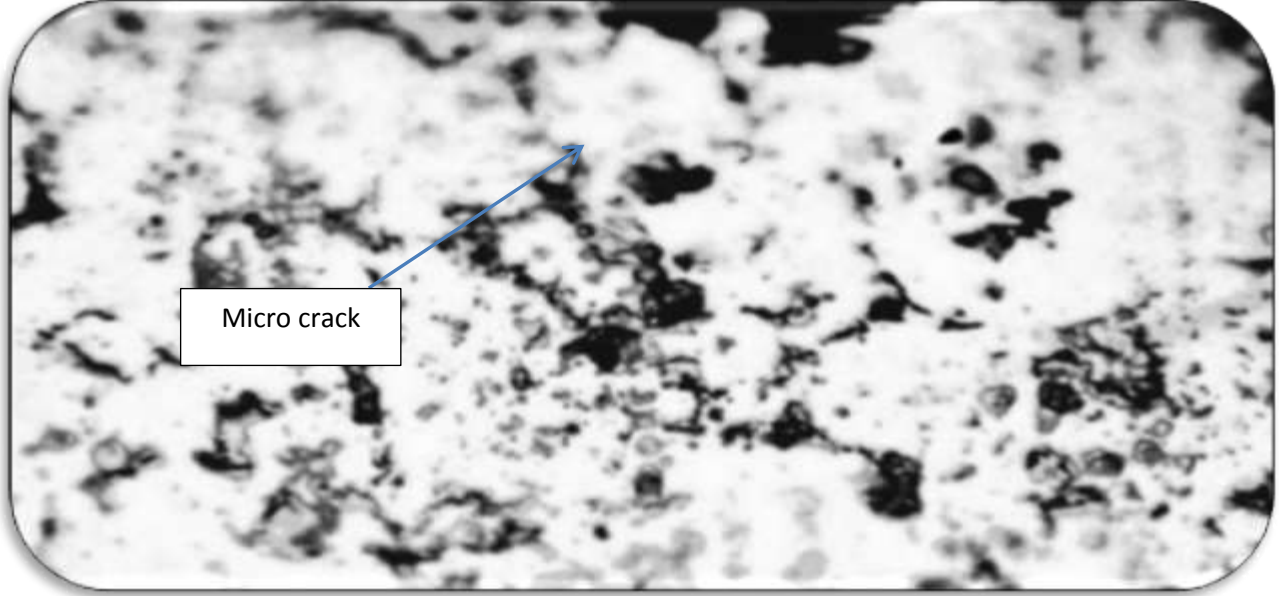
الشكل (7) البنية المجهرية للفولاذ العينة (A-2) التكبير 1000×

معايير التقييم وفق التصنيف المعياري VGB-TW 507 Standard الجدول (2)

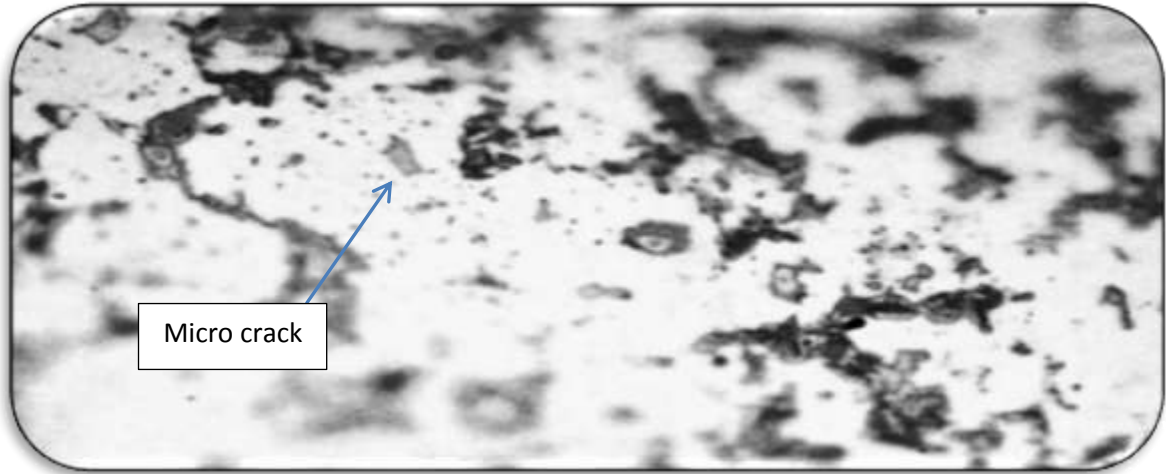
- العينة (A-1): موقع مصفاة بانياس الفرن H.106-2 بجانب الدرزة للحامية (أي المنطقة المتأثرة حرارياً HAZ). يوضح الشكل (6) صورة للصلاقة مأخوذة من هذا الموقع.
- العينة (A-2) : موقع مصفاة بانياس الفرن H.106-2 بجانب الدرزة للحامية. يوضح الشكل (7) صورة للصلاقة مأخوذة من هذا الموقع.
- العينة (B-1): موقع مصفاة حمص، المجمع السفلي من الوحدة 500H بجانب الدرزة للحامية. يوضح الشكل (8) صورة للصلاقة مأخوذة من هذا الموقع.
- العينة (B-2) : موقع مصفاة حمص الوحدة U400-3 بجانب الدرزة للحامية. يوضح الشكل (9) صورة للصلاقة مأخوذة من هذا الموقع.
- العينة (A-3) : موقع مصفاة بانياس الفرن H.101-1 بجانب الدرزة للحامية. يوضح الشكل (10) صورة للصلاقة مأخوذة من هذا الموقع.

HV

فريتية في الغالب مع تكهفات منعزلة على حدود الحبيبات 152



الشكل (8) البنية المجهرية للفولاذ العينة (B-1) التكبير $\times 1000$
فريتية في الغالب مع ظهور بعض الشقوق الميكروية HV 103



الشكل (9) البنية المجهرية للفولاذ العينة (B-2) التكبير $\times 1000$
فريتية في الغالب مع ظهور بعض الشقوق الميكروية HV 105

وتعتبر هذه الحالة طبيعية وتسمح بعمل المنشأة سنتين تقريباً قبل الاختبار اللاحق.

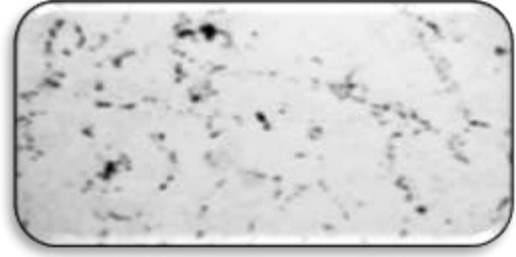
2. العينات المأخوذة من مصفاة حمص (B-1)، (B-2). أظهرت زحفاً من مستوى متقدم والذي يعرف بظهور الشقوق (cracks) الميكروية، و أظهر المعدن قساوة تتراوح ضمن

المجال (HV(95-125). وتعدّ هذه الحالة خطيرة وينبغي تبديل المعدن بأقصى سرعة ممكنة .

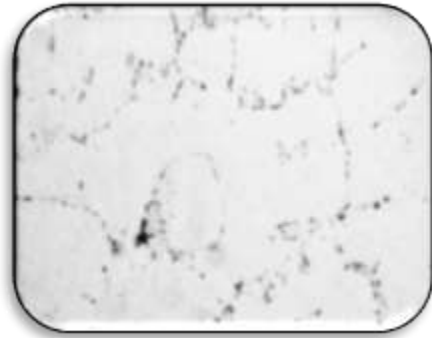
3. زحف حراري من المستوى الثاني في عينات مصفاة بانياس (A-3)، (A-4) والذي يعرف بظهور تكهفات (Cavities) متجمعة على شكل سلاسل، وأظهر المعدن قساوة فيكرز قيمها تتراوح ضمن المجال (HV(150-110). وتعتبر هذه الحالة طبيعية وتسمح بعمل المنشأة سنة و نصف تقريباً قبل الاختبار اللاحق.

4. اختبار القساوة يمكن أن يعتبر مؤشراً مقبولاً، لكن غير حاسم، وفق شروط الرقابة الفنية العالمية لتقييم الزحف الحراري.

5. بالمجمل فقد بينت الدراسات التجريبية فعالية هذه الطريقة لإعطاء المسؤولين عن الرقابة والسلامة الفنية في كل من محطتي بانياس و حمص النفطيتين، صورة واضحة لمستقبل المنشأة ليتم أخذ التدابير اللازمة لمعالجة الوضع.



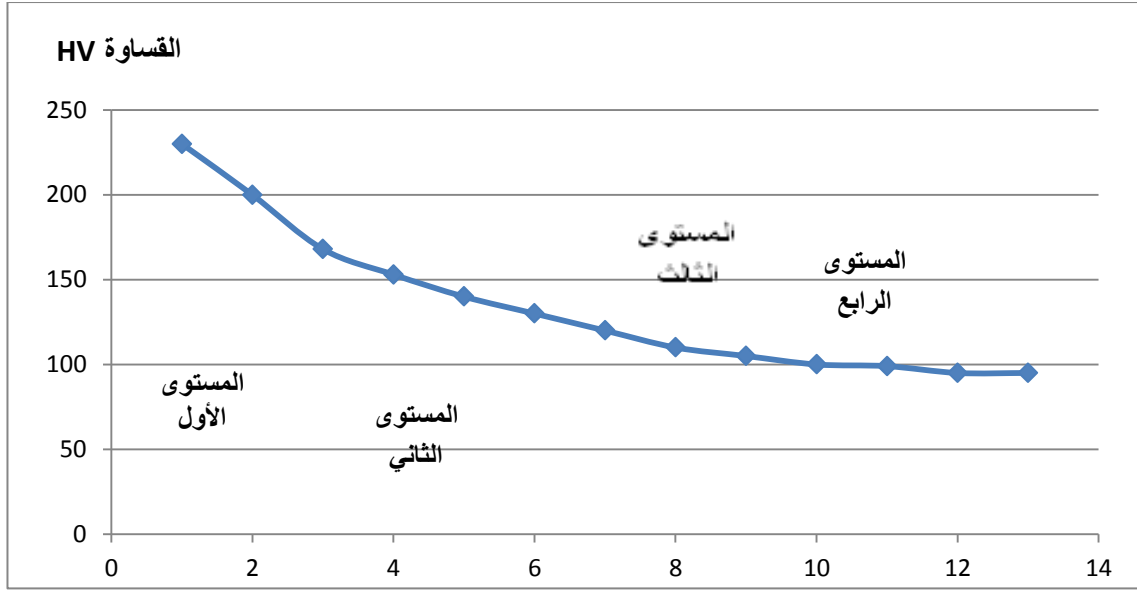
الشكل (10) البنية المجهرية للفولاذ العينة (A-3) التكبير 1000×
فريتية في الغالب مع ظهور سلاسل من التكهفات HV 123



الشكل (11) البنية المجهرية للفولاذ العينة (A-4) التكبير 1000×
فريتية في الغالب مع ظهور سلاسل من التكهفات HV 115
بمقارنة الصور البنيوية للعينات السابقة و بالعودة

للجدول (2)، تمت ملاحظة ما يلي:

1. زحف حراري من المستوى الأول في عينات مصفاة بانياس (A-1)، (A-2) والذي يعرف بظهور تكهفات (Cavities) ضمن الطور الفريتي للمعدن، وأظهر المعدن قساوة فيكرز قيمها تتراوح ضمن المجال (HV(140-190).



الشكل (10) تغير القساوة (الخواص الميكانيكية) تبعاً لتغير مستوى الزحف

ومن جهة أخرى يتوجب التوجيه للجهات التي تتعرض منشآتها لظواهر الزحف الحراري (محطات توليد الطاقة الحرارية، مصافي النفط،...)، لإدراج عملية الاختبار المذكورة ضمن برامج الرقابة الفنية و الجودة لديها بشكل إلزامي. **التمويل:** هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

الخاتمة:

أظهرت الدراسة نجاحاً في إمكانية وضع تكنولوجيا اللصاقة في الخدمة محلياً، لتلبية حاجات قطاع الطاقة والاستغناء عن الخبرات الأجنبية ضمن مستوى جودة مقبولة. وبالتالي توفير القطع الأجنبي وتجنب استغلال هذه التقنية من قبل الجهات الخارجية ويفضل العمل على التوسع أكاديمياً في هذا الموضوع نظراً لأهميته. كما يتوجب على القائمين على العمل تأطير وتوثيق العمل وفق اجرائيات معتمدة، كما ينبغي على المختبر المؤهل لهذه التقنية الحصول على اعتماد رسمي وفق المواصفة ISO17025 .

References

1. Dorn, J.E Some fundamental experiments on high temperature creep, J. Mech. Phys. Solids, (1995) Vol 3, P 50- P 122.
2. Ray et al., J Pet Environ Biotechnol 5:4. Uncertainty in Damage Assessment and Remaining Life Prediction of Engineering Materials Used In Petrochemical Industry J. of Shanghai University (English Edition), (2014), Vol.5. P.326- 330.
3. Teboho Jacob, Molokwane. microstructural and property assessment of creep aged 12cr steel after welding , Publisher of Mechanical Industry, Beijing(2019), p.174-176.
4. JánMichel', MariánBuršák, MarekVojtko. microstructure and mechanical properties degradation of CrMo creep resistant steel operating under creep conditions. Sweden.(2018 Sept), P.26-28.

5. Uddeholm, Repliset test for creep .Swedish Institute for Metals.D.L.MARRIOT. Sweden(2020), p.177-202.
6. Eds. A. K. Ray, S. Chaudhuri, N. G. Goswami and R. N. Ghosh @NML Creep and life assessment of engineering components in power plants and process industries. Jamshedpur 831007, India. (2018). p.177-202.
7. R.K.PENNY, Journal Progress in Material Science . Nucleation and Growth of cracks and Cavities under Creep-Fatigue Interaction, USA(2017), Issue.28.
8. C. Gourдина, S. Mariea, S Chapuliotb,. An Analytical Thermal Fatigue crack growth approach, Laboratoire, F-91191 Gif-sur-Yvette, France. . (2021). p.5-198.
9. Stan T. Mandziej, Accelerated Microstructure Transformation Caused by Thermal-Mechanical Fatigue, Materials Science Forum Vols. 706-709 (2020) p 871-877.
10. Denis Delagnes, Farhad Rezai-Aria, Christophe Levaillant, André Grellier. Comportement et durée de vie en fatigue isotherme de l'acier X 38 CrMoV 5. Submitted on (6 Nov 2019).all.
11. Hayhurst, D.R. and Vakili-Tahami, F. India Material Section. Uv, p122-185. (2005).
12. Mustata, New R., and Vakili-Tahami, A. India Uv. p125-154 (2016).