تأثير المراجعة لفولاذ متوسط الكربون على سلوك الكلال

عبدالله ضايع عـــاصي /مدرس مساعد/ معهد تكنولوجيا / بغداد/قسم الميكانيك

سلمان حسين عمران /مدرس مساعد/ معهد تكنولوجيا / بغداد/قسم الميكانيك

الخلاصة

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير مقاومة الكلال للفولاذ متوسط الكربون (Ck45) والتقسية والمراجعة عند درجات حرارة مختلفة ^{o}C (250, 450, 650) وذلك باستخدام المعاملات الحرارية المتضمنة التقسية (الإخماد) في وسطين هما الماء والزيت متبوعا بالمراجعة عند درجات حرارة المذكورة ، والمقارنة بين تأثير كل من الوسطين على البنى المجهرية الناتجة والخواص الميكانيكية وكذلك مقاومة الكلال لكل وسط تقسية. تم إجراء اختبارات الكلال للفولاذ غير المعامل حراريا (as-received) والمعامل حراريا عند اجهادات ثابتة السعة وبنسبة إجهاد ($R = -1$).

أظهرت النتائج إن التقسية في الماء والمراجعة عند ^{o}C 250 (1 hr) أعطت أفضل مقاومة كلال للفولاذ وذلك بسبب تكوين بنية المارتنسايت المراجع، أما بالنسبة لوسط الزيت فكانت الظروف المثلى هي عند التقسية في الزيت والمراجعة عند ^{o}C 250، كما تم دراسة سلوك شقوق الكلال الطويلة من خلال صور المجهر الالكتروني الماسح (SEM) وقياس أطوال الشقوق لكل بنية مجهريه، وتم وضع أنموذجين رياضيين للتنبؤ بعمر الكلال للفولاذ متوسط الكاربون المقسى في الماء والمراجع عند درجات حرارية مختلفة اعتمادا على النتائج العملية حيث استخرج الأنموذج الأول من سرعة تقدم الشق (da/dN) أما الثاني فتم استخراجه من معامل شدة الإجهاد (ΔK) (the stress intensity factor) .

1. $$N_f = \frac{0.2 \times 10^9}{\sigma_f \, T^{0.07}}$$

2. $$N_f = \frac{100 \times 10^9}{\sigma_f{}^2 T^{0.07}}$$

THE EFFECT OF TEMPERING ON THE FATIGUE BEHAVIOR FOR MEDIUM CARBON STEEL

Abstract

This research is concerned with the study of the effect of tempering on the fatigue strength of medium carbon steel (CK 45), by using different heat treatments including quenching in water and oil followed by tempering at (250, 450 & 650) ^{o}C comparisons between the effects of two mediums on microstructure, mechanical properties and fatigue strength for each quenching media . The fatigue tests have been done under constant amplitude stresses with a stress ratio (R=-1). The experimental results reveal that water quenching followed by tempering at 250 ^{o}C (1 hr) gives maximum fatigue strength for steel, and this is due to the formation of tempered martensite. Long fatigue cracks have been measured and studied from using fractography of fatigue specimens (SEM). Two models have been to proposed to assess fatigue lives of quenched and tempered medium carbon steel at different tempering temperature . The first model was derived from the fatigue crack growth rate equation (da/dN) while the second model was extracted from the stress intensity factor equation (ΔK) .

1. $N_f = \dfrac{0.2\times10^9}{\sigma_f \, T^{0.07}}$

2. $N_f = \dfrac{100\times10^9}{{\sigma_f}^2 T^{0.07}}$

1- المقدمة Introduction

تتعرض العديد من الأجزاء الهندسية للفشل نتيجة للاجهادات الميكانيكية لأسباب تصميمية أو ميتالورجية، وتمثل ظاهرة فشل الكلال المساحة الأكبر وبحدود 90% من فشل الأجزاء الهندسية التي تكون معرضة إلى اجهادات دورية.[1]

إن خطورة فشل الكلال تتضمن حصوله بدون إنذار مسبق، لذلك أخذت ظاهرة الكلال جانباً كبيراً من البحوث والدراسات التي تعالج فشل المعادن، إذ تركزت هذه البحوث والدراسات على طبيعة الكلال وآلية الكسر ابتدءا من تكون الشقوق وسلوكها خلال فترات نموها وانتهاء بالعمر العملي للأجزاء التي تتعرض إلى الاجهادات المتكررة التي تسبب الكلال[2].

أن تحسين الخواص الميكانيكية للفولاذ باستخدام المعاملات الحرارية أدى إلى حدوث تطور كبير في الصناعة، وهذا التطور أدى إلى تحمل الفولاذ لسرع دورا نية عالية والى الظروف القاسية أثناء الخدمة.

إن خاصية الفولاذ الأساسية هي في إمكانية تصليده أو ما يُعرف بقابلية التصليد وهي إمكانية تحول الفولاذ جزئيا أو كليا من الاوستنايت إلى المارتنسايت بنسبة محددة وتحت ظروف محددة [3] ، ومن المعلوم إن مقاومة الكلال للفولاذ متوسط الكاربون عالية لذلك تناول هذا البحث دراسة تأثير البنى المجهرية أو الأطوار الناتجة من

المعاملات الحرارية المشتملة على التقسية في وسطين هما الماء والزيت متبوعا بالمراجعة عند درجات حرارية مختلفة على سلوك وعمر الكلال عند اجهادات ثابتة السعة.

استقراء نماذج رياضية لمعدلات نمو شقوق الكلال لفولاذ متوسط الكربون تحت تأثير المراجعة ومقارنة وتقويم نماذج نمو شقوق الكلال من خلال تنفيذ اختبارات الكلال والمعاملات الحرارية التي يتطلبها البحث .

الجاني العملي

2-1 المعدن المستخدم

إن المعدن المستخدم في هذا البحث هو فولاذ متوسط الكاربون (CK45) حسب المواصفة الألمانية (DIN) الذي يستخدم في الصناعة لأغراض مختلفة. وقد تم الحصول على قضبان اسطوانية من هذا المعدن بطول 6m وقطر 19mm من الأسواق المحلية.

تم فحص التركيب الكيمياوي للفولاذ متوسط الكاربون (CK 45) وذلك بإجراء عملية التحليل الكيمياوي باستخدام جهاز المطياف الموجود في المعهد المتخصص للصناعات الهندسية. الجدول (1) يوضح التركيب الكيمياوي القياسي والتركيب الفعلي للمعدن المستخدم في البحث.

جدول (1) نتائج التحليل الكيماوي للمعدن المستخدم

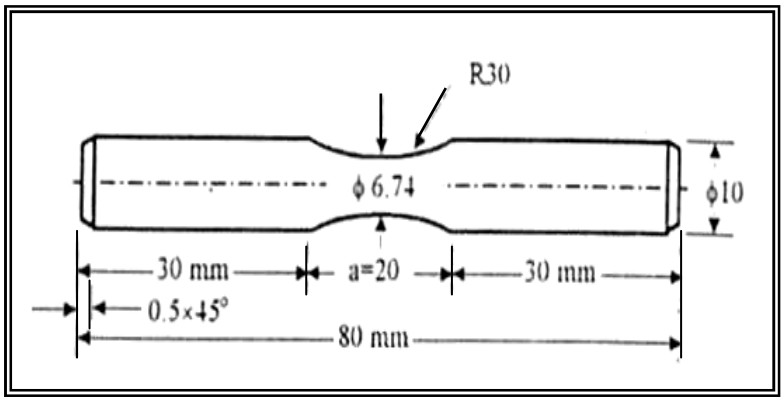
Wt %	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cu	Fe
القيمة القياسية	0.42-0.5	0.15-0.35	0.5-0.8	≤ 0.035	≤ 0.035	-	-	Rem.
القيمة الفعلية	0.472	0.2115	0.567	-	0.03	0.082	0.016	Rem.

2-2 تصنيع عينات اختبار الكلال

تم تصنيع عينات اختبار الكلال الموضحة في الشكل (1) وفقا للمواصفات القياسية لفحصها على جهاز اختبار الكلال بالانحناء الدوار.

تم تقطيع القضبان المستلمة إلى قطع بطول 82 mm وقطر 11 mm ثم تم إجراء التجليخ السطحي بمكائن التجليخ اللامركزي (Center less Grinding) للحصول على القطر النهائي 10mm. وللحصول على التقوس الموجود في وسط العينة (R 30) تم تشغيل العينات على مخرطة الاستنساخ من نوع (Harrison

600) حيث تم استنساخ العينة مع التقوس الموجود على عينة قياسية صنعت على ماكنة CNC وبقطر 6.74 mm في وسط التقوس (R) مع ترك سماح 0.1 mm لغرض التنعيم اليدوي وإزالة التشوهات الناتجة من المعاملات الحرارية، حيث تم استخدام ماكنة الخراطة الاعتيادية لغرض تنعيم الجزء المقوس (R 30) بأوراق تنعيم من كاربيد السليكون بدرجات نعومة (120، 180، 220، 320، 400، 500، 600، 1000، 1200) حبيبة /سم^2 ، أما الصقل فتم باستخدام معجون الماس بحجم حبيبي 4/8 مايكرون مع قماش صقل احمر وسائل تبريد للحصول على درجة فائقة من النعومة والصقل (**Mirror Finishing**).



شكل (**1**) أبعاد عينة الكلال القياسية **[10]**

2-3 تصنيف عينات اختبار الكلال

تم تصنيف عينات اختبار الكلال إلى خمس مجاميع وفقا لنوع التعامل الحراري المستخدم وكما موضح في الجدول (2).

جدول (2) تصنيف عينات اختبار الكلال للفولاذ متوسط الكاربون

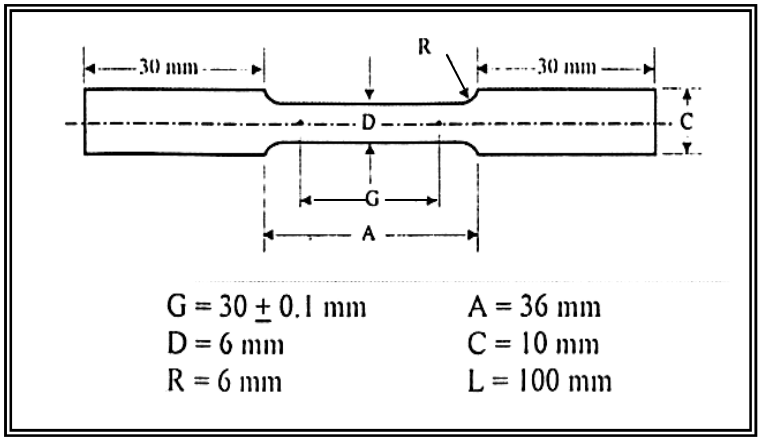
نوع المعاملة الحرارية	رمز العينة	رمز المجموعة
بدون تعامل (As-received)	-	A
تقسية في الماء من 830 °C لمدة 15 min.	-	B
تقسية في الماء + مراجعة عند 250 °C لمدة 1hr.	C1	C
تقسية في الماء + مراجعة عند 450 °C لمدة 1hr.	C2	
تقسية في الماء + مراجعة عند 650 °C لمدة 1hr.	C3	
تقسية في الزيت من 830 °C لمدة 15 min.	-	D

تقسية في الزيت + مراجعة عند 250 °C لمدة 1hr.	E1	E
تقسية في الزيت + مراجعة عند 450 °C لمدة 1hr.	E2	
تقسية في الزيت + مراجعة عند 650 °C لمدة 1hr.	E3	

4.2 الاختبارات والفحوصات

1.4.2 اختبار الشد

تم إجراء اختبار الشد للفولاذ متوسط الكاربون (CK 45)، إذ تم تصنيع عينة واحدة لكل معاملة حرارية بموجب المواصفات القياسية رقم (DIN 50125) لعينة اختبار الشد والموضحة في الشكل (2)، وقد اجري اختبار الشد على جهاز فحص الشد من نوع (Universal Testing Instron) الموجود في المعهد المتخصص للصناعات الهندسية. والجدول (3) يوضح نتائج اختبار الشد لفولاذ متوسط الكاربون وفقا لنوع المعاملة الحرارية.



شكل (2) أبعاد عينة الشد القياسية

جدول (3) نتائج اختبار الشد للفولاذ (CK 45) وفقا لنوع المعاملة الحرارية

No.	Specimen	Yield Strength (N/mm^2)	Tensile Strength (N/mm^2)
1	A	595	622
2	B	2030	2220
3	C1	-	1920
4	C2	-	1125

5	C3	-	870
6	D	-	900
7	E1	-	940
8	E2	-	780
9	E3	-	630

2.4.2 اختبار الصلادة العيانية (Macro hardness)

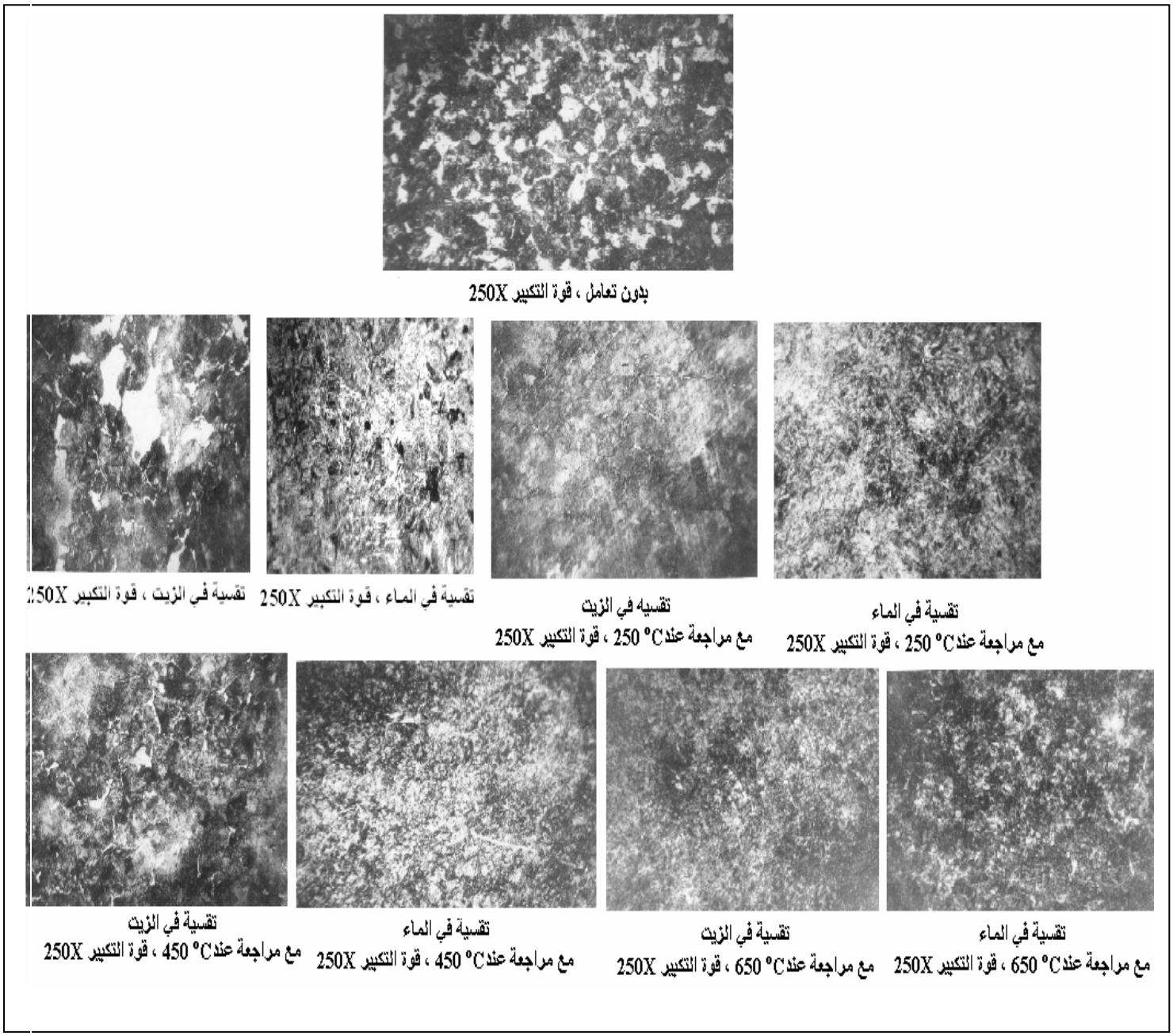
أولا: تم إجراء اختبار الصلادة العيانية بطريقة روكويل (HRC) على جهاز قياس الصلادة نوع (Wilson / Rockwell Hardness Tester B524-R) الموجود في الشركة العامة للصناعات الكهربائية ولكافة مجاميع العينات المعاملة وغير المعاملة حراريا واستخدمت في الجهاز أداة غرز مخروطية ماسية وحمل مقداره 150 kg وتم اخذ ثلاث قراءات لكل عينة من الجهاز مباشرة وتم اعتماد المعدل لهذه القراءات . وتم هذا الاختبار(أي فيكرز للصلادة) في قسم هندسة الإنتاج والمعادن، وان نتائج هذا الاختبار موضحة في الجدول(4).

جدول (4) نتاج اختبار الصلادة للفولاذ متوسط الكاربون وفقا لنوع المعاملة الحرارية

Specimen	A	B	C1	C2	C3	D	E1	E2	E3
HRC	17.7	59.3	49.1	35.5	25	26.8	28.8	22.8	18
HV	218	702	505	350	270	280	292	243	222

3.4.2 الفحص بحيود الأشعة السينية

تم إجراء الفحص بحيود الأشعة السينية للعينات لمعرفة الأطوار الناتجة باستخدام جهاز حيود الأشعة السينية من نوع (X-Ray Diffract meter, Philips) الموجود في الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين حيث أظهرت النتائج الأطوار الموجود في كل نوع من الفولاذ المعامل حراريا حيث تم تحويل الاوستنايت إلى مارتنسايت، وقد وجد بان كمية الاوستنايت المتبقية قليلة بحيث لم يتحسسها الجهاز كما هو موضح في المخططات الموجودة في البحث.والشكل (3) يظهر البنية المجهرية لفولاذ متوسط الكربون .



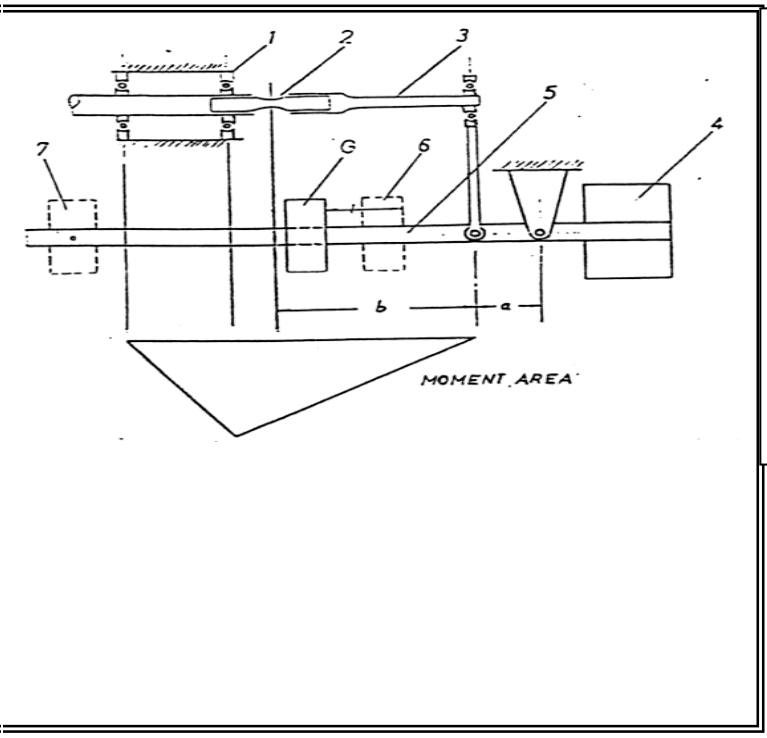
الشكل (3) البنية المجهرية لفولاذ متوسط الكربون

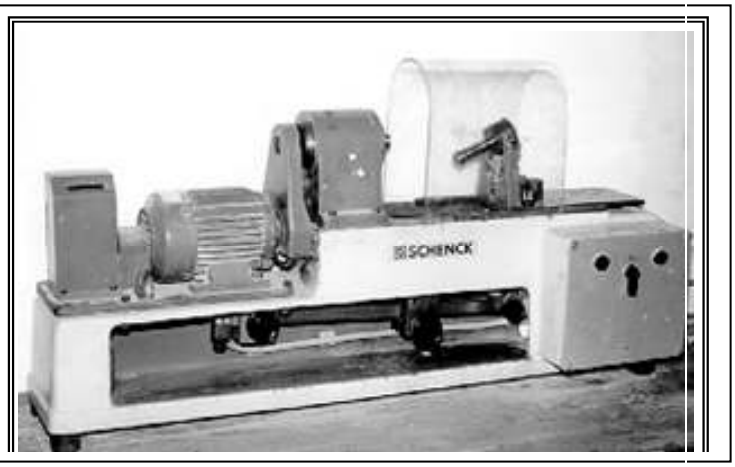
4.5.2 قياس الحجم الحُبَيبي

تم استخدام طريقة التقاطع الخطي (Linear Intercept Method) لقياس الحجم الحبيبي للمعدن المستخدم. يتلخص مبدأ هذه الطريقة بحساب عدد الحبيبات الواقعة ضمن خط معلوم الطول، حيث تم تقسيم الطول المعلوم على عدد الحبيبات المحسوبة للحصول على متوسط قطر الحبيبة، وبتكرار هذه العملية عدة مرات في مواقع مختلفة على سطح المعدن يتم الحصول على متوسط قطر الحبيبة بصورة أكثر دقة، وكان متوسط قطر الحبيبة (d_{av}) للفولاذ غير المعامل حراريا (As-Received) هو ($32\ \mu m$).

5.4.2 اختبار الكلال

إن اختبار الكلال المستخدم في هذا البحث هو الكلال بالانحناء الدوار (Rotating Bending) والجهاز المستخدم من نوع (Schenck Punn Rotating Bending Machine) الموجود في قسم هندسة الإنتاج و المعادن في الجامعة التكنولوجية، كما موضح في الشكل (4).





شكل (4) رسم تخطيطي لآلية عمل جهاز الكلال مع جهاز الكلال

1	عمود القيادة	L	= إزاحة الكتلة المنزلقة
2	قطعة الاختبار	b	= 10 cm
3	عمود التحميل	a	= 5 cm
4	حمل الموازنة	G	= الكتلة المنزلقة= 1.5 Kg
5	عتبة التحميل		
6	الكتلة المنزلقة		
7	الكتلة الإضافية		

تم إجراء اختبارات الكلال عند أحمال ثابتة السعة وبنسبة إجهاد (R = −1) لعينات ملساء (Smooth) حيث تتعرض قطعة الاختبار في هذا الجهاز إلى حمل يسلط من الجهة اليمنى لماسكة القطعة بشكل عمودي إلى محور قطعة الاختبار وبذلك يتعرض سطح القطعة إلى إجهادي شد وانضغاط متعاقبين عند دوران القطعة.

أن الجهاز مزود بعداد لتسجيل عدد دورات الإجهاد بسرعة دوارنية للجهاز مقداره 6000 rpm وتجري عملية تسليط الإجهاد باستخدام كتلة حديدية تنزلق على عتبة حديدية مدرجة طولها 30 cm ومن حساب عزم الحناية تكون قيمة إجهاد الحناية ممثلة بحركة الكتلة على العتبة فعندما تتحرك مسافة 1cm يسلط إجهاد مقداره 1 kg/mm^2 على قطعة الاختبار عندما يكون القطر عند قاع التقوس (6.74 mm).

أن أقصى اجهاد للجهاز مع استخدام الكتل الإضافية هو (90 Kg/mm^2) أي بحدود (900 N/mm^2) تقريبا .

ولحساب الإجهاد المسلط على عينة الاختبار يمكن تطبيق العلاقات التالية التي تعطي القيمة على المسطرة المدرجة التي يوضع عليها المؤشر للحصول على الاجهاد المسلط المضبوط [4].

$$1cm = 1kg/mm^2 = 9.81N/mm^2 \text{.....(1)}$$

$$(C.F) = \left(\frac{D}{6.74}\right)^3 \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

$$Slide(cm) = C.F * \frac{\sigma(N/mm^2)}{9.81} \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

حيث

C.F = معامل التصحيح

D = اصغر قطر لعينة الاختبار = 0.674 cm

عزم الحناية (Mb) عند مركز القطعة

$$M_b = \frac{G.L}{a} * b = \frac{1.5 * L}{5} * 10 = 3L \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

الإجهاد على القطعة (σ)

$$\sigma = \frac{M_b}{W} = \frac{G.L * b}{a.W} = \frac{3.L}{0.03} = 100L \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

$$W = \frac{I}{Y} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

حيث :

I = عزم القصور الذاتي للعينة عند منتصف القطعة.

Y = عامل الشكل

6.4.2 اختبار الصدمة

تم إجراء اختبار الصدمة بطريقة (Charpy) للعينات المعاملة حراريا في مختلف الظروف وفقا للمواصفات القياسية لعينة الصدمة المبينة في الشكل (5)، حيث تم استخدام جهاز اختبار الصدمة نوع Torsee's (CI-30) Charpy Impact Testing Machine الموجود في معهد التكنولوجيا/بغداد ، وتم حساب كلاً من طاقة الصدمة ومقاومة الصدمة عمليا كما موضح في جدول (5)، وتم استخدام القانون التالي لحساب مقاومة الصدمة[5].

$$\sigma_i = \frac{E}{A} = \frac{WL(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)}{A}$$

حيث:

σ_i = مقاومة الصدمة (KJ/m^2)

E = طاقة الصدمة (Joule)

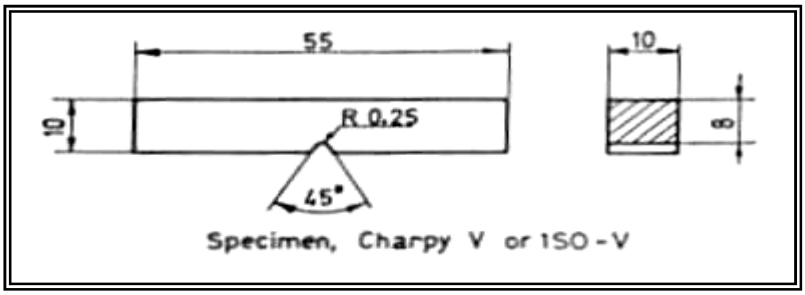
W = وزن الثقل = 25.9 kg

L = طول ذراع البندول = 75 cm

α_1 = زاوية الصدمة

α_2 = زاوية ارتفاع البندول = 141.5 °

A = مساحة مقطع عينة الصدمة عند الحز = 0.8 cm^2



شكل (5) أبعاد عينة اختبار الصدمة القياسية بطريقة شاربي (V) والابعاد بالمليمتر

جدول (5) نتائج اختبار الصدمة بطريقة (Charpy)

No.	Specimen	α_1	عمليا E (J)	عمليا σ_i (KJ/m^2)
1	A	131	22	270
2	B	132	20	243
3	C1	131	22	270
4	C2	110	75	941
5	C3	99	107	1338
6	D	109	78	975
7	E1	106	87	1081
8	E2	108	81	1013
9	E3	97	113	1413

3-1 النتائج والمناقشة

للتنبؤ بعمر القطعة المعرضة لاجهادات الكلال والتي أجريت عليها عملية التقسية في الماء متبوعة بالمراجعة عند درجات حرارة ^{o}C (250, 450, 650)، وتأثير هذه الدرجات الحرارية على عمر القطعة، تم اقتراح أنموذج رياضي تجريبي بالاعتماد على أطوال الشقوق الطويلة وعدد دورات الفشل لكل عينة، وكما موضح في الخطوات الآتية:

1. رسم علاقة بين طول الشق–عدد الدورات لاجهادات مختلفة ومن العلاقة تم إيجاد المعادلات الرياضية عند كل درجة حرارية، كما موضح في الجداول (6)، (7) و (8).
2. رسم علاقة بين سرعة تقدم الشق (da/dN) وشدة الإجهاد (ΔK) ومن العلاقة تم إيجاد المعادلات الرياضية لكل درجة حرارة مراجعة التي هي:

$$\frac{da}{dN} = 0.0234\times10^{-3}(\Delta K)^{-1.794} \qquad for\ 250\ ^oC \quad \cdots\cdots\cdots(7)$$

$$\frac{da}{dN} = 11.96\,(\Delta K)^{-3.761} \qquad for\ 450\ ^oC \quad \cdots\cdots\cdots(8)$$

$$\frac{da}{dN} = 0.0274\times10^{-3}(\Delta K)^{-2.402} \qquad for\ 650\ ^oC \quad \cdots\cdots\cdots(9)$$

3. تم التعويض عن (ΔK) في معادلات الفقرة (2) بـ $\left(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a}\right)$ وعدت قيمة Y الممثلة بعامل الشكل هي (1) وتم الحصول على:

$$\frac{da}{dN} = 16.76\times10^{-3}\,\sigma_f{}^{-1.794}\,a^{0.897} \qquad for\ 250\ ^oC \quad \cdots\cdots\cdots(10)$$

$$\frac{da}{dN} = 2.78\,\sigma_f{}^{-3.761}\,a^{1.88} \qquad for\ 450\ ^oC \quad \cdots\cdots\cdots(11)$$

$$\frac{da}{dN} = 13.85\times10^{-3}\,\sigma_f{}^{-2.404}\,a^{-1.202} \qquad for\ 650\ ^oC \quad \cdots\cdots\cdots(12)$$

4. رسم علاقة بين معدل سرعة تقدم الشق $(av.da/dN)$ ومعدل شدة الإجهاد $(av.\Delta K)$ لكل الدرجات الحرارية وإيجاد المعادلة الرياضية للعلاقة وهي:

$$\frac{da}{dN} = 1.273\times10^{-9}(\Delta K)^{1.895} \qquad \cdots\cdots\cdots(13)$$

5. رسم علاقة بين شدة الإجهاد $(av.\Delta K)$ لكل الدرجات الحرارية ودرجة حرارة المراجعة (T) وإيجاد المعادلة الرياضية للعلاقة وهي:

$$\Delta K = 3006.4\,(T)^{-0.635} \qquad \cdots\cdots\cdots(14)$$

6. رسم علاقة بين معدل سرعة تقدم الشق لكل الدرجات الحرارية ودرجة حرارة المراجعة (T) وإيجاد المعادلة الرياضية للعلاقة وهي:

$$\frac{da}{dN} = 6.898\times10^{-3}\,(T)^{-1.257} \qquad \cdots\cdots\cdots(15)$$

7. تم مساواة المعادلتين (13) و (15) وبعد التعويض عن (ΔK) بـ $(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a})$ في معادلة (14) تم الحصول على:

$$a = \frac{907297}{\sigma_f{}^2 . T^{1.326}} \qquad \cdots\cdots\cdots(16)$$

من التعويض عن من تكامل المعادلة (15) ΔK في معادلة (14)

$$a = \frac{719256}{\sigma_f{}^2 T^{1.326}} \qquad \cdots\cdots\cdots(17)$$

تم الحصول على:

$$a = 6.898\times10^{-3} T^{-1.257} N \qquad \cdots\cdots\cdots(18)$$

8. تم مساواة المعادلتين (16) و (18) وأيضا (17) و (18) للحصول على معادلتين كل منهما تمثل عمر الجزء:

$$N_f = \frac{0.2\times10^9}{\sigma_f\, T^{0.07}} \qquad \cdots\cdots\cdots(19)$$

$$N_f = \frac{100\times10^9}{\sigma_f{}^2 T^{0.07}} \qquad \cdots\cdots\cdots(20)$$

$$a = b_o + b_1 N + b_2 N^2 \qquad \Rightarrow da/dN = b_1 + b_2 N$$

جدول (6) الحسابات الخاصة بنمو الشقوق للفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند (250 ^{o}C)

b_o= -0.065	b_1= 9.31 x 10^{-6}		b_2 =1.50 x 10^{-11}	
a (mm)	N_f (cycle)	σ (N/mm^2)	da/dN (mm/cycle)	ΔK $(MPa.m^{1/2})$
0.96	1.40x10^5	830	7.230x10^{-6}	45.50
0.98	1.55x10^5	820	7.013 x10^{-6}	45.55
1.13	1.73x10^5	800	6.744 x10^{-6}	47.45

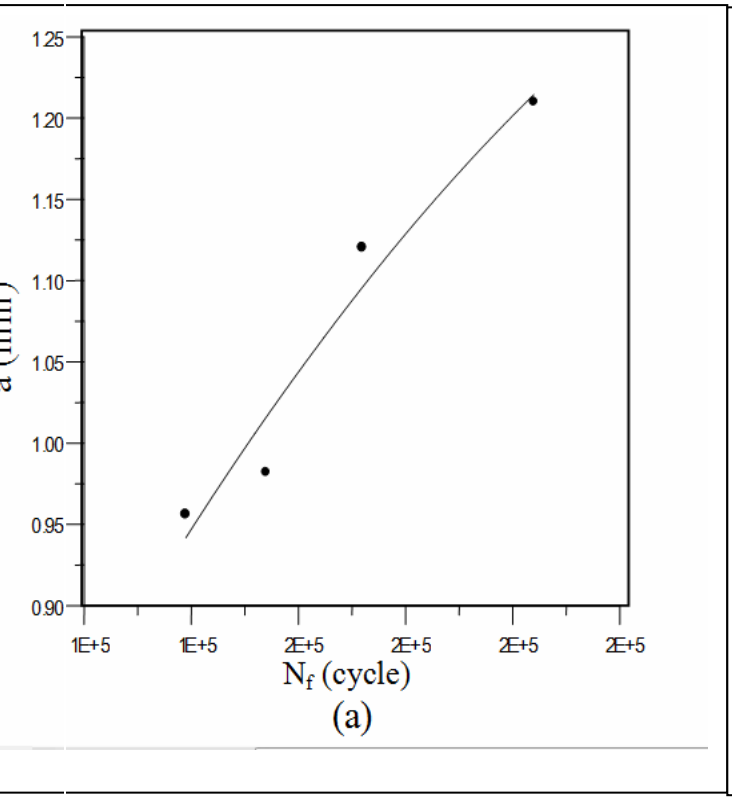
1.22	2.05×10^{5}	790	6.267×10^{-6}	48.71
-	-	-	av.(da/dN)=6.8×10^{-6}	$av.\Delta K = 46.8$

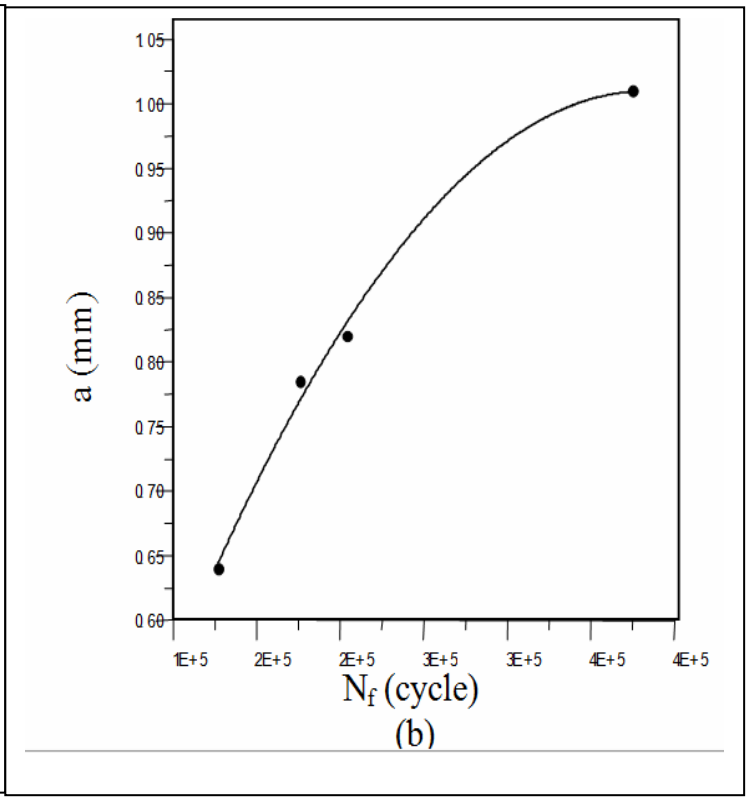
جدول (7) الحسابات الخاصة بنمو الشقوق للفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند ($450\ ^{o}C$)

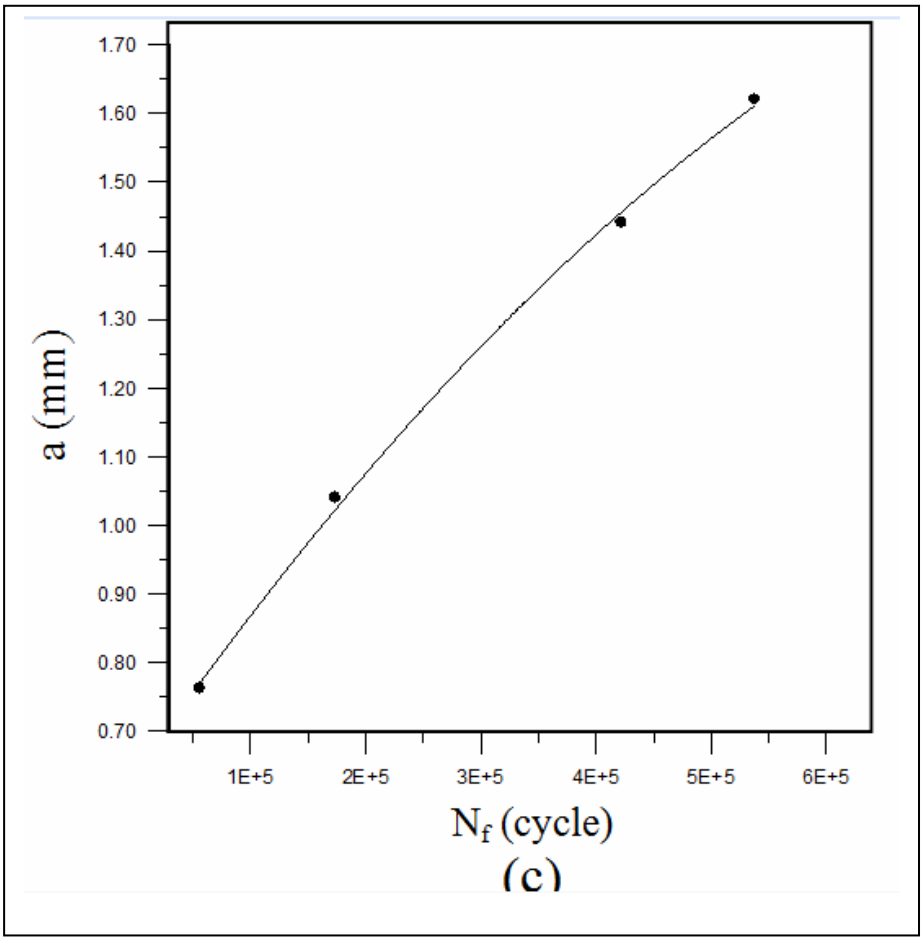
$b_o = 0.193$	$b_1 = 4.26\times10^{-6}$		$b_2 = 5.55\times10^{-12}$	
a (mm)	N_f (cycle)	σ (N/mm^2)	da/dN (mm/cycle)	ΔK ($MPa.m^{1/2}$)
0.65	1.30×10^{5}	600	3.554×10^{-6}	26.9
0.79	1.78×10^{5}	570	3.282×10^{-6}	28.81
0.83	2.00×10^{5}	550	3.127×10^{-6}	27.92
1.03	3.76×10^{5}	540	2.178×10^{-6}	30.42
-	-	-	av.(da/dN)=3.03×10^{-6}	$av.\Delta K = 28.5$

جدول (8) الحسابات الخاصة بنمو الشقوق للفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند ($650\ ^{o}C$)

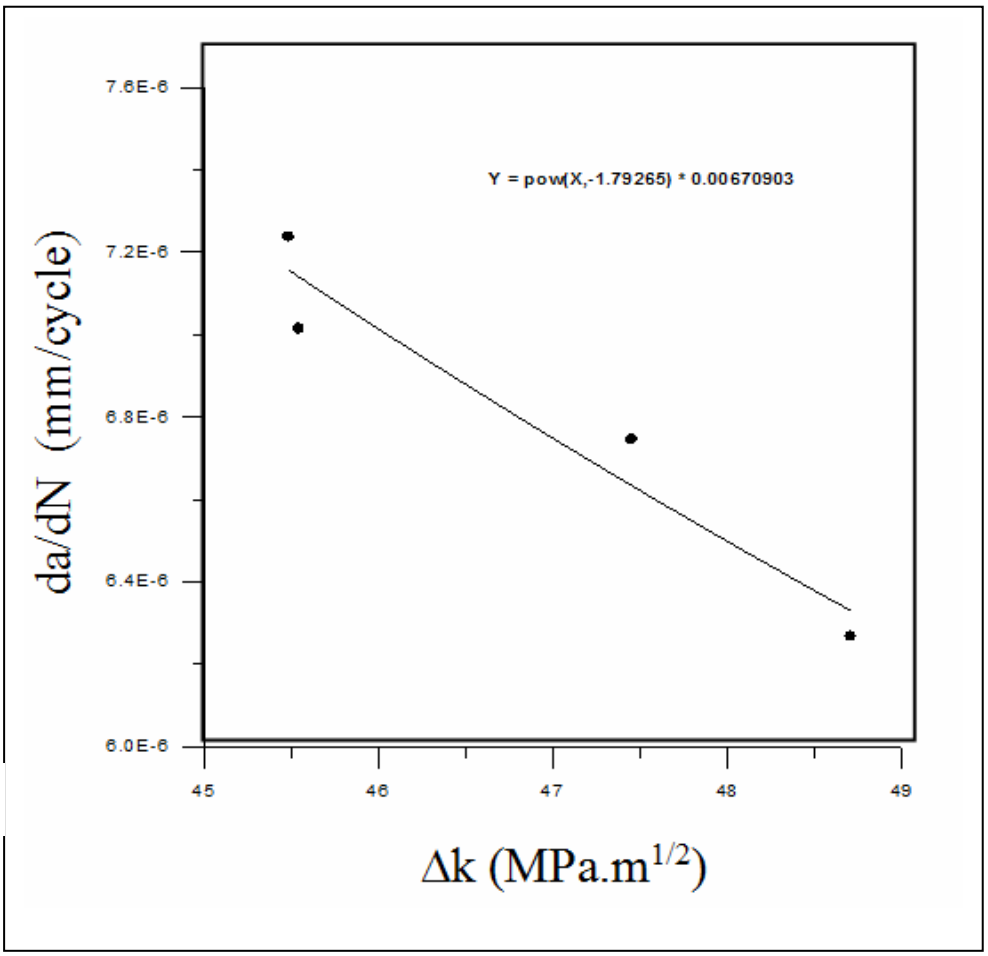
$b_o = 0.64$	$b_1 = 2.41\times10^{-6}$		$b_2 = 1.12\times10^{-12}$	
a (mm)	N_f (cycle)	σ (N/mm^2)	da/dN (mm/cycle)	ΔK ($MPa.m^{1/2}$)
0.762	5.60×10^{4}	500	2.343×10^{-6}	24.46
1.04	1.74×10^{5}	450	2.212×10^{-6}	25.72
1.44	4.22×10^{5}	400	1.936×10^{-6}	26.90
1.62	5.38×10^{5}	380	1.808×10^{-6}	27.11
-	-	-	av.(da/dN)=2.075×10^{-6}	$av.\Delta K = 26.05$


1.25
1.20
1.15
1.10
1.05
1.00
0.95
0.90
1E+5
1E+5
2E+5
2E+5
2E+5
2E+5
N_f (cycle)
(a)

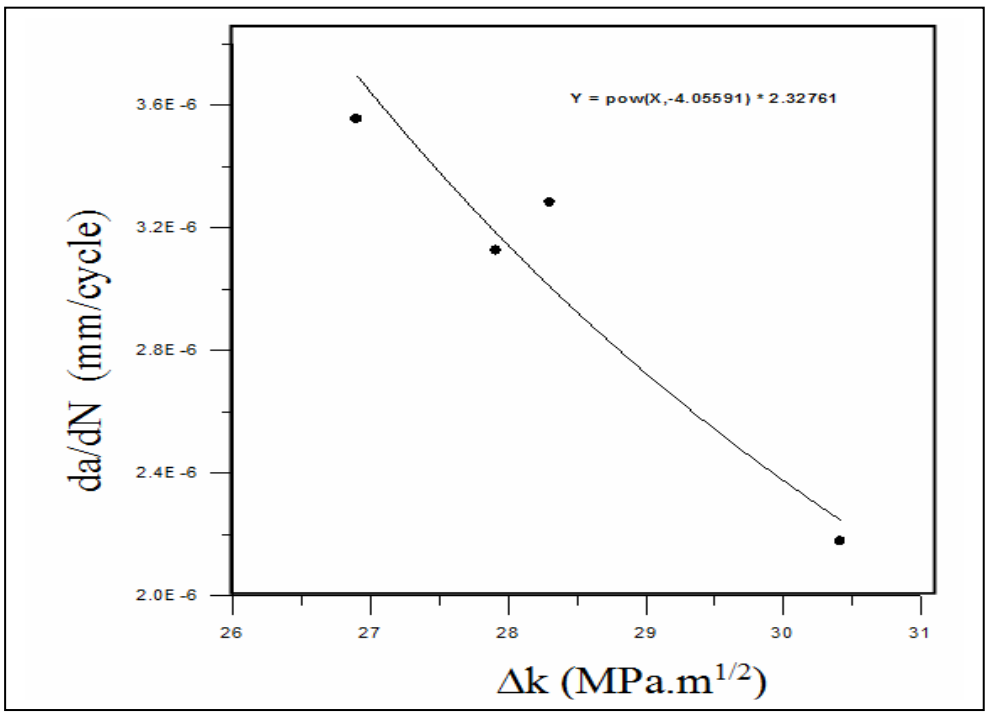

a (mm)
1.05
1.00
0.95
0.90
0.85
0.80
0.75
0.70
0.65
0.60
1E+5
2E+5
2E+5
3E+5
3E+5
4E+5
4E+5
N_f (cycle)
(b)


a (mm)
1.70
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
1E+5
2E+5
3E+5
4E+5
5E+5
6E+5
N_f (cycle)
(c)

شكل (6) العلاقة بين طول الشق – عدد الدورات لفولاذ متوسط الكربون مقسى في الماء ومراجع عند درجات حرارة ^{o}C (250, 450, 650) .

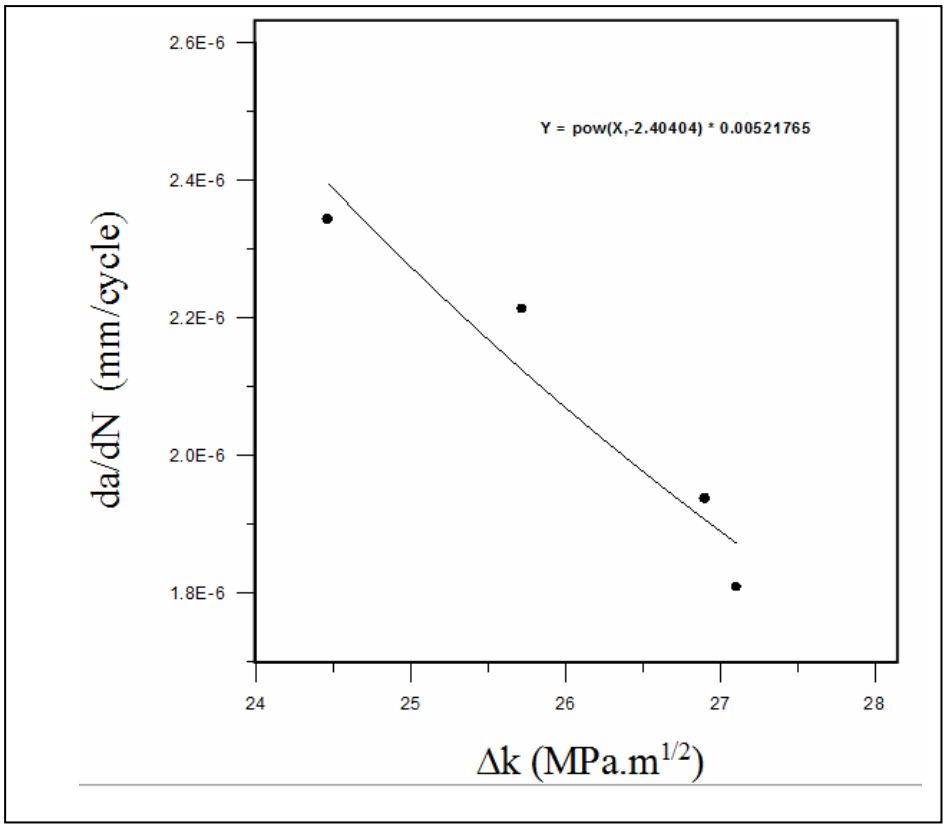


(a)

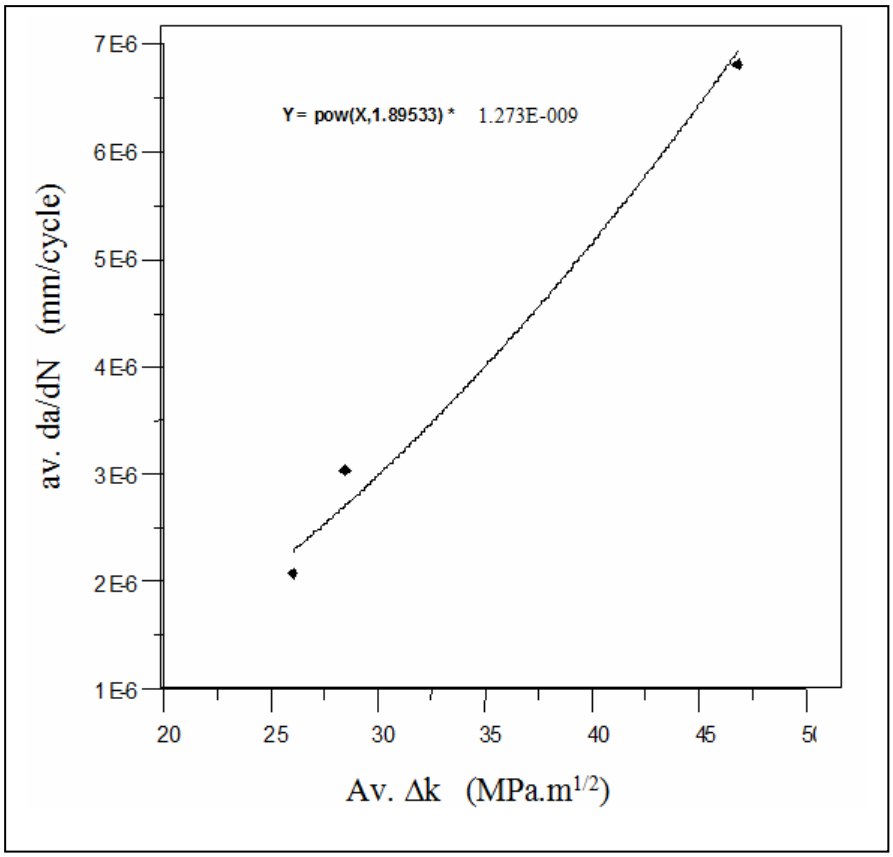


(b)

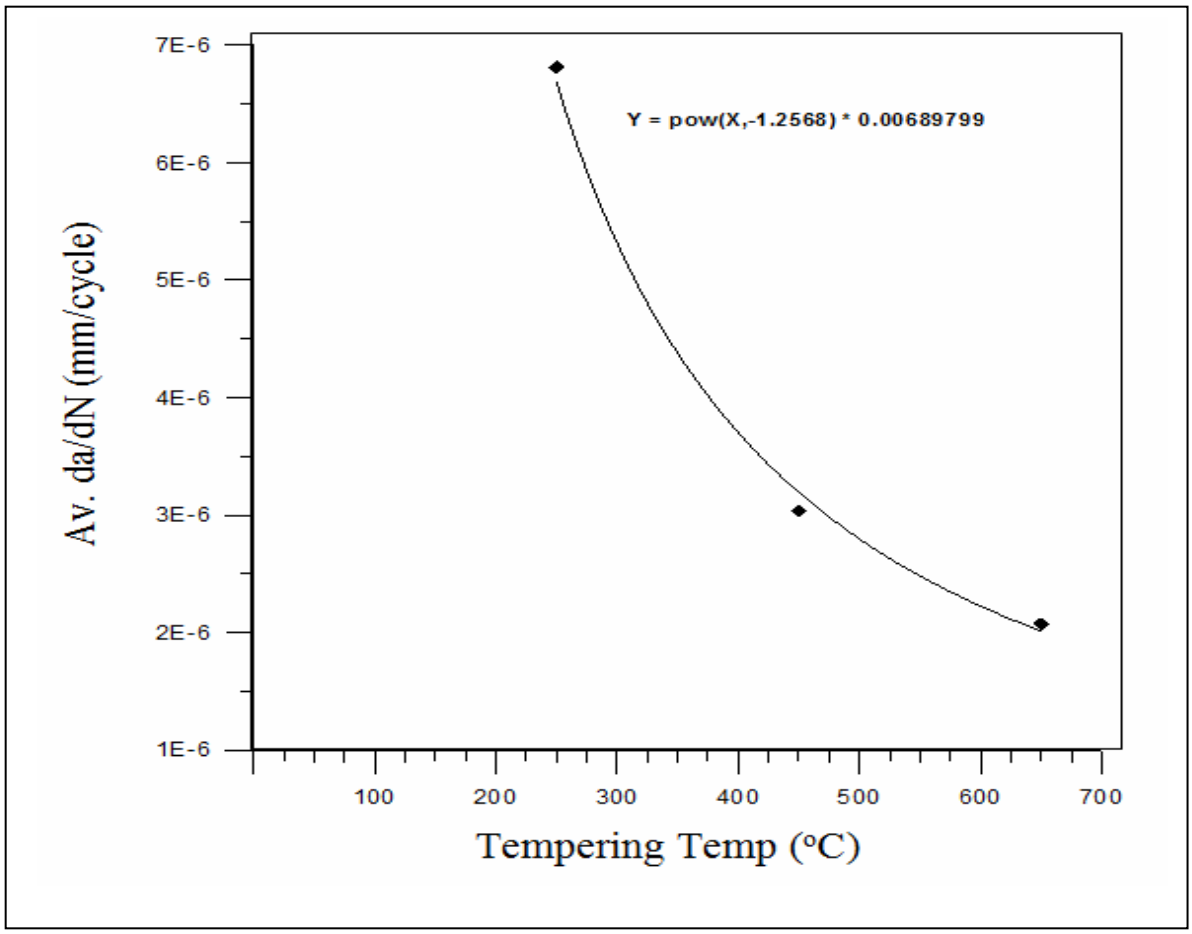
(c)



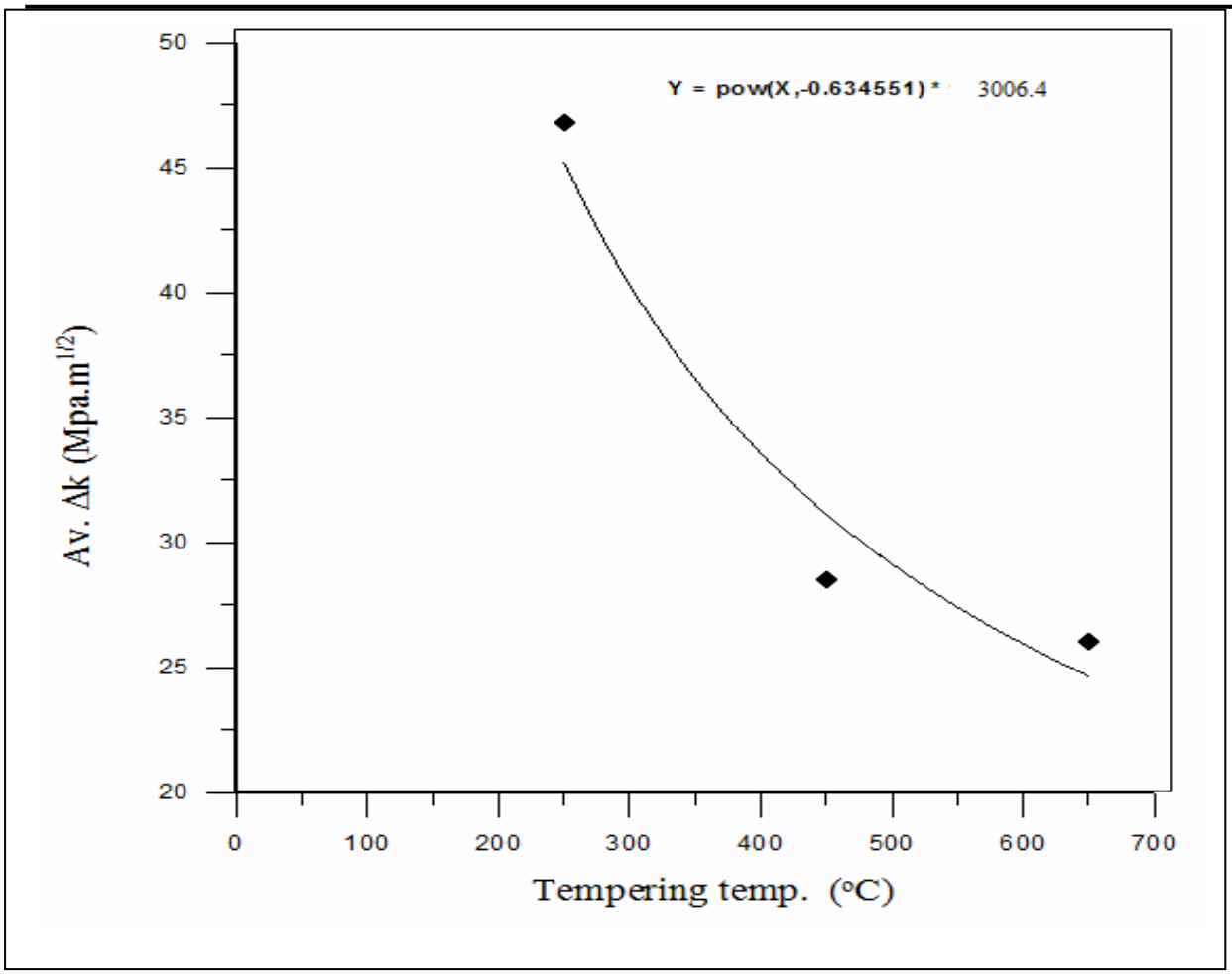
شكل (7) (a,b,c)العلاقة بين سرعة تقدم الشق – شدة الإجهاد لفولاذ متوسط الكربون مقسى في الماء ومراجع عند درجات حرارة ^{o}C (250, 450, 650) .



شكل (8) العلاقة بين معدل سرعة تقدم الشق – معدل شدة الإجهاد لفولاذ متوسط الكربون مقسى في الماء ومراجع عند درجات حرارة ^{o}C (250, 450, 650) .



شكل (9) العلاقة بين معدل سرعة تقدم الشق – درجة حرارة المراجعة لفولاذ متوسط الكربون مقسى في الماء ومراجع عند درجات حرارة ^{o}C (250, 450, 650) .



شكل (10) العلاقة بين معدل معامل شدة الإجهاد – درجة حرارة المراجعة لفولاذ متوسط الكربون مقسى في الماء ومراجع عند درجات حرارة ^{o}C (250, 450, 650) .

2-3 تأثير البنية المجهرية على مقاومة الكلال

عند مستويات إجهاد اقل من حد الكلال تتكون شقوق كلال صغيرة لكنها تتوقف عن النمو بسبب تأثرها بالبنية المجهرية، أما عند زيادة مستوى الإجهاد إلى أعلى من حد الكلال فسيحصل نمو لهذه الشقوق عبر الحواجز البنيانية والعوائق لتصبح شقوقا طويلة لا يتأثر نموها بالبنية المجهرية أو قد تكون الشق الرئيس الذي يسبب الفشل، كذلك فان البنى الثنائية الطور يكون الشق فيها متعرجا بسبب وجود طورين يمتلك كل منها خواص ميكانيكية تختلف عن الآخر أو بسبب اختلاف اتجاه المستويات البلورية بين الحبيبتين، كما إن نقصان الحجم الحبيبي للبنية المجهرية يقلل من معدل نمو الشقوق الصغيرة بسبب تأثير الحواجز البنيانية المتمثلة بالحدود الحبيبية مما يزيد من عمر الكلال الكلي [10].

تم دراسة تأثير البنية المجهرية على مقاومة الكلال للفولاذ متوسط الكاربون لوسطي التقسية(الماء والزيت) وكما يأتي:

أولا: التقسية في الماء

إن بنية المارتنسايت الناتجة من تقسية الفولاذ الكاربوني في الماء تعيق نمو شقوق الكلال بسبب الحواجز البنيانية لبنية المارتنسايت مما يؤدي إلى ارتفاع حد الكلال، ويعاق نمو هذه الشقوق بشكل اكبر للبنية المجهرية المتكونة من المارتنسايت المراجع مع القليل من البايناىت اذ تتميز هذه البنية بكونها خالية من الاجهادات الداخلية والتي تنتج من التقسية لذلك ارتفع حد الكلال للفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند $250^{o}C$ حيث وصل حد الكلال إلى (780 MPa) وهو أعلى حد كلال تم الحصول عليه، وهذه البنية المفضلة في الكلال، وهذا يتفق مع ما توصل إليه الباحث J. P. Benson [4].

أما بالنسبة للفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند ^{o}C 450 والذي يتكون على الأغلب من المارتنسايت المراجع مع الفرايت والسمنتايت (التروستايت) فان هذه البنية تمتلك الخواص المثلى من ناحية الصلادة ومقاومة الكلال والصدمة، أما الفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند $650^{o}C$ والمكون من الفرايت والبيرلايت الكروي (السوربايت) فتتميز هذه البنية بامتلاكها مقاومة صدمة عالية علاوة على صلادة ومقاومة كلال متوسطتين.إن المزج بين المقاومة والمتانة العاليتين يعطي خواص الكلال المفضلة عند معدلات نمو شقوق كلال متوسطة وعالية.

ثانيا: التقسية في الزيت

إن الفولاذ المقسى في الزيت و المراجع عند درجات حرارة مراجعة $450^{o}C$ و$650^{o}C$ يتكون من بنية الفرايت والبيرلايت مع اختلاف الحجم الحبيبي وطريقة ترسيب السمنتايت لكل تعامل حراري مقارنة بالمعدن الأساس ،كما موضح في صور البنية المجهرية شكل(3) ، حيث يحصل نمو الشق عبر طور الفرايت ويتوقف عند الحدود الحبيبية بين الفرايت والبيرلايت ، ويكون الانتقال بطيئا خلال حبيبة البيرلايت بسبب صفائح السمنتايت التي تعمل كعائق لنمو شق الكلال [5]،أما بالنسبة للفولاذ المقسى في الزيت والمراجع عند $250^{o}C$ فيظهر طور البايناىت بشكل قليل مع الفرايت والبيرلايت (كما مبين في مخططات حيود الأشعة السينية) الذي يؤدي إلى زيادة مقاومة الكلال مقارنة بالفولاذ المقسى في الزيت.

3-3 تأثير وسط التقسية على مقاومة الكلال

يحصل الكلال غالبا عن طريق تكوين الحزم الانزلاقية (Slip bands) ،لذلك فان أي معاملة تسبب زيادة الصلادة أو مقاومة الخضوع والشد سوف تزيد من مستوى الإجهاد اللازم للانزلاق وهذا يؤدي بدوره إلى زيادة

مقاومة الكلال ،ويتضح هذا جليا في العينات المقساة في الماء حيث أظهرت ارتفاعا في حد الكلال (740 MPa) أي كانت نسبة التحسن في حد الكلال (131%) مقارنة بالمعدن الأساس المتكون من الفرايت والبيرلايت الذي بلغ حد الكلال فيه (320 MPa) ، أما وسط الزيت فانه أعطى مقاومة كلال اقل من وسط الماء وبلغت (470 MPa) أي كانت نسبة التحسن في حد الكلال (47%) مقارنة بالمعدن الأساس وذلك لأن معدل التبريد في الزيت اقل من معدل التبريد الحرج.

3-4 تأثير عملية المراجعة على مقاومة الكلال

أعطت درجة حرارة المراجعة 250 ^{o}C أعلى مقاومة كلال بالنسبة لوسط الماء ، وهذا يعزى إلى التخلص من الاجهادات الداخلية الناتجة من عملية التقسية وكذلك تكون بنية المارتنسايت المراجع مع قليل من البايناىت [6]، حيث ارتفع حد الكلال لهذه البنية إلى (780 MPa) على الرغم من حصول انحدار عالٍ في منحني الإجهاد- عدد الدورات،أي حصول الفشل بدورات قليلة لقيم الإجهاد المسلط خاصة في الاجهادات العالية القريبة من إجهاد الخضوع وذلك لأن طاقة الانفعال اللدن اللازمة للفشل عالية نسبياً لذلك يكون عمر الكلال فيها قليلا، حيث يزداد معدل نمو الشق في هذه المرحلة بالغاً بذلك طوله الحرج وبالتالي حصول الكسر النهائي بعد دورات قليلة لنشوء الشق.[7]

أما بالنسبة لوسط الزيت وعند نفس الدرجة فقد ارتفع حد الكلال إلى (520MPa) مقارنة بالمعدن المقسى في الزيت وذلك بسبب تكون القليل من البايناىت مع الفرايت والبيرلايت كما مبين من نتائج حيود الأشعة السينية في الملحق.

أما درجة حرارة المراجعة 450 ^{o}C فقد أعطت مقاومة كلال اقل من المعدن المقسى لكلا الوسطين حيث بلغ حد الكلال (520 MPa) بالنسبة للماء كوسط تقسية و(440 MPa) بالنسبة للزيت كوسط تقسية بسبب زيادة الحجم الحبيبي و نقصان الاجهادات المتبقية الضغطية .

أما درجة حرارة المراجعة 650 ^{o}C فقد أدت إلى انخفاض مقاومة الكلال لكلا الوسطين حتى أصبحت مقاربة للمعدن الأساس بسبب تكور السمنتايت أي تكون بنية والبيرلايت الكروي وإزالة الاجهادات المتبقية،كما تم مقارنة منحنيات الاجهاد –عدد الدورات للفولاذ المقسى في الزيت والمراجع عند درجات حرارة مختلفة مع المعدن الأساس وكذلك بالنسبة لوسط الماء ، كما تم مقارنة أعمار الكلال لدرجات المراجعة المختلفة وذلك برسم منحنيات الإجهاد –عدد الدورات للفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند درجات حرارة مختلفة وعند إجهاد ثابت ،

ووجد بان أفضل عمر كلال هو عند المراجعة في درجة حرارة $250^{o}C$ يليها عند $450^{o}C$ ثم بعد ذلك عند $50^{o}C6$.

3-5 تأثير الخواص الميكانيكية على حد الكلال

يزداد حد الكلال للفولاذ متوسط الكاربون بزيادة كل من مقاومة الشد و الصلادة وتم إيجاد معادلات تصميمية تربط بين كلا من الصلادة و مقاومة الشد مع حد الكلال، إذ أعطت هذه النماذج نتائج مقاربة لمنحنيات الإجهاد –عدد الدورات لنفس المعدن حيث تعطي هذه النماذج مؤشراً تقريبياً لحد الكلال.

تم حساب نسبة الكلال والتي تمثل النسبة بين مقاومة الكلال إلى مقاومة الشد القصوى(σ_f/σ_u) حيث تراوحت بين (0.365) في حالة الفولاذ المقسى في الماء و بين(0.64) في حالة الفولاذ المقسى في الزيت والمراجع عند 650^{o} C وبعدد دورات 10^5 دورة ، وتمثل هذه النسبة مقدار التشكيل اللدن الذي يزداد بزيادة نسبة الكلال.

ان عدد دورات الفشل له اثر كبير على نسبة الكلال حيث تراوحت بين (0.432) عند 10^6 دورة وبين (0.515) عند 10^5 دورة وهذا يتفق مع ما توصل إليه

الباحث Lankford . J [8] ، تم التوصل إلى إن المعاملة المشتملة على تقسية الفولاذ في الماء هي افضل من المعاملة المشتملة على التقسية في الماء والمراجعة عند $250^{o}C$عند عدد دورات عالية تتجاوز 10^5 دورة، أما عند عدد دورات اقل من 10^5 دورة فان التقسية في الماء المتبوعة بالمراجعة عند $250^{o}C$ هي أفضل من التقسية في الماء ، وهذا يزيد من أهمية هذه المعاملة في تطبيقات الكلال واطئ الدورات (Low Cycle Fatigue)وتم حساب قيم الثوابت A وα الخاصة بمنحنيات الاجهاد –عدد الدورات ومقارنتها مع النتائج العملية وكانت مقاربة.

3-6 مناقشة تصرف ونمذجة شقوق الكلال

أظهرت صور المجهر الالكتروني الماسح (SEM) للفولاذ متوسط الكاربون غير المعامل والمعامل حراريا إن مرحلة النمو المبكر للشقوق القصيرة للفولاذ الناتج من التقسية والمراجعة هي أبطئ من تلك التي للشقوق الطويلة لنفس شدة الإجهاد وذلك لتأثرها بشكل كبير بالبنية المجهرية [9,10] كما تم ملاحظة مرحلة توسع الشق ووجد بأنه من نظام التحام الفجوات الدقيقة (Microvoid coalescence mode) بالنسبة للبنى البيرلايتية وخاصة الكروية منها التي تنتج من التقسية في الماء المتبوعة بالمراجعة عند $650\ ^{o}C$ ،وهذا يتفق مع ما توصل

إليه الباحث De Los Rios [11]،كما وتم ملاحظة تكون الحزوز(striation) التي تشير إلى حدوث تشكيل لدن في البنى البيرلايتية وخاصة للمعدن المستلم (بدون تعامل) كما موضح في شكل (3).

إن بدء الشق يكون عادة مرتبطاً بتكون الشقوق الدقيقة عبر الحدود الحبيبية علاوةً على تكون الحزوز ،وهذه العملية تكون سريعة في الفولاذ المقسى في الماء وتعاق بالنسبة للبنى الناتجة من المراجعة وهذه الحالة واضحة في الفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند $250^{o}C$ ،كذلك تم ملاحظة تكون الكسر مابين الحبيبات (Inter granular Fracture) بالنسبة للبنية المارتنسايتية الناتجة من التقسية في الماء [11]،ومن صور المجهر الالكتروني الماسح الموضحة في شكل (3) وبعد قياس أطوال الشقوق الطويلة وإهمال الشقوق القصيرة لصعوبة مسحها وقياسها تم التنبؤ بأنموذجين رياضيين لحساب أعمار الكلال ويلاحظ من الشكل (10) إن معامل شدة الإجهاد (ΔK) تنخفض بزيادة درجة حرارة المراجعة وذلك لأن البنية الناتجة من المراجعة عند $250^{o}C$ هي المارتنسايت المراجع الحاوية على الاجهادات المتبقية الضغطية التي تؤدي إلى حدوث ظاهرة انغلاق الشق(Crack Closure) [12]علاوة على الحواجز البنيانية القوية للمارتنسايت مما يزيد من الإجهاد اللازم لحدوث الانزلاق الذي يؤدي بدوره إلى زيادة معامل شدة الإجهاد (شكل (10).

4- الاستنتاجات

1. أعلى حد كلال تم الحصول عليه للفولاذ المقسى والمراجع بالنسبة لوسطي الماء والزيت هو عند درجة حرارة مراجعة $250^{o}C$.
2. أعطت درجة حرارة المراجعة $450^{o}C$ بالنسبة لوسط الماء الخواص المثلى للفولاذ متوسط الكاربون من ناحية الصلادة ومقاومة الصدمة و الكلال.
3. إن زيادة درجة حرارة المراجعة أدت إلى تحويل نوع الكسر من الكسر الهش إلى الكسر المطيلي.
4. أدت التقسية في الماء المتبوعة بالمراجعة عند $250^{o}C$ إلى تحسين مقاومة الكلال ،إذ بلغ مقدار التحسن (144%) مقارنة بالمعدن الأساس.
5. تم التوصل إلى علاقات رياضية تربط بين مقاومة الكلال والشد والصلادة.
6. اظهر الأنموذج الرياضي الذي يعتمد على معامل شدة الإجهاد (ΔK) في حساب عمر الكلال دقة اكبر من الأنموذج الذي يعتمد على سرعة تقدم الشق (da/dN) ،كما أعطى كلا من الأنموذجين أعمار كلال اقل من القيمة العملية وهذا يعطي معامل أمان جيد للمصمم.
7. أظهرت المعاملة المشتملة على التقسية في الماء والمراجعة عند ^{o}C 250 أهميتها في تطبيقات الكلال واطئ الدورات أي عند عدد دورات اقل من 10^{5} دورة.
8. إن البنية المجهرية المفضلة في الكلال هي المارتنسايت المراجع.

المصادر References

[1] جي. إي. ديتر، ترجمة د. عبد الرزاق إسماعيل خضر، د. عبد الوهاب محمد عبد الله "الميتالورجيا الميكانيكية" الجامعة التكنولوجية، قسم هندسة الانتاج والمعادن، بغداد، 1994.

[2] د. ج. ديفيز، ل. أ. اويلمان، ترجمة د. جعفر طاهر الحيدري، السيد عدنان نعمة "المعادن بنيتها وخواصها ومعاملاتها الحرارية"، بغداد، 1989.

[3] Chen, Xu. 2004. Evaluation of Fatigue Damage at Welded Tube Joint Under Cyclic Pressure Using Surface Hardness Measurements. Enqineering Failure Analysis. 12 (616-622).

[4] Becker, W. T. et al. 2004. vol. 11. ASM Handbook: Failure Analysis and Prevention. ASM Intemational: Ohio.

[5] R.A. Smith, "Fatigue Crack Growth" 30 years progress proceeding of conference on fatigue crack growth, Cambridge, U. K., Awheaton co. Ltd., 1984.

[6]د. عويد زهمك الراوي، د. عبد الرزاق إسماعيل خضر "المعاملات الحرارية للمعادن الحديدية واللاحديدية"، قسم هندسة الإنتاج والمعادن، الجامعة التكنولوجية، بغداد، 1989.

[7] K. Tokaji and T. Ogawa, "The Growth Behavior of Microstructurally Small Fatigue Crack in Metal", Short Fatigue Cracks, EIS13 (edited by K. J. Miller and E. R. De Los Rios), Mechanical Engineering Publication, London, pp. 85-99, 1992.

[8] J. Lankford, "The Influence of Microstructure on the Growth of Small Fatigue Cracks", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 8, No. 2, pp. 161-175, 1985.

[9] T. A. Khalifa, "Effect of Inclusion on the Fatigue Limit of a Heat-Treated Carbon Steel", Material Science and Engineering, A102, pp. 175-180, 1988.

[10] عبدالله ضايع عاصي (تأثير تصميم وصلات اللحام على معدل نمو شقوق الكلال) ،أطروحة ماجستير ، الجامعة التكنولوجية ، 2002.

[11] Hobart. 2005. MIG Welding. (Web Document) Available at:http://www.hobartwelders.com/products/mig

[12] K. J. Miller and R. Akid, "The Application of Microstructural Fracture Mechanics to Various Metal Surface States", Proc. R. Soc. Lond. A (452), pp. 1411-1432, 1996.