نمذجة نمو شقوق الكلال القصيرة والطويلة للفولاذ الإنشائي (DIN st 52-3)[+]

MODELING OF SHORT AND LONG FATIGUE CRACKS GROWTH FOR STRUCTURAL STEEL (DIN ST 52-3)

أحمد صاحب مهدي [*]

المستخلص

في هذا البحث تم دراسة معدل نمو شقوق الكلال القصيرة والطويلة للفولاذ الإنشائي (DIN st 52-3) عند تسليط أحمال ثابتة السعة تحت اجهادات مختلفة .
تناولت هذه الدراسة محورين رئيسيين ، المحور الأول يتضمن اختبار كلال ثابت السعة من نوع الانحناء الدوار (Rotating Bending) وبنسبة إجهاد (R=-1) في جو المختبر ، وكان حد الكلال للمعدن المستخدم (195 MPa) ، أما المحور الثاني فيتضمن دراسة سلوك نمو شقوق الكلال القصيرة والطويلة واستنتاج أنموذج رياضي يصف طبيعتها .

Abstract:

The current research deals with short and long fatigue cracks growth rate of structural steel (DIN st52-3) when a constant amplitude loading are applied for different stresses .Two main tasks are studies , The first task included a constant amplitude fatigue test of rotating bending type with a stress ratio (R=-1) in the laboratory condition , The fatigue limit value was found to be (195 MPa) .
The second task include the study of fatigue cracks growth behavior for short and long cracks.
Key words :- Short and Long Fatigue crack growth , Modeling , Stress Intensity Factor (K) .

المقدمة :

الفشل الذي يحدث تحت أحمال دورية متكررة يسمى فشل الكلال (Fatigue Failure) وهذا النوع من الفشل يمر بعدة أطوار ١- نشوء الشق (Crack Initiation) ٢- نمو الشق (crack propogation) ٣- الفشل التام (Fracture) [1] ، وتنشأ التشققات الصغيرة للكلال بصورة عامة عند الشوائب أو في مناطق تمركز الاجهادات مثل الحافات الحادة وحزم الانزلاق [2]، ولقد توصل العديد من الباحثين ومنهم [3][4][5] إلى إن شقوق الكلال لسبيكة الألمنيوم ذات الرمز (2024) تصاحب خطوط الانزلاق الخشنة في حالة الاجهادات العالية بينما تصاحب الشوائب في حالة الاجهادات الأقل .

[+] **تاريخ استلام البحث ٢٠١٠/١٠/٣ ، تاريخ قبول النشر ٢٠١١/٥/٣١ .**
[*] **مدرس مساعد /المعهد التقني / الناصرية**

وقد أظهرت البحوث [4][6] بأن الشقوق القصيرة تنمو أسرع من الشقوق الطويلة وتستمر بالنمو السريع إلى أن تصل حاجز بنياني قوي يحد من نموها الذي يمثل نقطة التحول من الشقوق القصيرة إلى الشقوق الطويلة إلى أن تتغلب على مقاومة الإعاقة هذه لتعود وتنمو بمعدلات أوطئ وبتسارع مستمر .

الجانب العملي

١-الفولاذ المستخدم

تم استخدام فولاذ إنشائي أو هياكل نوع (DIN st52-3) حسب المواصفة الألمانية (DIN 1623)[7] وذلك لشيوع استخدامه في الصناعة .

التركيب الكيمياوي

تم فحص التركيب الكيمياوي للعناصر المكونة للفولاذ المستخدم ومقارنتها مع نتائج المواصفات القياسية العالمية على شكل نسب وزنية (wt%) للعناصر ،كما في الجدول (١) .

جدول (١) التركيب الكيمياوي لعناصر الفولاذ المستخدم ومقارنتها مع النتائج القياسية

العناصر المكونة للمعدن (wt%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
القيمة القياسية	o.16-0.2	0.4 - 0.55	1.1-1.6	0.02 - 0.03	0.01 - 0.03	–	–	Rem
القيمة الفعلية	٠,١٨	٠,٥	١,٢٤	٠,٠٢	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠٠٧	Rem

٢ الأجهزة المستخدمة

١ جهاز اختبار الشد

تم استخدام جهاز اختبار الشد نوع (Schenck treble RM100) وإن أقصى حمل يصل إليه الجهاز هو (100KN) .

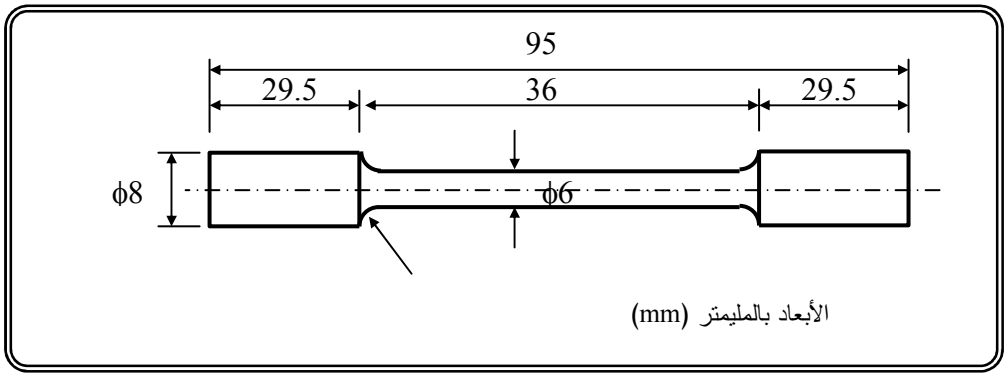
٢ جهاز اختبار الكلال

أستخدم جهاز اختبار الكلال من نوع الانحناء الدوار (Rotating Bending) نوع (Schenck Punn Rotating Bending) والموجود في أحدى مختبرات الجامعة التكنولوجية قسم هندسة الإنتاج والمعادن.

٣- الاختبارات الميكانيكية

٣-١ فحص الشد

تم تصنيع عينة فحص الشد للفولاذ المستخدم وفق الأبعاد المحددة بموجب المواصفة القياسية (DIN A6*30 50125)[8] كما مبين في الشكل (١) ويبين الجدول (٢) الخواص الميكانيكية التي تم الحصول عليها من الاختبار .



شكل (١) يوضح أبعاد عينة الشد القياسية.

جدول (٢) نتائج فحص أختبار الشد للمعدن المستخدم

الاستطالة (E%)	مقاومة الشد (MPa)	أجهاد الخضوع (MPa)
١٨	٥١٨	٣٤٨

<u>فحص الصلادة</u>

تم أجراء فحص الصلادة بطريقة روكويل للفولاذ المستخدم في هذا البحث والتي كانت قيمتها (80)

قياس قطر الحبيبة

تم قياس قطر الحبيبة بطريقة التقاطع الخطية (Linear Intercept Method) وبموجب المعادلة التالية [9][10].

$$D = \frac{L}{N} \qquad (١)$$

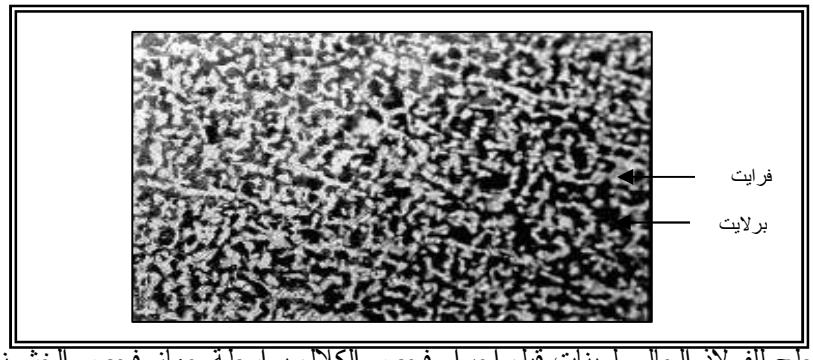
حيث إن :

D : معدل قطر الحبيبة.

L : طول الخط المراد حساب قطر الحبيبة من خلاله مقاس بالميكرون .

N : عدد الحبيبات على طول الخط .

ومن خلال تطبيق المعادلة أعلاه تم الحصول على معدل القطر للحبيبة وتساوي (30µm)، والشكل رقم (2) يبين البنية المجهرية للفولاذ المستخدم.

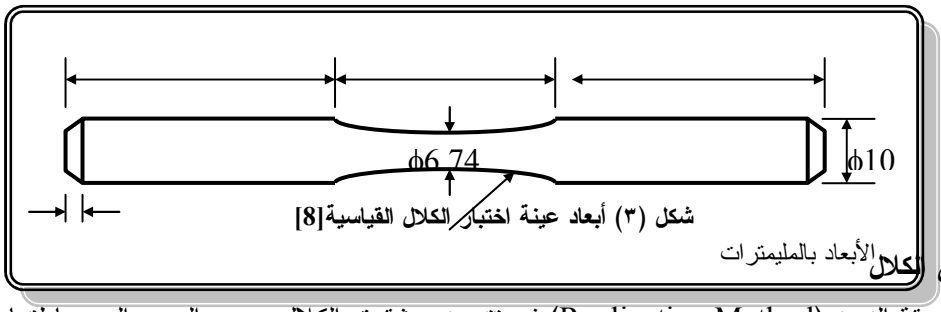


فحص الخشونة

تم قياس خشونة السطح للفولاذ الحالي لعينات قبل إجراء فحص الكلال بواسطة جهاز فحص الخشونة (Tally Surface)[11] وكانت قيمة معدل الخشونة لعدة عينات (1.5µm).

اختبار الكلال تحت أحمال ثابتة السعة

تم اختبار الكلال ثابتة السعة للفولاذ المستخدم في البحث والشكل (٣) يوضح أبعاد عينة الاختبار القياسية بموجب المواصفة القياسية (DIN 50125)[8].



شكل (٣) أبعاد عينة اختبار الكلال القياسية[8]

الأبعاد بالمليمترات

تتبع نمو شقوق الكلال

تم استخدام طريقة النسخ (Replication Method) في تتبع نمو شقوق الكلال ويعود السبب إلى بساطتها وسرعتها علاوة على أمكانية قياس الشقوق التي لا يزيد طولها عن (10μm) [9].

النتائج والمناقشة :

اختبار الكلال ثابت السعة

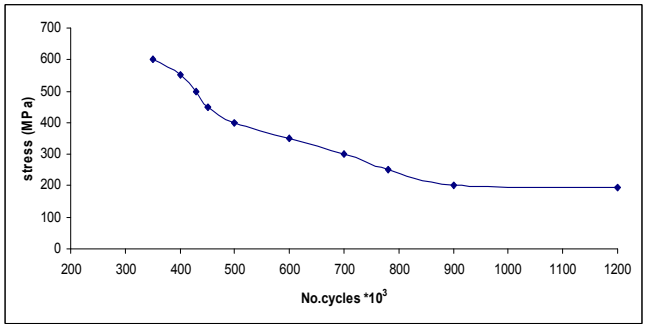
تم إجراء اختبار كلال ثابت السعة حيث استخدمت ثلاثة عينات لكل إجهاد وحساب عدد دورات الفشل لكل عينة ومن العينات الثلاث نستخرج متوسط القيمة لعدد الدورات عند الإجهاد المحدد كما في الجدول (٣)، وتم الحصول على منحنى الإجهاد – عدد الدورات ومن خلاله تم التوصل إلى حد الكلال للفولاذ المستخدم في البحث والذي كان (195MPa) والشكل (٤) يوضح منحنى ألإجهاد – عدد الدورات .

جدول (٣) قيم الإجهاد – عدد الدورات لاختبار كلال ثابت السعة

متوسط قيمة عدد الدورات للعينات الثلاث (N) *١٠٣	العينة الثالثة (N3) *١٠٣	العينة الثانية (N2) *١٠٣	العينة الأولى (N1) *١٠٣	الإجهاد (σ) (MPa)
٣٥٠	٣٤٥	٣٦٥	٣٤٠	٦٠٠
٤٠٠	٤١٥	٤٠٥	٣٨٠	٥٥٠
٤٣٠	٤٣٠	٤٤٠	٤٢٠	٥٠٠
٤٥٠	٤٥٥	٤٦٥	٤٣٠	٤٥٠

٥٠٠	٥١٥	٤٧٥	٥١٠	٤٠٠
٦٠٠	٥٨٥	٥٩٥	٦٢٠	٣٥٠
٧٠٠	٧٠٠	٧١٠	٦٩٠	٣٠٠
٧٨٠	٧٩٥	٧٨٥	٧٦٠	٢٥٠
٩٠٠	٩١٠	٨٧٠	٩٢٠	٢٠٠
لم تفشل				١٩٥

من الاختبار أعلاه نستنتج إن حد الكلال للفولاذ المستخدم يساوي (195MPa).



حساب معامل شدة الإجهاد

تم حساب معامل شدة الإجهاد (K)(Stress Intensity Factor) من خلال تطبيق المعادلة الآتية [5].

$$K = \sigma \sqrt{\pi c} \qquad (2)$$

حيث إن :

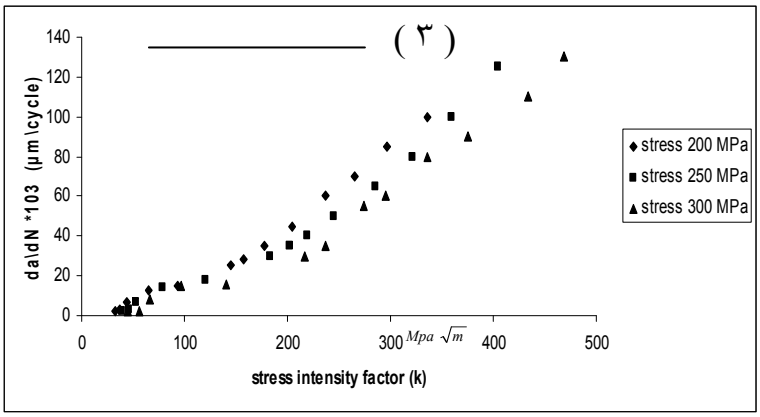
σ : الإجهاد (MPa)

c : نصف طول الشق (m)

ويمكن تقدير مدى معامل شدة الإجهاد للعتبة (Kc)(Critical Stress Intensity Factor) الذي تحته لا يمكن للشقوق أن تنمو وتعتبر شقوق خاملة ، من خلال تعويض أجهاد حد التحمل (σo)(Endurance Limit) بدلاً من (σ) ونصف معدل قطر الحبيبة بدلاً من نصف طول الشق (c) في المعادلة (٢) لتصبح كالآتي[12] :

$$Kc = \sigma_o \sqrt{\pi \frac{D}{2}} \qquad (3)$$

ومنها كانت قيمة (Kc) للفولاذ المستخدم بقيمة ($1.33Mpa\sqrt{m}$) والشكل (٥) يوضح قيم معامل شدة الإجهاد .



شكل (٥) قيم معامل شدة الإجهاد .

نمذجة نمو شقوق الكلال القصيرة

لغرض نمذجة نمو شقوق الكلال القصيرة ، أي الشقوق التي لا يتجاوز طولها حاجز بنياني معين (قطر الحبيبة) لابد أن يؤخذ ما يلي بنظر الاعتبار .

الإجهاد المتناوب المسلط (σ)

ب – طول الشق (a)

ج– حجم الحبيبة (D)

يمكن التعبير عن معدل النمو للشقوق القصيرة بالمعادلة التالية [13].

$$\frac{da}{dN} = B\sigma^{\beta}(D-a)^{\alpha} \qquad (٤)$$

الرموز(B,β,α) ثوابت تعتمد على نوع المعدن ،البيئة، نوع التحميل ،قيمة نسبة الاجهاد ، ودرجة الحرارة [13] .

ولغرض أيجاد قيم الثوابت (B,β,α) فأن المعادلة (٤) تكتب عند تعريض عينة كلال إلى إجهاد ثابت السعة بالصيغة التالية .

$$\frac{da}{dN} = A(D-a)^{\alpha} \qquad (٥)$$

حيث : $A=B\sigma\beta$

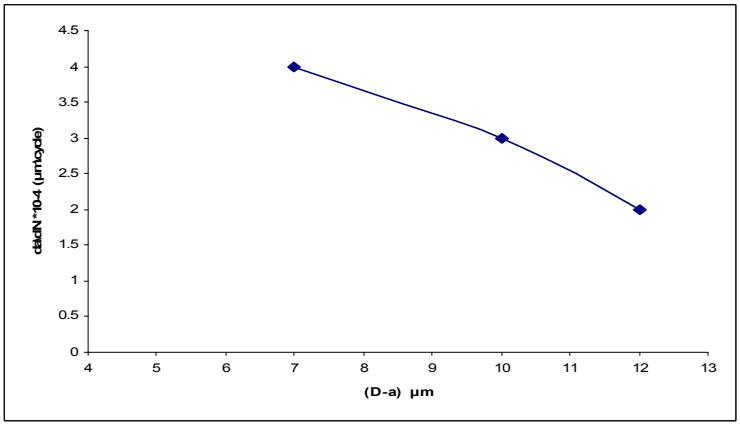
ولأجل الحصول على قيم الثوابت (A, α) فقد رسمت علاقة خطية بين(da\dN) و (D-a) لكل إجهاد كما موضح بالأشكال (٦)(٧)(٨) وقد استخدم في الأنموذج الرياضي معدل قيم (α) التي تم الحصول عليها والتي كانت مقدارها يساوي (α=-0.912) ، أما لإيجاد قيم (B,β) فقد رسمت علاقة خطية بين (σ)و(A) كما موضح بالشكل (٩) لنحصل بذلك على قيمتها والتي كانت . (B=5*10-8) (β=3.899) وبذلك تصبح المعادلة (٥) التي تصف معدل نمو الشقوق القصيرة تحت أحمال الكلال الدورية بالصيغة التالية .

$$\frac{da}{dN} = 5*10^{-8}(\sigma)^{3.899}(D-a)^{-0.912} \qquad (٦)$$

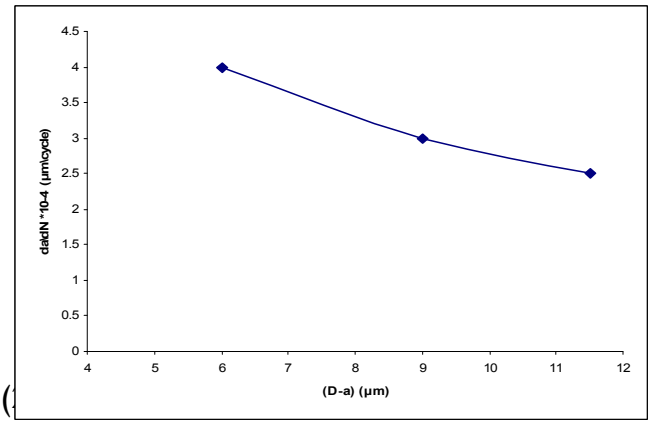
نلاحظ إن معدل النمو في المعادلة أعلاه يعتمد بصورة كبيرة على التركيب المجهري إذ كلما زاد طول الشق أرتفع معدل نموه حتى يقترب من الحد الحبيبي إذ يمثل العائق الكبير للنمو كما يعتمد على مقدار الإجهاد المسلط .

يمكن الحصول على عدد الدورات للشقوق القصيرة (Ns) من خلال تكامل المعادلة (٦) من مقدار الخشونة السطحية إلى مقدار قطر الحبيبة لتصبح بالشكل التالي .

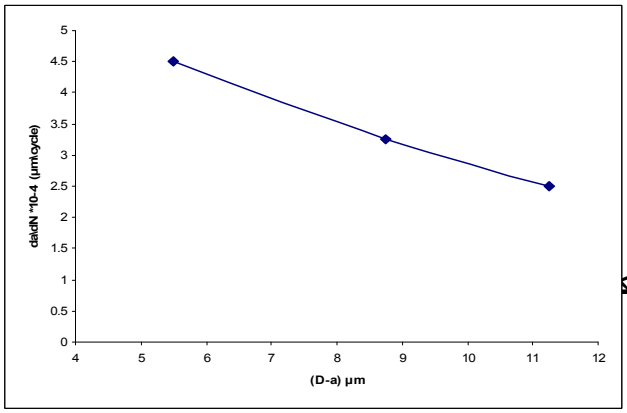
$$N_s = 9.56*10^{8}(\sigma)^{-3.899}(D-R)^{1.912} \qquad (٧)$$



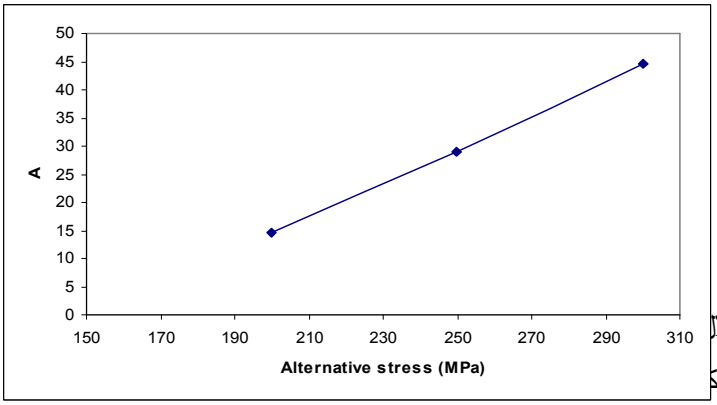
شكل (٦) علاقة معدل النمو وطول الشق للإجهاد (200MPa)



(



شك



نمذجة نمو شقوق الكلا

أما معدل نمو شقوق الك

ولإيجاد قيم الثوابت (F,α1,α2) عند تعريض عينة الكلال للإجهاد الثابت السعة تتم كتابة المعادلة (٨) بالصيغة الآتية

$$\frac{da}{dN} = Fa^{\alpha 1}\sigma^{\alpha 2} \qquad (8)$$

.

$$\frac{da}{dN} = E.a^{\alpha 1} \qquad (9)$$

ومن ثم رسم علاقة خطية بين (da\dN) و (a) لكل إجهاد كما في الأشكال (١٠)،(١١)،(١٢) والذي يكون معدل طول الشق فيه أكبر من الحجم الحبيبي (D=30µm) للحصول على قيم الثوابت (E,α1) وقد أستخدم في الأنموذج الرياضي معدل قيم (α1) والتي تم الحصول عليها والتي كان مقدارها (α1=0.868) ولغرض أيجاد قيم الثوابت (F)

و ($\alpha 2$) فقد رسمت علاقة خطية بين (σ) و (E) كما موضح في الشكل (١٣) لنحصل على قيمتها والتي كانت ($\alpha 2=0.7833$) ($F=178.6*10\text{-}8$) وبذلك تصبح المعادلة (٨) التي تصف معدل نمو الشقوق الطويلة تحت أحمال الكلال الدورية بالصيغة التالية

ويتضح من المعادلة أعلاه إن معدل النمو فيها يعتمد بصورة كبيرة على طول الشق وقيمة الإجهاد المتناوب وقد تم الحصول على عدد الدورات للشقوق الطويلة (NL) من خلال تكامل المعادلة (١٠) من قطر الحبيبة إلى قطر العينة لتصبح بالصيغة التالية .

$$NL = 23.57*10^{8}(\sigma)^{-0.7833}\left(d^{0.132} - D^{0.132}\right) \qquad \text{(١١)}$$

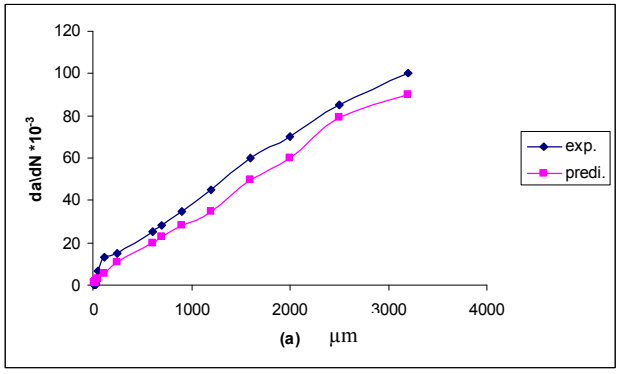
ومن المعادلتين (٧) و(١١) تم التنبؤ بالعمر الكلي للفشل (Nt) من خلال العلاقة التالية.

$$\frac{da}{dN} = 178.6*10^{-8}(\sigma)^{0.7833}(a)^{0.868} \qquad \text{(١٠)}$$

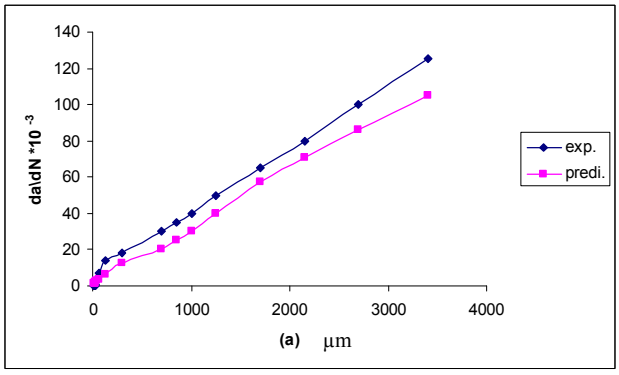
$$Nt = Ns + NL \qquad \text{(١٢)}$$

عند ملاحظة الأشكال (١٠) ، (١١) ، (١٢) فإنها توضح معدل نمو شقوق الكلال ومقارنتها مع الأنموذج الرياضي المقترح وفق المعادلة (١٠) حيث تبين هذه الأشكال زيادة سرعة نمو الشقوق القصيرة بزيادة طول الشق يعقبه تباطؤ في سرعة النمو عندما يصبح طول الشق بقدر حجم الحبيبة ($D=30\mu m$). أما مرحلة نمو الشقوق الطويلة فهي عبارة عن تسارع مستمر الى حين فشل العينة وهذا ما أكده كل من الباحثين [4] و [10] .

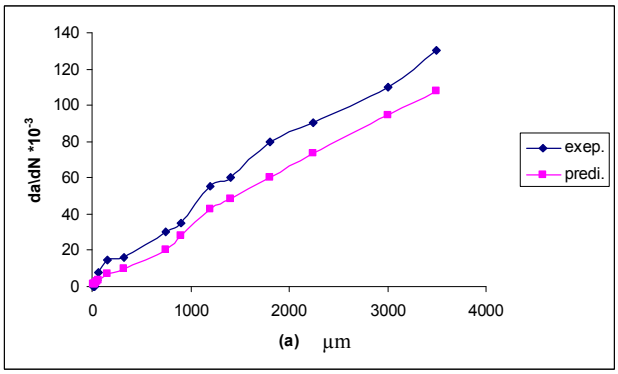
والشكل (١٤) يوضح علاقة عدد الدورات – طول الشق للاجهادات الثلاثة ويبين أنه كلما أزداد الإجهاد المسلط على العينة أزداد طول الشق ومعدل نموه وهذا ما أكد عليه الباحث [4].



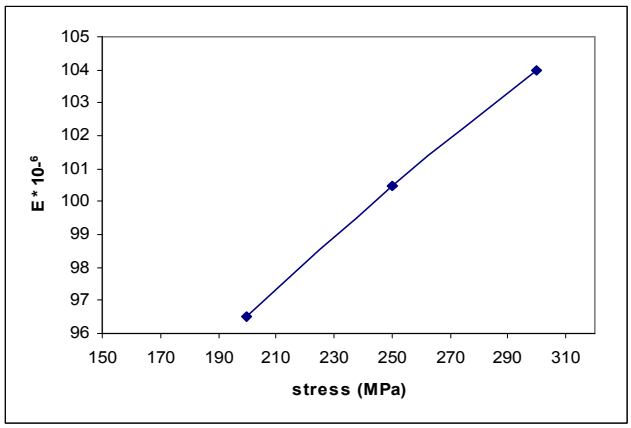
شكل (١٠) علاقة طول الشق ومعدل نمو الشقوق للاختبار العملي والنموذج المقترح للإجهاد (200MPa)

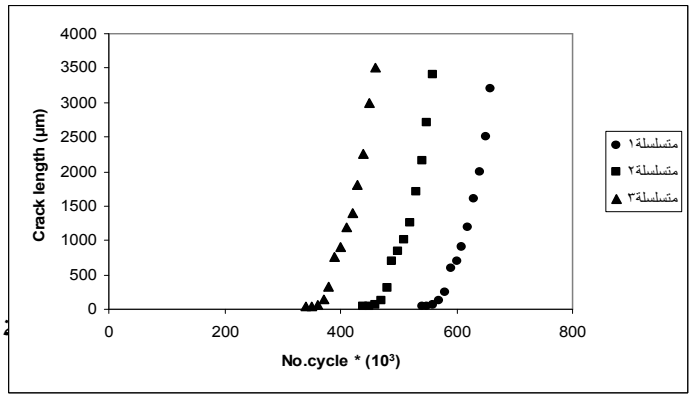


شكل (١١) علاقة طول الشق ومعدل نمو الشقوق للاختبار العملي والنموذج المقترح للإجهاد (250MPa)



شكل (١٢) علاقة طول الشق ومعدل نمو الشقوق للاختبار العملي والنموذج المقترح للإجهاد (300MPa)





٣٦٤

الاستنتاجات:

١- تنمو شقوق الكلال القصيرة تحت مدى معامل شدة إجهاد أقل من العتبة ولا يمكن تطبيق مفاهيم ميكانيك الكسر المرن الخطي في هذه الحالة .

٢- أمكانية استخدام الأنموذج المتوصل إليه لنمو شقوق الكلال القصيرة والطويلة في البحث الحالي.

٣- يزداد معدل نمو الشق كلما أزداد طول الشق إلى أن يقترب من الحد الحبيبي الذي يمثل العائق الكبير للنمو عندها يقل معدل النمو وبعد تجاوز هذا العائق يبدأ بتسارع النمو.

٤- نمذجة نمو شقوق الكلال القصيرة تعتمد على الإجهاد المتناوب المسلط وطول الشق وحجم الحبيبة بينما نمذجة نمو شقوق الكلال الطويلة تعتمد على الإجهاد المتناوب المسلط وطول الشق.

المصادر:

1-Sindo.kou " Welding Metallurgy " department of materials and engineering , university of Wisconsin , 2003, p.p 131 .

2-Marco . Giglio " Crack propagation in aluminum – Nomex panels : Experimental and Numerical Approach " The Arabian Journal for Science and Engineering , vol.31 , Number .2c , December 2006.

3-R.G. chermahini " Stabilized Crack opening stresses as a function of specimen thickness " The Arabian Journal for Science and Engineering , vol.31 , Number .2c , December 2006.

٤- العلكاوي ، حسين جاسم " دراسة ظاهرة الكلل لسبيكة الألمنيوم (2024-T351) تحت الاجهادات الدورية المعقدة" مجلة الكلية الهندسية العسكرية ، العدد ٧ ، ١٩٩١ .

٥- ن.ك. عزيز "نمذجة نمو شقوق الكلال لسبيكة ديور ألومين" رسالة ماجستير ، قسم التعليم التكنولوجي ، الجامعة التكنولوجية ، بغداد ١٩٩٧.

6- Victor .E. Gromov " Structure Phase States and Fracture Surface in Fatigue Loaded and Failed Austenitic Stainless steel " The Arabian Journal for Science and Engineering , vol.31 , Number .2c , December 2006.

7- "Catalogue of Key to steel " Federal Republic of Germany ,1988.

8- " Annual Book of ASTM Standards : Metal test Methods And Analytical Procedures Catalogue " sec.3 ,vol.3,1988.

9- - De Los Rios , E.R " Experimental Techniques to Observe and Monitor Short Fatigue Cracks " Advances in Fatigue Science and Technology , vol . 159 , Published by Kluwer Academic Publishers, 1988.

10- Miller .K.J " The Application of Micro structural Fracture Mechanics to Various Metal Surface States " Proc. R. , London , Printed in Great Britain , 1996.

11- Norton .R.L "Machine Design : An Integrated Approach" Prentice –Hall inter science pub , 1998.

12- Turki . al.qahtani " Effects of strain rate and temperature on fracture toughness and tensile properties " King fahd university , October 2005.

13- Necar . Merah " Temperature and loading Frequency effects on fatigue crack growth in HDPE pipe material" The Arabian Journal for Science and Engineering , vol.31 , Number .2c , December 2006.