دراسة نظرية لنمو شقوق الكلل لسبيكة الألمنيوم AL باستخدام معادلة باريس المعمم

د.فاروق إبراهيم حسين
كلية التربية – ابن الهيثم – قسم الفيزياء

الخلاصة

تم في هذا البحث أجراء دراسة نظرية لنمو شقوق الكلل ومدى عامل شدة الإجهاد لسبيكة للألمنيوم AL .تمت هذه الدراسة باستخدام قانون باريس المعمم. وتحقيق نظريته التي تربط بين بارامترات باريس C وn التجريبية. حيث تم استعمال قانون باريس البسيط وبمساعدته استخرجنا قيم C وn العملية ومقارنتها مع القيم النظرية التي تم التوصل إليها بقانون باريس المعمم . وتم استخراج قيم da/dN وΔK وذلك باستخدام البرنامج (Get data) لكل مادة ولكل أنموذج ومقارنته بالبيانات التي تم التوصل أليها, تم بناء برنامج حاسوب مكتوب (بلغة الفورتران) الذي يحقق قانون باريس المعمم , الذي تم العمل به طوال البحث. وأيضا تم حساب قيم n وC النظرية . ومن ثم رسم البيانات النظرية والعملية بوساطة برنامج (Graf). والوصول إلى الأشكال المذكورة في البحث .

المفتاح:- نمو شقوق الكلل- الالمنيوم

نمو شقوق الكلل :-

المقدمة

الكلل بشكل عام يعرف بانه هو حالة الفشل أو الانهيار الذي يحدث في تركيب المواد نتيجة تعرضها إلى تحميل أي حمل متكرر (Cyclic load) (قوة خارجية دورية) فقد يحدث الانهيار التام على الرغم من عدم وجود ضرر واضح خلال الجزء الأعظم من دورات التحميل والتي لو سلطت هذه الأحمال سكونيا (Statically) لما أدت إلى انهيار المعدن إي وجوب كون الإجهاد أو التحميل الذي ينهار عنده اقل من الإجهاد اللازم لكسر العينة تحت تأثير حمل ثابت .[1,2]

النظرية

يوصف نمو شقوق الكلل (Fatigue) بالاختلاف في معامل شدة الإجهاد ($\Delta K= K_{max}- K_{min}$) ، وتمثل بيانيا برسم بياني لوغارتيمي – لوغارتيمي لمعدل نمو الشقوق (da/dN) إزاء (ΔK) وكما مبين في الشكل (1) كشكل أنموذجي للمناطق الثلاثة , حيث تؤخذ هذه المناطق لمنحني FCG بنظر الاعتبار لتطوير أنماذج تحليلية لتمثيل بيانات تجريبية ، وبالأرقام الرومانية (Near- Threshod).[7, 2].

- **المنطقة الأولى (Region I):** تمثل منطقة (قرب العتبة) أو(قرب البداية) التي يحصل فيها نمو بطيء جداً للشقوق ولا يحصل فيها نمو تحت قيمة العتبة للقوة الدافعة (المسببة للشقوق) والتي يرمز لها بالرمز (ΔK_{th}).

- **المنطقة الثانية (Region II):** المنطقة الخطية ذات الحالة الثابتة لمنحني نمو الشقوق.
- **المنطقة الثالثة (Region III):** في جزء معدل النمو الأعلى للمنحني يحصل نمو سريع وغير مستقر عندما يحصل الاقتراب من الكسر النهائي عندما K_{max} تساوي K_e ، مايمثل مساواة الكسر للمادة.

وبمرور السنين تم تطوير عدد من المعادلات لتمثل جميع اوجزءاً من المدى الانموذجي لبيانات FCG ، وكان ابسطها معادلة باريس التي وردت عام 1963 لتعطي المنطقة الخطية من المنحني.

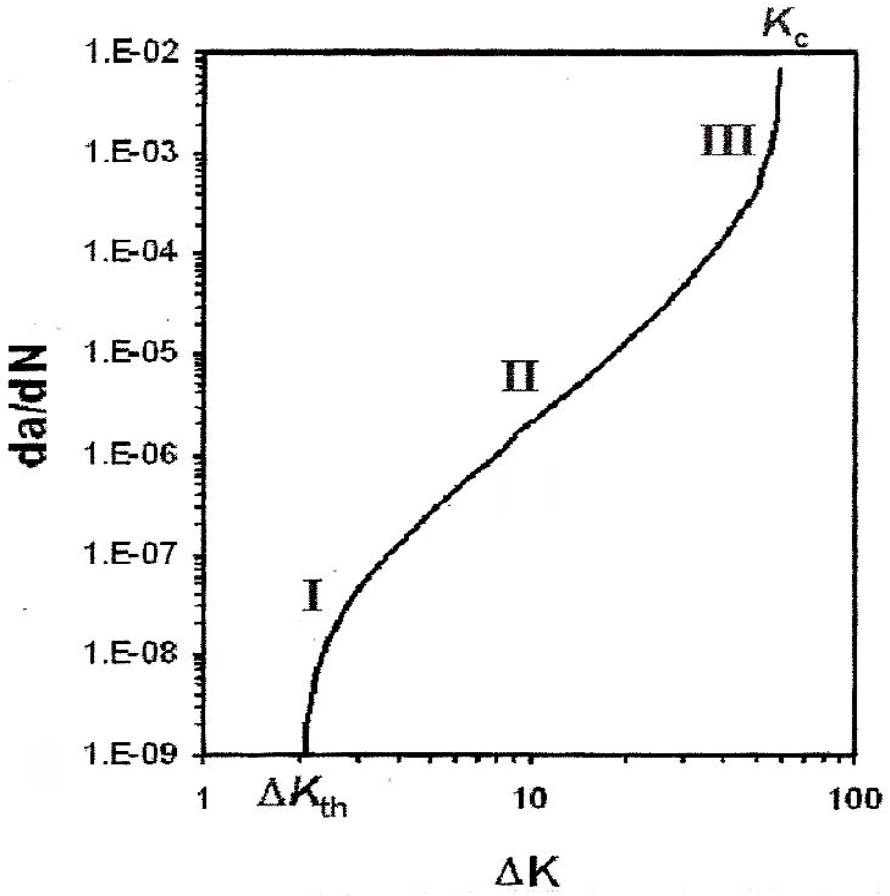
$$da/dN = C(\Delta K)n \quad \ldots\ldots.(\quad 1)$$

حيث أن :

n, C: ثوابت تجريبية

ΔK : معامل شدة الإجهاد stress intensity factor .(Mpa*m½)

da/dN: معدل نمو الشقوق Crack growth rate. (m/cycle) وتمثل نمو عرض الشق نسبة الى عدد الدورات



الشكل (1) منحني أنموذجي لنمو شقوق الكلل يبين المناطق الثلاث (I= العتبة)،(II: المنطقة الخطية)، (III: منطقة عدم الاستقرار).[2]

تم دراسة نمو شقوق الكلل للالمنيوم من قبل الباحثين تجريبيا باستخدام معادلة باريس التجريبية اعلاه [1,3]

a=half crack length

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$

N= no. of cyclic loading , $K_{min} = \alpha S_{min}(a\pi)^{1/2}$, S_{max}, S_{min}=applied stresses

$K_{max} = \alpha S_{max} (\pi a)^{1/2}$

$\alpha = (\sec \pi a/w)^{1/2}$ w=width of the specimen

وتم حساب معدل نمو شقوق الكلل لسبيكة الالمنيوم - منغنيزكالاتي:-

$da/dN=1.430 \times 10^{-11}\Delta K^{3.921}$

$C=1.430\times10^{-11}$ **n=3.921**

وهذه الثوابت التجريبية اعتبرت ثوابت مستقلة عن بعضها لاترتبط مع بعضها وعلى العموم ان دراسة شقوق الكلل اعتبر فنا تجريبيا اكثر من كونه علما , ولكن قام باحثون اخرون باثبات ان الثوابت C,n مرتبطان مع بعضها البعض وتم توسيع معادلة باريس وتعميمها عام 2004 من قبل كل من (PUNGO & RUFF) باستخدام ميكانيك الكم للكسروتوصلوا الى معادلة باريس المعممة Generalized Paris Equation والتي تمثل كالاتي:- [5,6, 4]

$$\frac{da}{dN} = C\left[\Delta K\sqrt{\pi\left(a+\left\{\frac{\Delta K^{\,k-n}}{C\overline{C}\,\pi^{\,n/2}(n/2-1)}\right\}^{1/n/2-1}\right)}\right]^{n} \quad \ldots\ldots(2)$$

وبذلك اصبح بالإمكان التنبؤ نظريا بنمو شقوق الكلل (FCG) لاي مادة تخضع لاجهادات دورية تتبع معادلة باريس غير المعممة وفي بحثنا الحالي نحاول اثبات امكانية استخدام معادلة باريس المعممة على سبائك الالمنيوم والتنبؤ بنمو شقوق الكلل له وذلك باستخدام المعطيات العملية من معادلة باريس الاولية وتطبيقها في معادلة باريس المعممة واستخراج الثوابت نفسها(c,n) .

الحسابات والنتائج

يتميز الألمنيوم AL بخفة وزنه وبالمتانة العالية وبقابلية لإعادة التصنيع وبمقاومه للصدأ و بسهولة التعامل و بقابليته للتشكيل والتوصيل الكهربائي , ونتيجة لهذه الخصائص المتنوعة تعددت مجالات استعمال الألمنيوم وأصبح استعماله ضروريا في تطبيقات مختلفة . إذ تبلغ كثافته 2.70 غم| سم^3 تعادل ثلث كثافة الحديد والنحاس . وأيضا يتمتع بمقاومته الجيدة للحريق , ومقاومته الفائقة للتآكل لذلك فهو يعد من المواد المعمرة . ويستعمل في البناء حيث يدخل في كثير من المنتجات الصناعية على هيأة أعمدة وإطارات شبابيك وتغطية خارجية في الأسقف والجدران وتغليف الهياكل الإنشائية وعلى هيئة أوراق من الألمنيوم للحماية من تسرب المياه فهو عازل تام للمياه . كما يستعمل في الطائرات بشكل كبير . ومن أهم خصائصه الحديثة هي إمكانية إعادة استعماله (recycling) وفي منتجات البناء كافة يستخدم فيها الألمنيوم إلى غير نهاية دون إن تفقد خصائص المادة نفسها .

والنماذج التي تم استعمالها في النظرية هي لسبيكة (ألمنيوم و نحاس ومغنيسيوم) مختلفة النسب كما موضح في الشكل (2) ولقد تم إجراء الفحوصات بمدى إجهاد ثابت تقريبا وبصورة دورية , وهناك اختلاف في التغايرية , حيث يمكن ملاحظة التغايرية الناعمة للمادة في العينتين 3 و 4 , وملاحظة التغايرية متوسطة الخشونة في العينتين 1 و 2 [3] .

حيث يتم أولا تقدير قيم كل من Cو n من معادلة باريس البسيطة ,ومن ثم حسابها من قانون باريس المعمم , حيث تم استعمال المعادلات الآتية لاستخراج قيم Cو n العملية والنظرية : -

$$Log\frac{da}{dN} = Log\left[C(\Delta K)^n\right]\cdots\cdots(3)$$

$$Log\frac{da}{dN} = LogC + nLog(\Delta K)\cdots\cdots(4)$$

$$n = \frac{dLog\, da/dN}{dLog(\Delta K)}\cdots\cdots(5)$$

كيفية الحصول على بيانات da/dN وΔK العملية كالأتي :-

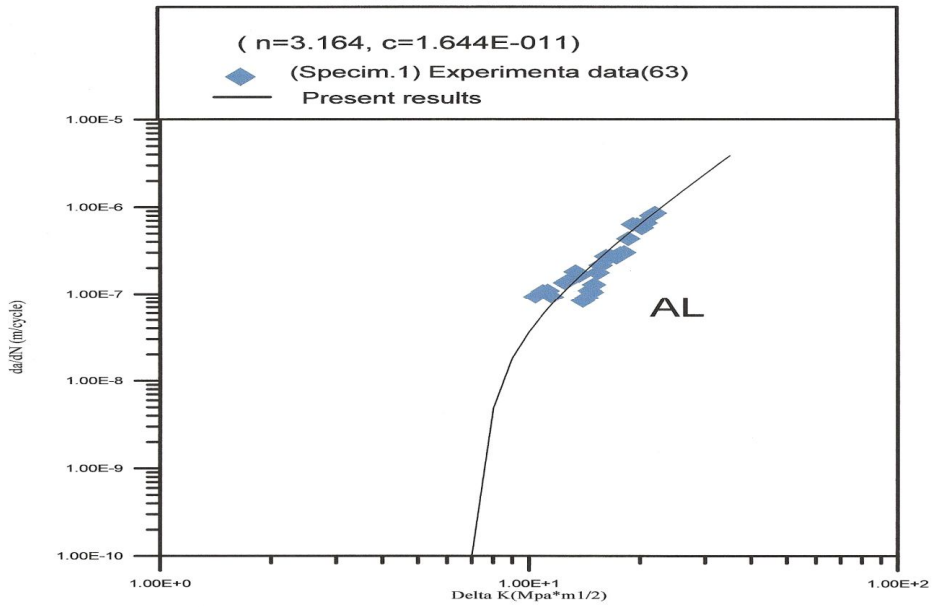
1. المصادر التي تم استخدامها في هذا البحث تستخدم قانون باريس البسيط المشار أليه بالمعادلة (1), حيث بمساعدة البرنامج الحاسوبي (Get data) تم استخراج بيانات da/dN وΔK من الأشكال البيانية في المصادر المذكورة .
2. المصادر المشار أليها لاتحتوي قيم n و C العملية حيث تم حسابها باستخدام المعادلات (4)و(5) والتي تعتبر من وجهة نظر قانون باريس البسيط أنهاغير مرتبطة مع بعضها البعض وذلك للاستفادة منها عند حساب n وC النظرية من قانون باريس المعمم الذي يعتبرها غير مرتبطة مع بعضها البعض وهذا الذي يهدف أليه البحث لغرض المقارنة .
3. تمت كتابة برنامج بلغة الفورتران لحساب معادلة باريس المعممة واستخراج معاملات باريس الجديدة من البرنامج والمتمثلة C و n خلال الحصول على قيم جديدة لـda/dN وΔK واثبات إن هذه المعاملات مرتبطة ببعضها وهذا ماتشير إليه معادلة باريس المعممة كما موضحة في المعادلة (2).

4. حيث تم رسم البيانات العملية المستخرجة من (Get data) والبيانات النظرية المحسوبة بوساطة البرنامج الفورتران بشكل بياني بمساعدة البرنامج (Graf) ومنه يمكن ملاحظة الفرق بين القانونين, وفيما يلي جدول يوضح قيم معاملات باريس النظرية والعملية .

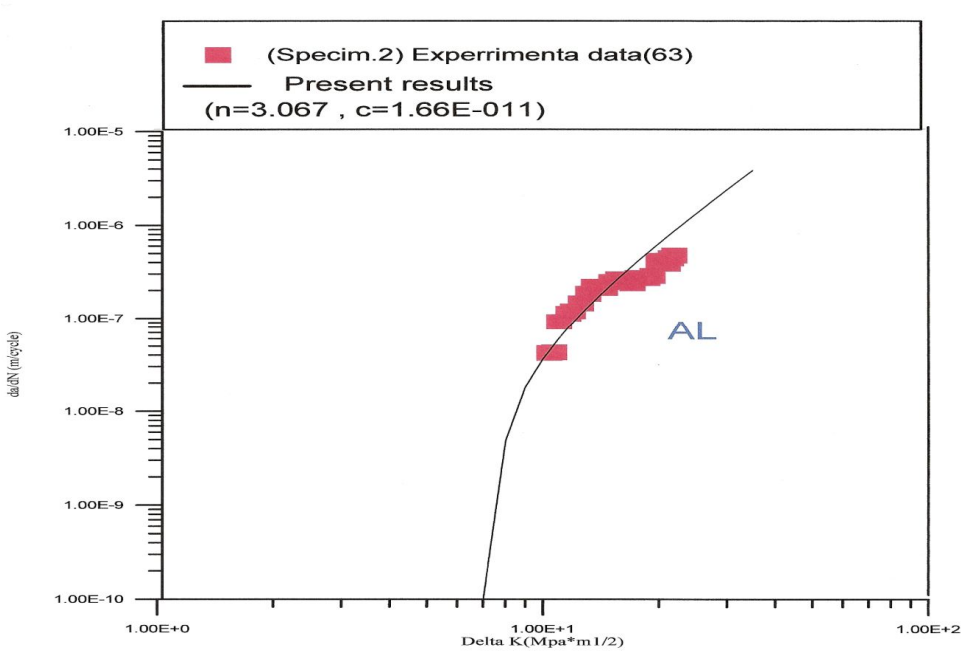
الـجدول(1) يوضح قيم C وn لسبيكة الألمنيوم AL.

Experimental				Theoretical	
n	C	رقم العينة		n	C
3.921	1.430E-011	1		3.164	1.644E-011
3.702	2.631E-011	2		3.067	1.661E-011
3.943	2.315E-0112	3		3.246	2.051E-011
3.562	2.313E-011	4		3.261	2.118E-011

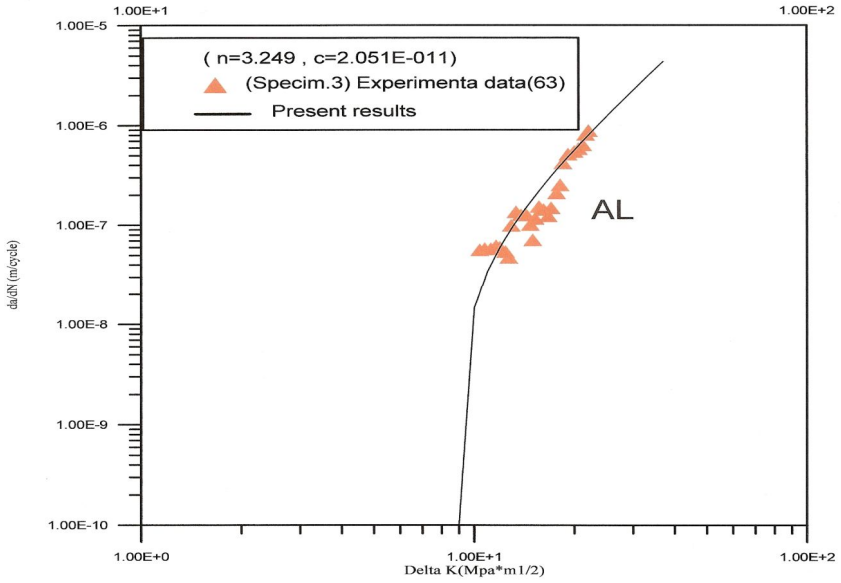
الشكل (2) يوضح أربعة نماذج مختلفة لسبيكة الألمنيوم AL .[3].



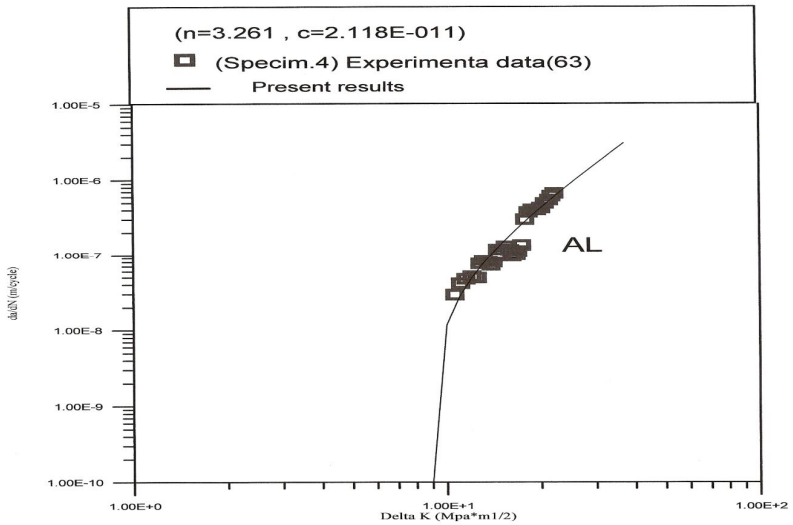
الشكل (3) يوضح سلوك الألمنيوم AL في العينة الأولى حسب قانون باريس المعمم.



الشكل (4) يوضح سلوك الألمنيومAL في العينة الثانية حسب قانون باريس المعمم.



الشكل (5) يوضح سلوك الألمنيوم AL في العينة الثالثة حسب قانون باريس المعمم.



الشكل (6) يوضح سلوك الألمنيوم AL في العينة الرابعة حسب قانون باريس المعمم.

المناقشة

بصورة عامة من البيانات التي تم الحصول عليها من الأدبيات ومن الحسابات التي توصلنا إليها تم إنشاء منحنى (S-N) , حيث يمثل محور (y-axis) معدل نمو الشقوق والمتمثل بـ da/dN , ومحور (x-axis) فيمثل شدة الإجهاد المتمثل بـ ΔK وللمواد المختارة كافة . ومن خلال معرفتنا إلى صفات الألمنيوم AL , مما تدل هذه الخواص على ان المنطقة الثانية (منطقة النمو المنتظم للشقوق) لهذا المركب تكون جيدة نوعا ما . مما نلاحظ أن وصوله إلى حالة الفشل اقل مما تظهر عند غيره من المعادن وكذلك عن المواد السيراميكية , لان الألمنيوم له مقاومة جيدة للسحب والطرق , ولقد لوحظ بشكل عام أن بتغير قيمة نسبة الإجهاد R فان ΔK شدة الإجهاد تتغير أيضا , ونتيجة لذلك واستنادا إلى معادلة باريس فان معدل نمو الشقوق يجب أن تتغير أيضا .

ان الهدف الاساسي لمعادلة باريس المعممة هي دراسة نمو شقوق الكلل نظريا والتنبأ بمعدل حدوثها والبياني الذي نحصل عليه من هذه المعادلة يصف العلاقة بين معدل نمو الشقوق وشدة الاجهاد كمنطقة واحدة ولايقسمها الى ثلاث مناطق كمعادلة باريس البسيطة لان الاخيرة هي معادلة تجريبية كما تم شرحها في النظرية والاشكال (3-6) توضح هذه الحقيقة لاربع نماذج من سبائك الالمنيوم مختلفة في نسب الشوائب المتكونة من النحاس والمغنيسيوم حيث ان الاربع نماذج حققت معادلة باريس المعممة من خلال مقارنة قيم الثوابت (n , c) العملية المستخرجة تجريبيا من معادلة باريس التجريبية والقيم النظرية المستخرجة من معادلة باريس المعممة وكما موضح في الجدول (1) وهو الهدف الرئيسي من الدراسة كما ان الاشكال توضح وتبين ان للالمنيوم مرونة كبيرة ولدونة تقاوم اجهادات الاحمال الدورية اكبر من بقية المواد وبالاخص المواد السيراميكية وهو نفس ماحققته الدراسات التجريبية السابقة لمعادلة باريس التجريبية السابقة اي اننا نظريا يمكن

دراسة سلوك الالمنيوم من خلال فرض اجهادات (معدل نمو الشقوق da/dN) وشدة اجهادات ΔK والتنبأ متى يحدث الانهيار والاستفادة منها في التصاميم الهندسية التي يستخدم فيها الالمنيوم.

الاستنتاجات

1- وجد إن الثوابت التجريبية لباريس Cوn ترتبط بعضها ببعض حيث كلما زادت C تزداد n وبالعكس .

2- أن الزيادة في نسبة الإجهاد تؤدي إلى زيادة في معدلات نمو الشقوق وكذلك زيادة في عامل شدة الإجهاد .

3- يمكن أن يكون للتركيب تأثير قوي على نسبة نمو الشقوق بالكلل حيث تزداد عند إضافة المواد الأخر مثل النحاس والمغنيسيوم وأيضا تزداد كلما ازدادت نسبة المادة المضافة .

4- عتبات نمو شقوق الكلل بالمقارنة في المادة الناعمة تكون أدنى مما في المواد الخشنة .

المصادر

1. ASTM, " Annual Books of ASTM standards Die-Cast Metals; Aluminum and Magnesium Alloys (nonferrous metal products) section 2, Vol. 0202 ,P-291, 1985.
2. Brown E.N. , White S.R. , Sottos N.R., "Fatigue Crack Propagation in Microcapsule-Toughened Epoxy", J. Mater , Sc. (2006),41:6266- 6273.
3. N. Benachour A. Hadjoui M. Benachour M. benguediab " Stress Ratio and Notch Effect on Fatigue Crack Initiation and Propagation in 2024 Al-Alloy " World Academy of Science, Engineering and technology 79 ,2011.
4. L.P.Borrego J.M.Costa J.M Ferreira and A.S. Ribeiro " Comparison Of Crack Growth Behavior Of AA6082-T6 and AA6061-T651 Aluminium Alloys " Anales de Mecãnica de la Fractura 28,Vol.1 (2011).
5. OMMI. " A Simple *Engineering* Method of Fatigue Crack Growth in the stable Paris Region "*Probab*ilistic .Assessment of Crack Growth Vol.3 Issue 3 , December 2004.
6. M.Camarilla ,N.pugno " Generalized Paris Law for Fatigue Crack Growth " XXXIV Convegno Nazionale Alas- Milano ,14-17 Sebtembre 2005.
7. Hellan Kare " Introduction to Fracture Mechanic" Mc-Graw-Hill Co., Singapora , 1985.

Theoretical Studying Of Fatigue Crack Growth (FCG) for Aluminums Alloy By using Generalized Paris Equation

Dr. FAROUQ I. HUSSAIN

Dep. Of Physics college of Education IBN-ALHAITHM

Abstract

A theoretical study was done in this work for Fatigue Crack Growth (FCG) and stress factor intensity range for Aluminum.

It also includes Generalized Paris Equation and the Fulfillment of his equation which promises that there is a relation between parameters c and n.

Used Simple Paris Equation through which we have estimated the practical values of c and n and compared them with the theoretical values which have been calculated by Generalized Paris Equation .

The value of da/dN (crack growth rate m/cycle) and ΔK (stress intensity factor $Mpa*m^{1/2}$) for every material and sample were concluded and compared with the data which was used in the computer program for the whole of our research .

The program is written in Fortran . The theoretical and practical data was drawn with (Graf) program so as to conclude the data mentioned in the research .

Keywords :- Fatigue Crack Growth- Aluminum