

دراسة عملية لكلال سبيكة الالمنيوم (T٦٥١ - ٦٠٦١) تحت التحميل الانحنائي المتناوب

باسم حسين عباس

مدرس مساعد

معهد التكنولوجيا - بغداد/ العراق

(الاستلام: ٢٠١٢/٦/١٨، القبول: ٢٠١٢/١١/٤)

الخلاصة

لقد تمت دراسة ظاهرة الكلال لسبيكة الالمنيوم ذات الرمز (T٦٥١ - ٦٠٦١) وذلك بتسليط اجهادات دورية ثابتة ومتغيرة (constant and variable cyclic stresses) من نوع الانحناء الصافي (pure bending) في درجة حرارة الغرفة. ومن خلال قياس اطوال الشقوق السطحية الصغيرة (Short surface fatigue cracks) والشقوق السطحية الكبيرة (long surface fatigue cracks) وكذلك عدد الدورات (number of cycles) تم بناء نموذج (model) رياضي يصف حركة الشقوق الصغيرة والكبيرة وأجريت تجارب مختبرية على ثلاثة عينات من نفس المادة تحت اجهادات دورية متغيرة (variable stresses) لتقريب الحالة الى ما هو عليه في الحياة العملية وتم تخمين عمر هذه العينات باستخدام النموذج المقترح وأثبت كفاءة جيدة لانه اعطى نتائج أقل من النتائج العملية وهذا يعني أن النموذج يعطي تخمين محافظ اي يعطي تحذير مهم جداً وخاصة ان السبيكة أعلاه تستخدم في صناعة أجزاء الطائرات الحربية والمدنية ، يوضح هذا البحث إمكانية الاستغناء عن منحنى ويلر او (S-N curve) .

الكلمات الدالة : سبيكة الالمنيوم T٦٥١-٦٠٦١ ، الشقوق الكلالية الصغيرة والكبيرة ، أنموذج نمو الشقوق.

تسمية الرموز

اغلب الرموز عرفت هنا أما التي لم تعرف فموجودة بشكل مفصل بالمتن .

a : طول الشق السطحي

N : عدد الدورات

K : عامل شدة الاجهاد

σ_y : أجهاد الخضوع

σ_u : المقاومة القصوى للمادة (أجهاد الشد القصوى)

da / dN : سرعة الشق

p : الحمل المسلط

σ_f : الاجهاد عند الفشل

b : سمك العينة

- h : عرض العينة
M : العزم المسلط
L : طول الخط المستخدم لقياس قطر الحبيبة
n : عدد حدود الحبيبة
MG : التكبير
D : معدل قطر الحبيبة
l : عزم القصور الذاتي
 σ_b : اجهاد الانحناء
 A_1, A_c, m : ثوابت تعتمد على المادة
 N_s : عدد الدورات (عمر الشقوق السطحية الصغيرة)
 N_L : عدد الدورات (عمر الشقوق السطحية الكبيرة)
 N_f : عدد الدورات الكلية لفشل العينة او الجزء
RA% : النسبة المئوية لتخفيض المساحة

١ - المقدمة

بدأ الاهتمام ينصب على ظاهرة الكلال او تعب المواد اثناء تسليط اجهادات دورية معقدة حيث بدأت ظاهرة الكلال تأخذ موقعا حساسا وخاصة في المواد الهندسية المصنوعة منها الطائرات وفي مقدمتها سبائك الالمنيوم لان ظهور هذه الظاهرة في هذه المنظومات يؤدي الى هدر في حياة الانسان بشكل مباشر . والدراسات السابقة أهتمت بدراسة هذه الظاهرة على اساس انها تمثل نمو الشقوق وتقدمها الى ان يحدث الفشل دون الاخذ بنظر الاعتبار سلوك هذه الشقوق، وكان على رأس الباحثين في هذا المجال S Jaap, (1) حيث وصف علاقة نمو الشقوق وسرعتها بعامل يسمى عامل شدة الاجهاد (K) Stress intensity factor) وأن هذه الشقوق تزداد سرعتها كلما تقدمت في الخدمة وأن العلاقة التي أوجدها تمثل بالمعادلة التالية

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad \text{-----} \quad (1)$$

حيث أن $\frac{da}{dN}$ هي سرعة الشق

A, m ثوابت تعتمد على المادة المستخدمة

ΔK مدى عامل شدة الاجهاد

وتتراوح قيمة (m) بين (٢-٤) لاغلب المواد ومنها سبائك الالمنيوم (2) بعد تقدم طرق قياس الشقوق أتضح ان هناك

نوعان من الشقوق تختلفان في تصرفهما بشكل كبير جدا وهما:

١- الشقوق الصغيرة (Short fatigue cracks) والتي تمتاز بـ

أ- سرعتها العالية جدا

ب- اعتمادها على الحجم الحبيبي (Grain size)

ج- لا يمكن للمعادلة رقم (١) اعلاه ان تصف تصرف هذه الشقوق

د- صعوبة ايجادها وقياسها

٢- الشقوق الكبيرة (Long fatigue cracks)

أ- سرعتها أقل بكثير من الشقوق الصغيرة

ب- لا تعتمد على التركيب المجهرى للمادة

ج- سهولة ايجادها وقياسها

د- من السهل تقييم هذه الشقوق بواسطة المعادلة أعلاه

أن أول من وجد هناك شقوق تمتاز بالسرعة الابتدائية العالية هو De Lange (٣) سنة ١٩٦٤ لسبائك الالمنيوم والصلب ومن ثم تتباطىء هذه الشقوق وغالباً ما تقف في مناطق معينة وسماها بالشقوق العمياء (Non - propagating fatigue cracks) وجاء Pearson (١) في سنة ١٩٧٤ وتوصل الى نفس الاستنتاج واستطاع ان يصف حركة هذه الشقوق وسرعتها العالية بمعادلات رياضية شبيهة بالمعادلة رقم (١). في الثمانينات (٤) Miller (٤) Tayler, (٥) درسوا الشقوق الصغيرة المتكونة من تسليط الاجهادات المعقدة باختلاف أنواعها لسبائك مختلفة فوجدوا الآتي :

١- للتركيب المجهرى للمادة تاثير بالغ على تصرف هذه الشقوق.

٢- لا يمكن للمعادلة رقم (١) ان تصف حركة هذه الشقوق.

٣- تخمين حياة الجزء المراد تصميمه وخاصة عندما تكون الاجهادات المتغيرة قريبة من حد الكلل (Endurance Limit) تعتمد بشكل رئيسي على عمر هذه الشقوق لانها تشكل نسبة (٧٠ - ٨٠)% من الحياة الكلية للجزء عند الاجهادات الواطئة القريبة من حد الكلل (٦,٧).

ان هذا البحث يقدم عرضاً مفصلاً عن تصرف الشقوق الصغيرة والكبيرة ويهتم بدراسة ظاهرة الكلال في سبيكة الالمنيوم ذات الرمز (T601 - 6061) المسلط عليها أجهادات دورية متغيرة قريبة من حد الكلل وتخمين عمر العينات بواسطة نموذج رياضي يصف حركة الشقوق الصغيرة والكبيرة والذي يمكن بناءه عن طريق النتائج العملية.

٢- التفاصيل العملية

تم اختيار سبيكة الالمنيوم (T601 - 6061) وذلك لاستخداماتها الواسعة في الصناعات وخاصة صناعة الطائرات (طائرات ميراج). التركيب الكيماوي لهذه السبيكة موضح في جدول رقم (١)، أما المواصفات الميكانيكية للسبيكة اعلاه فمبينة في الجدول رقم (٢).

عينات الفحص

شكل رقم (١) يمثل شكل وأبعاد العينة المستخدمة والمسلطة عليها انحناء صافي (pure bending)، حيث تم استخدام جهاز بسيط يقوم بتثبيت العينة بنقطتين كما هو الحال في العتلة المستندة على مسندين، وبتسليط الحمل على بعد ثابت من الطرفين ويقوم الجهاز بتسليط الحمل ورفعها الى ان يتم فشل القطعة . أن أنحناء العينة ورجوعها الى حالتها الاولى يعتبر دورة واحدة، تفاصيل الجهاز والعينة بشكل متكامل متوفرة في المصدر (٧).

٣- الحسابات

١-٣ حسابات الاجهاد الدوري Cyclic Stresses Calculation

من الشكل رقم (١) يتضح ان أعظم عزم مسلط على العينة هو $p = 150$ نيوتن. ملم وعليه ببساطة يمكن استخدام المعادلة التالية لحساب الاجهاد الدوري المسلط على العينة:

$$\frac{\sigma_b}{y} = \frac{M}{I} \quad \text{-----} \quad (2)$$

حيث M اعلى عزم مسلط على العينة
I عزم القصور الذاتي
y المسافة بين مركز المقطع الى الحافة
($I = \frac{bh^3}{12}$)
($y = \frac{h}{2}$)

σ_b الاجهاد الدوري الانحنائي المسلط على العينة

٢-٣ حساب سرعة الشقوق Crack Speed Calculation

تم استخدام طريقة المسح (Replication Technique) لقياس طول الشق على السطح بعد مسح العينة بواسطة قطعة سليولوزية (acetate paper) باستخدام سائل الاسيتون (للتفاصيل الدقيقة يمكن الرجوع الى المصادر (٦) (٨). طول الشق على السطح يمثل المسقط الافقي اي المسافة المستقيمة بين نهاية الشق وبدايته وقد تم قياس أطوال الشقوق باستخدام مجهر حساس وفحصت القطعة السليولوزية المطبوع فيها تضاريس سطح العينة كذلك تم قياس عدد الدورات من خلال عداد (Counter). أن طول الشق المسجل يقابله عدد دورات مصروفة تسجل مباشرة وبعدها يتوقف الجهاز وتبدأ عملية المسح خلال فترات منتظمة، أن سرعة الشق حسبت بالمعادلة التالية:

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad \text{-----} \quad (3)$$

حيث ان (a) يمثل طول الشق على السطح
(N) عدد الدورات
($\frac{da}{dN}$) سرعة الشق
(i) رقم المسحة

اما حساب معدل طول الشق فتم بالشكل التالي:

$$a_{average} = \frac{a_{i+1} + a_i}{2} \quad \text{-----} \quad (4)$$

٣-٣ حساب معدل قطر الحبيبية Average Grain Size Diameter Calculation

تم استخدام طريقة التقاطع الخطية Linear Intersept Method^(٨) لقياس معدل قطر الحبيبية بعد الحصول على الحجم الحبيبي للعينة وبالمعادلة التالية:

$$D_{average} = \frac{L}{n(MG)} \quad \text{-----} \quad (5)$$

حيث أن (D_{average}) معدل قطر الحبيبية
(L) تمثل طول الخط المستخدم (بالامكان استخدام اي طول)
(n) عدد التقاطعات للخط اعلاه مع حدود الحبيبية.
(MG) التكبير المستخدم في أظهار التركيب المجهرى للمادة.

٤ - النتائج Results

٤-١ الاجهادات (اجهاد الانحناء الدوري) Cyclic Bending Stress

نتائج الاجهادات للعينات الثلاثة موضحة في الجدول رقم (٣).

٤-٢ سرعة الشقوق Speed of Cracks

ثلاث عينات مسلط على كل منها اجهاد يختلف عن الآخر كما مبين في الجدول رقم (٣) حيث تم مسح العينات الثلاثة وسجلت أطوال الشقوق وعدد الدورات المقابلة لهذه الاطوال جدول رقم (٤) يبين هذه النتائج حيث ان طول الشق تم حسابه عملياً بواسطة عملية المسح المجهرية بطريقة Replication.

طريقة تسجيل وقياس الشق مع عدد الدورات تلخص بما يلي:

أ- أيقاف الجهاز .

ب- مسح العينة (سطح العينة) بوضع ورقة (Acetate Paper) بعد رشها بالاسيتون.

ج- تركها لمدة دقيقة ثم ازلتها من العينة.

د- فحصها مجهرياً وقياس طول الشق عند قراءة العداد المتمثلة بعدد الدورات لهذا الطول من الشق.

أن تسجيل طول الشق وعدد الدورات يكون تحت ثبوت الاجهاد لحين كسر العينة ولذلك استخدمت ثلاثة عينات باجهادات انحناء دورية مختلفة.

٤-٣ معدل قطر الحبيبية

من خلال التركيب المجهرى للمادة والمبين في شكل رقم (٢) تم حساب معدل قطر الحبيبية بواسطة طريقة التقاطع الخطية حيث ان النتيجة النهائية تمثل معدل القياسات لحوالي (١٠٠٠) حبيبية وكان المعدل (٢٢٠) مايكرون.

٥- تحليل النتائج والمناقشة

الاجهادات المبينة في جدول رقم (٣) المسلطة على العينات تم حسابها بواسطة المعادلة رقم (٢) اما سرعة الشقوق ومعدل طول الشق فقد تم حسابها بواسطة المعادلة رقم (٣) و (٤) بالتوالي والجدول رقم (٥) يوضح النتائج. اما معدل طول الشقوق مبينة في الجدول رقم (٦) حيث حسبت بالمعادلة (٤).

من خلال سرعة الشقوق للعينات الثلاثة أتضح ان السرعة الاولية عالية جداً وتبدأ بالتباطيء فمثلا العينة الاولى تبدأ التباطيء عند طول الشق $112\mu m$ بينما في العينة الثانية عند طول الشق $185\mu m$ وللعينة الثالثة عند $46\mu m$ وبعد هذه الاطوال تزداد سرعة الشقوق الى ان يتم الكسر وبشكل مبسط تأخذ العلاقة المبينة في الشكل رقم (٣) والذي يمثل تأثير الحجم الحبيبي ((D grain size diameter)) على عمر الشقوق الصغيرة فعندما يكون هذا العامل كبيراً فان سرعة الشقوق الصغيرة تكون عالية والعكس صحيح ولذلك نلاحظ من الشكل رقم (٣) ان طول الشق المتكون في المعدن ذوالحجم الحبيبي الصغير يولد ايقاف للشق. ويسمى في هذه الحالة الشق الصغير المتولدة (Non Propagating Short Fatigue Crack) ولكن عندما يكون (D) كبيراً من المحتمل جداً ان يتوقف الشق قليلاً ثم يعبر حدود الحبيبية ليصبح شق كبير Long Crack بفرض ان الاجهاد الدوري ثابت اما اذا تغير الاجهاد اي ازداد فمن الممكن ان تنمو الشقوق المتوقفة لتصبح شقوق كبيرة لان بإمكانها ان تعبر حدود الحبيبية بفعل زيادة الاجهاد^(٤).

من الشكل رقم (٣) يمكن تقسيم تصرف هذه الشقوق الى منطقتين الاولى تختلف تماماً عن الثانية ولوحظ ان التباطيء يحدث عندما يصل الشق الى حدود الحبيبية (grain boundary) أي بكلمات بسيطة عندما يساوي طول الشق قيمته (D) بينما عندما يجتاز الشق هذا الحد فلن يتوقف واذا ما توقف قليل جداً اما التوقف الكبير فهو في الحبيبية الاولى حيث في بعض الاحيان تقف الشقوق نهائياً ولا يحدث لها اي تقدم في الحبيبية الاولى^(٥) وتسمى عند ذلك بالشقوق السطحية

العمياء non - propagating surface cracks وعلى هذا الاساس دخل تأثير التركيب المجهري والمتمثل هنا في معدل قطر الحبيبة بسرعة الشقوق وبتحديد عمر العينة او الجزء (٥) لذلك فقد تم تقسيم النتائج الى قسمين القسم الاولي الذي يشمل الشقوق التي هي اقل من (D) أي أقل من $220 \mu m$ وسميت بالشقوق الصغيرة (short cracks) والشقوق التي هي اكبر من (D) وسميت بالشقوق الكبيرة (long cracks) وتم وصف حركة كل من هذه الشقوق على حدة وذلك بسبب الاختلاف الكبير الذي تتصرفه كل من هذه الشقوق . (١٠١١)

١-٥ تحليل ومناقشة الشقوق الصغيرة

اعلى قيمة تصل لها هذه الشقوق هي ($220 \mu m$) وعليه تم ايجاد العلاقة بين ($D - a_{av.}$) وسرعة الشق da / dN لحد ($220 \mu m$) لاحظ الجدول (٥) و (٦) لانه عندما تصل قيمة (a) الى (D) فإن سرعة الشق تساوي صفر اي ان طول الشق وصل الى حدود الحبيبة وبالتالي يتوقف ولو لفترة وجيزة جداً ومن خلال النتائج لاطوال الشقوق وعدد الدورات المبينة في الجدول رقم (٤) تم بناء علاقة بفرض ان سرعة الشق ترتبط ب ($D - a_{av.}$) بالشكل التالي:

$$da / dN = A_1 (D - a_{av.})^{\alpha_1} \quad (٦)$$

كما اخذها الباحثون في المصدر [٦] و [٩]

ومن خلال النتائج في الجدول (٥) و (٦) يمكن ايجاد قيمة α_1 و A_1 لكل عينة على حدة بواسطة استخدام طريقة ايجاد احسن علاقة منحنى curve fitting process وحسب الجدول رقم (٧):

وللتبسيط تم اخذ معدل قيم α_1 فوجدناها مساوية الى (٤, -٢) واعدنا نفس البرنامج لمعرفة العلاقة بين الاجهاد الدوري (σ) وقيم A_1 للعينات الثلاثة وكما هو موضح في الجدول رقم (٨):
وبواسطة استخدام المعادلة التالية :

$$A_1 = A_2 \sigma^{\alpha_2} \quad (٧)$$

تم ايجاد الثوابت وكالاتي :

$$A_2 = ٤٦١٣٤$$

وبتعويض معادلة (٧) في (٦) نحصل على :

$$\alpha_2 = -1$$

$$da / dN = 46134 \sigma^{-1} (D - a_{av.})^{-2.4} \mu m / Cycle \quad (٨)$$

والمعادلة اعلاه تصف تصرف الشقوق الناشئة في اول حبيبة حيث يتضح أن العوامل الرئيسية التي تؤثر على سرعة الشقوق da / dN هي:

أ- قيمة (D) أو الحجم الحبيبي حيث كلما ازدادت قيم (D) كلما ازدادت سرعة الشق وبالتالي يفضل ان يكون قطر الحبيبة صغير لتقليل سرعة الشق وبالتالي زيادة عمر العينة او الجزء وهذا يتفق مع ما جاء في المصدر [١٢] .
ب- كلما كان الاجهاد عالي كلما ازدادت سرعة الشق لذلك يفضل ان تكون الاجهادات المسلطة قريبة من حد الكلال للمادة اما في حالة جعل الاجهادات عالية جداً فان تأثير المعادلة اعلاه يهمل تقريباً لان الشقوق الصغيرة تنتهي بشكل مفاجيء ولا تأثير لها وهذا يتطابق ما جاء في المصدر [٤] [١٣].

٢-٥ تحليل ومناقشة الشقوق الكبيرة

مما سبق ذكره ان هذه الشقوق ليس لها علاقة بالحجم الحبيبي للمادة بينما يكون تأثير الاجهاد المسلط (Cyclic Stress) بالغاً وللتبسيط استخدمت نفس الطريقة السابقة لانشاء معادلة تصف حركة هذه الشقوق وكالاتي:

$$da / dN = A_3 a_{av.}^{\alpha_3} \quad (٩)$$

$A_3 \alpha_3$ ثابته تعتمد على المادة المستخدمة وان معدل قيم α_3 هي تقريباً واحد

$$A_3 = A_4 J^{-\alpha_4} \quad (10)$$

تم ايجاد قيمة α_4 مساوية الى 12,88 وقيمة A_4 هي $4,73 \times 10^{-34}$ ويتعويض معادلة (10) في (9) نحصل على:

$$da/dN = 4.73 \times 10^{-34} \sigma^{12.88} a \quad \mu m/Cycle \quad (11)$$

المعادلة (11) تصف حركة الشقوق الكبيرة عندما يعبر الشق حدود الحبيبة ويؤدي الى فشل العينة في هذا البحث اكتفينا بسبعة قراءات للشقوق السطحية للاسباب التالية:

- 1- الصعوبة العالية بمتابعة الشقوق تحت المجهر.
- 2- متابعة وقياس الشقوق تأخذ وقتاً كبيراً.
- 3- عندما تصبح الشقوق بكم حوالى 2-3 ملم تبدأ عملية الاندماج للشقوق.
- 4- أفترضنا ان تصرف الشقوق عند عبورها حدود الحبيبة هو نفسها الى ان تفشل العينة (حدوث كسر) وهذا ما يفترضه أغلب الباحثين ومنهم [6] [12].
- 5- ممكن أخذ أكثر من ثلاث عينات حيث أتبعنا طريقة المصدر [12] وذلك لتقليل الوقت يتضح من المعادلة (11) ان الشقوق الكبيرة لا تتأثر بالتركيب المجهرى للمادة وعندما تكون الاجهادات المسلطة عالية تكون هي الفعالة ويمكن اهمال تأثير الشقوق الصغيرة.

3-5 تطبيق النموذج (Model) الحالي على عينات مسلطة عليها اجهادات دورية متغيرة من عالي - واطيء - وبالعكس

تم تسليط اجهادات دورية متغيرة من مستوى عالي الى مستوى واطيء وبالعكس وسجلت عدد الدورات التي فشلت بها العينات وتم تخمين عمر هذه العينات بواسطة النموذج الحالي اي المعادلتين (8) و (11) حيث تم تكامل المعادلة رقم (8) الخاصة بالشقوق الصغيرة.

$$\int_0^D \frac{da}{(D - a_{av})^{-2.4}} = 46134 \sigma^{-1} \int_0^{N_s} dN \quad (12)$$

او

$$N_s = \frac{(D)^{3.4}}{3.4 \times 46134 \sigma^{-1}} \quad (13)$$

ثم وضعت حدود التكامل من صفر الى (D) على اعتبارات ان الشق يبدأ من الصفر ولو ان الشق يبدأ من أضعف نقطة أي من النقطة الخشنة على السطح.

أما بخصوص معادلة الشقوق الكبيرة فيؤخذ تكامل المعادلة (11).

$$\int_D^{a_f} \frac{da}{a} = 4.73 \times 10^{-34} \sigma^{12.88} \int_{N_s}^{N_L} dN \quad (14)$$

$$NL = \frac{\ln a_f - \ln D}{4.73 \times 10^{-34} \sigma^{12.88}} + N_s \quad (15)$$

حيث أن a_f هو عرض العينة ويساوي 20 ملم راجع الشكل رقم (1).

لو طبقنا المعادلة (13) والمعادلة (15) على النتائج العملية لجدول (9) حصلنا على النتائج النظرية التالية:

الملاحظ من الجدول (٩) ان النتائج المخمنة لعمر العينات بواسطة النموذج المقترح أقل بقليل من النتائج العملية وهذا مؤشر لصحة النموذج واستخدامه في الحياة العملية لهذه السبيكة حيث ان نوع الاجهادات المستخدمة في الحياة العملية تكون متغيرة بشكل غير منتظم وتم تنفيذ التجارب المختبرية بشكل قريب مما هو عليه في الحياة العملية وذلك لتبسيط الحالة .

كثير من الباحثين يستخدمون معادلة منحنى ويلر (٢) المستخرجة للمادة ويعملون بعض التحسينات على هذا المنحني الى حد معين (١٤) أو ايجاد حد كلال جديد للمادة كما عمل Marsh (١٥) وأستخدم هذا المنحني بتخمين حياة العينة بينما الطريقة المقترحة في هذا البحث لا تعتمد على استخراج منحني ويلر (S - N Curve).

٦ - الاستنتاجات

- ١- دراسة ظاهرة الكلال او تعب مادة سبيكة الالمنيوم T601 - 6061 اعتمدت بشكل رئيسي على ايجاد وقياس الشقوق الصغيرة والكبيرة بطريقة مسح سطح العينة.
- ٢- تم بناء نموذج رياضي معتمداً على ما استخرج من نتائج مختبرية وهذا النموذج صالح الاستعمال لتخمين عمر الاجزاء التي تعمل تحت أجهادات دورية متغيرة في الحياة العملية للسبيكة اعلاه.
- ٣- من الممكن عدم الرجوع الى منحني ويلر (S-N Curve) حيث أنه يحتاج الى وقت طويل وعينات كثيرة.

المصادر

١. Jaap S. "Fatigue of structure and materials" ٢ nd edition, springer, (٢٠٠٩).
٢. Pearsons, S., Eng., " Initiation of fatigue cracks in commercial aluminum alloys and the subsequent propagation of very small cracks", Fracture Mach. ٧, pp. ٢٣٥ - ٢٤٧, ١٩٧٤.
٣. De - Lange, R. G., Trans. Met. Soc. , AIME , ٢٣٠ " Plastic - replica methods applied to a study of fatigue crack propagation in steel ٣٠CD٤ and ٢٦ st aluminum alloy", pp. ٦٤٤ - ٦٤٠, ١٩٦٤ .
٤. Miller, K. J., "Fatigue eng. Mater, The short fatigue crack problem", struct. ٥, pp. ٢٢٣ - ٢٣٢, ١٩٨٢.
٥. Taylor, D. and knott, J. F. Fatigue Eng. Mater. , " Fatigue crack propagation behaviour of short cracks " , Struct . , ٤ , pp. ١٤٧ - ١٥٥ , ١٩٨١ .
٦. Wail Rasheed Al Naimy "Cumulative multiaxial fatigue damage on aircraft alloy ٢٠٢٤ - T٤ under complex loading MSC thesis, university of Technology, (١٩٩٧).
٧. Mohamed Alalkawi, H. J., "Damage due to cyclic stresses below the fatigue limit", Military Tech. College, Journal, vol .٢, (١٩٨٨).
٨. Swan and Newman, "On the use of Markes loads and replicas for measuring growth rates for small cracks", presented at agard specialists meeting on fatigue crack topography, SIENA - ITALY, (٢٠٠٥).

٩. Mahir H. M. "Accumulated damage in fatigue – creep interaction of aluminum alloy ٢٠٢٤ – T٤" Ph. D. thesis, university of Technology, (٢٠٠٩) .
١٠. K. J. Miller "Material science perspective of metals fatigue resistance", Material science and technology vol. ٩, pp ٤٥٣-٤٦٢, (١٩٩٣).
١١. A Aid, A. Amrouche, B. Bachir, M. Bengedid, G. Mesmacque " Fatigue life prediction under variable loading based on a new damage model " Materials and Design ٣٢ , ١٨٣ – ١٩١ , (٢٠١١)
١٢. E. R. R Ios and P. Mercier, "short crack behavior under variable amplitude loading of shot peened surfaces "Int. J. Fatigue, Fract. Engng – Mater. Struct. Vol. ١٩, No. ٢٣ pp ١٧٥ – ١٨٤, (١٩٩٦).
١٣. Lankford, J., Cook, T. S. and Sheldon, G. P. Int. J. fracture, ١٧, "Fatigue crack growth in nicked – base super alloy", pp. ١٤٣ – ١٥٥, ١٩٨١.
١٤. Corten, H. T. and Dolan, T. J., Proc. Int. conf London Inst. Mech. Engrs., Cumulative fatigue damage ", pp. ٢٣٥ – ٢٤٦, ١٩٥٦.
١٥. Marsh, K. J., Report No. ١٣٦ N. E. L., "Cumulative fatigue damage under symmetrical sawtooth - loading programme", ١٩٦٤.

جدول رقم (١): التركيب الكيماوي لسبيكة الالمنيوم (T601 - 6061).

Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
Standard	٠,٤ – ٠,٨	٠,٧	٠,١٥ – ٠,٤	٠,١٥	٠,٨ – ١,٢	٠,٠٤ – ٠,٣٥	٠,٢٥	Rem
Experimental	٠,٦٢	٠,٧١	٠,٣٥	٠,١٠٢	٠,٩٥	٠,٢	٠,١٨	Rem

جدول رقم (٢): المواصفات الميكانيكية لسبيكة الالمنيوم.

Al- alloy (6061 - T601)	source	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	Elongation %	Modulus of elasticity E (GPa)	Hardness	
						HB	HV
	Standard	٣١٠	٢٧٥	١٢	٦٩	٩٥	٢٢
	Experimental	٣٢٥	٣٠٠	١٣	٧٠	٩٦	٢٤

جدول رقم (٣): العينات والاحمال والاجهادات المسلطة عليها.

Specimen No.	(p) Load, N	(σ_f) N/mm ^٢	Specimen Dimension
١	٧٧٠	١٧٣,٢٥	b = ١٠ mm
٢	٥٣٠	١١٩,٢٥	h = ٢٠ mm
٣	٦٢٠	١٣٩,٥	y = ١٠ mm
			M = ١٥٠ N. mm

جدول رقم (٤): أطوال الشقوق على السطح وعدد الدورات المقابلة لها لثلاث عينات تحت اجهادات دورية متغيرة.

Specimen No. ١		Specimen No. ٢		Specimen No. ٣	
$\sigma_f = 173,20 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_f = 139,0 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_f = 119,20 \text{ N/mm}^2$	
(a) μm	(N) Cycle	(a) μm	(N) Cycle	(a) μm	(N) Cycle
٦٢	٤١٦٠٠	٧	٣٨٢٣٠٠	٦	٣٨٠٠٠٠
٨٧	٤٧٦٠٠	١٨	٣٩٥٠٠٠	١٨	٣٩٥٠٠٠
١٣٧	٦٣٠٠٠	٦٤	٤٢٣٢٠٠	٢٨	٤١٠٠٠٠
٢٨٧	٨٥٦٠٠	١٨٢	٤٥٨٠٠٠	٦٤	٤٢٣٠٠٠
٢٣١	٩٨٥٠٠	١٨٨	٤٦٠٠٠٠	١٦٣	٤٥٢٠٠٠
٣٧٥	١١٠٥٠٠	٢٩١	٤٨٠٠٠٠	٦١٠	٥٣٥٠٠٠
٤٥٠	١٢٣٠٠٠	٣٣٠	٤٨٦٤٠٠	٧٥٠	٥٤٥٠٠٠

جدول رقم (٥): سرعة الشقوق السطحية للعينات الثلاثة.

$\sigma_b = 173,20 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_b = 139,0 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_b = 119,20 \text{ N/mm}^2$
da / dN $\mu\text{m} / \text{Cycle}$	da / dN $\mu\text{m} / \text{cycle}$	da / dN $\mu\text{m} / \text{cycle}$
$1,49 \times 10^{-3}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,07 \times 10^{-5}$
$4,16 \times 10^{-3}$	$8,66 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-4}$
$3,2 \times 10^{-3}$	$1,63 \times 10^{-3}$	$6,6 \times 10^{-4}$
$6,63 \times 10^{-3}$	$3,39 \times 10^{-3}$	$2,76 \times 10^{-4}$
$3,41 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-3}$
$3,66 \times 10^{-3}$	$0,10 \times 10^{-3}$	$0,38 \times 10^{-3}$
$6,0 \times 10^{-3}$	$6,09 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$

جدول رقم (٦): معدل أطوال الشقوق السطحية.

Specimen No. ١	Specimen No. ٢	Specimen No. ٣
$a_{av.}, \mu\text{m}$	$a_{av.}, \mu\text{m}$	$a_{av.}, \mu\text{m}$
٣١	٤	٣
٧٥	١٣	١٢
١١٢	٤١	٢٣
٢١٢	١٢٣	٤٦
٣٠٠	١٨٥	١١٤
٣٥٣	٢٤٠	٣٨٧
٤١٣	٣١١	٦٨٠

جدول رقم (٧): قيم A_1 و α_1 للعينات الناتجة.

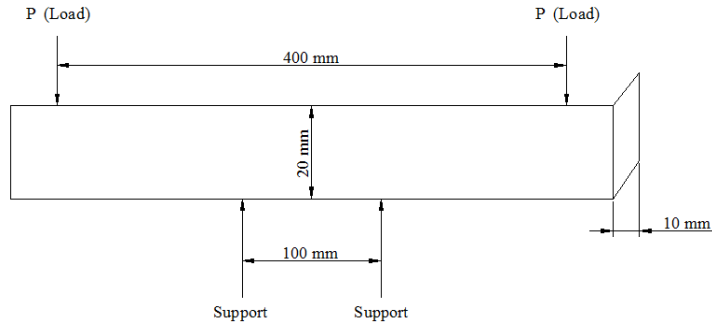
العينة الاولى		العينة الثانية		العينة الثالثة	
A_1	α_1	A_1	α_1	A_1	α_1
١٠٧٠٦	٤	٨٧٢٦٧	-٧,٢	٢٦٧٨٧	-٤

جدول رقم (٨): قيم σ_1 و A_1 للعينات الثالثة.

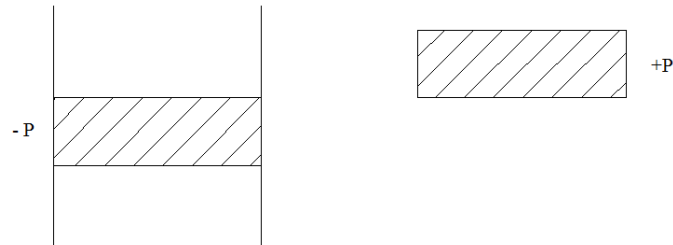
العينة الاولى		العينة الثانية		العينة الثالثة	
A_1	σ	A_1	σ	A_1	σ
١٠٧٠٦	١٧٣,٢٥	٨٧٢٦٧	١٣٩,٥	٢٦٧٨٧	١١٩,٢٥

جدول رقم (٩): النتائج المختبرية لاربعة عينات سلطت عليها اجهادات دورية متغيرة.

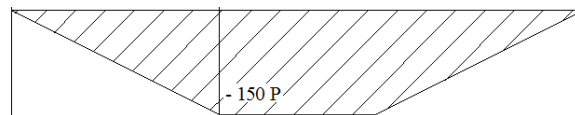
النتائج العملية				النتائج النظرية	
Specimen No.	Stress Level N/mm ²		Average Stress N/mm ²	N _f exp. Cycles	N _f (model) (N _L + N _S) Cycles
	Low	High			
١	١٢٠	١٨٠	١٥٠	$1,5 \times 10^6$	١٠٠٩٥٢٣
٢	١١٠	١٧٠	١٤٠	$2,44 \times 10^6$	٢٣٣٦٩١٨
	High	Low			
٣	١٨٠	١٢٠	١٥٠	$1,7 \times 10^6$	١٠٦٩٥٢٣
٤	١٨٠	١١٠	١٤٥	$1,88 \times 10^6$	١٥٥٢٧٩٣



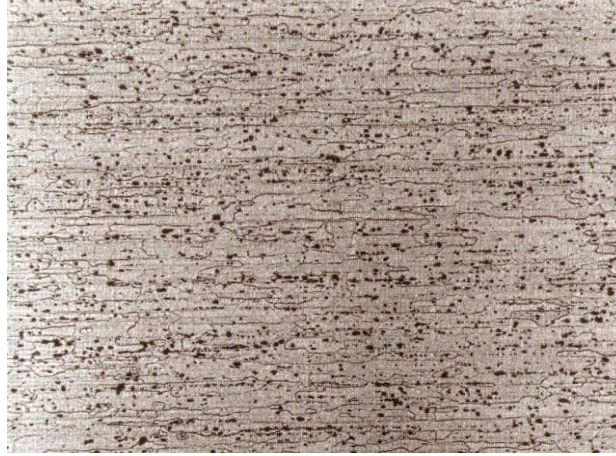
Shearing force diagram



Bending moment diagram



شكل رقم (١): العينة المستخدمة وتوزيع القوى والعزوم عليها.



شكل رقم (٢): التركيب المجهرى لسبيكة الالمنيوم ٦٠٦١ - T٦٥١

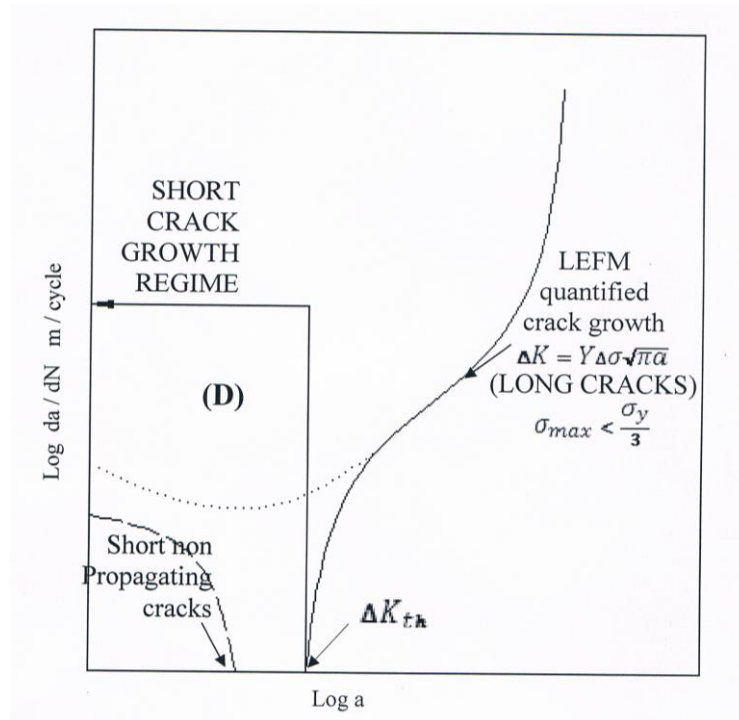


Figure (٣): schematic diagram showing the short and long fatigue crack growth regimes after ^(٤).

EXPERIMENTAL FATIGUE STUDY of ٦٠٦١ – T٦٥١ Aluminum ALLOY UNDER ALTERNATING ROTATING BENDING LOADING

Basim Hussein Abbas
Assistant lecturer
Institute of Technology- Baghdad / Iraq

ABSTRACT: - Fatigue under constant and variable cyclic stresses of ٦٠٦١ – T٦٥١ aluminum alloy was studied at room temperature using pure bending as a loading test. An empirical model was derived from the experimental data of surface crack lengths for short and long fatigue cracks and the corresponding number of cycles. Variable cyclic stresses test was carried out using three specimens of the same material. The proposed model was applied to estimate the life of specimens and it showed that good results can be predicted (under – estimate the life of the specimens), and gave good indication for warning before failure happens. From this study it was concluded that there is no need to establish the S-N curve of the material.

Keywords: Aluminum alloy ٦٠٦١ – T٦٥١, short and long fatigue cracks, crack growth model