

فشل الكلال بعدد دورات منخفضة (LCF) لسبيكة الألمنيوم AA7020 عند معاملات حرارية مختلفة

مازن محمود يحيى* ، د.شاكر سكران حسن* و د.عدنان نعمة عبود**

تاريخ التسلم: 2009/5/10

تاريخ القبول: 2009/12/3

الخلاصة

إشتمل البحث على اختبار فشل الكلال بعدد دورات منخفضة (LCF) لسبيكة الألمنيوم AA7020 بحالاته الثلاث ، التخمير والتعتيق الطبيعي والتعتيق الصناعي . أجري الاختبار على عينات قياسية من نوع المسندة من جهة واحدة (Cantilever Beam) لبيان التأثير المشترك للإجهاد المسلط ومركزات الإجهاد على عمر الكلال . استخدم المجهر الضوئي والمجهر الماسح لدراسة سطح الفشل . أكدت نتائج فحص الكلال أن سبيكة الألمنيوم المخمر 7020-O يتعرض الى حالة الإصلاذ الإنفعالي الدوري بينما تعاني سبيكة الألمنيوم 7020 للحالتين (T6) و (T4) من التليّن الدوري مما يجعل من سبيكة الألمنيوم المخمر أكثر مقاومة لفشل الكلال عند عدد الدورات المنخفضه . تراوحت قيم أس معامل متانة الكلال (b) من (-0.064) الى (-0.14) وقيم أس معامل مطيلية الكلال (c) من (-0.554) الى (-0.600) والتي تقع ضمن الحدود المسجلة للمعادن ، سجلت سبيكة الألمنيوم المخمرة 7020-O عدد دورات إنتقاليه (N_T) أعلى من السبيكتين الأخرتين (T6) و (T4) مما يؤكد أن السبيكة المخمره ستتعرض الى عدد دورات أعلى للإنتقال الى منطقة التشوه اللدن ، يمكن الاستفادة من معلومات منحني الأجهاد-الأنفعال الهندسي بدلالة (σ_u/σ_y) وقيمة (n) للتنبأ بسلوك السبيكتين المخمره والمعتقه صناعياً بحالة فشل الكلال بعدد دورات منخفضة (LCF) ، بينما تحتاج سبيكة 7020 بحالة التعتيق الطبيعي (T4) الى إجراء اختبار فشل الكلال (LCF) نظراً لأمتلاكها قيمة (n) أقل من (1.2) ونسبة (σ_u/σ_y) أعلى من (1.4) . أظهر الفحص بالمجهر الماسح ظهور عدة نقاط لبدء الشقوق للحالات الثلاثة (O, T4, T6) عند إجهادات أعلى من إجهاد الخضوع (σ_y) ، بينما أوضح الفحص بالمجهر الضوئي للمقطع العرضي لسطح الكسر أن الإجهاد المسلط يلعب دوراً رئيسياً في الفشل عند إجهادات أعلى من (σ_y) لحالة (T6) بينما تلعب مركزات الإجهاد الدور الأكبر في فشل الكلال للعينات المخمره نظراً للتصليد الإنفعالي الدوري المرافق لحالة التخمير .

Low Cycle Fatigue Failure of AA7020 Aluminum Alloy at different heat treatments

Abstract

The present work encompasses Low Cycle Fatigue (LCF) of the Al-alloy AA7020 with three conditions; annealing, natural aging and artificial aging. The LCF tests carried out using standard

*قسم هندسة المكنان والمعدات ، الجامعة التكنولوجية/بغداد
** كلية تقنية - بغداد ، هيئة التعليم التقني/ بغداد

specimens cantilever beam types. Optical Light Microscope (OLM) and Scanning Electron Microscope (SEM) were employed to examine the fracture features. The results confirmed that AA7020-O sustained *cyclic hardening*, while 7020-T4 & 7020-T6 undergoing *cyclic softening*, therefore make the annealing conditions more resistance to LCF. The values of *fatigue strength exponent (b)* is varying from (-0.064) to (-0.14) and *fatigue ductility exponent (c)* from (-0.554) to (-0.60), whereas these values within the general limitation of the metals. The number of transition cycle (N_T) for annealing condition is more comparing to the other conditions which emphasis that the annealing alloy will withstand more cycles before introducing the plastic zone. The information extracted from Engineering Stress-Strain curve; (σ_u/σ_y) as well as strain harden exponent (n) can be need to estimate the behavior of annealing and artificial alloy, while the natural aging alloy will need LCF testing to definite the conducting because of its " n " less than (1.2) and (σ_u/σ_y) more than (1.4). The SEM examination distriacted many point of cracks initiation for the three alloys at stresses more than Yield point. OLM investigation of the cross-section of fracture surface indicated the dominating of applied stress when it is more than Yield point of artificial aging alloy. Where the stress concentration is the most important role for annealing specimens because of companion of cycle strain hardening.

Keywords: Low Cycle Fatigue; Strain-Life Of Aluminum Alloy at annealing, natural aging and artificial aging.

(-40°C) إلى (150°C) وبأنفعال كلي من (1-50%) أن الكلال واطئ الدورات للسبيكة المذكورة يعتمد بقوه على درجة الحرارة وعدد الدورات ولاحظوا أن معامل الكلال (Fatigue Exponent, b) ومعامل المطيلية (Ductility coefficient) في معادلة (Coffin-) Manson دالة لدرجة الحرارة وعدد الدورات وكلا العاملين

غير ثابتين . كما أكد الباحثان (Mustafa Kemal, Ilyas Uygur) (2002) [4] أن نتائج اختبار الكلال واطئ الدورات لسبيكة الألمنيوم

المقدمة

اكتسبت طريقة عمر الانفعال القبول كطريقة مفيدة لتقييم عمر الكلال لجزء محزز (notched component)، وأوصت الجمعية الامريكية للفحص والمواد (ASTM) وجمعية مهندسوا السيارات (SAE) بطرق اختبارية معينة لتخمين عمر الكلال بواسطة عمر الانفعال [2,1]. أشار الباحثان (X. Q. Shi, H. L.) (2000) J. Pang [3] في دراستهما للكلال واطئ الدورات على سبيكة اليوتكتيك (63Sn/37Pb) عند مدى واسع من الدورات وصولاً الى (10^4) ودرجات حرارية مختلفة من

(Emission Spectrometer) ، وأظهر التحليل الكيمياءوي (جدول-1) تطابق السبيكة مع متطلبات المواصفه الدولييه . نظراً لأستجابة سبيكة (7020) لمعاملة التعتيق فقد أجريت المقارنه ما بين التعتيق الصناعي والطبيعي . . أستخدمت العينات (7020-T6) بحالتها المستلمه كونها وارده من المنشأ وهي معامله حرارياً وأجريت معاملتين أخريتين لضمان المقارنه .

أولاً : التخمير Annealing : سُخِّتَت العينات الى درجة حرارة (480°C) بإستخدام فرن كهربائي (Mafulle Furnace) ، ثم تركت لمدة ساعتين عند الدرجة المذكوره (soaking) time والتبريد داخل الفرن [6] للحصول على عينه مخمره تماماً .
ثانياً : المعاملة المحلوليه Solution treatment : تم تسخين العينات الى درجة حراره (435°C) داخل الفرن الكهربائي ثم تركت لمدة (30 min.) عند الدرجة المذكوره والتقسية مباشرةً في الماء . تركت العينه لمدة (30) يوماً عند درجة حرارة الغرفه للوصول الى حالة التعتيق الطبيعي (T4) [6]

تم تصنيع عينات إختبار الشد من سبيكة الألمنيوم وفقاً للمواصفه الدولييه ASTM (شكل-1) [7] بواقع (12) عينة . تم إختبار (4) عينات للسبيكة بحالتها المستلمه (7020-T6) ، و(4) عينات أخرى لحالة المعامله المحلوليه (7020-T4) ، و(4) عينات لحالة التخمير (7020-O) Annealing .

أستُخدمَ جهاز شد نوع WP 300 - Universal Material 20 KN (GUNT Tester) لإجراء الإختبار وأعدت النتائج كمتوسط لأربع إختبارات لكل حاله . تم تصنيع عينات الكلال من سبيكة الألمنيوم

المركبه (AA2124) المصنعه بطريقتة تكنولوجيا المساحيق تشير الى أن زيادة كمية (SiCp) من (17 الى 25%) ينتج عنه إنخفاض خواص الكلال واطى الدورات ، وإن زيادة الكسر الحجمي لدقائق المساحيق المضافه إضافة الى زيادة حجمها من (2.5 الى 15µm) يساعد على الاسراع في بدء الشق . وأوضح كل من الباحثين (L.P. Borrego,) (L.M. Abreu (2004) [5] من خلال دراستهما لخواص الكلال واطى الدورات على سبيكتين من سبائك الألمنيوم -AA6060-T6,AA6082-T6 أن التلين الدوري والإصلاح الدوري لسبيكة (6082-T6) كان أقل وأعلى من 0.82% ، بينما كان السلوك الدوري للسبيكة (6060-T6) مستقراً وإن عمر الكلال الإنتقالي (Transition Fatigue Life) بلغ (744) دورة لسبيكة (6082-T6) بينما كانت (1030) دورة للسبيكة (6060-T6) ، وأظهرا ان سلوك التشوه لسبائك (AlMgSi) (6xxx) تتأثر بالأطوار المترسبه والذي له علاقة بتفاعل الإنخلاعات مع الأطوار المتكونه أثناء التعتيق.

الجزء العملي Experimental

إشتمل البحث على تقييم خواص الكلال بدلالة عمر الإنفعال لسبيكة الألمنيوم ASTM AA 7020 تحت حالات مختلفة من الإصلاح بالتعتيق الصناعي (T6) والتعتيق الطبيعي (T4) والتخمير (O) لبيان سلوك السبيكة المذكوره ضمن هذا المدى من عمر الكلال وتأثير المعاملات الحرارية على ذلك .

أستُخدمت صفائح من سبيكة الألمنيوم (7020-T6) بسمك (10 mm) لأجراء الأختبارات المختلفه.أجري الفحص الكيمياءوي بجهاز نوع (Thermo ARL 3460,

$$\frac{32(106)}{p8^3} F =$$

$$= 2F(MPa)$$
 إذ :-
 F = الحمل المسلط (N) ،
 a = ذراع الحمل والذي يساوي mm 106 ± 0.1
 b = قطر العينة والذي يساوي mm 8 ± 0.05
 $M_b =$ عزم الانحناء (N. mm)
 $W_b =$ معامل المقطع modulus mm, section
 $\sigma_a =$ إجهاد الانحناء (MPa)
 بعد إيجاد الانحناء وتبسيطه على العينة تم رسم منحني الكلال لكل حاله . تم إجراء فحص الكسر لعينة الكلال بعد الفشل لبيان طبيعة سطح الكسر ، حيث قطعت العينة بمستوى يسمح بالفحص بدءاً من سطح العينة الى مركزها ، أجريت عملية التجليخ باستخدام أوراق التنعيم بدءاً من (2000,1200,800,600,400,320,220) ثم أتبعها إجراء عملية التنعيم بالاستفادة من مادة الألومينا (0.3-0.5µm) أسئخدم المجهز الضوئي للفحص والتصوير بقوى تكبير مختلفة . كما أسئخدم المجهز الماسح (Scanning Microscope) لفحص منطقة الكسر .

النتائج والمناقشة & Results Discussion

تبين من اختبار الشد للعينات القياسية المعتمده صناعياً أن إجهاد الشد يبلغ ($\sigma_u=420$ MPa) وإجهاد الخضوع ($\sigma_y=360$ MPa) والإستطالة ($E=12.3\%$) كمتوسط نتائج لأربع عينات اختبار (جدول-2) لغرض الاستفادة من معلومات الشد تم رسم منحني الإجهاد-الإنفعال الحقيقي لإيجاد قيمة المعامل (n) و (Strain Hardening Exponent) و (Strength Coefficient) (K) ،

(AA 7020) بحالاتها الثلاث وفقاً للمواصفه القياسيه (ASTM) (شكل-2) وبواقع (43) عينه . تم إختبار (18) عينة للتعتيق الصناعي (as received) و(13) عينه لحالة المعامله المحلوليه و(12) عينة لحالة التخمير .
 أجريت عملية التنعيم على عينات إختبار الكلال بعد عملية التشغيل بأستخدام ورق تنعيم (emery papers) من كاربيد السليكون وبدرجات نعومه مختلفه التدرج (ASM grades (2000,1200,1000,800,600) ، ثم أجريت عملية التلميع (polishing) بأستخدام محلول الألومينا مع القماش الخاص به (cloth) .
 تم إجراء إختبار الكلال بإستخدام جهاز نوع (WP 140 Fatigue Testing Apparatus) والذي يعمل بطريقة الانحناء الدوار لعينة مثبتة من طرف واحد وسائبه من الطرف الأخر "عربة كابولية" (cantilever beam) . تتعرض عينات إختبار الكلال الى إجهاد ناتج عن عزم إنحناء وذلك بتسليط حمل على الطرف الحر من العينه والذي يكون عمودياً على محورها السيني (المقطع العمودي لمساحة العينه) والذي يؤدي الى إجهاد شد وضغط متساوي خلال دوران العينه ($R=-1$) (تحميل متعاكس تماماً Completely Reversed Stress (R) هي نسبة الإجهاد الأدنى الى الإجهاد الأعلى ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$) .
 يتم حساب إجهاد الانحناء المسلط في جهاز الأختبار وفق مايتي :-

$$M_b = Fa$$

$$W_b = \frac{pd^3}{32}$$

، إضافة إلى أن نسبة (σ_u / σ_y) الهندسي في حالة الإصلاذ بالتعتيق الصناعي أقل والتي تبلغ (1.166) مقارنةً بنسبة (σ_u / σ_y) في حالة الإصلاذ بالتعتيق الطبيعي والتي تبلغ (1.417). يرجع سبب ذلك إلى الإنخفاض الحاصل في إجهاد الخضوع (σ_y) في حالة التعتيق الطبيعي نظراً لأن دقائ (GP) أصغر مقارنةً بالتعتيق الصناعي (T6) فضلاً على أن التشوهات المحيطة بدقائ (GP) في حالة التعتيق الصناعي تكون أكبر، مما يؤدي إلى رفع قيمة الإجهاد اللازم لقص الدقائ وبالتالي إرتفاع إجهاد الخضوع [6].

إنخفضت قيمة أس الإصلاذ الإنفعالي (n) في حالة التعتيق الصناعي (T6) مقارنةً بالحالة المخمره وحالة التعتيق الطبيعي مما يؤكد أن التشوهات اللدنه ستكون أقل في التعتيق الصناعي مقارنةً بالحالتين الأخرى (T4, O). يُقابل هذا الإنخفاض إرتفاع في قيمة معامل المتانه (K) إلى حدود (708 MPa) (جدول-2). من المؤكد أن قيمة (K) تمثل الإجهاد الحقيقي اللازم لتحقيق إنفعال حقيقي إفتراضي يبلغ (1) $(\approx \text{Elong.})$ [100%، فزيادة قيمة (K) يعطي مؤشراً على أن الإجهاد اللازم لبلوغ $(\epsilon=1)$ أو أقل من واحد ستحتاج في حالة (T6) إلى إجهاد أعلى مقارنةً بالحالتين الأخرى.

خلال إستقراء نتائج (σ_u / σ_y) الهندسي أو قيمة (n) للألمنيوم المخمر (Soft Material) أن الألمنيوم المذكور سيتصلد (Hardening) أثناء الإنفعال اللدن الدوري عند تعرضه لإجهاد متكرر في منطقة التشوه اللدن وذلك لأن قيمة (σ_u / σ_y) تبلغ (2.1) وهي أكبر من (1.4) بينما تبلغ قيمة (n) بحدود (0.21) وهي تزيد عن (0.2)، أي أن دورة الإنفعال اللدن للألمنيوم

إضافة إلى تحديد قيمة الإجهاد المقابل للإنفعال الحقيقي (شكل-4). تبلغ قيمة الإنفعال الحقيقي عند الكسر (0.073) والتي تمثل قيمة الإنفعال المرن مضافاً إليه الإنفعال اللدن. يبين الشكل رقم (4) قيمة أس الإصلاذ الإنفعالي (n) والتي تبلغ (0.097) وتمثل ميل المنطقه اللدنه في منحنى الإجهاد- الإنفعال الحقيقي وقيمة معامل المتانه (K) والذي يبلغ (708 MPa) عند إنفعال مساوياً لوحد.

فعل سبيل المثال عند تسليط إنفعال كلي حقيقي قدره $(0.4\epsilon_{total})$ يصار إلى رسم خط عمودي يتقاطع مع منحنى الإجهاد- الإنفعال (شكل-3) ورسم خط موازي لخط التشوه المرن ليتم الحصول على مركبات الإنفعال الحقيقي $(\epsilon_p \& \epsilon_e)$ عند النقطة $(0.4\epsilon_{total})$ يقابلها الإجهاد المطلوب تسليطه.

يتبين من الجدول رقم (3) أن قيمة أس الإصلاذ الإنفعالي (n) قد إنخفضت من (0.21) في حالة التخمير إلى (0.12) لحالة (T4) قابلها إرتفاع بقيمة معامل المتانه (K) من (510 MPa) إلى (605 MPa) مما يعطي مؤشراً واضحاً أن الألمنيوم المخمر (O) يتعرض إلى تشوه لدن أعلى مقارنةً بالألمنيوم المعتق طبيعياً (T4).

إنخفضت قيمة الإنفعال الكلي الحقيقي من (0.181) للألمنيوم المخمر إلى (0.122) في حالة التعتيق الطبيعي وهذا راجع بطبيعة الحال إلى ترسب دقائ (GP) والإعاقة التي تواجهها الإنخلاعات من قبل مناطق التشوه المحيطة بالدقائ المذكوره [8]. أمّا العينات المعتقة صناعياً (T6) فإن قيم الخواص الميكانيكية من إجهاد شد (σ_u) وإجهاد الخضوع (σ_y) (جدول-2) تكون أعلى مقارنةً بعينات التعتيق الطبيعي (T4)

منطقة التشوه اللدن . بينما بلغت قيمة معامل مطيلية الكلال e'_f () بحدود (0.7) ومعامل مقاومة الكلال $(E S'_f)$ قيمته تساوي (0.0122) أما قيمة (S'_f) تبلغ (777 MPa) بعد ضرب قيمة معامل مقاومة الكلال بمعامل يونك .

وفي هذا العمر بالذات من الدورات الإنتقالية (N_T) تكون سعة الإنفعال المرن مساويه سعة الإنفعال اللدن [7] . يقابل نقطة التحول (N_T) إنفعالا حقيقياً قدره (0.0019) .

يلاحظ من الشكل رقم (5) أن منحني الكلال (LCF) أخذ شكلاً مشابهاً لمنحني كلال (LCF) لحالة التخميم (O) وبعده دورات إنتقالية (N_T) أقل والتي بلغت (370000) ، يقابله إنخفاض في قيم معامل مطيلية الكلال ومعامل متانة الكلال واللتن تساويان ($c=-0.577$ و $b=-$ 0.105) على التوالي . قابل نقطة التحول (N_T) إنفعالا حقيقياً قدره (0.0027) .

يستفاد من قيمة (b) و (c) كمؤشراً على سلوك السبيكة تحت الإنفعالات اللدنه وإن إنخفاضها دليلاً على أن المعدن يقترب من حالة التلين الأنفعالي . وبالمقارنة مع الحالة فإن حالة (T4) تعاني من التلين مقارنة بحالة التخميم .

إنخفضت قيمة العمر الإنتقالي (N_T) الى حدود (27000) دورة وفي نفس الوقت رافقه إنخفاضاً في قيم معامل مطيلية الكلال ومعامل متانة الكلال واللتن تساويان ($c=-0.554$ و $b=-0.064$) على التوالي (شكل - 6) . قابل نقطة التحول (N_T) إنفعالا حقيقياً قدره (0.0023) . وتشير قيمة (N_T) لحالة (T6) أن السبيكة المذكورة تدخل مرحلة التشوه اللدن بعد عدد الدورات المذكورة بينما حالة

المخمر سيرافقها زيادة في كثافة الإنخلاعات وتقاطعها أثناء الإنزلاق ومن ثم زيادة إحتماية التصليد الإنفعالي [9] .

أما في حالة الألمنيوم المعتق صناعياً (T6) (Hard Material) فإن قيمة (σ_u / σ_y) تبلغ (1.166) وهي أقل من قيمة (1.2) أما قيمة (n) فتبلغ (0.097) وهي أصغر من قيمة (0.1) ، مما يؤشر على ان المادة في حالة (T6) ستعرض الى التلين (Softening) ويرجع ذلك الى تحرر الإنخلاعات أثناء الأنفعال اللدن الدوري والذي سيشجع بدوره على التلين الإنفعالي [10] .

أما حالة الألمنيوم المعتق طبيعياً (T4) فإن قيمة (σ_u / σ_y) تبلغ (1.417) وهي أكبر من قيمة (1.2) فيما بلغت (n) قيمة مقدارها (0.12) وهي أقل من قيمة (0.2) ، وعليه فإن حاله المذكوره (T4) لا يكون سلوكها واضحاً من خلال نسبة (σ_u / σ_y) أو من خلال قيمة (n) إلا أنها أقرب الى حالة (T6) من خلال القيم أنفة الذكر . تم رسم منحني عمر الكلال منخفض الدورات (LCF) بدلالة الإنفعال الكلي الحقيقي أولاً ثم يصار الى رسم منحني الكلال للإنفعال اللدن الحقيقي وأخر للإنفعال المرن الحقيقي لإيجاد قيم أس متانة الكلال (b) وأس مطيلية الكلال (c) والعمر الإنتقالي (N_T) . ويستفاد عادةً من منحني الإجهاد-الإنفعال الحقيقي لإيجاد قيم الإنفعال الكلي والإنفعال اللدن والمرن (شكل - 3) .

من خلال شكل رقم (4) يلاحظ أن قيمة أس متانة الكلال يساوي (b=-0.14) للحالة المخمرة وقيمة أس مطيلية الكلال تساوي (c=-0.600) وأن عدد دورات العمر الإنتقالي (N_T) بلغ (430000) والذي يُمثل عدد الدورات اللازمة لإنفعال المعدن من منطقة التشوه المرن الى

سيتحمل عدد دورات تصل الى قيمة (20000) يقابلها عدد دورات (1.3×10^4) لحالة (T4) و (420) لحالة (T6) وبالتالي فإن الألمنيوم المخمر عند تعرضه لإنفعالات دورية عاليه سيكون أطول عمراً من الحالتين الأخرتين . وتكون هذه الحالة سائدة لغاية عدد دورات تقرب من حوالي (2.8×10^5) . ويمكن الإشارة الى أفضلية استخدام (7020-O) عند تسليط إنفعالات دورية عالية لا سيما عند عدد دورات أقل من (2.8×10^5) دورة ، وأن قيمة الإنفعال الكلي (Total Strain) عند حد الكلال يكون أقل للعينات المعتمقه صناعياً مقارنة بالعينات المخمرة وبالرجوع الى قيمة (n) تُعزز هذه النتيجة حيث أن قيمة (n) للحاله المخمرة تساوي (0.21) .

بينما في حالة رسم منحني الكلال عالي الدورات (سعة الإجهاد- عدد الدورات) بدلالة عمر الإجهاد (Stress-Life) لنفس الحالات الثلاثة (O, T4, T6) فإن حد التحمل (10^7) دورة في حالة (T6) يكون أعلى بالتأكيد مقارنة بالحالتين الأخرتين لأنهما تقع ضمن منطقة التشوه المرن وأن السلوك في هذه المنطقه مرتبط بمتانة شد المعدن ، فزيادة متانة الشد يزداد حد الكلال (شكل-8) .

لوحظ عند إختبار الكلال (LCF) أن قيمة (N_T) تنخفض مع زيادة قيمة متانة الشد أو إنخفاض المطيلية مما يعني أن العينات المخمرة (O-7020) تتعرض الى حالة الإصلاذ عند التحميل في منطقة التشوه اللدن بينما تتعرض عينات التعتيق الصناعي (T6-7020) الى التلدين عند تعرضها للكلال في منطقة التشوه اللدن أيضاً . وكلما إرتفعت قيمة (σ_u/σ_y) كلما زادت (N_T) (شكل-9) .

إن زيادة قيمة أس الإصلاذ الإنفعالي (n) يرافقها زيادة في عدد

(T4) و (O) تدخل المرحلة المرنة بعد عدد دورات أكبر .

يكون تصرف الألمنيوم في كل الأحوال بحالته في التعتيق الصناعي مصاحباً بالتلدين ويتحمل تشوه كلي أقل عند الفشل قياساً بالحالتين الأخرتين (T4 , O) وهذا مرتبط بالدفائق المترسبه من (GP) وحجمها وقوى القص اللازمة لقطعها [8] .

بالإستفادة من منحنيات (LCF) يمكن إيجاد قيمة (n') (Cyclic Strain Hardening Exponent) . حيث وجد أن قيمة (n') للحالة المخمرة تبلغ (0.23) تقرب من قيمة (n) (Strain Hardening Exponent) التي تساوي (0.21) . أما لحالة (T4) فإنها بلغت (0.1819) يقابلها قيمة (n) تساوي (0.12) ، ولحالة (T6) فإن (n') بلغت (0.1155) فيما بلغت (n) قيمة مقدارها (0.097) . ويلاحظ أن قيمة (n') تقرب قليلاً من قيمة (n) للحالة المخمرة مقارنة بالحالتين الأخرتين (T4, T6) والذي يرجع سببهُ الى طبيعة التصليد الدوري المرافق لهما . من خلال المعادلة الخاصة بعمر الإنفعال الدوري [11] (فإن قيمة (K') بلغت (838 MPa) للمخمرة قابلهما (Strength Coefficient) (K) بقيمة مقدارها (505 MPa) ، أما للحالتين (T4) و (T6) فإن قيمة (K') بلغت (566 MPa) و (531 MPa) على التوالي ، إن إرتفاع قيمة (K') للحالة المخمرة يمكن إرجاعها الى حالة التصليد الدوري الذي تواجهه السبيكة مقارنة بحالة التلدين الدوري للحالتين الأخرتين (جدول-4) .

من ملاحظة شكل رقم (7) وبفرض أن الإنفعال اللدن المسلط تبلغ قيمته (0.04) فإن الألمنيوم المخمر

بيّن الفحص بالمجهر الماسح الإلكتروني (الشكل-11a,b) لحالة (T6) ظهور أكثر من منطقة أصل (بدء الشق) مما يُشير الى أن الإجهادات المسلطة عالية تقع ضمن منطقة التشوه اللدن إضافة الى تأثير مراكز الإجهاد في سرعة الفشل ، يُلاحظ عند إجهاد قريب من (σ_u) (شكل-11a) فإن منطقة الفشل السريع (Faster Fracture zone) واضحة جداً وتكون بوسط سطح العينة وهي تمثل منطقة الإفراط بالتحميل (Overstress zone) ، وعند خفض إجهاد الكلال الى قيمة قريبة من (σ_y) (شكل-11b) فإن عدد نقاط الأصل (بدء الفشل) تكون أقل وأن منطقة الإفراط في التحميل تكون أقل وضوحاً مقارنة بحالة العينة عند قيمة إجهاد كلال مقارب للأجهاد الأقصى (σ_u) .

إن انخفاض قيمة الإجهاد دون (σ_y) عند (144 MPa) (شكل-11c) رافقه انخفاض في عدد نقاط بدء الشقوق فضلاً عن تباين انخفاض عمق بدء الشق ويلاحظ أن منطقة التحميل المفرط (Overstress zone) تكون أقل مقارنة بشكل (11a) . وعند معاينة المقطع العرضي لسطح الفشل (شكل-12) يُلاحظ أن سطح الكسر يقترب من السطح المستوي (Flat Plane) (عمودي على مستوي سطح العينة) مما يُشير الى أن الإجهاد المسلط ضمن منطقة التشوه اللدن هو المسؤول عن الفشل وإن لمركزات الإجهاد دوراً ثانوياً [12,13] . بينما يكون سطح العينة عند إجهاد دون (σ_y) (بحدود 108 MPa) منحنيّاً (مقعراً) مما يعطي مؤشراً ان مراكز الإجهاد قد لعبت دوراً رئيساً في الفشل. أما حالة سطح الكسر لعينة الألمنيوم بحالته المعتقة طبيعياً (T4) فقد أظهر الفحص بالمجهر الماسح الإلكتروني ظهور عدة نقاط بدء

الدورات للتشوه المرن للحالة المخمرة مقارنة بحالة (T6) وكلما زادت قيمة متانة الكلال (K) قلت عدد دورات العمر الإنتقالي (N_T) ، تزداد قيمة (N_T) مع زيادة (K') (وهو عكس ما مؤشر لقيمة (K) ، بينما زادت قيمة (N_T) مع زيادة (n') كما هو الحال مقارنة بقيمة (شكل-10) .

إن مقاومة الألمنيوم في حالة التعتيق الطبيعي (T4) والصناعي (T6) للكلال بعدد دورات عاليه (HCF) تكون متشابهة الى حد ما وأعلى من حاله المخمرة وأنها تقع ضمن حالة التشوه المرن ، بينما تكون مقاومة الكلال بعدد دورات واطئ أعلى للألمنيوم المخمر وهو يقع ضمن منطقة التشوه اللدن .

بالرجوع الى النتائج المسجلة لباحثين آخرين فإن الألمنيوم المخمر (5083-O) [8] يتحمل إنفعال لادن أعلى من الألمنيوم المعتق (7046-T63) عند عدد دورات أقل من (10^3) بينما تكون قيمة التشوه الكلي أقل في حالة (7046-T63) عند التحميل لعدد دورات تزيد عن (10^3) مقارنة بالمخمره (5083-O) ، وهذا يتطابق مع نتائج البحث من حيث السبيكة الواحدة . وبالرجوع الى المعادلة الخاصة بعمر الإنفعال فإن قيمة المقدار الثاني (الإنفعال اللدن) $[e_f(2N_f)]$ أكبر بكثير من المقدار

الأول (الإنفعال المرن) $[\frac{S_f'}{E}(2N_f)]$

وهذا يدعو الى استخدام عمر الإنفعال عند الحسابات التصميمية في حالة الملحومات وتمركزات الإجهادات العاليه [8] . ففي حالة فشل الكلال بعدد دورات عاليه (HCF) والذي غالباً ما يكون أكثر من 10^4 فإن المقدار الأول سيكون هو الأكبر والسائد .

الأكبر . ويعتقد أن للتصليد الإنفعالي الدور الواضح في مقاومة الكلال المسلط مما ترك لمركزات الأجهاد دوراً أكبر في بدء الفشل مقارنة بالحالتين الأخرى (T4, T6) [11]

الاستنتاجات Conclusions

1. تميزت سبيكة الألمنيوم المخمرة (7020-O) بعدد دورات إنتقاليه (N_T) أعلى مقارنة بالحالتين الأخرى (T4, T6) مما يُشير الى تأخر دخول الألمنيوم المخمّر في منطقة التشوه اللدن مقارنة بالحالتين الأخرى .
2. يُفضل استخدام المخمر (O) لمقاومة فشل الكلال عند عدد الدورات المنخفضه (الإجهادات العاليه) ضمن منطقة التشوه اللدن . بينما يُفضل (T6) و (T4) عند فشل الكلال بعدد دورات عالية (ضمن منطقة التشوه المرن) .
3. تراوحت قيم (b) من (-0.14) وقيم (c) من (-0.554) الى (-0.600) إضافة الى أن قيم (n') تراوحت بين (0.1155) و (0.23) وقيم (K') من (531 MPa) الى (838 MPa) لسبيكة الألمنيوم (7020) بحالاتها الثلاثة وهي ضمن الحدود المسجله للمعادن .
4. إشتمل سطح الكسر لعينات (T6) و (T4) على عدة نقاط لبدء الشقوق عند إجهادات مسلطة تزيد على (σ_y) مع وضوح منطقة الإفراط بالتحميل .
5. إقترب سطح الكسر من الشكل المستوي لعينات (T6) و (T4) عند إجهاد قريب من (σ_{II}) مما يُشير الى أن تأثير الإجهادات المسلطه يكون أكبر مقارنة بمركزات الإجهاد .
6. لمركزات الإجهاد تأثير أكبر مقارنة بالإجهاد المسلط لعينات

الشقوق (شكل-13) بشكل أكثر وضوحاً وأقل عدداً من حالة (T6) وبمنطقة (Overstress) أقل تشوهاً ، أما سطح الكسر عند إجهاد قريب من إجهاد الخضوع (σ_y) لحالة (T4) فإن نقاط بدء الشقوق كانت أقل أيضاً مقارنة بالعينه المعرضه لإجهاد قريب من الإجهاد الأقصى (σ_{II}) (شكل-13a) إضافة الى وضوح منطقة (Overstress) (شكل-13b) . وبالرجوع الى الشكل (13a) يمكن ملاحظة المناطق الداكنة والتي تمثل بدء الكلال (Initial Fatigue) ونمو الشقوق البطيئه التي يسبق الفشل النهائي عند حالة التحميل بدورة واحدة أو عدة دورات . أظهر سطح الكسر عند إجهاد (σ_{II}) سطحاً مستويماً مشيراً الى دور الإجهاد المسلط الأكبر مقارنة بمركزات الإجهاد ، بينما كان سطح الكسر يشتمل على منطقة تقعر وتحدب في أن واحد عند إجهاد قريب من إجهاد الخضوع مما يُشير الى إقتراب تساوي تأثير الأجهاد المسلط مع مركزات الأجهاد في أن واحد (شكل-14) . أما العينات المخمرة فإبداً إضافة الى ظهور عدة نقاط بدء الشقوق للعينات المسلطه عليها إجهادات قريبة من (σ_{II}) و (σ_y) فإن منطقة (Overstresses) كانت أقل وضوحاً لاسيما مقارنة بحالة (T4) (شكل-15) . كما ظهرت النقاط السوداء (المناطق الداكنة) أقل وضوحاً مقارنة بحالة التعتيق الطبيعي (T4) . أظهر الفحص المجهرى للمقطع العرضي أن سطح الكسر عند الأجهادات القريبة من (σ_{II}) و (σ_y) تشتمل على السطح المقعر والمحدّب في أن واحد لاسيما لعينة (σ_{II}) (شكل-16a) مما يؤكد أن الفشل يوعز الى التأثير المشترك للإجهاد ومركزات الأجهاد في أن واحد وإن لمركزات الإجهاد الدور

- Failure Analysis, Vol. 11, Febr. 2004 PP. 715-725 .*
- 6-ASM Handbook, "**Heat Treatment**", Vol. 4, *The International*, 1991 .
- 7-Annual book of ASTM Standard Section 2, "**nonferrous Metal Product**", Vol. 02, 1981 .
- 8-Metals Handbook, "**Material Selection**" 2nd desk-edition, *American Society for Metals*, 1998 .
- 9-J. Dkrajni, G. Junak, "**Low Cycle Fatigue of Steel at High Temperature Under Gradual Loading**", *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 26, No. 2, Feb. 2008 .
- 10-X. S. Wang, F. Liang, J. Fan and F. H. Zhang, "**Low Cycle Fatigue Small Crack Initiation and Propagation Behavior of Cast Magnesium Alloys Based on in-Situ SEM Observations**", *Philosophical Magazine*, Vol. 86, No. 11, April 2006, PP. 1581-1596 .
- 11-Anil Kumar Nag, K. V. U. Praveen and Vakil Singh, "**Low Cycle Fatigue Behavior of Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si Alloy at Room Temperature**", *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 29, No. 3, Jun. 2006, PP. 271-275 .
- 12-K. O. Pedersen, Roven, O.-G G Lademo, O.S. Hopperstad, "**Strength and Ductility of Aluminum Alloy AA7030**", *Materials Science AND Engineering*, Vo. 10, March, 2007, PP. 89 .

(T4) عند فشل الكلال القريب من إجهاد الخضوع أو عينات (T6) تحت إجهاد الخضوع أو العينات المخمرة عند إجهادات مختلفة ويأخذ السطح شكلاً من سطح المنحني .

References

- 1-M. Avalue, G. Belingardi, M. P. Cavatorta, "**Static and Fatigue Strength of Die Cast Aluminum Alloy Under Different Feeding Conditions**", *Journal Published By Teksid Twice A Year*, Vol. 20, No. 2, Dec. 2002, PP. 9-13 .
- 2-Vani Shankar, M. Valsan, K. Bhanu Sankara Rao, R. Kannan, S. L. Mannan and S. D. Pathak, "**Low Cycle Fatigue and Creep-Fatigue Interaction of Modified 9Cr-1Mo Steel Weldments**", *Mater. Sci. Eng. A*, Vo. 437, (2006), PP. 413 .
- 3-X. Q. Shi, H. L. J. Pang, W. Zhou, Z.P. Wang, "**Low Cycle Fatigue Analysis of Temperature And Frequency Effects In Eutectic Solder Alloy**", *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, Nove. 1999, PP. 217-228 .
- 4-Ilyas Uygur, Mustafa kemal Kulekci, "**Low Cycle Fatigue Properties Of 2124/SiC_p Al-Alloy Composites**", *Turkish J. Eng. Env. SCI*. Vol. 26, 2002, PP. 265-274 .
- 5-L. P. Borrego, L. M. Abreu, J. M. Costa, J. M. Ferreira, "**Analysis of Low Cycle Fatigue In AlMgSi-Al Alloy**", *Engineering*

Solder", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 34, No. 1, 2005

13-X. Chen, D. Jin, M. Sakane, , "Multiaxial Low-Cycle Fatigue of 63Sn-37Pb

جدول رقم (1) : التحليل الكيماوي لسبيكة الألمنيوم 7020

| Elements Materials | % Zn | % Si | % Fe | % Cu | % Mn | % Mg | % Ti | % Al |
|----------------------------------|-------|--------|--------|--------|------------|---------|--------|---------|
| Nominal chemical composition [7] | 4 - 5 | ≤ 0.35 | ≤ 0.40 | ≤ 0.20 | 0.05 - 0.5 | 1 - 1.5 | ≤ 0.08 | Balance |
| Actual chemical composition | 4.280 | 0.148 | 0.392 | 0.152 | 0.092 | 1.043 | 0.042 | Balance |

جدول رقم (2) : الخواص الميكانيكية لسبيكة الألمنيوم 7020

| Properties* Materials | Eng. Tensile Stress, σ_u MPa | Eng. Yield Stress, σ_Y MPa | Eng., Strain, $\epsilon_{eng.}$ | | | True Tensile Stress, σ_{true} MPa | True Strain, ϵ_{true} | | |
|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------------|--|--------------------------------|--------------|--------------------|
| | | | ϵ_e | ϵ_p | ϵ_{Total} | | ϵ_e | ϵ_p | ϵ_{Total} |
| 7020-O | 210 | 103 | 0.01 | 0.167 | 0.175 | 237 | 0.053 | 0.128 | 0.181 |
| 7020-T4 | 397 | 280 | 0.006 | 0.123 | 0.129 | 466 | 0.032 | 0.09 | 0.122 |
| 7020-T6 | 420 | 360 | 0.008 | 0.115 | 0.123 | 471 | 0.015 | 0.059 | 0.074 |

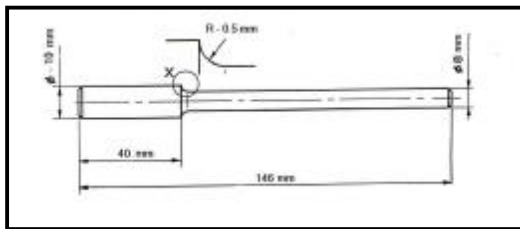
• الأختلاف المحدود عن قيم الشكل (1-4) يرجع الى أن القيم الجدولية محصلة لأربعة أختبارات.

جدول رقم (3) : قيم أس الإصلاذ الإنفعالي ومعامل المتانته

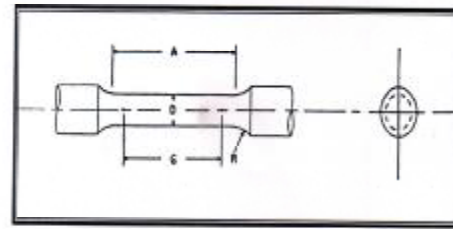
| Properties Materials | n | K, MPa |
|-------------------------|-------|--------|
| 7020 - O | 0.21 | 505 |
| 7020 - T4 | 0.12 | 605 |
| 7020 -T6 | 0.097 | 708 |

جدول رقم (4) : بعض المتغيرات النمطية والدورية التي تم الحصول عليها من الأختبارات

| Alloy | True Fracture Ductility) e _f (| $\Delta e_p / 2 = e'_f (2N_f)^c$ | | True Fracture, Stress S _f (MPa) | $\Delta S / 2 = s'_f (2N_f)^b$ | | K' (MPa) | n' |
|---------|--|----------------------------------|--------|--|--------------------------------|--------|----------|--------|
| | | e' _f | c | | s' _f | b | | |
| 7020-O | 0.181 | 0.7 | -0.600 | 237 | 772 | -0.14 | 838 | 0.23 |
| 7020-T4 | 0.122 | 0.66 | -0.577 | 466 | 521 | -0.105 | 566 | 0.1819 |
| 7020-T6 | 0.074 | 0.15 | -0.554 | 471 | 427 | -0.064 | 531 | 0.1155 |

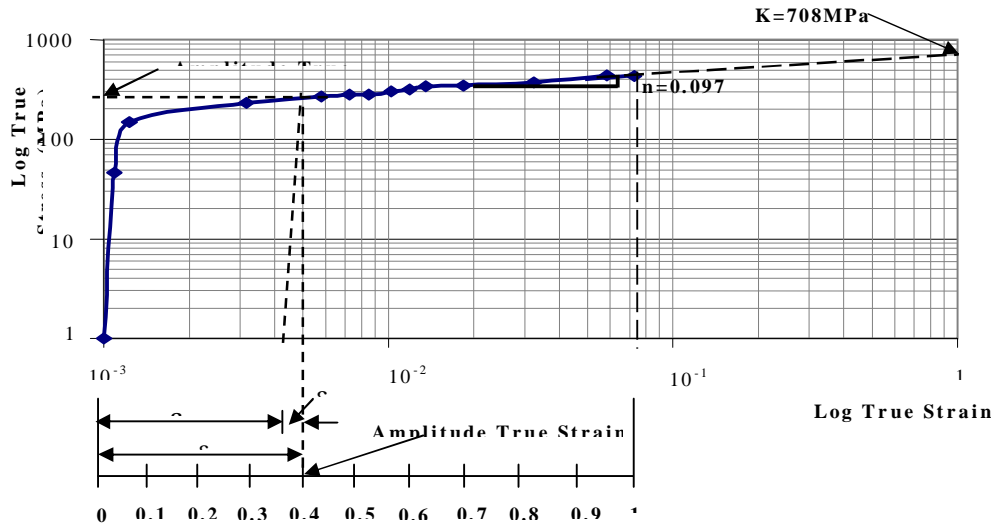


شكل (2) : عينة اختبار كلال

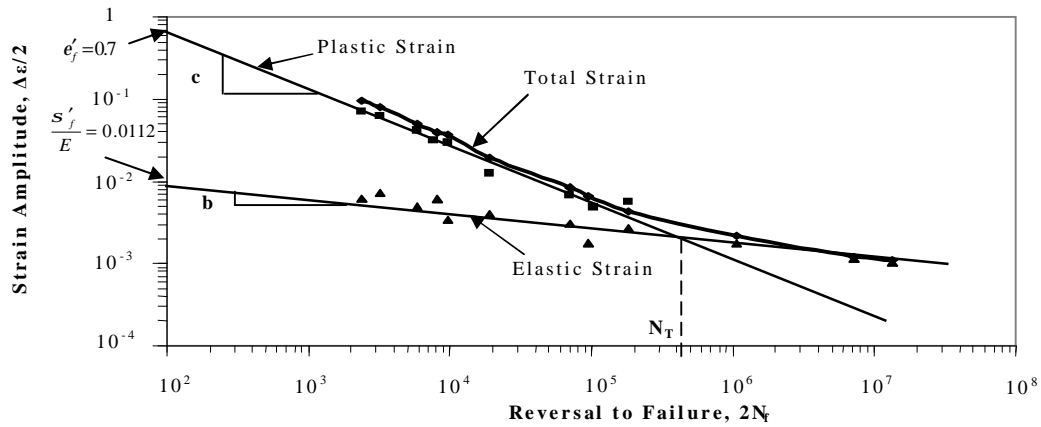


G-gage length (30 mm ±0.06), D-diameter (6.0 mm ±0.1)
 R-radius of fillet (6mm) min , A-length of reduced section (36mm).

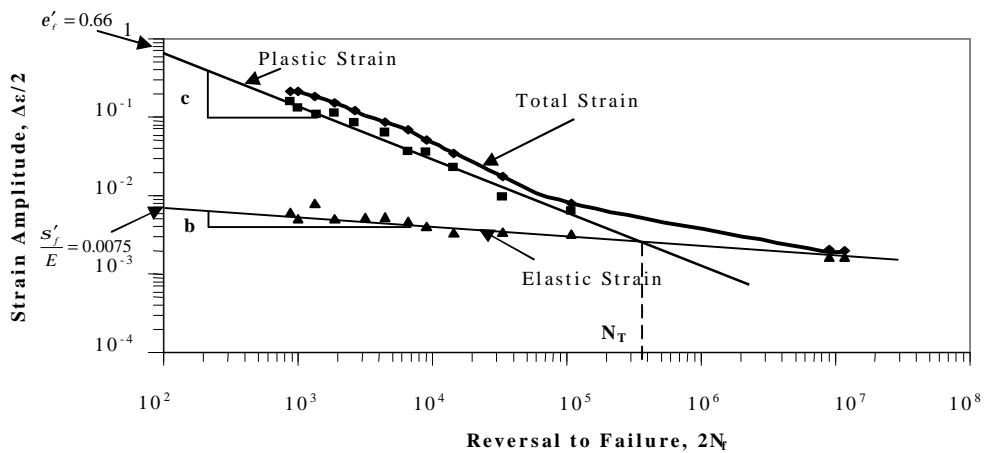
شكل (1) : عينة اختبار الشد



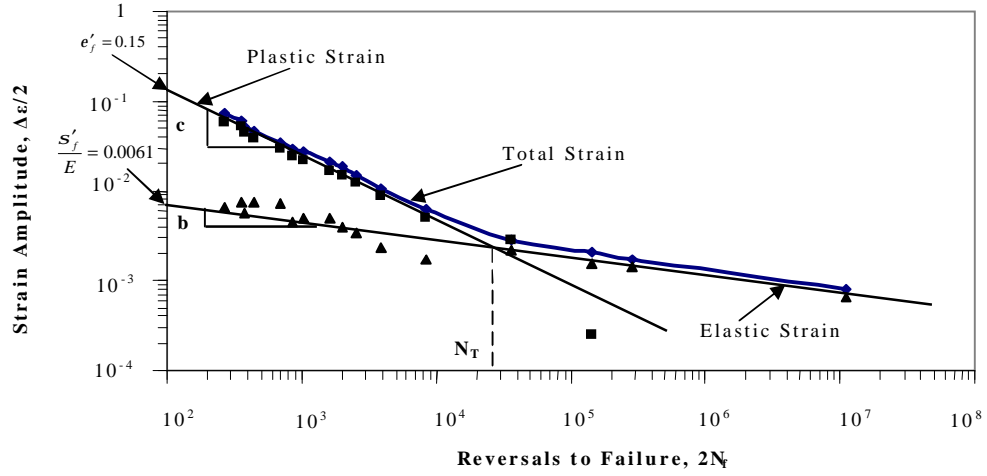
شكل (3) : منحنى الإجهاد-الإنفعال الحقيقي لسبيكة الألمنيوم 7020-T6



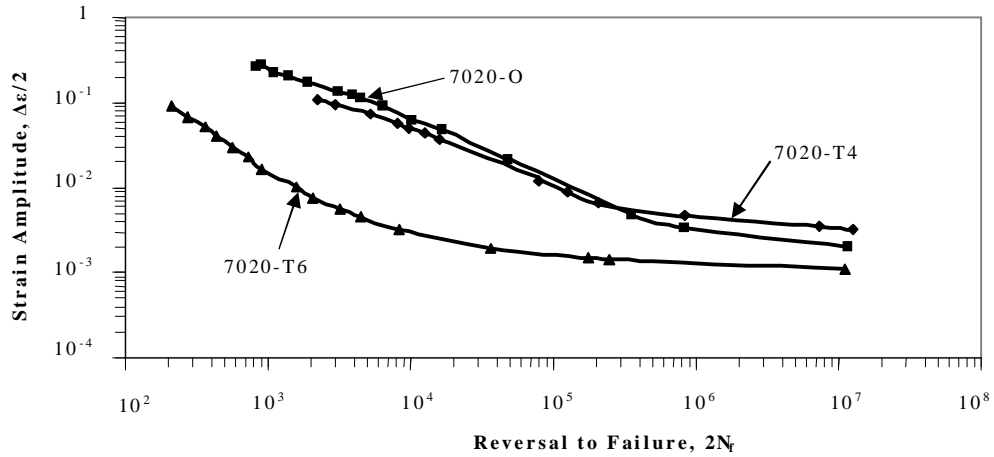
شكل (4) : منحنى عمر الإنفعال لسبيكة الألمنيوم 7020-O



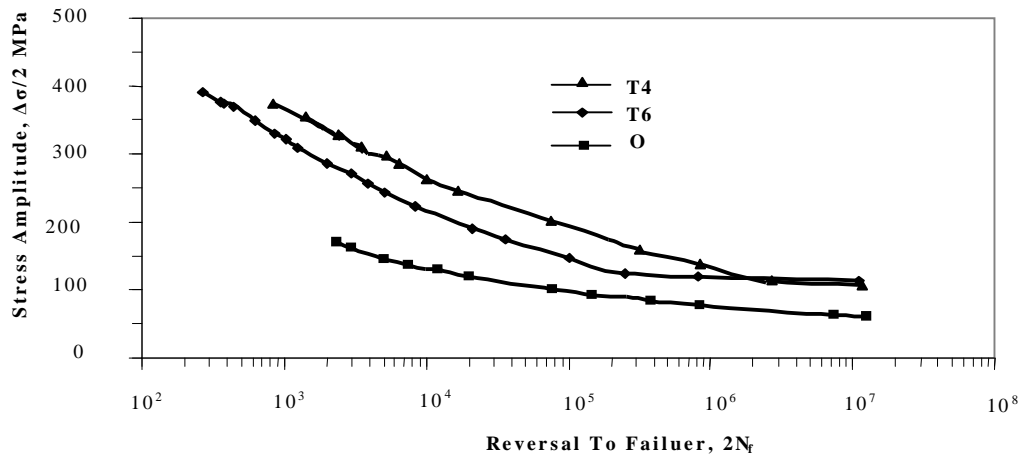
شكل (5) : منحنى عمر الإنفعال لسبيكة الألمنيوم 7020-T4



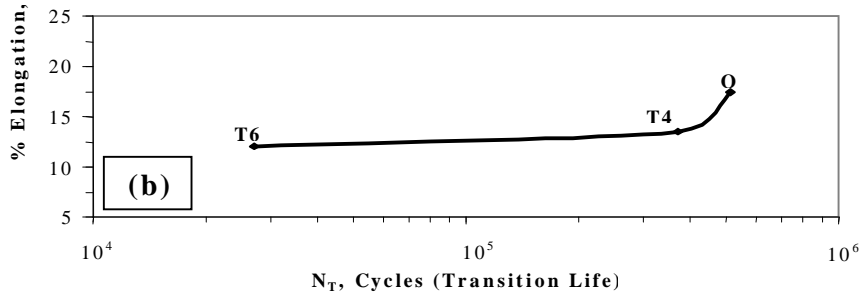
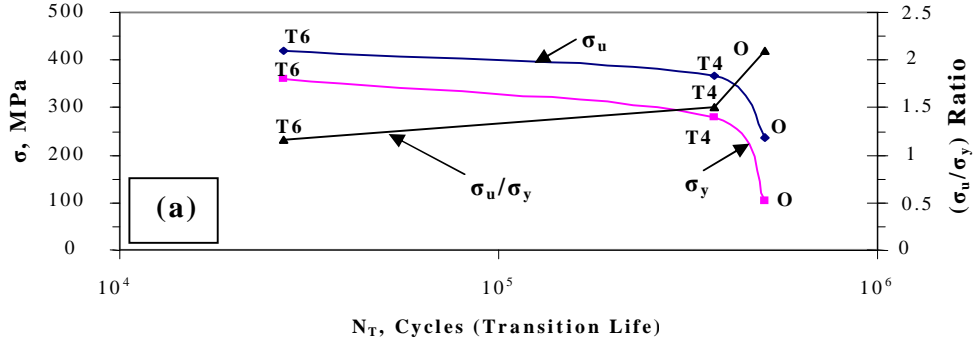
شكل (6) : منحنى عمر الإنفعال لسبيكة الألمنيوم 7020-T6



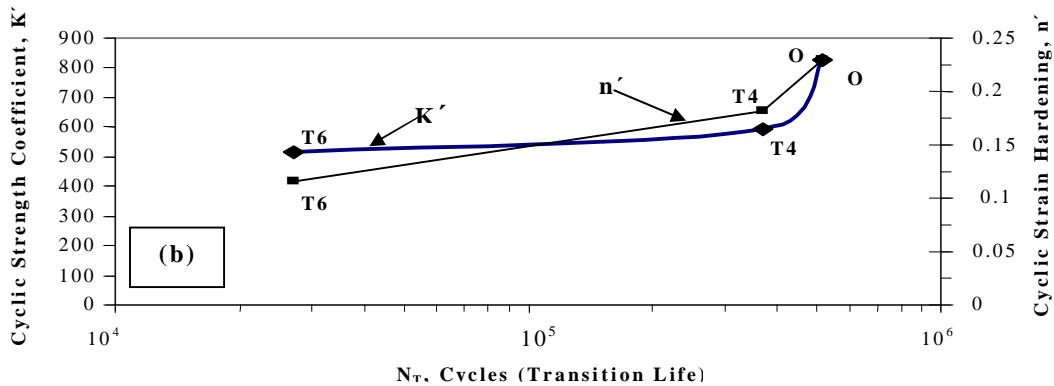
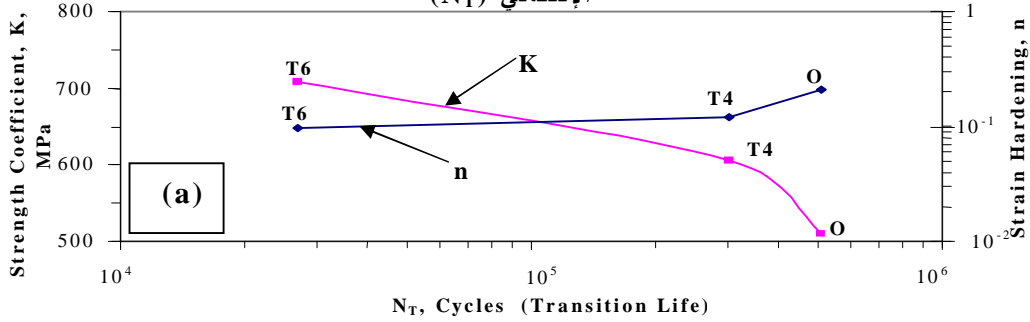
شكل (7) : منحنى عمر الإنفعال لسبائك الألمنيوم (7020) المخمرة (O)، المعتقة صناعياً (T6) والمعتقة طبيعياً (T4)



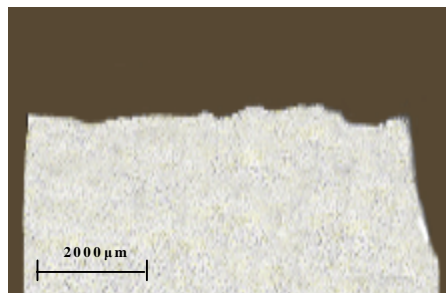
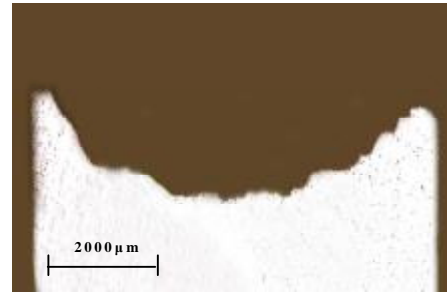
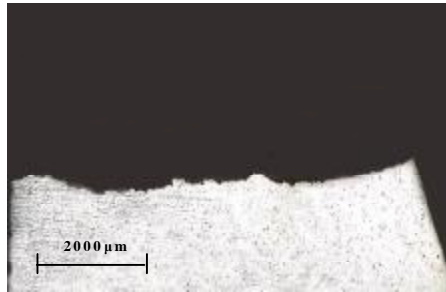
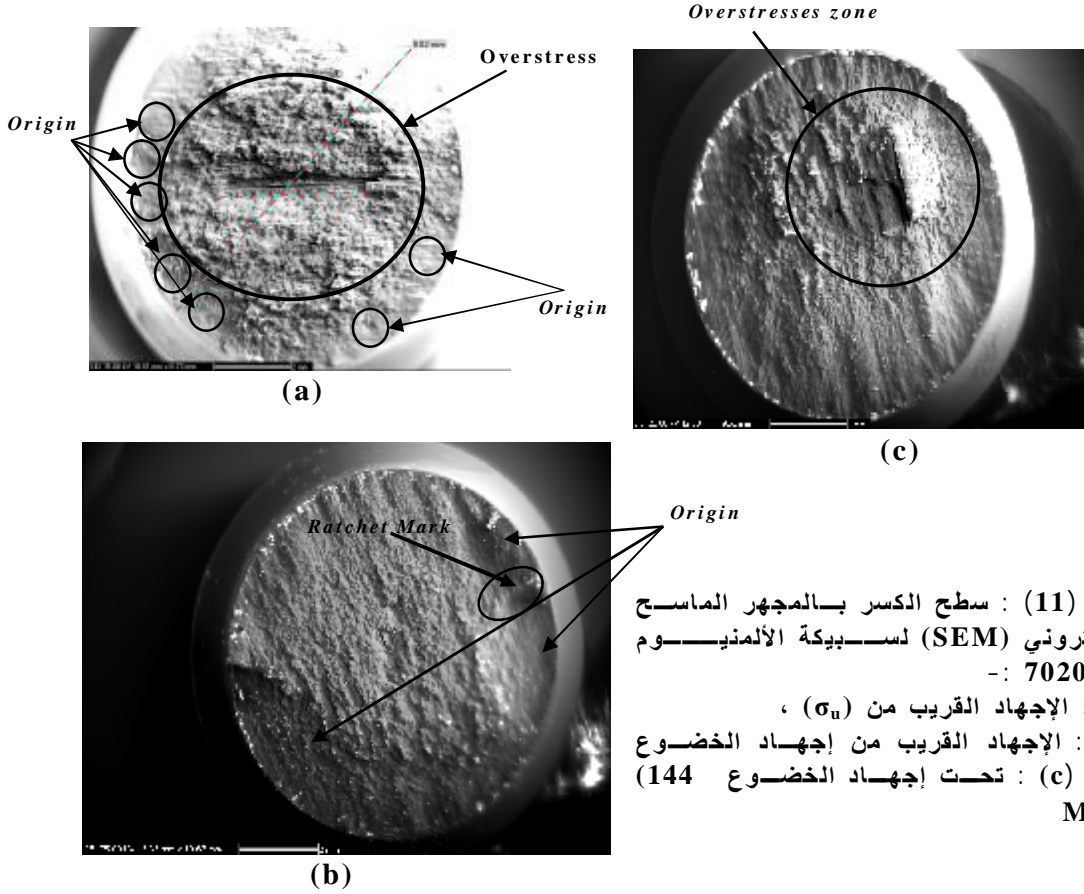
شكل (8) : منحنيات الكلال (HCF) لسبائك الألمنيوم في ثلاث حالات : التخمير (O)، التعتيق الطبيعي (T4) والتعتيق الصناعي (T6)



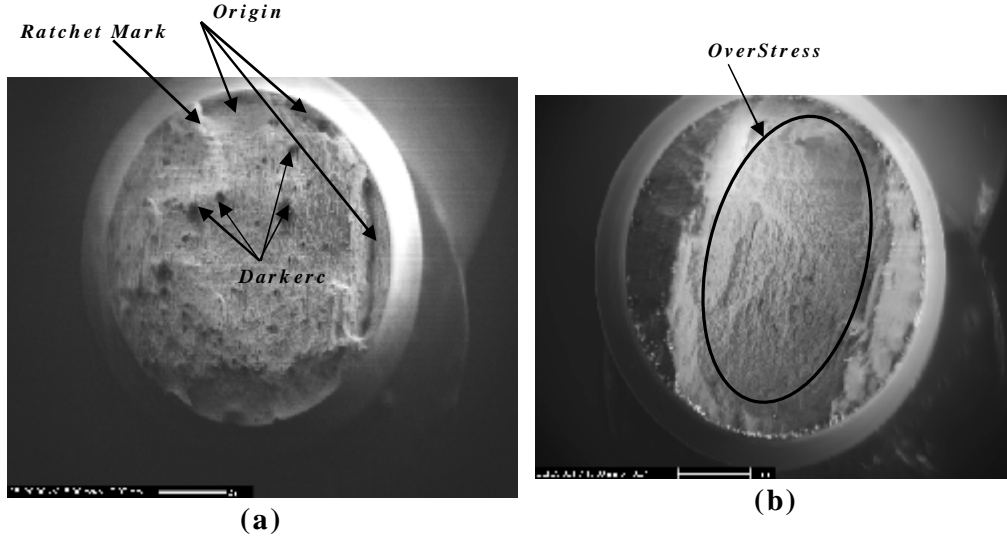
شكل (9): (a) : علاقة الإجهاد الأعظم (σ_u) ، إجهاد الخضوع (σ_y) ، ونسبة (σ_u / σ_y) مع العمر الإنتقالي (N_T) ، (b) : علاقة المطيلية مع العمر الإنتقالي (N_T)



شكل (10): (a) : علاقة أس الإصلاذ الإنفعالي ومتانة الكلال مع العمر الإنتقالي ، (b) : علاقة أس الإصلاذ الإنفعالي الدوري ومتانة الكلال الدوري مع العمر الإنتقالي

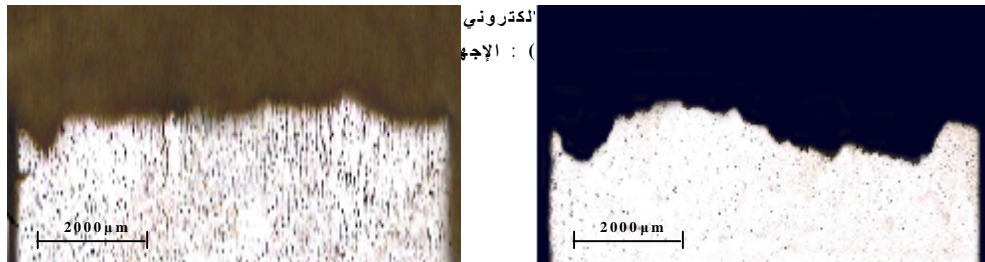
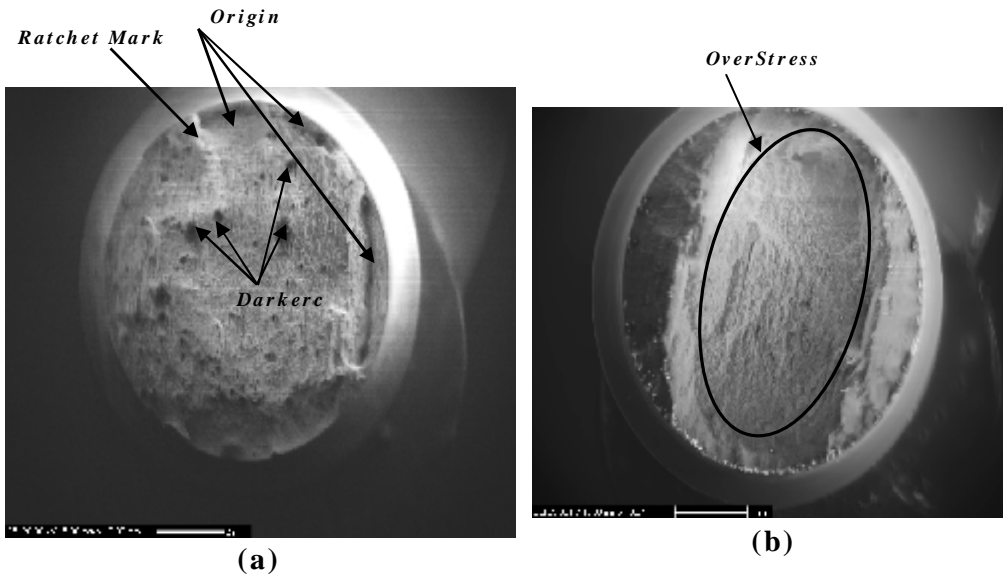


شكل (12) : المقطع العرضي لعينات
 كسر الكلال لسبيكة الألمنيوم -7020
 -: T6
 (a) قريب من الإجهاد الأقصى (σ_u)
 (b) قريب من إجهاد الخضوع (σ_y)
 (c) تحت إجهاد الخضوع (108 MPa)

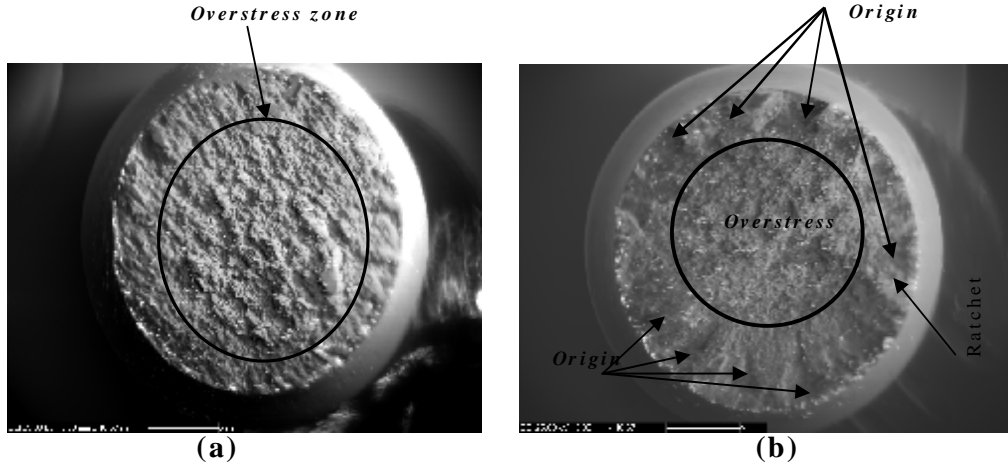


شكل (13) : سطح الكسر بالمجهر الماسح الإلكتروني (SEM) لسبيكة الألمنيوم 7020-T4 -

(a) : الإجهاد القريب من (σ_{II}) ، (b) : الإجهاد القريب من إجهاد الخضوع (σ_v)

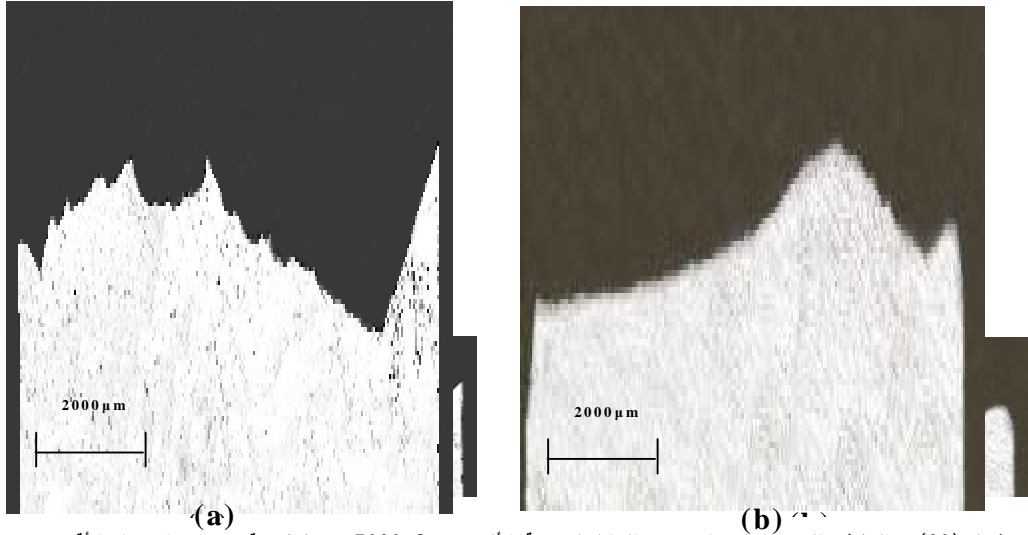


شكل (14) : المقطع العرضي لعينات كسر الكلال لسبيكة الألمنيوم 7020-T4 - : (a) : قريب من الإجهاد الأقصى (σ_{II}) ، (b) : قريب من إجهاد الخضوع



شكل (15) : سطح الكسر المعرض بالمجهر الماسح الإلكتروني (SEM) لسبيكة الألمنيوم 7020-O :-

(a) : الإجهاد القريب من (σ_u) ، (b) : الإجهاد القريب من إجهاد الخضوع (σ_y)



شكل (20) : المقطع العرضي لعينات كسر الكلال لسبيكة الألمنيوم 7020-O :- (a) : قريب من الإجهاد الأقصى

شكل (16) : المقطع العرضي لعينات كسر الكلال لسبيكة الألمنيوم 7020-O :- (a) قريب من الإجهاد الأقصى (σ_u) ، (b) قريب من إجهاد الخضوع (σ_y)