



تصرف نمو الشقوق المتولدة في سبيكة الألمنيوم (AL-7020 T6) تحت تأثير

إجهادات متداخلة الأطوار

د. رافع خليل البزاز

استاذ مساعد

جامعة الموصل/كلية الهندسة

ralbazzaz@yahoo.com

eng.majeedali90@gmail.com

مجيد علي عبدالرزاق

ماجستير هندسة ميكانيكية

جامعة الموصل/كلية الهندسة

الخلاصة

عادةً ما تحتوي سبائك الألمنيوم المستخدمة في التراكيب والهياكل الهندسية على شقوق وتكون واقعة تحت تأثير احمال متداخلة من الطور الأول والثاني، هذه الدراسة تقدم تحليل نظري وعملي على تصرف نمو الشقوق تحت تأثير إجهادات متداخلة الاطوار في سبيكة الألمنيوم (AL-7020T6) باستخدام عينات CTS تم تثبيتها داخل ماسكة فولاذية وبزوايا مختلفة ومعرضه الى احمال متزايدة ببطء (monotonic load) وبمعدل أراحه ثابتة . وأظهرت النتائج بأن عينات (LT) متانة كسرهما أكبر من متانة الكسر لعينات (TL) ، هنالك توافقاً جيداً بين نتائج الجانب النظري ونتائج برنامج (ANSYS) ، متانة الكسر عند الطور الأول أكبر من الطور الثاني وهذا يدل على أن سبيكة الألمنيوم (AL-7020T6) الحابوية على شقوق تكون متينة تحت تأثير حمل الشد وأقل متانة تحت تأثير حمل القص ، اما طاقة الانفعال المتحررة الكلية (G_I) فإنها تقل مع زيادة نسبة الطور الثاني وهذا يدل على أن الشقوق في السبيكة الألمنيوم تحتاج الى طاقة أكبر لكي تنمو عند الطور الأول واقل عند الطور الثاني .

الكلمات الدالة: سبيكة الألمنيوم (AL-7020T6)، عينات (LT)، عينات (TL) ، متانة الكسر ، اطوار المتداخلة .

Behavior Of The Cracks Propagation Exist In A



Aluminum Alloy (AL-7020T6) Under The Effects Of Mixed-Mode Stresses

Majeed Ali Abdulrzaq Albazzaz

M. Sc. in Mechanical Eng.
Univ. of Mosul / College of Eng.
of Eng. eng.majeedali90@gmail.com
ralbazzaz@yahoo.com

Dr. Rafi Khalil

Assistant professor
Univ. of Mosul / College

Abstract

The aluminum alloys using in engineering components and structure mostly contains cracks and subjected to mixed mode (I&II) loading, This study presented theoretical and experimental analysis on the behavior of the crack propagation under the effect mixed mode stresses in the aluminum alloy (AL-7020T6) by using (CTS) specimens connected into steel fixture at different angles and subjected to a monotonic loading at constant rate of displacement . The results showed that , the (LT) specimen have larger fracture toughness than (TL) , Good agreement between theoretical results and results of the ANSYS Software, Mode I fracture toughness larger than mode II this is indicated that the aluminum alloy (AL-7020T6) contain cracks has stronger in tensile and weak under shear loads ,The total energy release rate (G_I) decrease with increasing mode II fraction this is indicated that the crack in the aluminum alloy at mode I need higher energy than mode II in order to growth .

Keyword: AL(7020T6),(LT)specimens,),(TL)specimens, fracture toughness, mixed mode.

الرموز			
الرمز	تعريفه	الرمز	تعريفه
G	معدل طاقة الانفعال المتحررة	B	سمك عينة الاختبار
G _C	القيمة الحرجة لمعدل طاقة الانفعال المتحررة	F	القوة المسلطة
K	معامل شدة الاجهاد	W	عرض عينة الاختبار
J	تكامل J	a	طول الشق
E	معامل يونك	K _I , K _{II}	معامل شدة الاجهاد للطور الاول والثاني

المقدمة

منذ بداية الثورة الصناعية تم الاهتمام بميكانيك الكسر بسبب زيادة حصيلون الفشل في الاجزاء الميكانيكية للمنشآت الهندسية مثل محطات التوليد الكهربائي أو تكرير البترول أو المركبات الفضائية والطائرات أو حتى في الأغراض المنزلية البسيطة فقد قام عدد من الباحثين بعمل تجارب وابحث في هذا المجال ومن ابرزهم (George Irwin) الذي يعتبر مؤسس ميكانيك الكسر اذ قام بوضع اسس جديدة للكسر استنادا على مفاهيم المرونة الخطية فقد قام بوضع معيار للكسر في المعادن المرنة الخطية (Linear Elastic) اعتمادا على معدل طاقة الانفعال المتحررة (G) وبين بأن الشق يبدأ بالنمو عندما يصل معدل طاقة الانفعال المتحررة الى قيمه حرجية (G_C) وهي خاصية من خواص المعدن وقام بربط معدل طاقة الانفعال المتحررة (G) مع معامل شدة الاجهاد (K) الذي يصف شدة الاجهاد حول رأس الشق [1].

ان ميكانيك الكسر المرن الخطي هي طريقة تحليلية للتنبؤ بحصول كسر في المعادن التي تحتوي على شقوق اعتماداً على معامل شدة الإجهاد (K) وتنص على أن الشق يبدأ بالنمو عندما يصل معامل شدة الإجهاد (K) الى القيمة الحرجية وتسمى بمتانة الكسر (K_C)، والتنبؤ بتوزيع الاجهادات حول الشقوق استنادا الى نظريات ومفاهيم المرونة ومعرفة الإجهاد الازم لنمو هذه الشقوق. وهذه الطريقة تصلح للمعادن المرنة الخطية (Linear Elastic) والمتجانسة (Homogenous) والتي تكون خواصها متجانس في جميع الاتجاهات (Isotropic) والتي تكون فيها حجم منطقة التشوه اللدن الموجود عند رأس الشق صغيرة مقارنة مع طول الشق وبعبارة أخرى ميكانيك الكسر المرن الخطي يصلح للمواد التي تتمتع بقوة عالية (High Strength) ومتانة كسر قليلة مثل سبائك الالمنيوم ذات سلسه (7xxx) والتي تستخدم في مجال تصنيع الطائرات وتصلح أيضاً للمعادن القصفة (Brittle) مثل فولاذ عالي المقاومة (High Strength Steel) والزرجاج و الكونكريت والسيراميك وبعض من انواع البوليمر و المواد المتراكبة [2].

وهناك ثلاث اطوار من حالات الحمل والتي تؤثر على نمو الشقوق في الاجسام الصلبة وكما موضح في الشكل(1) ولكل طور من هذه الاطوار الثلاثة هناك معامل شدة الاجهاد (Stress intensity factor-K) حيث ترمز لمعامل شدة الاجهاد للطور الاول والثاني والثالث K_I و K_{II} و K_{III} على التوالي [3]. وفي كثير من الاحيان يحدث الطور الأول والثاني للكسر معا (Opening, Sliding) لان الشقوق الموجودة في الهياكل الهندسية اما تكون اتجاهها مائلة

تصنع زاوية معينة مع الحمل المسلط عليها او قد تكون الشقوق متعرضة إلى اجها لية متداخلة من سحب و قص معا مما يجعل الكسر في تلك الهياكل متداخل الاطوار (Mixed Mode Fracture) مثال على ذلك الشقوق الموجودة في اوعية الضغط وانابيب نقل النفط أو الغاز وغيرها ويكون الكسر فيها من نوع الطور الاول والثاني اما الشقوق الموجودة في الاعمدة الدوارة يكون الكسر فيها من نوع الطور الاول والثالث . في هذا الدراسة نهتم بالكسر الذي يكون سببه احمال من نوع الطور الاول والثاني لأنه شائع الحدوث في الصفائح المعدنية التي تستخدم في الهياكل الهندسية [4].

فقد قام الباحثون (Wanlin, et.al) [5] بدراسات عملية لتوضيح تأثير السمك على خصائص الكسر في عينات CTS مصنوعة من سبيكة الالمنيوم عالي المقاومة (LC4-CS) اتجاه الدرفلة فيها (TL) وذات سماكات مختلفة (2, 4, 8, 14 mm) وتم تثبيتها في ماسكة Richard وتحت تأثير احمال متزايدة ببطء وبزاويا مختلفة واستنتجوا بأن سمك العينة له تأثير قوي على شكل منطقة الكسر، واستنتجوا أيضا بأن معيار MTS و S يصلح للتنبؤ بزاوية بدء الشق في هذه السبيكة ماعدا عند الطور الثاني حيث يكون سطح الكسر مسطحا واستنتجوا أيضا بأن قدرة تحمل العينات للقوى المسلطة تقل مع زيادة سمك العينة عند الطور الأول وأن هذا التأثير لا يظهر بشكل واضح عند الاطوار المتداخلة.

قام الباحثون (Byron E. Amstutz, et.al) [6] بدراسة عملية لإيجاد تأثير اتجاه الدرفلة على نشوء الشقوق لعينات فراشية الشكل (butterfly shaped) مصنوعة من (AL2024-T3) ومثبتة في ماسكة Arcan وتحت تأثير احمال متزايدة ببطء وبزاويا مختلفة وقاموا باستنتاج ما يلي: (1) عندما تكون زاوية التحميل عند الطور الأول ازاحة فتحة رأس الشق (CTOD) عند عينات TL اقل من عينات LT، (2) منطقة التشوه اللدن الموجود عند رأس الشق لا يتأثر باتجاه الدرفله، (3) متانة الكسر عند العينات LT اكبر من عينات TL .

وقام الباحثون (Tein, et.al) [7] بدراسة نظرية لتقدير حجم منطقة التشوه اللدن الموجودة عند رأس الشق حسب معيار Von Mises للإجهاد الخضوع والتنبؤ بزاوية بدء الشق اعتمادا على معيار R_p لعينات CTS مصنوعة من سبيكة الالمنيوم (AL-2024T351) ومثبتة في ماسكة Richard وتحت تأثير احمال ثابتة وبزاويا مختلفة واستنتجوا بأن حجم منطقة التشوه اللدن الموجود عند رأس الشق هو مقياس للطاقة الممتصة اثناء نمو الشق حيث كلما كانت تلك

المنطقة كبيرة دل ذلك بان المعدن يمتلك متانة عالية (high toughness) ويمتص كمية كبيرة من الطاقة خلال نمو الشق والعكس صحيح اذا كانت تلك المنطقة صغيرة ،واستنتجوا ايضا بأن منطقة التشوه اللدن يحافظ على شكله عند كل زوايا التحميل القوى ولكن يختلف في الحجم والاتجاه .

قام الباحثون (Sha Jiangbo, et.al) [8] بدراسة تصرف الكسر في سبيكة الالمنيوم Ly12 تحت تأثير اجهادات متداخلة الاطوار من الطور الأول والثاني عملياً وباستخدام تقنية العنصر المحدود لعينات CTS مثبتة داخل الماسكة Richard وتحت تأثير احمال متزايدة ببطء وبزوايا مختلفة وقاموا بحساب التكامل J للطور الاول J_1 والثاني J_2 وللأطوار المتداخلة J_m ووضعوا معيار لنمو الشق اعتمادا على (J_m -R curve) واستنتجوا بأن متانة الكسر (J_m) تزداد مع زيادة نسبة الطور الثاني وبأن انفعال اللدونة (plastic strain) عند رأس الشق وحجم منطقة التشوه اللدن يزداد مع زيادة نسبة الطور الثاني وهذا يعني بأن مقاومة المعدن لنمو الشق تزداد مع زيادة نسبة الطور الثاني.

فيقدم هذا البحث دراسة عملية ونظرية على تصرف نمو الشقوق تحت تأثير اجهادات متداخلة من الطور الأول والثاني في سبيكة الالمنيوم (AL-7020T6) باستخدام عينات CTS تم تثبيتها داخل ماسكة فولاذية تسمى (Richard fixture) بزوايا مختلفة ومعرضة الى أحمال متزايدة ببطء (monotonic load) وبمعدل ازاحة ثابتة (0.3mm/min) وباستخدام مجسات الانفعال ومعدات أخرى مخصصة لهذه الاغراض وكذلك دراسة توزيع الاجهادات وشدتها حول الشقوق ودراسة تأثير اتجاه الدرفله على متانة الكسر. اما الجانب النظري من هذه الدراسة فيشمل تعيين الاجهادات وشدتها حول الشقوق وذلك باستخدام تقنية العناصر المحددة والمتمثلة باستخدام برنامج (ANSYS14.5) وحساب متانة الكسر (Fracture Toughness) للطورين الاول (K_{IC}) والثاني (K_{IIC}) والتداخل بينهما وكيفية تغيرها مع تغيير زاوية التحميل (Loading Angle) وكذلك التنبؤ بزوايا بدء الشق بالنمو وكيفية تغير منطقة التشوه اللدن الموجود حول رأس الشق مع تغيير زاوية التحميل .

الجانب النظري

معدل طاقة الانفعال المتحررة (Strain Energy Release Rate G): اوجد

Irwin تعريف عام لمعدل الطاقة الانفعال المتحررة (G) بأنها تساوي مقدار التغير في طاقة

الكامنة (Potential Energy) نتيجةً لنمو الشق وهي تساوي معدل الطاقة التي يحتاجها الشق لكي ينمو. واوجد أيضا علاقات رياضية تربط معامل شدة الاجهاد (K) ومعدل طاقة الانفعال المتحررة (G) لمعدن تحقق فيه شروط ميكانيك الكسر المرن الخطي: [9]

$$G = \frac{K_i^2}{E} \dots\dots\dots (1)$$

$$K_i = \frac{F}{WB} * \sqrt{\pi a} * f_i \left(\frac{a}{W} \right) \dots\dots\dots (2)$$

حيث ان: $f_i \left(\frac{a}{W} \right)$ معامل تصحيح الشكل، a طول الشق، W عرض العينة، F القوة المسلط على العينة، B سمك العينة.

اما معادلة حساب معامل شدة الاجهاد عند زوايا تحميل مختلفة لعينات (CTS)

قدمه Richard: [10]

$$K_I = \frac{F}{WB} \sqrt{\pi a} \frac{\cos \alpha}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)} \sqrt{\frac{0.26 + 2.65 \left(\frac{a}{W-a}\right)}{1 + 0.55 \left(\frac{a}{W-a}\right) - 0.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}} \dots\dots\dots$$

· (3 a)

$$K_{II} = \frac{F}{WB} \sqrt{\pi a} \frac{\sin \alpha}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)} \sqrt{\frac{-0.23 + 1.4 \left(\frac{a}{W-a}\right)}{1 - 0.67 \left(\frac{a}{W-a}\right) + 2.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}} \dots\dots\dots$$

· (3 b)

معادلات توزيع الاجهاد المرن حول الشقوق (Elastic Stress Distribution)

: معادلات توزيع الاجهاد المرن (Elastic Stress Distribution) حول رأس الشق وكما في الشكل (2) لمعدن يتحقق فيه شروط ميكانيك الكسر المرن الخطي ويخضع الى اجهادات متداخلة من الطور الاول والثاني كما يلي: [4]



$$\sigma_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[\begin{array}{l} K_I \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \\ K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \end{array} \right] \dots\dots\dots (4 a)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[\begin{array}{l} K_I \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \\ K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{array} \right] \dots\dots\dots (4 b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[\begin{array}{l} K_I \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \\ K_{II} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{array} \right] \dots\dots\dots (4 c)$$

$$\sigma_z = 0 \quad \text{For plane stress} \dots\dots\dots (4 e)$$

شكل منطقة التشوه اللدن حول رأس الشق: هنالك عدة معايير تستخدم في إيجاد

شكل منطقة التشوه اللدن في حالة تداخل الاطوار من أشهرها وادقها هي معيار (Von Mises)

و (Tresca) فالمعادلة التي تبين حدود اللدونة حول رأس الشق حسب معيار (Von Mises)

للإجهاد الخضوع كما يلي :

$$r(\theta) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{YS}} \right)^2 [f_x^2 + f_y^2 - f_x f_y + 3f_{xy}^2] \dots\dots\dots (5)$$

$$f_x = \left(\cos \frac{1}{2} \theta - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{1}{2} 3\theta \right) - \mu \left(2 \sin \frac{1}{2} \theta \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{1}{2} 3\theta \right) \dots\dots\dots (5 a)$$

$$f_y = \cos \frac{1}{2} \theta + \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{1}{2} 3\theta + \frac{1}{2} \mu \sin \theta \cos \frac{1}{2} 3\theta \dots\dots\dots (5 b)$$

$$f_{xy} = \frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{1}{2} 3\theta + \mu \left(\cos \frac{1}{2} \theta - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{1}{2} 3\theta \right) \dots\dots\dots (5 c)$$

$$\mu = \frac{K_{II}}{K_I} \dots\dots\dots (5 d)$$

اما المعادلة التي تبين حدود اللدونة حول رأس الشق حسب معيار (Tresca) للإجهاد القصوع كما يلي:

$$r(\theta) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{YS}} \right)^2 \left[\frac{1}{2} (f_x^2 + f_y^2) + f_{xy}^2 + \sqrt{\frac{(f_x^2 - f_y^2)^2}{4} + (f_x + f_y)^2 \cdot f_{xy}^2} \right] \dots \quad (6)$$

معايير التنبؤ بزاوية البدء لنمو الشق: هنالك عدة معايير قدمت من قبل الباحثين للتنبؤ بالزاوية التي تبدأ بها الشق بالنمو وفيما يلي بعض من تلك المعايير :

A: الاجهاد المماسي العظمى (Maximum Tangential Stress - MTS) هذا المعيار قدمه الباحثان (Erdogan, Sih) [11] وينص على أن الشق يبدأ بالنمو بالاتجاه الذي يكون فيه الاجهاد المماسي (σ_θ) الموجد على امتداد نصف قطر ثابت حول رأس الشق اعظم ما يمكن ويبدأ الشق بالنمو عندما يصل الاجهاد المماسي الى القيمة الحرجة ($\sigma_{\theta c}$) :

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad \& \quad \left[\frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial \theta^2} \right]_{\theta=\theta_0} < 0 \dots \dots \dots (7 a)$$

$$\tan^2 \frac{\theta}{2} - \frac{\mu}{2} \tan \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} = 0 \dots \dots \dots (7 b)$$

$$-\frac{3}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} \cos^3 \frac{\theta}{2} - \cos \frac{\theta}{2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] + \frac{1}{\mu} \left[\sin^3 \frac{\theta}{2} - \frac{7}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos^3 \frac{\theta}{2} \right] \right\} < 0 \dots \dots \dots (7 c)$$

$$\mu = \frac{K_I}{K_{II}} \dots \dots \dots (7d)$$

B: كثافة طاقة الانفعال الصغرى (Minimum Strain Energy Density-S) هذا المعيار قدمه (Sih) [12] وينص على أن الشق يبدأ بالنمو باتجاه الذي يكون فيها كثافة طاقة الانفعال الموجدة على امتداد نصف قطر ثابت حول رأس الشق اقل ما يمكن ويبدأ الشق بالنمو عندما يصل معامل كثافة طاقة الانفعال الى القيمة الحرجة (S_C):

$$\frac{\partial s}{\partial \theta} = 0 \quad \& \quad \left| \frac{\partial^2 s}{\partial \theta^2} \right|_{\theta=\theta_0} > 0 \dots\dots\dots (8 a)$$

$$\begin{aligned} & [2(1+k)\mu] \tan^4 \frac{\theta}{2} + [2k(1-\mu^2) - 2\mu^2 + 10] \tan^3 \frac{\theta}{2} - 24\mu \tan^2 \frac{\theta}{2} \\ & + [2k(1-\mu^2) + 6\mu^2 - 14] \tan \frac{\theta}{2} + 2(3-k)\mu \\ & = 0 \dots\dots (8 b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [2(k-1)\mu] \sin \theta - 8\mu \sin 2\theta + [(k-1)(1-\mu^2)] \cos \theta \\ & + [2(\mu^2 - 3)] \cos 2\theta > 0 \dots\dots (8 c) \end{aligned}$$

C: معدل طاقة الانفعال المتحرره العظمى (Maximum Energy Release -MERR)
(Rate) هذا المعيار قدمه (Hussain, et al) [13] وينص على أن الشق يبدأ بالنمو باتجاه الذي يكون فيها معدل طاقة الانفعال المتحرره (G) اعظم ما يمكن ويبدأ الشق بالنمو عندما يصل معدل طاقة الانفعال الى القيمة الحرجة (G_C) :

$$\frac{\partial G}{\partial \theta} = 0 \quad \& \quad \left| \frac{\partial^2 G}{\partial \theta^2} \right|_{\theta=\theta_0} < 0 \dots\dots\dots (9 a)$$

$$G = \frac{1}{E} (K_1^2 + K_2^2) \dots\dots\dots (9 b)$$

$$K_1 = \left(\frac{3}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right) K_I + \left(-\frac{3}{4} \sin \frac{\theta}{2} - \frac{3}{4} \sin \frac{3\theta}{2} \right) K_{II} \dots\dots\dots (9 c)$$

$$K_2 = \left(\frac{1}{4} \sin \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right) K_I + \left(\frac{1}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{3}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right) K_{II} \dots\dots\dots (9 d)$$

D: معيار (R_p) هذا المعيار قدمه (L.C Bian ، K.S Kim) [14] وينص على أن الشق يبدأ بالنمو باتجاه الذي يكون فيه نصف قطر منطقة التشوه اللدن الموجود حول رأس الشق وحسب معيار (Von Mises) اقل ما يمكن:

$$\frac{\partial R_P}{\partial \Theta} = 0 \text{ \& \; } \frac{\partial^2 R_P}{\partial \Theta^2} > 0 \dots\dots\dots (10 a)$$

$$2\mu \tan^4 \frac{\theta}{2} + (5 - 2\mu^2) \tan^3 \frac{\theta}{2} - 9 \mu \tan^2 \frac{\theta}{2} + (\mu^2 - 4) \tan \frac{\theta}{2} + \mu = 0 \dots\dots\dots (10 b)$$

$$(1 - \mu^2) \cos \theta + 3(1 - \mu^2) \cos 2\theta + 2\mu \sin \theta - 12\mu \sin 2\theta > 0 \dots\dots (10 c)$$

المواد المستخدمة في البحث

النماذج المستخدم في هذا البحث مصنوع من (AL-7020T6) حيث تعد من السبائك التجارية المهمة التي تستخدم في تطبيقات عديدة منها صناعة هياكل الدراجات الهوائية والنارية وبعض أجزاء الطائرات والسفن ويستخدم ايضاً في تطبيقات عسكرية كثيرة منها يدخل في صناعة العربات المدرعة وفي تركيب الجسور المؤقتة وغيرها. تم تحليل هذه السبيكة كيميائياً بواسطة جهاز مطياف (Spectrometer) والجدول (1) يبين التحليل الكيميائي لهذه السبيكة .

الجدول (1): التحليل الكيميائي لسبيكة (AL-7020T6) المستخدمة في البحث

العنصر	Fe	Cr	Mn	Cu	Mg	Ti	Zn
النسبة المئوية	0.565	0.239	0.095	0.16	1.08	0.022	4.74
العنصر	Si	V	Pb	Sn	Ni	Zr	Al
النسبة المئوية	0.268	0.005	0.007	0.001	0.008	0.11	Bal.



اما بالنسبة للماسكة المستخدمة للحصول على أطوار متداخلة من الأطوار الاول والثاني مصنوعة من الفولاذ الكربوني فالجدول (2) يبين الخواص الميكانيكية للمواد المستخدمة حسب مواصفة (ASTM-E8):

الجدول (2): الخواص الميكانيكية للمواد المستخدمة في البحث

	Elongation%	Ultimate Stress(Mpa)	Yield Stress(Mpa)	Hardness
(Al7020-T6) L	12	335	300	67.7 HRE
(Al7020-T6) T	11	323	280	67.7 HRE
Fixture	37.3	536	453	94 HRB

التجارب العملية

سبيكة الالمنيوم (AL-7020T6) ذات سمك (10mm) تم تقطيعها الى عينات مستطيلة موازية لاتجاه الدرفلة (LT) وعينات آخر عمودي على اتجاه الدرفلة (TL) وتم عمل شق جانبي في المنتصف طول العينة بطول (34mm) وعرض (0.18mm) تم عملها بواسطة ماكينة القطع بسلك (Wire Cutting) وتم استخدام مادة اللاصقة من نوع (Cyanoacrylate CN) في لصق مجسات الانفعال ومجسات قياس طول الشق كما موضح في الشكل (3). وتم تثبيت الماسكة في كل مره بزوايه مختلفة داخل جهاز فحص الشد والضغط عن طريق الشوكة الفولاذية وتم تثبيت عينات الفحص داخل الماسكة حيث تم تثبيت الماسكة بسبعة زوايا مختلفة داخل الشوكة وهي (90,75,60,45,30,15,0) كما موضح في الشكل (5) وتم تسليط حمل شد احادي المحور متزايد ببطء (Monotonic Load) وبمعدل ازاحة ثابت (Displacement Control) وبمقدار (0.3mm/min) على النصف العلوي للماسكة بينما تكون النصف السفلي للماسكة ثابتة لا تتحرك الى ان يحصل كسر في العينة نتيجة نمو الشق.

التحليل العددي

تم استخدام تقنية العناصر المحددة والمتمثلة باستخدام برنامج (ANSYS 14.5) لإيجاد كيفية توزيع الاجهادات وتمركزها حول الشقوق وكذلك إيجاد معامل شدة الاجهاد (K). إن القوى المسلطة من قبل جهاز فحص الشد تنتقل الى الماسكة ثم الى عينة الفحص ونفترض بأن F هي قوة مسلطة من قبل جهاز فحص الشد و α هي الزاوية التي تصنعها القوة المسلطة مع المحور الطولي للعينة كما موضح في الشكل (4) فتكون القوى المؤثرة على العينة كما يلي:

$$F_1 = F_6 = F \left(\frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{c}{b} \sin \alpha \right) \dots\dots\dots (11)$$

$$F_2 = F_5 = F \sin \alpha \dots\dots\dots (12)$$

$$F_3 = F_4 = F \left(\frac{1}{2} \cos \alpha + \frac{c}{b} \sin \alpha \right) \dots\dots\dots (13)$$

تم تحليل العينة داخل البرنامج باستخدام عنصر محدود من نوع (Plane 183) كما موضح في الشكل (6) وهو عنصر ثنائي الابعاد (2D) مستطيلة الشكل يحتوي على ثمانية عقد (node) كل عقدة من عقد هذا العنصر تكون درجة الحرية فيه ثنائي الدرجة (2degree of freedom) وهو قابلية الانتقال باتجاه محور (X) ومحور (Y) وتم استخدام عنصر محدود خاص تسمى (singularity element) لعمل الشبكة (mesh) في المنطقة الموجودة حول رأس الشق لأنه يمثل منطقة تمركز للإجهادات وتم تحليل الاجهادات في العينة تحت تأثير مستوي الاجهاد (Plane Stress) وتم تسليط القوة على الثقوب الثلاثة الموجودة في النصف العلوي للعينة وتم عمل تثبيت للعينة باتجاه محور (X) ومحور (Y) عن طريق الثقوب الثلاثة الموجودة في النصف السفلي للعينة وتم عمل تخطيط شبكي (Mesh) للعينة يحتوي على عدد عناصر (33433) وعدد عقد (65656) .

النتائج ومناقشتها

تأثير اتجاه الدرفلة على نمو الشقوق

كما ذكرنا انفاً أن العينات المستخدمة في هذه الدراسة تنقسم الى قسمين عينات تسمى (LT) و (TL) واستنتجنا من خلال التجارب العملية بأن عينات (LT) تتصف بمتانة كسر أكبر من عينات (TL) لأن الأخير تنشأ فيها الشقوق بصورة اسهل واسرع من الاولى وكما موضح في الشكل(8).

تأثير زاوية التحميل على متانة الكسر (Fracture Toughness)

تم إيجاد قيم معامل شدة الاجهاد عند حمل نشوء الشقوق (initiation load crack) للطورين الأول والثاني عند زوايا تحميل مختلفة بواسطة معادلة رقم (3) وبواسطة برنامج (ANSYS) لغرض مقارنة النتائج ومعرفة مدى مطابقة النتائج الجانب النظري مع تقنية العناصر المحددة (FEM). وقيم معامل شدة الاجهاد عند حمل النشوء تسمى بمعامل شدة الاجهاد الحرجة (K_{IIC}, K_{IC}) وقد رسمت العلاقة بين (K_{IIC}, K_{IC}) وزاوية التحميل كما في الشكل (7) حيث يلاحظ هنالك توافقاً جيداً بين الجانب النظري وبرنامج (ANSYS) ويلاحظ أيضاً ان معامل شدة الاجهاد الحرج للطور الأول (K_{IC}) تقل مع زيادة زاوية التحميل (زيادة نسبة الطور الثاني) ومعامل شدة الاجهاد الحرج للطور الثاني (K_{IIC}) تزداد مع زيادة الزاوية التحميل (زيادة نسبة الطور الثاني) ويكون معامل شدة الاجهاد الحرج للطورين الأول والثاني (K_{IIC}, K_{IC}) متساوية عند زاوية تحميل (66°) وتكون معامل شدة الاجهاد الحرج للطور الأول (K_{IC}) اكبر من الطور الثاني (K_{IIC}) عند زوايا تحميل اقل من (66°) وهذا يجعل طور الانفتاح (Opening mode) هو المسيطر ، وتكون معامل شدة الاجهاد الحرج للطور الثاني (K_{IIC}) اكبر من الطور الاول (K_{IC}) عند زوايا تحميل اكبر من (66°) وهذا يجعل طور القص (Shearing mode) هو المسيطر.

اما معامل شدة الاجهاد الفعال (K_{eff}) فقد تم تعيينه عن طريق العلاقة التالية:

$$K_{eff} = \sqrt{K_{IC}^2 + K_{IIC}^2} \dots\dots\dots (14)$$

ومن الشكل (8) حيث يلاحظ أن معامل شدة الاجهاد الفعال (K_{eff}) يقل مع زيادة زاوية التحميل (زيادة نسبة الطور الثاني) ويلاحظ أيضاً بأن معامل شدة الاجهاد الفعال (K_{eff}) عند للطور الأول أكبر من الطور الثاني وهذا يدل على أن متانة الكسر عند الطور الأول أكبر من متانة الكسر عند الطور الثاني.

تأثير زاوية التحميل على معدل طاقة الانفعال المتحررة (Strain Energy Release Rate)

عن طريق استخدام علاقة رقم (1) التي تربط بين معامل شدة الاجهاد ومعدل طاقة الانفعال المتحررة نستطيع إيجاد الاخير وتسمى بالقيم الحرجة (G_{IIC}, G_{IC}) اما طاقة الانفعال

المتحررة الكلية (G_t) فقد تم أيجادها عن طريق جمع (G_{IC}) و (G_{IIC}) ، حيث يلاحظ في الشكل (9) ان معدل طاقة الانفعال الحرجة للطور الأول (G_{IC}) تقل مع زيادة زاوية التحميل ومعدل طاقة الانفعال الحرجة للطور الثاني (G_{IIC}) تزداد مع زيادة زاوية التحميل اما بالنسبة الى طاقة الانفعال المتحررة الكلية (G_t) نلاحظ بأنها تقل مع زيادة زاوية التحميل وهذا يدل على أن زيادة زاوية التحميل يؤدي الى تقليل الطاقة اللازمة لنمو الشق أي ان الشقوق في معدن الالمنيوم يحتاج الى طاقة أعلى لكي تنمو عندما يكون عند الطور الأول أكثر مما عليه عندما يكون عند الطور الثاني.

تأثير الحمل المسلط على أزاحه الانفتاح لفم الشق (Crack Mouth Opening) (Displacement)

عند زيادة الحمل المسلط على العينة يتحرك سطح الشق (crack faces) مبتعداً عن بعضهما هذه الازاحة التي يتحركها سطح الشق تم تسجيله بواسطة (clip gauge) ، حيث يلاحظ في الشكل (10) مع زيادة الحمل المسلط تزداد (CMOD) في بداية امر بصورة قليلة نسبياً الى ان يصل الحمل الى ذروته (maximum load) بعد ذلك تزداد بصورة سريعة لأن الشق سوف ينمو وهذا يؤثر على (CMOD) ونلاحظ أيضاً مع زيادة زاوية التحميل من (0°) الى (60°) فإن قيمة (CMOD) عند الكسر لا تتأثر بشكل كبير ولكن بعد هذه الزاوية قيمة (CMOD) عند الكسر تقل لأن اجهاد القص يكون هو المسيطر بعد زاوية حمل (66°) واجهاد القص كلما زاد قلّه معه أزاحه الانفتاح لسطح الشق (CMOD) وزاد أزاحه الانزلاق (CMSD) لسطح الشق .

تأثير الحمل المسلط على نمو الشقوق (Crack Growth)

تم قياس مقدار استطالة الشق ($a\Delta$) عن طريق مجسات مخصصه لهذه الأغراض، ففي الشكل (11) نلاحظ هنالك ثلاث مراحل لنمو الشقوق أولاً زيادة حمل المسلط مع عدم وجود استطالة للشق ، ثانياً زيادة الحمل المسلط مع زيادة استطالة الشق ويكون فيها سرعة نمو الشق بطيئة وهذه المرحلة تسمى بالمرحلة الأستقرارية (stable crack growth) بحيث عند أزاله الحمل المسلط سوف يستقر الشق في مكانه ، اما المرحلة الثالثة تسمى بعدم الاستقرارية

(unstable crack growth) او مرحلة الانهيار ويزداد فيها سرعة نمو الشق وبالتالي من انخفاض الحمل المسلط وهي أخطر مرحلة من مراحل الثلاثة .

تأثير زاوية التحميل على شكل منطقة التشوه اللدن حسب معياري (Von Mises) و (Tresca) للإجهاد الخضوع

يوضح الشكل (12) كيفية تغير شكل منطقة التشوه اللدن حسب معيار (Von Mises) لإجهاد الخضوع عند زوايا تحميل مختلفة وفي الشكل (13) يوضح كيفية تغير شكل منطقة التشوه اللدن حسب معيار (Tresca) للإجهاد الخضوع عند زوايا تحميل مختلفة ففي الشكلين نلاحظ بأن شكل وحجم واتجاهية منطقة التشوه اللدن (plastic zone) الموجودة حول رأس الشق تعتمد بصورة كبيرة على زاوية التحميل. واستخدمنا أيضاً برنامج (ANSYS) من أجل التحقق من شكل منطقة التشوه اللدن بالنسبة الى معيار (Von Mises) كما موضح في الشكل (14) حيث يلاحظ بأن منطقة التشوه اللدن مشابهة تماماً لما تم الحصول عليه من الجانب النظري .

تأثير زاوية التحميل على توزيع الاجهادات في عينات (CTS)

لوحظ باستخدام برنامج (ANSYS) بأن عينات (CTS) تمتلك منطقتان لتركز الاجهاد هما رأس الشق (Crack tip) وثقوب التثبيت (Holes) لذلك تم استخدام معيار (Von Mises) للفشل لمعرفة أي من المواقع يحصل فيه الفشل أولاً وأيهما تشكل خطورة أكبر وأظهرت نتائج التحليل كما موضح في الشكل (14) بأن رأس الشق (Crack tip) يكون فيه تركز الاجهاد اعلى بكثير من الثقوب (Holes) وهو الذي يشكل خطورة أكبر من بقية المواقع الموجودة في العينة واطهرت النتائج أيضاً بان توزيع الاجهادات عند رأس الشق يتأثر بشكل كبير بزاوية التحميل حيث كلما زادت زاوية التحميل زادت ميلان توزيع الاجهادات عند رأس الشق ، واطهرت نتائج أيضاً بأن توزيع الاجهادات عند الثقوب يتأثر بزاوية التحميل حيث كلما زاد زاوية التحميل زادت تركز الاجهادات عند الثقوب ولكن يبقى ضمن حدود المرونة (Elastic Stress) لذلك نستنتج بأن عينات (CTS) بالأبعاد المذكورة سابقاً يصلح للاستخدام (Safe) عند كل الزوايا وأن موقع حصول الفشل في هذه العينات يكون عند الشق الاصطناعي.

تأثير زاوية التحميل على زاوية بدء الشق (Crack Initiation Angle)

تم قياس زاوية بدء الشق عملياً عن طريق قياس الزاوية بين مستوي سطح الشق الابتدائي ومماس سطح الشق في المراحل الأولى من نموها عند المستوي الوسطي للسلك العينة وتم مقارنة النتائج مع النظريات التنبؤ بزاوية بدء الشق . وظهرت النتائج وكما موضحه في الجدول (3) بالنسبة لعينات (LT) هنالك تطابق جيد بين نتائج تلك النظريات ونتائج الجانب العملي باستثناء الزاوية (90) عند الطور الثاني (mode II) حيث يكون سطح الكسر مسطحاً بنفس مستوي سطح الشق الابتدائي (original crack plane) نتيجة حمل القص الذي تعرض لها، اما بالنسبة لعينات (TL) فلا يمكن تطبيق تلك النظريات عليها حيث يلاحظ بأن الفرق بين نتائج الجانب النظري والعملي يزداد مع زيادة زاوية التحميل.

الجدول (3): زاوية بدء الشق (θ_0) عند زوايا تحميل مختلفة لعينات (LT) و (TL)

angle	Exp. (LT)	Exp. (TL)	MTS-criterion	S-criterion	G-criterion	R _p -criterion
0	3	0	0	0	0	0
15	14	10	14.705	14.2627	14.705	14.4892
30	24	21	26.345	24.443	26.614	25.393
45	37	32	37.431	33.748	37.887	35.714
60	50	17	48.1672	43.9879	48.1672	46.9288
75	65	0	59.058	58.374	59.373	61.926
90	0	0	70.528	80.333	70.53	83.621

الاستنتاجات

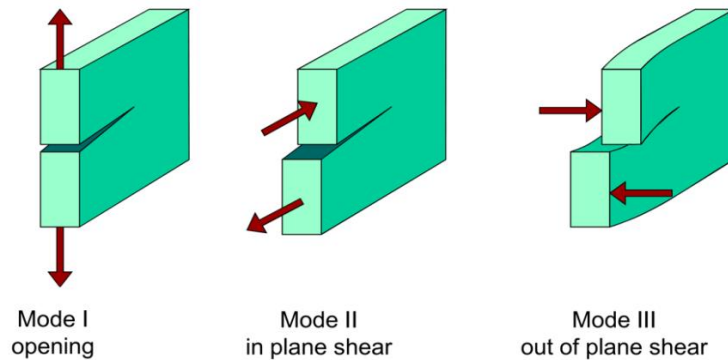
1- عينات (LT) تتحمل قوى أكبر وذات متانة كسر عالية مقارنة مع عينات (TL) ، وهنالك توافقاً جيداً بين نتائج الجانب النظري ونتائج برنامج (ANSYS).

2- معامل شدة الاجهاد الحرج للطور الأول (K_{IC}) تقل مع زيادة الزاوية التحميل (زيادة نسبة الطور الثاني) بينما معامل شدة الاجهاد الحرج للطور الثاني (K_{IIC}) يزداد مع زيادة الزاوية التحميل وتكون معامل شدة الاجهاد الحرج للطورين الأول والثاني (K_{IIC}, K_{IC}) متساوية عند زاوية تحميل (66°)، ومتانة الكسر عند الطور الأول (K_{IC}) أكبر من الطور الثاني (K_{IIC}) وهذا يدل على أن معدن الالمنيوم الحاوي على شقوق متين عند حمل الشد واقل متانة عند حمل القص.

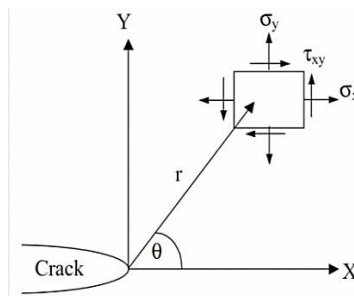
3- زيادة زاوية التحميل يؤدي الى تقليل الطاقة اللازمة لنمو الشق (G_I) أي ان الشقوق في معدن الالمنيوم يحتاج الى طاقة أعلى لكي ينمو عندما يكون الحمل المسلط عليها عند الطور الأول أكبر مما عليه عندما يكون عند الطور الثاني.

4 - شكل وحجم واتجاه منطقة التشوه اللدن الموجود حول رأس الشق تتغير مع تغير زاوية التحميل.

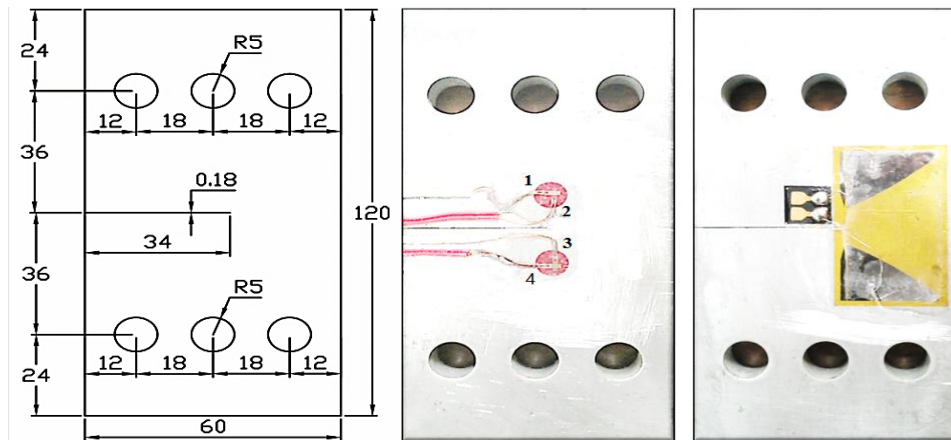
5- عينات (LT) يمكن ان تطبق عليها معايير (MTS, S, G, R_p) للتنبؤ بزاوية بدء الشق لأنها متطابقة مع نتائج الجانب العملي عند جميع الزوايا ماعدا عند الطور الثاني حيث يكون سطح الكسر مسطحاً. أما بالنسبة الى عينات (TL) فلا يمكن تطبيق تلك النظريات عليها.



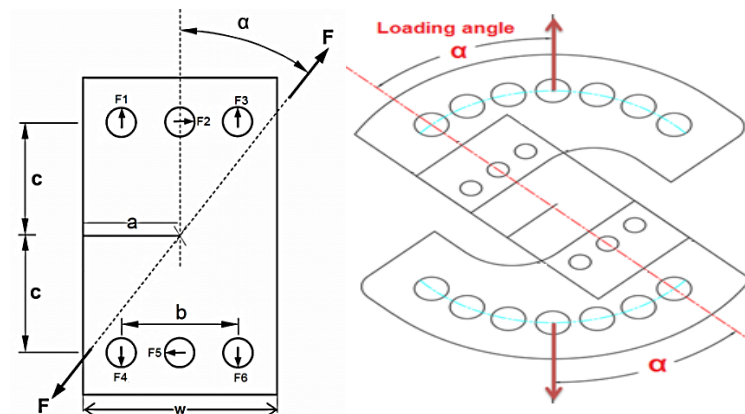
الشكل (1) يوضح اطوار الكسر



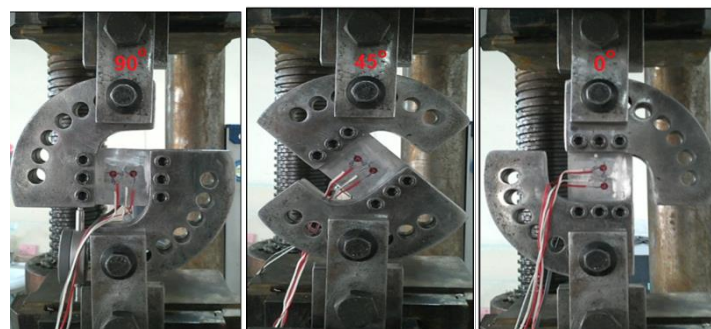
الشكل (2) نظام الاحداثي ومركبات الاجهاد حول رأس الشق بأحداثي الديكارتي



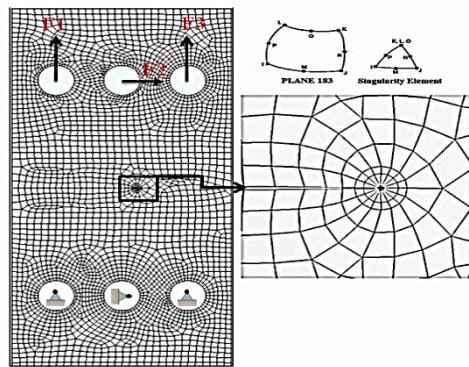
الشكل (3) يوضع أبعاد عينة الاختبار والمظهر الامامي والخلفي لها



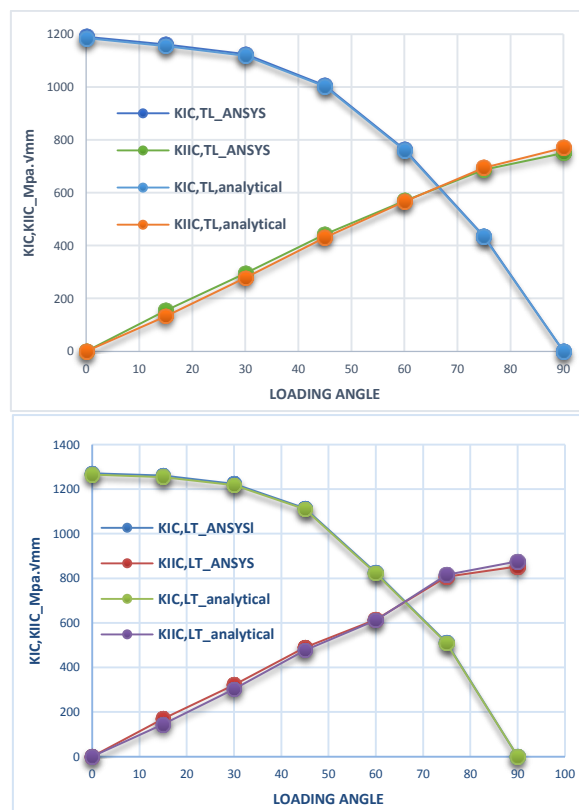
الشكل (4) تحليل القوى على العينة



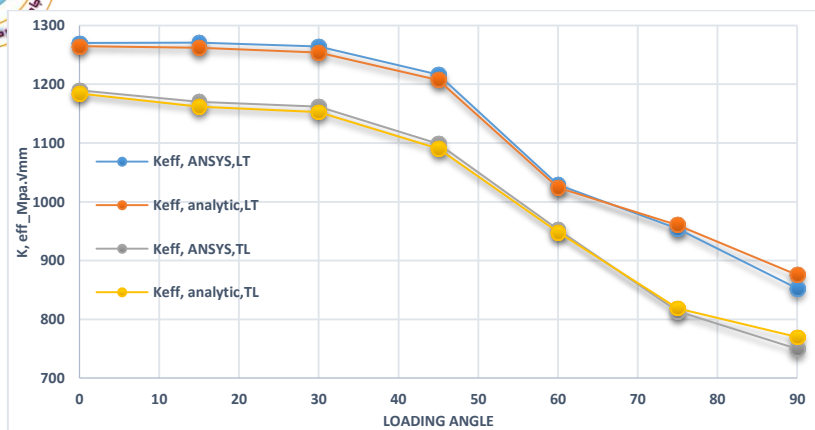
الشكل (5) الماسكة والعينة عند بعض زوايا التحميل



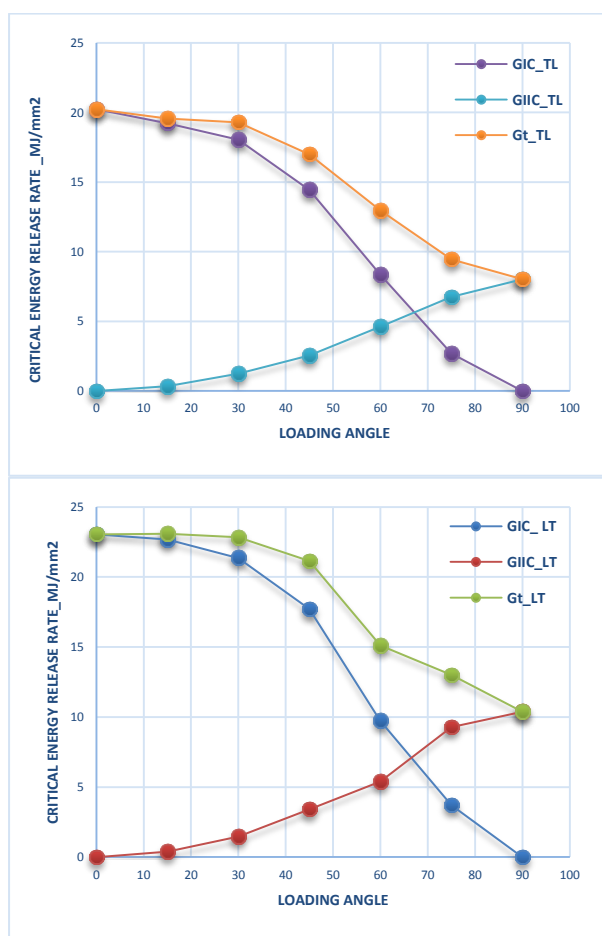
الشكل (6) التخطيط الشبكي للعينات بواسطة عنصر المحدود المسمى (Plane183)



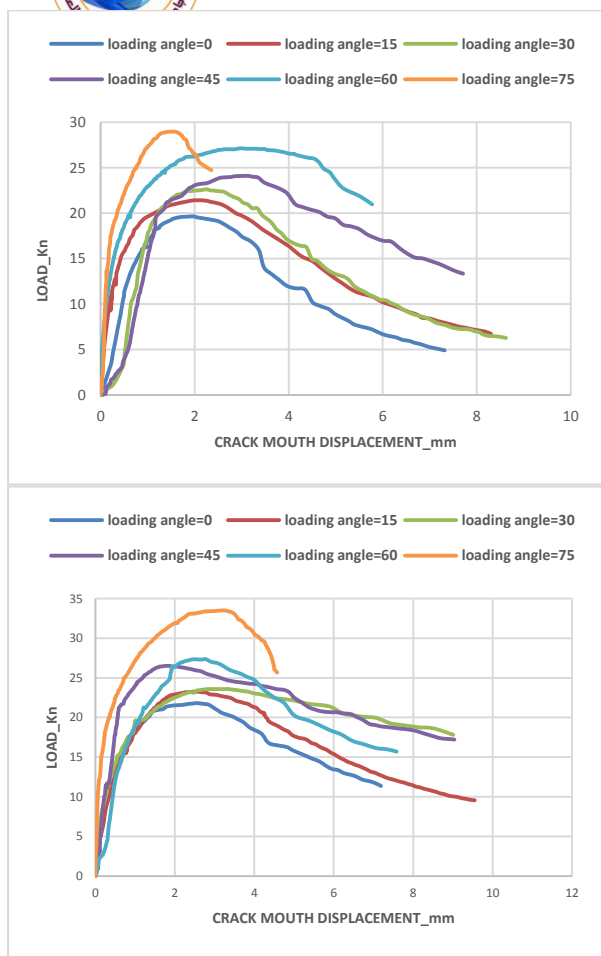
الشكل (7) تغير متانة الكسر للطور الأول والثاني مع تغير زاوية التحميل لعينات (TL) و (LT)



الشكل (8) تغير متانة الكسر (K_{eff}) مع تغير زاوية التحميل لعينات (LT) و (TL)



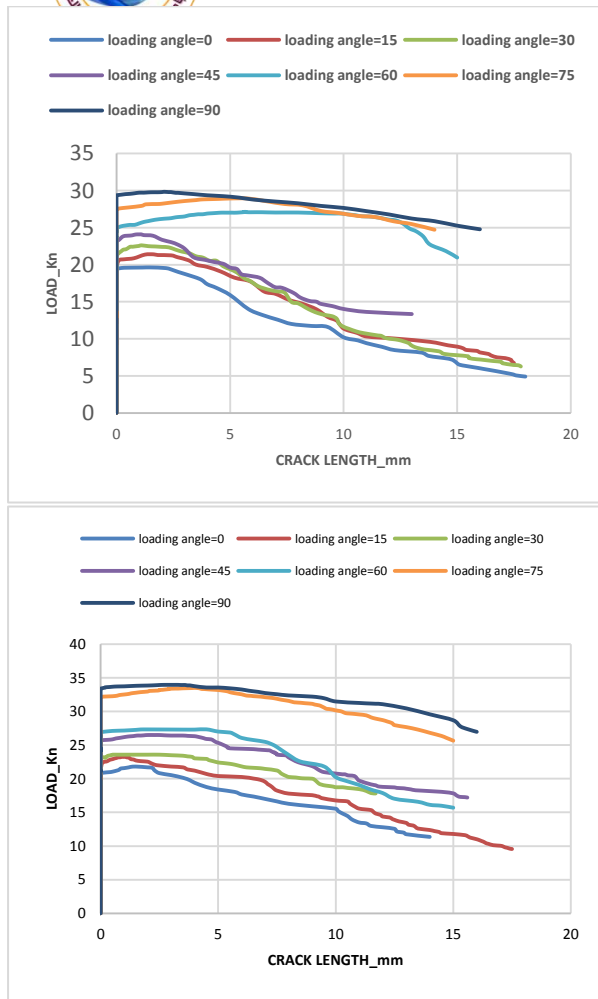
الشكل (9) تغير معدل طاقة الانفعال المتحررة مع تغير زاوية التحميل لعينات (LT) و (TL)



(b)

(a)

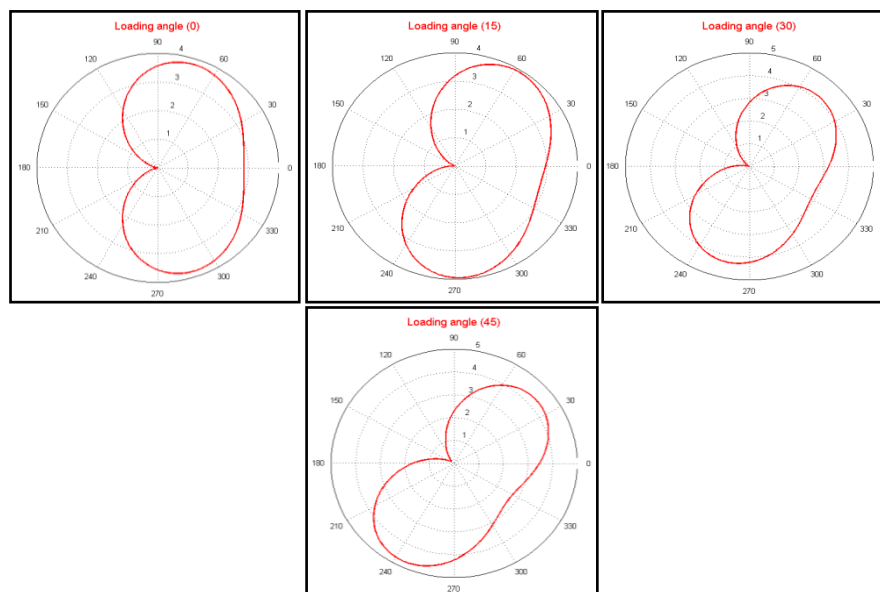
الشكل (10) يوضح العلاقة بين حمل المسلط وإزاحة الانفتاح لقم الشق: (a) لعينات (LT) ، (b) لعينات (TL)

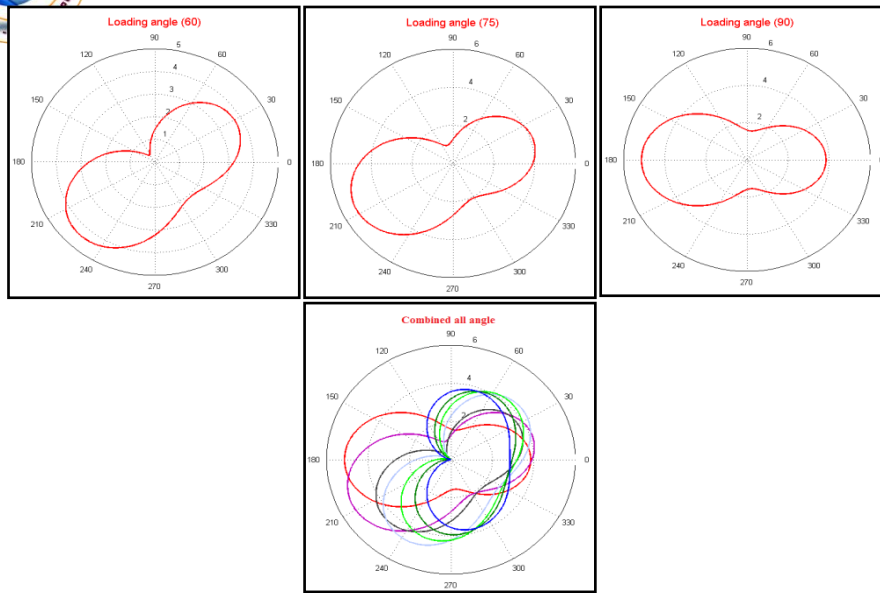


TL (b)

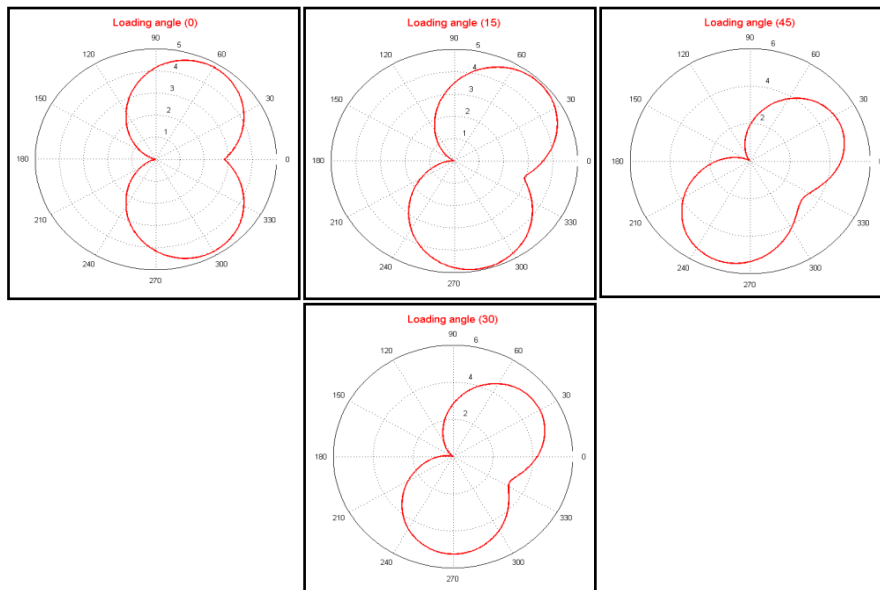
LT (a)

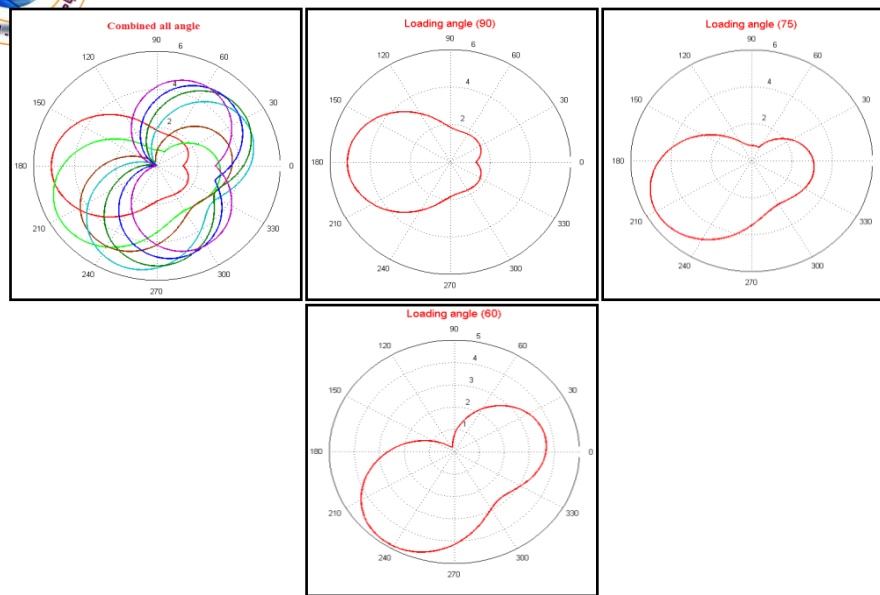
الشكل (11) يوضح العلاقة بين حمل المسلط و طول الشق: (a) لعينات (LT) ، (b) لعينات (TL)



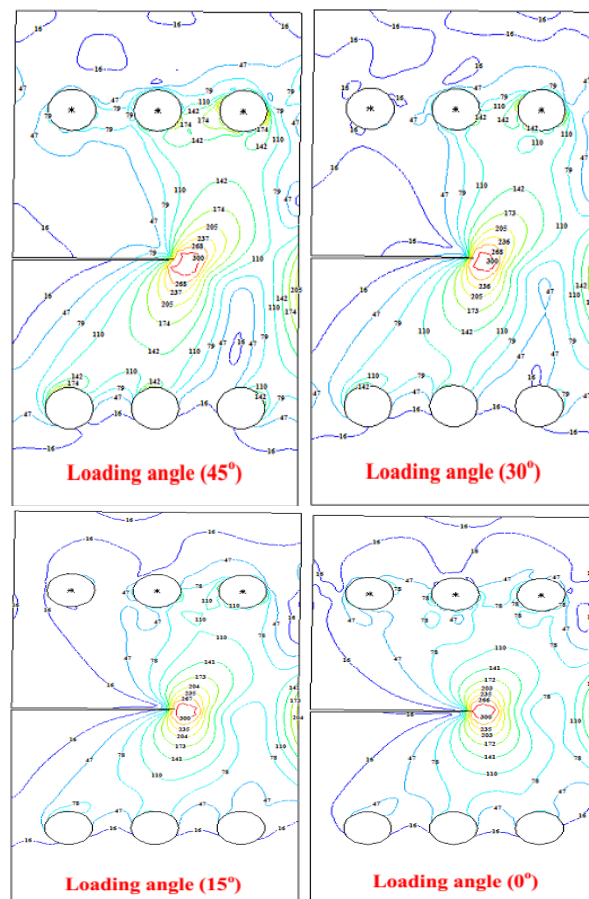


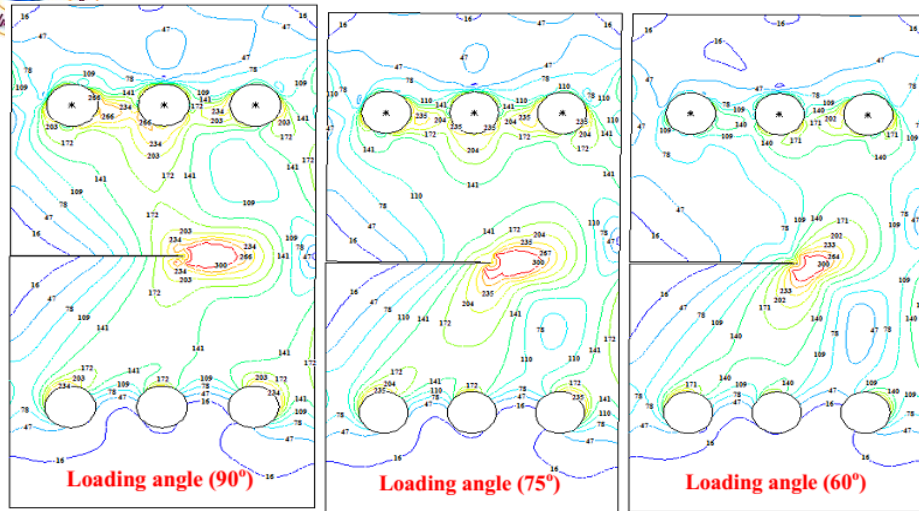
الشكل (12) شكل منطقة التشوه اللدن حسب معيار (Von Mises) عند حمل النشوء (Crack Initiation)
(Load)





الشكل (13) شكل منطقة التشوه اللدن حسب معيار (Tresca) عند حمل النشوء (Crack Initiation Load)





الشكل (14) يوضح توزيع الاجهادات (Stress Contour) بوحدة (Mpa) حسب معيار (Von Mises) عند حمل النشوء (Crack Initiation Load)

المصادر

- [1]. Wole Soboyejo, "Mechanical Properties of Engineered Materials", Marcel Dekker, USA,
- [2]. Ashok Saxena, "Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers", CRC Press LLC, USA,
- [3]. Hiroshi Tada, Paul C. Paris, George R. Irwin, "The Stress Analysis Of Cracks Handbook", Del Research Corporation ,Hellertown, Pennsylvania,1973.
- [4]. Nestor Perez , "Fracture Mechanic", Kluwer Academic, Boston, USA, 2004.
- [5]. H.R. Dong , W.L. Guo, "Mechanism Analysis of Thickness Effect on Mixed Mode I/II Fracture of Lc4-Cs Aluminum ", ACTA Metallurgica Sinica, Vol. 17, No. 3, pp. 255-262.
- [6]. Byron E. Amstutz, Michael A. Sutton, David S. Dawicke, Michael L. Boone , "Effect of Mixed Mode I/II Loading and Grain Orientation on



Crack Initiation and Stable Tearing In 2024T3 Aluminum", Fatigue and Fracture Mechanic, Vol.27, pp.105-125, (1997).

[7]. T. Dung Do, R. Leroy, D. Joly, " Computational Contour of Mixed Mode Crack-Tip Plastic Zone for Aluminum Alloy 2024T351", Int. J. Comp. Mat. Sci. Eng. , Vol.2, No.1, pp.1-12.

[8]. Sha Jiangbo, Sun Jun, Zhu Pin, Deng Zengjie, Zhou Huijiu, "Study on The Behavior of Elastic-Plastic Fracture Under Mixed I+II Mode Loading in Aluminum Alloy Ly12-J-Integral Analysis", International Journal of Fracture, Vol. 102, pp.141–154, (2000).

[9]. T.L Anderson, "Fracture Mechanic Fundamentals and Applications", 3th Ed, Taylor & Francis Group, 2005.

[10]. Richard H. A. , "Bruchvorhersage Bei Überlagerter Normal- und Schubbeanspruchung Von Rissen" , VDI Forschungsheft 631. Düsseldorf: VDI-Verlag , pp.1-60, (1985).

[11]. Erdogan F., Shi G.C., "On The Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear" , Journal of Basic Engineering, Vol. 85, pp. 519-527, (1963).

[12]. Sih G.C., "Strain Energy Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems", International Journal of Fracture, Vol. 10, No.3, pp. 305-321, (1974).

[13]. Hussain M. A., Pu S. L., Underwood J., "Strain Energy Release Rate for A Crack Under Combined Mode I and Mode II", ASTM STP 560, pp. 2–28, (1974).

[14]. L. C. Bian , K. S. Kim, "The Minimum Plastic Zone Radius Criterion for Crack Initiation Direction Applied to Surface Cracks and Through Cracks Under Mixed Mode Loading", International Journal of Fatigue, Vol. 26, pp.1169-1178, (2004).



Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)

Volume 12, Issue 3, June 2017

ISSN 1992 – 0849