كلال منخفض الدورات للفولاذ متوسط الكاربون DINCK50 [+]
LOW CYCLE FATIGUE OF MEDIUM CARBON STEEL DIN CK50

عدنان نعمه عبود [*] زياد نواف حجي [**] دريا سرور محمد صالح[**]

المستخلص:

إشتمل البحث على اختبار فشل الكلال بعدد دورات منخفض (LCF) للفولاذ متوسط الكاربون (DIN CK50) بحالات ثلاث، المستلمة (مشكل على البارد) والمخمرة عند درجة حرارة (850^oC) و(1000^oC). أُجري الأختبار على عيناتٍ قياسية من النوع المسند من جهةٍ واحدةٍ (Cantilever Beam) . أكدت نتائج فحص الكلال أن الفولاذ بحالاته الثلاث يتعرض الى الإصلاد الإنفعالي وان العينات المخمرة اكثر تحمـــــلا لفشل الكلال عند عدد دورات منخفضة . تراوحت قيم أُس معامل متانة الكلال (b) من (0.07-) الى (0.12-) وقيم أُس معامل مطيلية الكلال (c) من (0.51-) الى (0.73-) والتي تقـــع ضمن الحدود المسجلـــة للمعـــادن . سجل الفولاذ المخمر عدد دورات إنتقالية (N_T) أعلى من الحالة المستلمة مما يؤكد أن الفولاذ المخمر سيتعرض الى عدد دورات أعلى للإنتقال الى منطقة التشوه اللدن . يمكن الأستفادة من معلومات منحنى الإجهاد–الإنفعال الهندسي بدلالة (σ_u/σ_y) وقيمة أس الاصلاد الانفعالي (n) للتنبؤ بسلوك الفولاذ (DIN CK50) عند فشل الكلال بعدد دورات منخفضه (LCF) .

Abstract:

The present work encompasses Low Cycle Fatigue (LCF) of the steel DIN CK50 with three conditions; as received (cold working), annealing at 850^oC and 1000^oC. The LCF tests carried out using standard specimens cantilever beam types. The results were confirmed that the steels sustained cyclic hardening, with annealing conditions more resistance to LCF. The values of fatigue strength exponent (b) are varying from (-0.07) to (-0.12) and fatigue ductility exponent (c) from (-0.51) to (-0.73), whereas these values within the general limitations of the metals. The number of transition cycle (N_T) for annealing conditions is more comparing to the as received which emphasis that the annealed steels 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 hardening exponent (*n*) can be used to estimate the behavior of the steel DIN CK50.

الجانب النظري:

يشتمل تحليل الكلال على ثلاثة طرق رئيسية ، فشل الكلال بدلالة عمـــر الإنفعال (Strain-Life) وفشل الكلال بدلالة عمر الإجهاد (Stress-Life) وفشل الكلال بدلالة آليات الكـــسر (Fracture Mechanism) ، ويمثـــل الفـــشل بدلالة عمر الإنفعال الأكثر إستخداماً في الوقت الحاضر . غالباً مايُربط الفشل بدلالة عمر الإنفعال بدلالة بدء الـــشقوق بينما يمثل فشل الكلال بدلالة عمر الإجهاد العمر الكلي للجزء دون أن يميز بين بدء الشق ونموه .اما الطريقة الثالثـــة

[+] تاريخ استلام البحث ٢٠١٠/٤/١ ،تاريخ قبول النشر ٢٠١٠/١٢/٩ .

[*] استاذ مساعد / الكلية التقنية– بغداد .

[**] مدرس مساعد /الكلية التقنية–السليمانية .

فهي تبدأ بفرضية شقٍ معلوم الحجم ثم يتم إيجاد نمو الشق ولذلك تسمى-ايضا- عمر الكسر (Fracture Life) . يستفاد عادةً من هذهِ الآلية في تحديد مدة الصيانة للجزء . يستخدم عمر الإنفعال أحياناً لإيجاد عمر الشق ويمثل بدء الشق مضافاً اليه عمر الشق العمر الكلي للجزء . **إن** معظم الأجزاء تكون عُرضَةً لإجهادات مرنة دورية إلاّ أن الحزوز ومناطق اللحام أو مركزات الإجهادات الموجودة قد ينتج عنها إنفعالات لدنة دورية موضعية وبذلك فإن هناك حاجة الى إستخدام الإنفعالات الموضعية بوصفها متغيرا مهماً في دراسة عمر الكلال . بدأ هذا الإهتمام مع نهاية ١٩٥٠ وأستخدم بشكل فعّال للتنبؤ بعمر الكلال للأجزاء . إن عمر الإنفعال يُمَثّل بمنحنى بين الإنفعال وعمر الكلال والذي يمكن الحصول عليه من إختبارات كلال يتم التحكم به إنفعالياً بإستخدام عينات المادة المراد إختبارها ، وغالباً يتم التوصية بإجراء هذا النوع من الإختبار لأن المادة عند مركزات الإجهاد أو الحزوز ربما تكون في تشوه لدن دوري ، في حين يسلك الجزء باكمله سلوكاً مرناً خلال دورة التحميل [1-9] .

يصنف فشل الكلال عند عدد دورات أقل من (10^4) واجهاد اعلى من اجهاد الخضوع على أنه منخفض الدورات ، بينما يُصنف فشل الكلال عند دورات أكثر من (10^4) واجهاد اقل من اجهاد الخضوع بكلالٍ عالي الدورات . لقد أشّارت معادلة (Coffin-Manson) الخاصة بفشل الكلال (LCF) الى أن الإنفعال اللدن هو السائد في هذا النوع من الفشل . وقد أُجري على المعادلة المذكورة العديد من التعديلات .أن قيم الكلال بدلالة الأنفعال اللدن ($\varepsilon_p - N$) يمكن أن تكون خطية عند رسمها بأستخدام احداثيات لوغاريتمية ، ويرتبط الإنفعال اللدن وفق المعادلة الآتية [10-13] :-

$$\Delta \varepsilon_p / 2 = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث أن :

$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$ = سعة الإنفعال اللدن (plastic strain amplitude)

$2N_f$ = عدد الإنقلابات للفشل (reversals to failure)

ε'_f = معامل مطيلية الكلال (fatigue ductility coefficient)

c = أُس مطيلية الكلال (fatigue ductility exponent)

تُعد (ε'_f & c) أيضا" خواص كلال المادة وتكون قيمة معامل مطيلية الكلال مساوية تقريباً لمطيلية الكسر الحقيقي (true fracture ductility) بينما تتراوح قيمة (c) بين (-1) و(-0.5). وبالرجوع الى المعادلة (1) فإن الإنفعال الكلي يمثل مجموع الإنفعالات المرنة واللدنة ويمكن إعادة كتابة المعادلة (1) بدلالة سعة الإجهاد [12,13] :-

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

ويمكن التعبير عن الأنفعال المرن كما يأتي :-

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

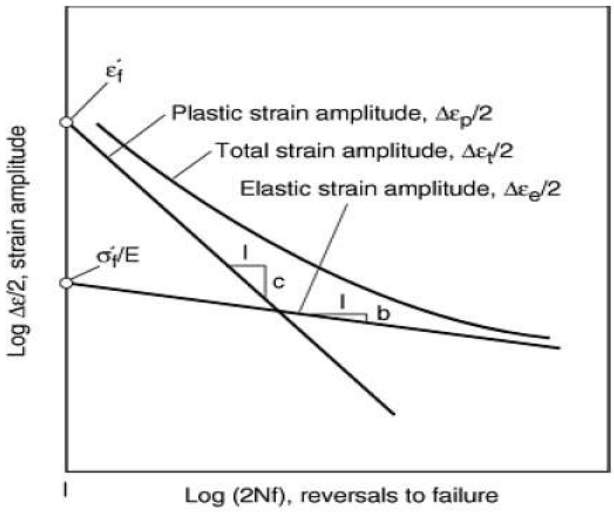
وباستخدام المعادلة (3) يمكن التعبير عن سعة الإنفعال المرن بدلالة عمر الفشل(life to failure) :-

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (٤)$$

وباستخدام المعادلة (1&4) فإن الإنفعال الكلي يمكن اعادة كتابته كما يأتي :-

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \varepsilon'_f(2N_f)^c \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

تعد المعادلة (5) أساس طريقة عمر الإنفعال وتسمى علاقة عمر الإنفعال (strain-life relation) [10-13] .



شكل-١: منحنى فشل الكلال منخفض الدورات [13]

يمكن التعبير عن المعادلة (٥) بيانياً والقول إن معادلتي الإنفعال المرن والانفعال اللدن تكون خطية عند رسمها على مقياس لوغاريتمي وإن سعة الإنفعال الكلي $(\Delta\varepsilon/2)$ يمكن رسمها من جمع قيم الإنفعال المرن والانفعال اللدن وكما هو موضح في الشكل (١).

<u>الجزء العملي :</u>

إشتمل البحث على تقييم خواص الكلال بدلالة عمر الإنفعال للفولاذ الكاربوني (DIN CK50) تحت حالات مختلفة من الحجم الحبيبي والكسر الحجمي للفرايت والبرلايت الناتج من المعاملات الحرارية لدراسة سلوك الفولاذ المذكورة ضمن هذا المدى من عمر الكلال. أستخدمت قضبان من الفولاذ بقطر (19 mm) (قضبان القائدة لسيارة نوع اوبل الالمانية Drive shaft) لإجراء الاختبارات المختلفة. أجري الفحص الكيمياوي في شركة نصر العامة بجهاز من نوع (Thermo ARL 3460, Emission Spectrometer) ، وأظهر التحليل الكيمياوي تطابق الفولاذ مع متطلبات المواصفة الدولية (جدول-١) .

أستخدمت عينات من قضبان بحالتها المستلمة (مشكلة على البارد cold working) بينما أجريت معاملتان حراريتان أخريتان لقضبان اخرى لغرض المقارنة:-

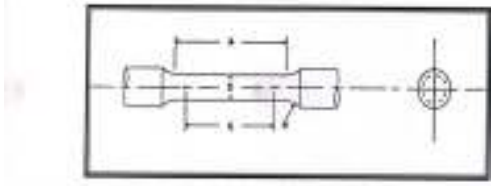
أولاً : تخمير (Annealing) الفولاذ عند درجة حرارة (850^oC) باستخدام فرن كهربائي (Mafull Furnace) بمعدل تسخين بلغ ($150^oC/hr$) وتركت لمدة ساعة عند الدرجة المذكورة (soaking time) والتبريد داخل الفرن للحصول على عينة مخمرة تماماً لدراسة عمر الإنفعال .

جدول-١: التركيب الكيمياوي للفولاذ الكاربوني DIN CK50

Elements / Materials	%C	% Si	% Mn	% P	% S	% Fe
Nominal chemical composition	0.47-0.55	≤ 0.4	0.60-0.90	0.035	0.03	Balance
Actual chemical composition	0.411	0.209	0.831	0.0297	0.012	Balance

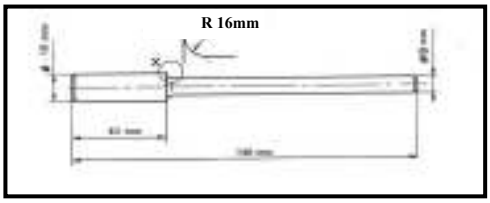
ثانياً : تخمير الفولاذ عند درجة حرارة (1000^oC) وتركه لمدة ساعتين عند الدرجة المذكورة والتبريد داخل الفرن للحصول على عينة مخمرة –ايضا– بنسبة فرايت وبرلايت مختلفة فضلا عن حجوم حبيبات مختلفة .

تم تصنيع عينات اختبار الشد من الفولاذ وفقاً للمواصفة الدولية ASTM E660 (شكل-٢) بواقع (١٢) عينة اربعة عينات لكل حالة. أُستُخدمَ جهاز شد من نوع (GUNT WP 300-20 KN – Universal Material Tester) لإجراء الإختبار وأعتُمدت النتائج متوسطاً لأربعة إختبارات لكلِ حالة . تم تصنيع عينات الكلال من الفولاذ بحالاته الثلاثه وفقاً للمواصفة القياسية (ASTM) (شكل-٣) وبواقع (١٢) عينة لكل حالة.



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-٢: عينة الشد



شكل-٣: عينة اختبار الكلال

أُجريت عملية التنعيم على عينات اختبار الكلال بعد عملية التشغيل باستخدام ورق تجليخ (emery papers) من كاربيد السليكون وبدرجات مختلفة التدريج (ASTM grades 600,800,1000,1200,2000) ، ثم أُجريت عملية الصقل (polishing) باستخدام عالق الألومينا مع القماش الخاص به (cloth) .

نفذ إختبار الكلال باستخدام جهاز من نوع (WP 140 Fatigue Testing Apparatus) الذي يعمل بطريقة الإنحناء الدوار لعينة مثبتة من طرف واحد وسائبة من الطرف الأخر (cantilever beam) بقيمة (R=-1) أي أن الاجهاد متعاكس تماماً (Completely Reversed Stress) حيث إن (R) هي نسبة الإجهاد الأدنى الى الإجهاد الأعلى($R = \sigma_{min.}/\sigma_{max.}$) .

تم احتساب الحجم الحبيبي بتقنية تقاطع الخطوط (lineal intercept) والتي تشتمل على حساب عدد التقاطعات الذي يحققها خط مستقيم (معلوم الطول) مع الحدود الحبيبية للبنية المجهرية المصورة بقوة تكبير معلومة (14). اما الكسر الحجمي لطور الفرايت والبرلايت فتم احتسابها بعد تخزين صور البنى المجهرية بتقنية (Bit Map) باستخدام برنامج حاسوب باسم (Scion Image).

النتائج والمناقشة :

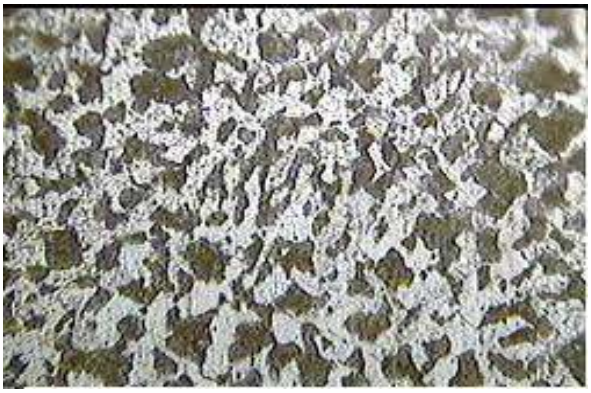
يبيَّنَ جدول (٢) نتائج اختبارات الشد للحالات الثلاثة مع قيم الاجهادات والانفعالات الحقيقية . ارتفعت قيمة الانفعال الكلي الحقيقي من (0.2226) الى (0.2574) عند تخمير الفولاذ عند درجة (850^oC) والى (0.2692) عند التخمير عند درجة حرارة ($1000\ ^oC$) وهذا يرجع الى ازالة الاجهادات فضلا عن التباين في الكسر الحجمي للطورين الفرايت والبرلايت والزيادة في حجم حبيبات الفرايت عند التخمير عند درجة حرارة (1000^oC).

جدول-٢: الخواص الميكانيكية للفولاذ الكاربوني DIN CK50

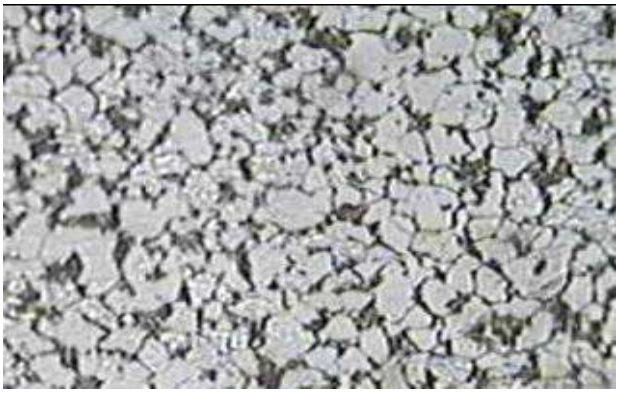
Properties / Materials	Eng. Tensile Strength $\sigma_{u.\ MPa}$	Eng. Yield Strength $\sigma_{Y\ MPa}$	Engineering Strain $\varepsilon_{eng.}$			True Tensile Strength $\sigma_{true,\ MPa}$	True Strain , ε_{true}		
			ε_e	ε_p	ε_{Total}		ε_e	ε_p	ε_{Total}
As received	654	427	0.0021	0.2472	0.2493	767	0.0021	0.2205	0.2226
Annealing,850°C,1 hr	595	287	0.0014	0.3076	0.309	730	0.0015	0.2677	0.2574
Annealing 1000°C , 2hrs	454	272	0.0013	0.2923	0.2936	563	0.0023	0.2551	0.2692

اوضح الفحص المجهري (الاشكال-٤،٥،٦) ان الكسر الحجمي للفرايت عند التخمير عند درجة حرارة (850^oC) قد ازداد من (0.41) الى (0.74) مع زيادة بسيطة في الحجم الحبيبي مقارنة بحالة التشكيل على البارد. أن الزيادة في الكسر الحجمي للفرايت تعود الى تعرض الفولاذ الى ازالة للكاربون (decarburizing) نتيجة التخمير في في جو فرن غير محمي (unprotection atmosphere). ازداد الحجم الحبيبي الى (32 µm) مقارنة بالحالة المستلمة (29 µm). يتضح من الخواص الميكانيكية ان لزيادة الكسر الحجمي للفرايت التاثير الاقوى في خفضها عند التخمير. ساعدت زيادة درجة حرارة وزمن التخمير عند درجة حرارة (1000^oC) الى انخفاض اضافي في قيم مقاومة الشد والخضوع قابلها زيادة في الكسر الحجمي للفرايت (0.93) والحجم الحبيبي (48 µm). بلغت نسبة(σ_u / σ_y) الهندسية في الحالة المستلمة (1.53) مقارنةً بنسبـــة (σ_u / σ_y) في حالة التخمير عند (850^oC) والتي بلغت (2.0) بينما بلغت النسبة (1.67) عند التخمير عند ($1000\ ^oC$). يتضح من ذلك ان الفولاذ في حالاته الثلاثة سيتصلد دوريا نظرا لان نسبة (σ_u / σ_y) تزيد عن 1.4 [١٢].

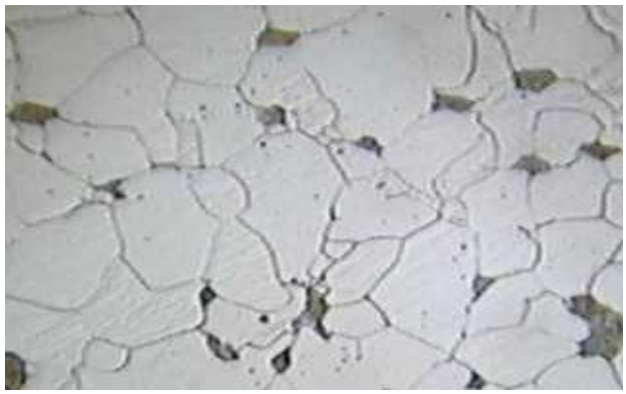
لوحظ أن قيمة أس الإصلاد الإنفعالي (n) قد ارتفعت من (0.28) في حالة ما قبل التخمير الى (0.29) لحالة التخمير عند(850^oC) والى قيمة (0.30) لحالة التخمير عند (1000^oC) (جدول-٣) . اما معامل المتانة (K) فقد انخفضت من (1820 MPa) الى (1150 MPa) ممّا يعطي مؤشراً واضحاً ان الفولاذ المخمر سيتعرض الى تشوه لدن أعلى مقارنة بالفولاذ المستلم الذي هو في حالة مشكلة على البارد . عموما اذا كانت قيمة (n) اكبر من (0.20) فان المادة ستتصلد دوريا اما اذا كانت قيمة (n) اقل من (0.10) فان المادة ستتلين دوريا وبذلك فان الفولاذ بحالاته الثلاثة يتعرض الى التصليد الدوري عند تعرضه الى الكلال منخفض الدورات مع الاشارة الى ان الفولاذ المخمر يتعرض الى اصلاد دوري اعلى، أي إن دورة الإنفعال اللدن للفولاذ المخمر سيرافقها زيادة في كثافة الإنخلاعات وتقاطعها أثناء الإنزلاق ومن ثم زيادة إحتمالية التصليد الإنفعالي [12].



شكل-٤: البنية المجهرية للفولاذ بحالته المستلمه (230X)



شكل-٥: البنية المجهرية للفولاذ المخمر عند 850°C (230X)

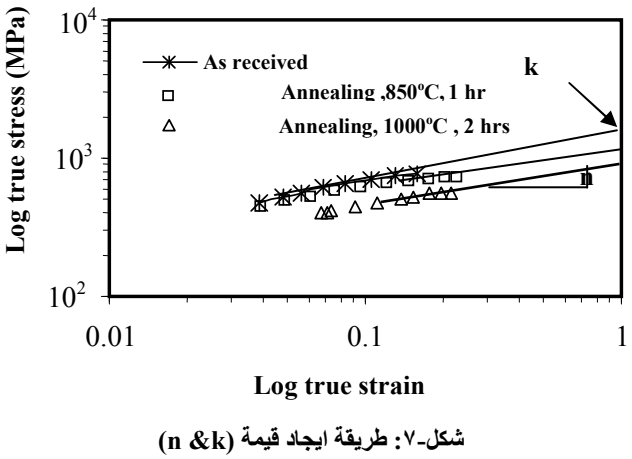


شكل-٦: البنية المجهرية للفولاذ المخمر عند 1000°C (230X)

تم حساب قيمة أُس الإصلاد الإنفعالي (n) من ميل المنطقة اللدنة في منحنى الإجهاد-الإنفعال الحقيقي وقيمة معامل المتانة (K) عند إنفعالٍ مساوٍ للرقم واحد (شكل-٧) . من المعلوم أن قيمة (K) تمثل الإجهاد الحقيقي اللازم لتحقيق إنفعال حقيقي إفتراضي يبلغ (1) (ε_{true} =1) ، فبزيادة قيمة (K) يعطي مؤشراً على أن الإجهاد اللازم لبلوغ (ε_{true} =1) أقل في كلتا حالتي التخمير.

جدول-٣: معامل (n&k) لمنحى الاجهاد-الانفعال الحقيقي

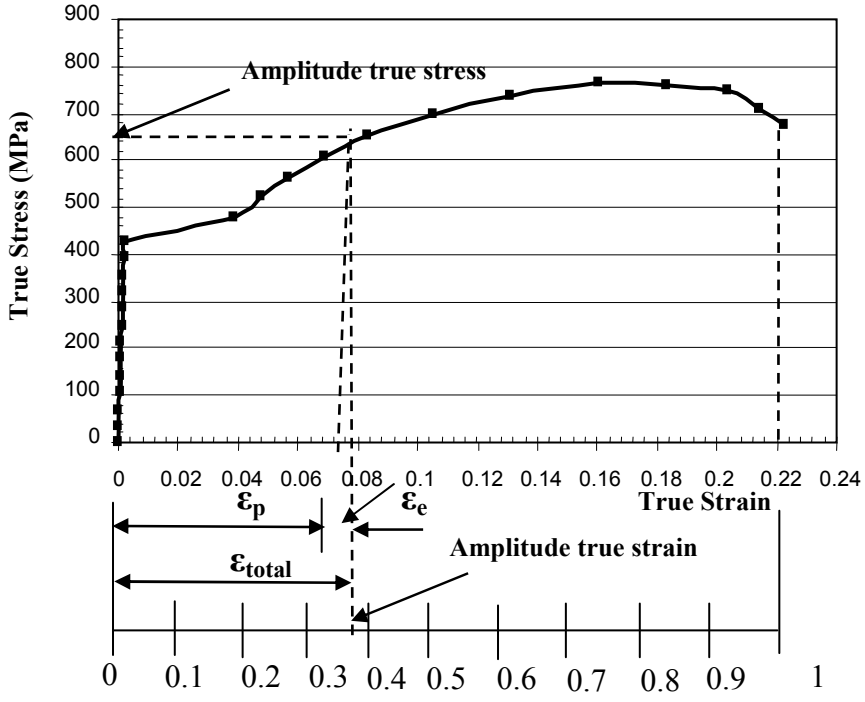
Properties / Materials	n	K (MPa)
As received	0.28	1820
Annealing ,850° C, 1hr	0.29	1150
Annealing ,1000° C, 2 hrs	0.3	910



شكل-٧: طريقة ايجاد قيمة (n &k)

اختبار الكلال:

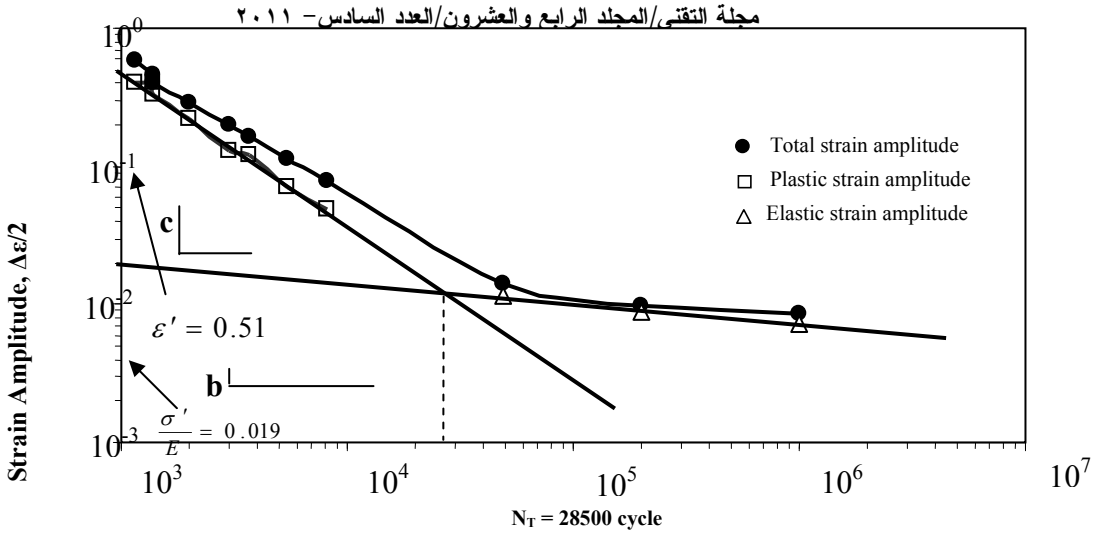
تم رسم منحنى عمر الكلال منخفض الدورات (LCF) بدلالة الإنفعال الكلي الحقيقي أولاً ثم يصار الى رسم منحنى الكلال للإنفعال اللدن الحقيقي وآخر للإنفعال المرن الحقيقي لإيجاد قيم أُس متانة الكلال (b) وأُس مطيلية الكلال (c) والعمر الإنتقالي (N_T) . ويستفاد عادةً من منحنى الإجهاد–الإنفعال الحقيقي لإيجاد قيم الإنفعال الكلي والإنفعال اللدن والمرن (شكل–٨) . فعلى سبيل المثال عند تسليط إنفعال كلي حقيقي قَدرهُ ($0.38\varepsilon_{total}$) يصار الى رسم خط عمودي يتقاطع مع منحنى الإجهاد–الإنفعال ورسم خط مواز لخط التشوه المرن ليتم الحصول على مركبات الإنفعال الحقيقي(ε_e & ε_p) عند النقطة ($0.38\varepsilon_{total}$) يقابلها الإجهاد المطلوب تسليطه [12].



شكل–٨: طريقة تحديد الانفعال المسلط باستخدام منحى الاجهاد–الانفعال الحقيقى

- **إختبار الكلال المنخفض الدورات (LCF) للفولاذ بحالته المستلمة**

يمثل الشكل (٩) العلاقة بين الإنفعال الكلي الحقيقي وعدد الدورات المؤدية الى الفشل بدلالة عمر الإنفعال. يلاحظ أن قيمة أُس متانة الكلال يساوي (b=-0.07) وقيمة أُس مطيلية الكلال تساوي (c=-0.61) وأن عدد دورات العمر الإنتقالي (N_T) بلغ (28500) والذي يُمثل عدد الدورات اللازمة لإنتقال المعدن من منطقة التشوه المرن الى منطقة التشوه اللدن . بينما بلغت كل من قيمة معامل مطيلية الكلال (ε'_f) بحدود (0.51) ومعامل مقاومة الكـــــلال (σ'_f /E) قيمتهُ تساوي (0.019) أما قيمة (σ'_f) فتبلغ (3876 MPa) بعد ضرب قيمة معامل مقاومة الكلال بمعامل يونك . وفي هذا العمر حصراً من الدورات الإنتقالية (N_T) تكون سعة الإنفعال المرن مساوية لسعة الإنفعال اللدن [13]، وتقابل نقطة التحول (N_T) إنفعالاً حقيقياً قدره (0.003) .



شكل-٩: منحى فشل الكلال (LCF) للفولاذ بحالته المستلمة

وبالإستفادة من منحنيات (LCF) يمكن إيجاد قيمة (n') (n' =c/b Cyclic Strain Hardening Exponent). إذ وجد أن قيمة (n') للحالة المستلمة تبلغ (0.11). أما لحالة التخمير عند درجة حرارة (850^oC) فإنها بلغت (0.13) ولحالة التخمير عند (1000^oC) فإن(n') بلغت (0.12) . وبذات السلوك فان قيمة (n') تكون اقل للفولاذ المستلم مقارنة بالحالتين الاخريتين فضلا عن ان قيمة (n') المسجلة اقل من قيمة (n) لاختبار الشد والذي يشير الى ان الفولاذ بحالاته الثلاث يتعرض الى اصلاد انفعالي اكبر عند التحميل الدوري.

وبالرجوع الى المعادلة الاتية[13] :

$$K' = \frac{\sigma'_f}{(\varepsilon'_f)^{n'}} \quad \text{Cyclic Strength Coefficient} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

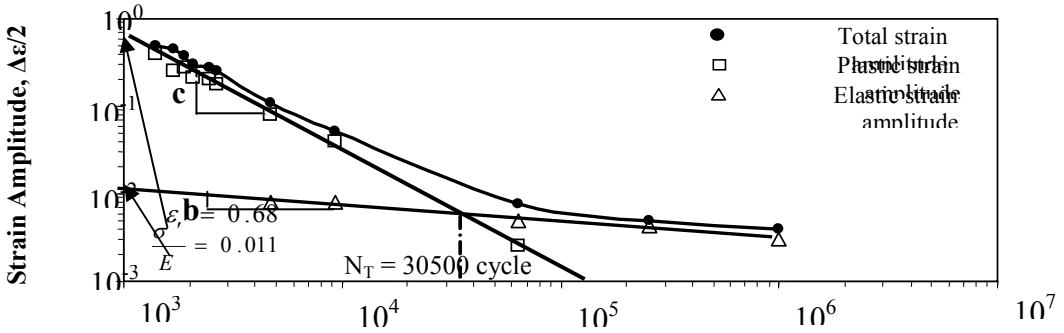
فإن قيمة (K') (بلغت (4176 MPa) يقابلها قيمة (K) للفولاذ بحالته المستلمة (1820 MPa)، أما للحالتين المخمرتين (850^oC) و (1000^oC) فإن قيمة (K') بلغت (2336 MPa) و (1887 MPa) على التوالي . إن ارتفاع قيمة (K') للحالة المستلمة يمكن إرجاعها الى حالة التصليد الدوري الاسرع التي تواجهه بحالتيه المخمرتين الأُخريتين (جدول- ٤).

- **إختبار الكلال منخفض الدورات (LCF) للعينات المخمرة عند (850^oC)**

يلاحظ من الشكل (١٠) أن منحنى الكلال (LCF) أخذ شكلاً مشابهاً لمنحنى كلال (LCF) للحالة المستلمة وبعدد دورات إنتقالية (N_T) اعلى والتي بلغت (30500) ، يقابله انخفاض في قيم معامل مطيلية الكلال و معامل متانة الكلال واللتين تساويان (c=-0.67) و (b=-0.09) على التوالي . وقابل نقطة التحول (N_T) إنفعالاً حقيقياً قدره (0.006) . يستفاد من قيمة (b) و (c) بوصفهما مؤشراً لسلوك السبيكة تحت حالات الإنفعالات اللدنة وإن انخفاضهما دليل على أن المعدن يتجه الى حالة التصليد الإنفعالي.

جدول-٤: معامل الكلال والخواص الدورية للفولاذ بحالته المستلمة

Alloy	$\Delta\varepsilon_p/2=\varepsilon'_f(2N_f)^c$		$\Delta\varepsilon_e/2=\frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b$		k' (MPa)	n'
	ε'_f	c	σ'_f/E	b		
As received	0.51	- 0.61	0.019	- 0.07	4176	0.11
Annealing (850° for 1- hour)	0.68	- 0.67	0.011	- 0.09	2336	0.13
Annealing (1000° for 2- hours)	0.78	0.98-	0.009	- 0.12	1890	0.12



شكل-١٠: منحنى فشل الكلال (LCF) للفولاذ المخمر عند درجة حرارة (850°C)

- **إختبار الكلال المنخفض الدورات (LCF) للعينات المخمرة عند (1000°C)**

ارتفعت قيمة العمر الإنتقالي (N_T) الى حدود (٧٠١٥٠) دورة وفي نفس الوقت رافقه إنخفاض في قيم معامل مطيلية الكلال ومعامل متانة الكلال واللتين تساويان (c=-0.98) و (b=-0.12) على التوالي (شكل- 11) . وقابل نقطة التحول (N_T) إنفعال حقيقي قدره (0.0035) . وتشير قيمة (N_T) الى أن السبيكة المذكورة تدخل مرحلة التشوه اللدن بعد عدد الدورات المذكور.

يكون تصرف الفولاذ بحالته المستلمه (المشكل على البارد) مصحوباً بالتصليد ويتحمل تشوهاً كلياً أقل عند الفشل قياساً بالحالتين الأُخريتين (التخمير) وهذا مرتبط بالكسر الحجمي للاطوار المتواجدة فضلا عن الحجم الحبيبي. تزداد قيمة (N_T) مع انخفاض متانة الشد أو ارتفاع المطيلية مما يعني أن العينات المخمرة تتعرض لحالة الإصلاد عند التحميل في منطقة التشوه اللدن بمقدار اكبر مقارنة بالعينات المستلمه . وكلما ارتفعت قيمة (σ_u/σ_y) زادت دورات العمر الإنتقالي (N_T) (جدول-٥) .

جدول-٥: علاقة (N_T) بقيم الخواص الميكانيكية

Properties / Materials	σ_u	σ_u / σ_y	Elongation %	N_T
As received	654	1.53	24.9	28510
Annealing, 850° C, 1hr	595	2.07	30.7	30500
Annealing 1000° C, 2 hrs	454	1.66	29.2	70150

الاستنتاجات:

١. تعرض الفولاذ الكاربوني (DIN CK50) بحالته المستلمه (المشكل على البارد) والمخمرة عند درجة حرارة ($1000^oC,850^oC$) الى التصليد الدوري الإنفعالي عند تعرضه لكلال منخفض الدورات.

٢. انخفضت قيمة (n') (أُس الإصلاد الإنفعالي الدوري) للفولاذ بحالاته الثلاث عن قيمة (n) (أُس الإصلاد الإنفعالي الهندسي) نظراً للتصليد الإنفعالي الاكبر الذي يواجه الفولاذ عند فشل الكلال بالدورات المنخفضة .

٣. إرتفعت قيمة(K')(معامل المتانة الدوري) للفولاذ بحالاته الثلاثه عن قيمة (K) (معامل المتانة الإنفعالي) نتيجة الاصلاد الانفعالي.

٤. تراوحت قيم (b) من (0.07-) الى (0.12-) وقيم (c) من (0.61-) الى (0.98-) وهي ضمن حدود القيم القياسية.

٥. تميز الفولاذ بحالته المخمرة بعدد دورات إنتقالية (N_T) أعلى مقارنةً بالحالة المستلمة مما يُشير الى تأخر دخول الفولاذ المخمر في منطقة التشوه اللدن.

٦. يمكن الإستفادة من قيمة (σu/σy) الهندسي فضلاً عن قيمة *(n)* للتنبؤ بسلوك الفولاذ (DIN CK50)عند تعرضه لفشل الكلال بعدد دورات منخفض .

المصادر :

1. 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* .
2. Tae-Sang Park, Soon-Bok Lee, "Low Cycle Fatigue Testing of Ball Grid Array Solder Joints Under Mixed-Mode Loading Conditions", *Journal of Electronic Packaging, Vol. 127, Sep. 2005, PP. 237-244* .
3. Sylwester Ktysz, "Load Sequence Influence on Low Cycle Fatigue Life", *Technical Sciences, No. 8, 2005* .
4. J.-O Nilsson and T. Tharvaldsson, "Low Cycle Fatigue Behavioure of Alloy 800H at 600°C-Effect of Grain Size and Y-Precipitate Dispersion" , *fatigue Fract. Eng. Mat. Stract. Vol. 8, No. 4, 1985, PP. 373.*
5. M. Greger, L. Kander, R. Kocich, "Structure and Low-Cycle Fatigue of Steel AISI 316 ", *International Scientific Journal, Vol. 31, Issue 1, May 2008, pp. 41-44* .
6. Vani Shankar, M. Valsan, R. Kannan, Bhanu Sankara Rao, S. L. Mannan and S. D. Pathak, "Low Cycle Fatigue Behavior of A modified 9Cr-1Mo Ferritic Steel", *International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering, December 2004* .
7. S. S. Manson and U. Muralidharan, "A single Expression Formula For Inverting Strain-Life and Stress-Life Relationships", *Fatigue Fract. Eng. Struct. Vol. 9, No. 5, 1987, PP. 343-356.*
8. A. Plumier & M. R. Agatino, A. Castellani, C. A. Castiglioni & C. Chesi, "Resistance of Steel Connections to Low-Cycle Fatigue", *11th European Conference on Earthquake Engineering, 1998 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54 982 3* .
9. K. Tanaka, S. Nishijima, S. Matsuaka, "Low-and-High Cycle Fatigue Properties of Various Steels Specified In JIS for Machine Structural Use", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Stract. , Vol. 4, No. 1, 1981, PP. 97-108* .
10. Juli A. Bannantine, Jess J. Comer, James, L. Handrok, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis" , *prentice hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1989* .
11. Yung-Lilee, Jwo pan, "Fatigue Testing And Analysis" , *Elsevier printer*, *2002*.
12. Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, "*Metal Fatigue In Engineering*", *Second Edition,Mc Graw Hill, 2001.*
13. V. M. Radhakrishnan, "On Bilinearity of Manson-Coffin Low Cycle Fatigue Relationship", *NASA Technical Memorandum 105840, Vol. 5, No. 39, 1992, PP. 14-27* .
14. M. A. Meyers, K. K. Chawala, "*Mechanical Behavior of Metals"*, Prentice-Hall, Inc., USA, 1999, PP. 249-252.