

Residual Stresses Sreated by Heat Treatment for Carbon Steel and their Effect on Mechanical Properties

Dr. Mohamad Seed Wheed

Applied Science Department, University of Technology /Baghdad

Khamaal Muhssan

Applied Science Department, University of Technology /Baghdad

Email: Khamaal_2005@yahoo.com

Received on: 6/4/2011 & Accepted on: 1/3/2012

ABSTRACT

This work aims to study the effect of residual stresses created by quenching processes on the fatigue behavior of low carbon steel .The quenching was achieved from a temperature of (900 °C) using water or oil as quenching medium. Quenching from a temperature of (850 °C) in oil was also used to produce dual phase steel. The specimens were divided into two groups, the first was subjected to tempering for (1 hr) at (200 °C) after quenching, and the second was without tempering. The results showed that the specimen which was quenched in water and tempered has the highest value of fatigue limit (356 MPa), and the specimen which was quenched in oil from (850 °C) and tempered showed a lower fatigue limit.

الاجهادات المتبقية بسبب المعاملات الحرارية للصلب الكربوني وأثرها على خواص الكلال للمعدن

الخلاصة

يتضمن هذا البحث دراسة اثر الاجهادات المتبقية الناتجة من عملية الإخماد على سلوك الكلال للصلب الواطئ الكربون (C) (0.0977%) تم إجراء الإخماد للعينات من درجة حرارة (900 °C) في وسط إخماد ماء بدرجة حرارة الغرفة, ومن درجة حرارة (900 °C) في وسط إخماد زيت, ومن درجة (850 °C) في وسط إخماد زيت, والذي نتجت عنه بنية صلب ثنائي الطور وإجراء مراجعة لقسم من هذه العينات وترك القسم الآخر بدون مراجعة لدراسة طبيعة وتأثير الإجهاد المتبقي إن المعاملات أعلاه أدت إلى تولد اجهادات متبقية ضغطية حيث سجلت العينة المخمدة بالماء ومن درجة حرارة (900 °C) والمتبوعة بالمراجعة بدرجة (200 °C) أعلى حد كلال حيث كانت قيمته (365 Map) وتليها من حيث القيمة العينة المخمدة من درجة (850 °C) بالزيت والمتبوعة بالمراجعة أيضا وتم إجراء الفحص بالموجات فوق الصوتية للعينات لقياس الاجهادات المتبقية وقد أوضحت القيم زيادة مقدار الإجهاد المتبقي الضغطي بزيادة درجة حرارة المعاملة الحرارية.

الكلمات المرشدة:- الاجهادات المتبقية , الكلال , صلب واطئ الكربون

المقدمة

من الاعتبارات المهمة التي تدرس في مجال تحسين خواص الصلب هي الاجهادات المتبقية المتأتبة من المعاملات المختلفة إذا كان توليد هذه الاجهادات بصورة مدروسة تؤدي إلى تحسين خواص الصلب الميكانيكية^[1] فمثلا تسبب رفع حد الكلال في المواد الحاوية على الاجهادات المتبقية في الطبقات السطحية حيث يكون تأثير الاجهادات المتبقية الضغطية تأثيرا جيدا على رفع حد الكلال عكس الاجهادات المتبقية الشدية حيث أن الاجهادات المتبقية الضغطية تقوم بغلق الشقوق وبالتالي تأخير نموها^[2]. وفي بعض الحالات يكون تولد هذه الاجهادات نتيجة ظروف العمل التي يتعرض لها الجزء المعدني مثل درجات الحرارة العالية التي تتعرض لها بعض أجزاء المراحل البخارية حيث إن الأجزاء الهندسية غالبا ما تتعرض إلى تشوه لدن وتدرج حراري نتيجة لتعرض الطبقات الخارجية إلى اجهادات ميكانيكية أعلى من تلك التي تعرضت لها الطبقات الداخلية وبدرجات حرارة أكبر مسببا بذلك مقدارا إضافيا من الاجهادات التي قد تسبب عيوب ويعظم تأثير هذه العيوب مع الشقوق الموجودة مسبقا نتيجة التعامل مع تلك الأجزاء أو عند تجميعها فأن الإجهاد الكلي الذي سينتج من اثر الإجهاد المتبقي والتحميل الخارجي المسلط من الممكن أن يتجاوز إجهاد الخضوع مما يسرع في حصول الفشل^[3].

إن الاجهادات من السهل أن تحصل ومن الصعب أن تزال أو يعاد توزيعها هذا وتجدر الإشارة إلى إن عمليات إزالة أو إعادة توزيع هذه الاجهادات تكون مكلفة وغير تامة علاوة على إن الأجزاء والتراكيب يصعب التعامل معها كذلك من الممكن إن تكون الاجهادات المتبقية نافعة لذلك من المهم أن نحقق توزيع لهذه الاجهادات بما يلائم الاستفادة منها لزيادة مقاومة الأجزاء الهندسية^[1].

الجانب العملي

التركيب الكيماوي:

تم إجراء فحص التركيب الكيماوي للصلب منخفض الكربون في شركة نصر للصناعات الميكانيكية حيث تم الفحص بطريقة التحليل الطيفي. والجدول (1) يوضح نتائج الفحص:

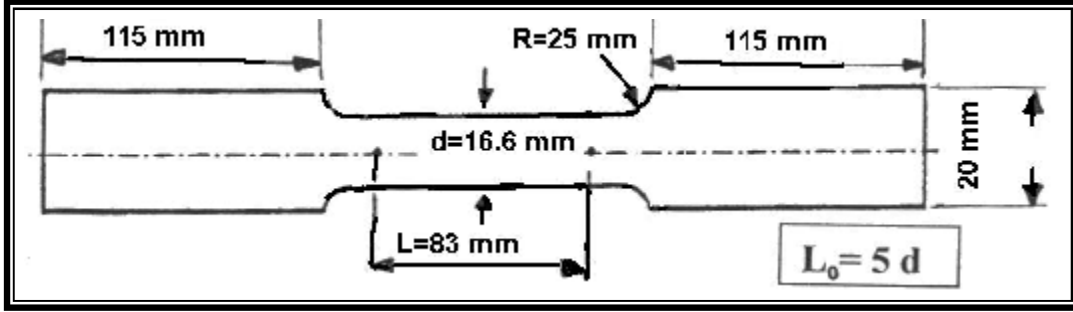
جدول (1) التحليل الكيماوي للصلب

العنصر%	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
	0.097796	0.01275	0.28942	0.06166	1.27698	0.13058	0.16994
العنصر%	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Co
	0.02835	0.00508	0.14820	0.00738	0.00079	0.02097	0.01732
العنصر%	Al	Pb	Nb	Zr	Ca	Zn	Fe
	0.00035	0.00894	0.00142	0.0027	0.00002	0.00268	97.7174

1- اختبار الشد :

حضرت سبع عينات لاختبار الشد وكانت بالأبعاد التي يوضحها الشكل الآتي:-

واجري التنعيم للعينات باستخدام ورق كاربيد السليكون بدرجات نعومة (320)، (600)، (800)،

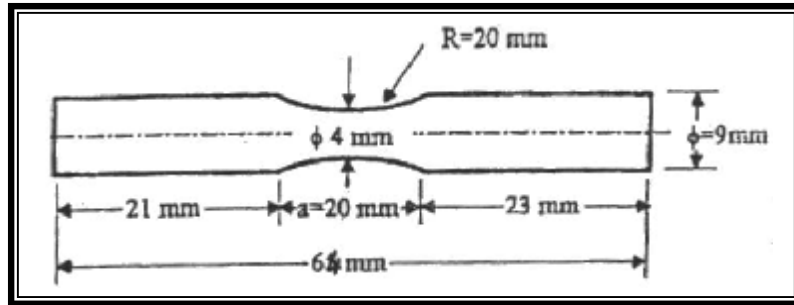


الشكل (1) عينة اختبار الشد

(1200) وبعد ذلك تصقل العينة باستخدام قماش خاص للصلب مع محلول الألومينا . اجري اختبار الشد على جهاز شد ألماني المنشأ مصنع من قبل شركة (G.F) حمولة الجهاز القصوى (200KN) وسرعة سحب العينة (0.2 mm/s) .

2- تحضير عينات اختبار الكلال :-

حضرت عينات الاختبار على عدة مراحل وهي:
تم تصنيع عينات اختبار الكلال وفق المواصفات القياسية الخاصة بعينات الاختبار لفحصها على جهاز اختبار الكلال بالأحشاء الدوار ويوضح الشكل (2) شكل و أبعاد العينة:



شكل (2) أبعاد عينة اختبار الكلال

وبعد إجراء المعاملات الحرارية اللازمة على العينة تم إجراء تنعيم لها باستخدام ورق كاربيد السليكون بدرجات نعومة (1200, 800,600,320) ثم صقل الجزء المقوس باستخدام قماش خاص للصلب مع محلول ألو لومينا.

3- المعاملات الحرارية المنجزة:

- جدول (2) تقسيم عينات الاختبار حسب درجة حرارة المعاملة وأوساط الإخماد
- 1- تقسيم العينات إلى ثلاث مجاميع حسب وسط الإخماد ودرجة الحرارة وكل مجموعة إلى مجموعتين الأولى بدون مراجعة والثانية مع مراجعة.
- 2- إجراء المعاملة الحرارية للعينات حسب الدرجة المحددة ثم التبريد بأوساط الإخماد. حيث يوضع مؤشر الفرن على الدرجة الحرارية المطلوبة ويترك لفترة لغرض استقرار القراءة وضمان التوازن الحراري وتوضع بعد ذلك العينات داخل الفرن لزمان معاملة (30 دقيقة) عند الدرجة الحرارية المطلوبة ثم يتم إخراج العينات من الفرن وتبريدها بأوساط الإخماد المختارة والجدول (2) يبين تقسيم عينات الاختبار حسب درجة حرارة المعاملة وأوساط الإخماد:

جهاز اختبار الكلال :-

لقد تم استخدام جهاز اختبار الاحناء الدوار (Rotating Bending) المصنع من قبل شركة (Hi-Tech) ذي المواصفات (HSM 19, Rotating Bending Fatigue Machine) ويتم معرفة عدد الدورات التي تفشل بها العينة بواسطة عداد وفي حالة فشل العينة فان الجهاز يتوقف تلقائيا عن الدوران بسبب انقطاع الدائرة الكهربائية الذي يقوم به مفتاح مايكرووي (-Micro Switch) ويبقى العداد محتفظا بالرقم المسجل حتى عند انقطاع التيار الكهربائي. يمكن حساب الحمل (P) المراد تسليطه على العينة والمقاس بالنيوتن (N) ولمقدار إجهاد معلوم (S) والمقاس بوحدة (N/mm²) من تطبيق المعادلة الآتية:-

$$P = \frac{s * p * d^3}{125.7 * 32} \dots\dots\dots (1)$$

حيث d : قطر التخصر في العينة المقاس بوحدة (mm). إن دوران الجهاز ينتج عنه إجهاد احناء على شكل موجة جيبية ذات سعة ثابتة ومتوسط إجهاد صفر.

قياس خشونة السطح:-

تم إجراء عمليتي تنعيم وصل للسطح بالأسلوب نفسه المتبع في تنعيم وصل عينات الكلال واجري الاختبار باستخدام جهاز الخشونة من نوع (P56) (Taylor-Hobson) بريطاني المنشأ ويبين الجدول (3) مقدار خشونة السطح .

جدول(3) قيم فحص الخشونة

Ra mm	رمز العينة	Ra mm	رمز العينة
0.175	B2	0.22	A1
0.2	C1	0.21	A2
0.36	C2	0.2	B1

7- الفحص بالموجات فوق الصوتية:-

تم إجراء الفحص بالموجات فوق الصوتية للعينات التي تمثل المجاميع المختلفة من اجل معرفة مقدار الإجهاد المتبقي المتولد من عملية الإخماد للعينات. وقد صنعت العينات وفق أبعاد ثلاث المجسات (Transducers) الخاصة بالجهاز. والجهاز من طراز (A 5217) ياباني المنشأ (New Sonic Viewer Oyo-Corporation Tokyo- Japan) ، واستخدم في الفحص ذراعا

إرسال واستقبال منفصلان وترسل موجة فوق سمعية خلال العينة ثم تقاس قيمة الذروة للموجة المنقولة ويتم وضع العينة بين المجسين بعد وضع مادة رابطة على السطح الداخلي للمجسين للحصول على أفضل تطابق بين سطح العينة وسطح المجس وعدم حصول أي ضياع في الموجة، وبعد تشغيل الجهاز يتم تشغيل زمن الموجة الطولية والموجة المستعرضة بوحدة (m . sec) ويتم حساب سرعة الموجة الطولية والقصية من العلاقات الآتية:-

$$u_L = \frac{L}{t_L} \dots\dots\dots(2)$$

$$u_S = \frac{L}{t_S} \dots\dots\dots(3)$$

حيث:- u_L = السرعة الطولية.

u_S = السرعة القصية.

يتم حساب الانفعال المتبقي من تطبيق المعادلة أدناه [4]-:

$$\epsilon_R = \frac{Pu_L^2 - E}{C} \dots\dots\dots (4)$$

ϵ_R = الانفعال المتبقي (بدون وحدات)

u_L = سرعة الموجة الطولية (m/sec)

E = معامل يونك (MPa)

P = الكثافة kg/m^3

C = معامل الاجهاد المتبقي وهو دالة لمعامل يونك ويتم حسابه كلاتي:

$$\sigma = E \epsilon \dots\dots (5)$$

الاجهاد: σ

معامل المرونة: E

الانفعال: ϵ

لكن في الحقيقة هناك مراتب اعلى لمعامل المرونة :

$$\sigma = E\epsilon + C\epsilon^2 + D\epsilon^3 + \dots\dots (6)$$

حيث ان C الرتبة الثالثة لمعامل المرونة و D الرتبة الرابعة .اغلب البحوث تاخذ الحدين الاولين وتستبعد الحد الثالث :

$$\sigma = E\epsilon + C\epsilon^2 \dots\dots\dots (7)$$

ويحسب C بالطريقة الآتية:

1- يحسب معامل المرونة من منحنى فحص الشد ولكل ظرف.

2- يتم اختيار نقطتين على منحنى الإجهاد الانفعال شرط ان تكون على خط المرونة ثم تحل على

هيئة معادلتين أنيتن وتستخرج قيمة C

$$s_1 = E\epsilon_1 + C\epsilon_1^2$$

$$s_2 = E\epsilon_2 + C\epsilon_2^2$$

$$S_2 - S_1 = E (\epsilon_2^1 - \epsilon_1^1) + C (\epsilon_2^2 - \epsilon_1^2) \quad \dots\dots (8)$$

و بتطبيق قانون هوك يتم ايجاد الاجهاد المتبقي (S_R)

$$E = \frac{S_R}{\epsilon_R} \quad \dots\dots\dots (9)$$

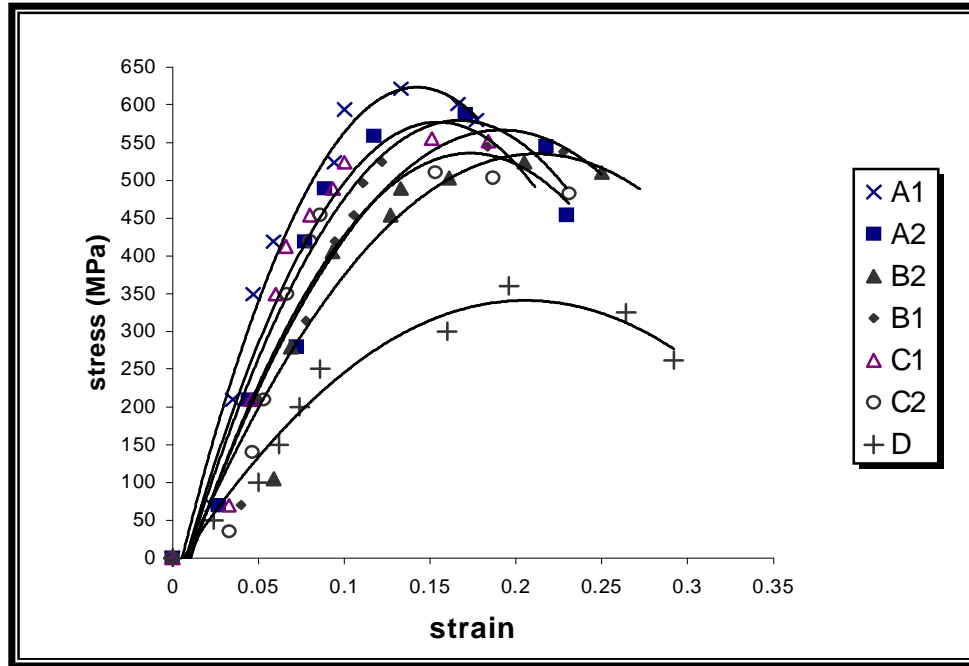
النتائج والمناقشة

نتائج الفحص بالموجات فوق الصوتية

يبين الجدول (4) نتائج الفحص بالموجات فوق الصوتية وقيم الاجهادات المتبقية

يلاحظ من الجدول ان الإخماد أدى إلى زيادة سرعة الموجات فوق الصوتية حيث سجلت العينة بحالتها المستلمة اقل سرعة وكانت (4125 m/sec) للموجة الطولية و(1269 m/sec) للموجة العرضية وسجلت العينة المخمدة بالماء وبدون مراجعة أعلى قيمة لسرعة الموجات فوق الصوتية وكانت قيمتها (4852 m/sec) للموجة الطولية و (2750 m/sec) للموجة العرضية هي العينة التي سجلت أعلى قيمة من الإجهاد المتبقي والذي كانت قيمته (395 MPa) يلاحظ من الجدول انه بزيادة الإجهاد المتبقي تزداد سرعة الموجات فوق الصوتية .

ان تقنية قياس الاجهاد باستخدام الموجات فوق الصوتية يعتمد على الخواص السمعية المرنة التي بموجبها سرعة الموجة المرنة في الصلب تعتمد على الاجهاد الميكانيكي, إن الموجات فوق الصوتية تزداد سرعتها بزيادة الرص الذري [5]، وان إخماد هذه العينات أدى إلى تولد بنية المارتنسايت بصورة أساسية بالإضافة إلى البنى الأخرى والتي تميزت بان حجوم هذه الأطوار اكبر من حجم بنية الاوستنايت والذي أدى إلى زيادة الرص وعدد الانخلاعات وبالتالي زيادة



الشكل (3) منحنيات الشد للعينات كافة

سرعة الموجات فوق الصوتية.

2- نتائج اختبار الشد :-

من الشكل (3) نلاحظ ان المنحنى (A_1) اكثر المنحنيات ارتفاعا وابتعادا عن المنحنى (D) واكثر المنحنيات زحفا نحو اليسار يليه المنحنى (A_2) من حيث الارتفاع ومنحنى (C1) وهو اكثر ميلاً نحو اليسار من المنحنى (A_2) واقل ارتفاعا ويلييه بعد ذلك المنحنى (B1) وهو اقل ارتفاعا من المنحنيات السابقة واقل ميلاً نحو اليسار يأتي بعده المنحنى (B2) ومن ثم المنحنى (C2) الذي هو اكثر ميلاً نحو اليسار واقل ارتفاعا من المنحنى (B2) واخيرا يأتي منحنى العينة (D).

ان سبب كون المنحنى (A_1) اكثر ارتفاعا واكثر ميلاً نحو اليسار (وبالتالي زيادة الاجهاد اللازم لإحداث الانفصال) هو ان مقدار الاجهاد المتبقي الناتج من عملية الإخماد بالماء قيمته اكبر من قيمة الاجهاد الناتج من الإخماد في الأوساط الأخرى حيث سجل أعلى مقدار وهو (395 MPa) كما هو مبين في الجدول رقم (4). حيث ان مقدار الاجهادات المتبقية تعتمد على شدة وسط الإخماد وان الاجهادات الناتجة من عملية التحول تعتمد على اتساع او عرض فترة التبريد [6] . وبما ان سرعة تبريد وسط الماء اكبر ثلاث مرات من سرعة تبريد الزيت [7] فان الاجهاد المتبقي الناتج من الإخماد بالماء سيكون اكبر من الاجهاد الناتج من الإخماد بالزيت.

جدول (5) يبين نتائج اختبار الشد

D	C2	C1	B2	B1	A2	A1	
360	509.99	555.4	523.96	544.92	586.8	621.7	إجهاد الشد الأقصى (MPa) UTS
306	462	529	489	509	562	595	إجهاد الصمود (P.S) (MPa)
262	482.05	537.9	488	509.9	455.1	579.8	إجهاد الكسر (MPa)
3000	5072.4	5263.15	3821.42	4621.2	5000	5803.5	معامل المرونة (MPa)

وكذلك عند الإخماد بالماء يكون الحجم الحبيبي للمارتنسايت اصغر مع زيادة كميته وهذا يؤدي إلى زيادة مقاومة الشد القصوى. وهذا يفسر كون إجهاد الشد الأقصى للمنحنى (A_2) والذي كانت قيمته (586.6 MPa) اكبر من إجهاد الشد الأقصى للمنحنى (B_1) والذي كانت قيمته (544.92 MPa) على الرغم من احتوائه على اجهادات متبقية اكبر من اجهادات العينة (A_2) الذي كانت قيمته للعينة (B1) حوالي (254 MPa) وللعينة (A2) حوالي (217 MPa).
واما بالنسبة للمنحنى (C1) فان سبب ارتفاعه اكثر من المنحنى (B1) على الرغم من كون درجة حرارة الإخماد لهذه العينة اقل من العينة (B1) هو انه بالإضافة إلى الاجهادات الحرارية المتولدة واجهادات التحول فان الاجهادات المتبقية تتأثر أيضا بالفرق بالحجم بين الأطوار المتولدة. وفي حالة العينة (C1) فان بنية العينة مكونة بصورة رئيسة من فيرايت ومارتنسايت وان الفرق بالحجم بين هاتين البنيتين كبير مما يؤدي إلى زيادة مقدار الاجهاد المتبقي للضغط للعينة (C1) والذي تبلغ قيمته حوالي (326 MPa) على مقدار الاجهاد المتبقي للعينة (B1) والذي تبلغ قيمته

حوالي (254 MPa) ولذلك يكون الإجهاد الأقصى للعينة (C1) والذي كانت قيمته (MPa)
555.4 أكبر من الإجهاد الأقصى للعينة (B1) والذي كانت قيمته حوالي (MPa 544.92).

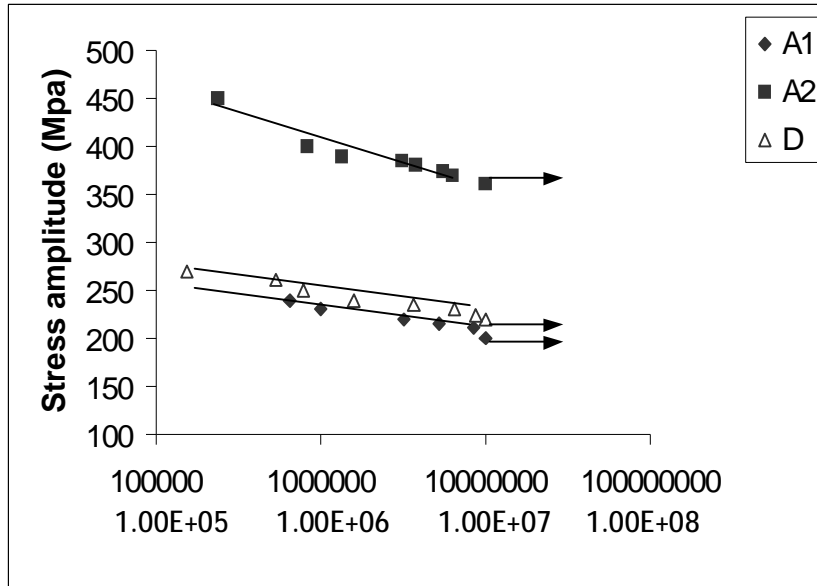
نتائج اختبار الكلال

يلاحظ من الشكل (4) للعينات المخمدة بالماء إن الكسر للعينات المراجعة يحصل بعدد دورات أكبر من عدد الدورات للعينات الغير المراجعة عند تطبيق الإجهاد نفسه. حيث يلاحظ إن حد الكلال للعينة (A 1) بلغت قيمته (205 MPa) بينما حد الكلال للعينة (A 2) كانت قيمته (365 MPa) ويلاحظ أيضا إن منحنى العينات غير المراجعة ينخفض على كل من منحنى العينة المراجعة والعينة بحالتها الأصلية التي بلغ حد الكلال لها (215 MPa) تم الحصول على المعادلات (10) (11) (12) التي تمثل العلاقة بين الاجهاد وعدد الدورات :

$$Y = 526.6 X^{-0.05} \dots\dots\dots (10)$$

$$Y = 948.1 X^{-0.05} \dots\dots\dots (11)$$

$$Y = 461.4 X^{-0.04} \dots\dots\dots (12)$$



الشكل (4) منحنيات الكلال لعينات المجموعة (A)

وكذلك من الشكل (5) يلاحظ أيضا انخفاض حد الكلال للعينات غير المراجعة عن حد الكلال للعينات المراجعة وللعينات بحالتها المستلمة وتم الحصول على المعادلتين (13) (14) اللتان تمثلان العلاقة بين الاجهاد وعدد الدورات :

$$Y = 782.7 X^{-0.09} \dots\dots\dots (13)$$

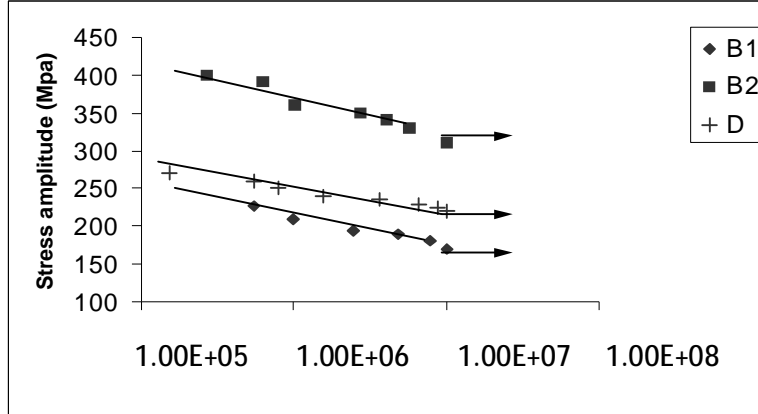
$$Y = 962.5 X^{-0.06} \dots\dots\dots (14)$$

وأیضا من الشكل (6) وهو منحنى عينات الكلال للمجموعة (C) يلاحظ الحالة نفسها هي انخفاض حد الكلال للعينات غير المراجعة عن كل من منحنى الكلال للعينات المراجعة والعينات

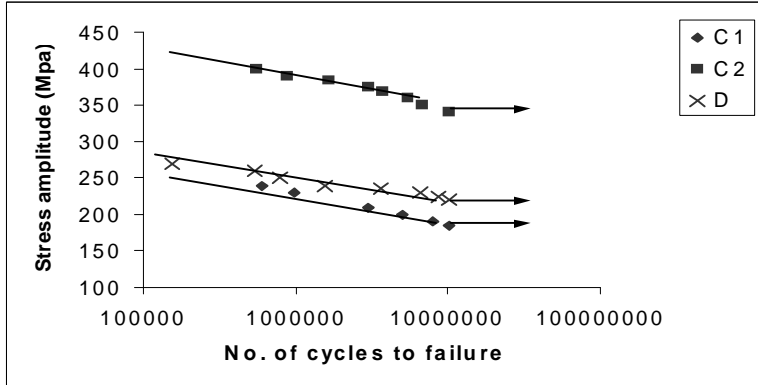
بحالتها الأصلية وتم الحصول على كل من المعادلتين (15) (16) اللتان تمثلان العلاقة بين الاجهاد وعدد الدورات :

(15) معادلة عينات المجموعة (C1) $Y = 526.6 X^{-0.08}$

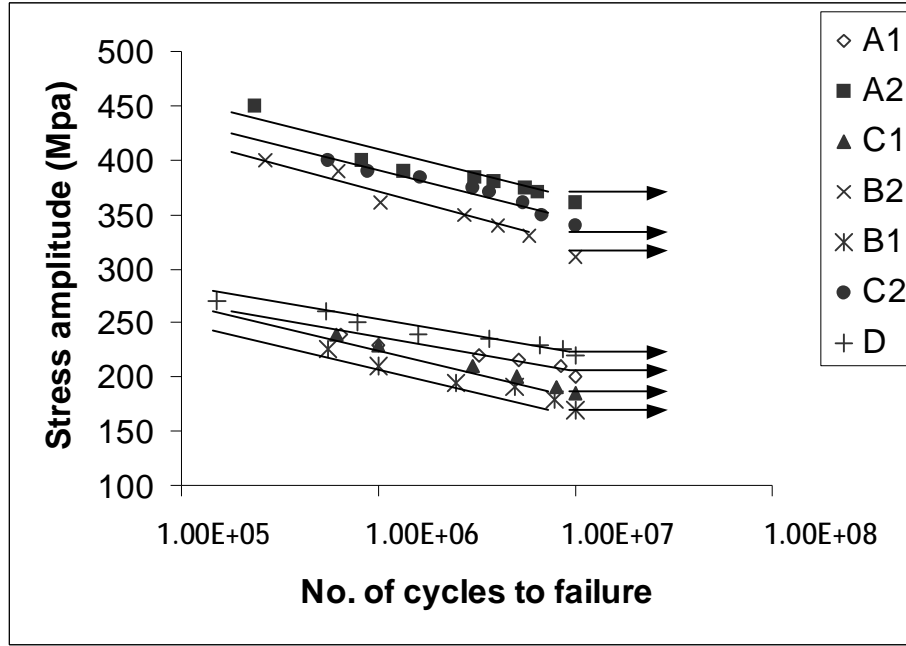
(16) معادلة عينات المجموعة (C2) $Y = 526.6 X^{-0.04}$



الشكل (5) منحنيات الكلال لعينات المجموعة (B)



الشكل (6) منحنيات الكلال لعينات المجموعة (C)



الشكل (7) منحنيات الكلال للعينات كافة

جدول (6) يوضح حد الكلال عمليا والمتنبأ به

العينة	حد الكلال عمليا (Mpa)	حد الكلال المتنبأ به (Mpa)
A1	205	278
A2	365	244.9
B1	175	219.8
B2	320	205.9
C1	187.5	218.54
C2	345	204
D	215	200.9

ان الجدول (6) يوضح حد الكلال المستخرج عمليا والمتنبأ به حيث يتم التنبؤ بحد الكلال من العلاقة التي تستخدم لتقييم حد الكلال للمعادن الحديدية فقط^[8] :-

$$F.L = 1.256 * HB \dots \dots \dots (16)$$

F.L = حد الكلال المحسوب (MPa)

HB = صلادة برنل

إن سبب انخفاض حد الكلال للعينات غير المراجعة عن العينات المراجعة وعن حد الكلال للعينات بحالتها المستلمة كما هو واضح في الجدول (6) على الرغم من امتلاكها اجهادات ضغطية مقدارها الكبر من مقدار الاجهادات الضغطية للعينات المراجعة هو إن الاجهادات المتبقية التي تنشأ

من الإخماد من درجات حرارية مرتفعة تكون غير منتظمة في العينة وكما هو معروف إن أحد أسباب تولد شق الكلال هي الاجهادات غير المنتظمة. عند إجراء المراجعة للعينات فإن المراجعة تعمل على تقليل اثر الاجهادات المتبقية وذلك يعود إلى دورها في إعادة توزيع وانتظام الاجهادات المتبقية^[9]. كذلك تعمل المراجعة على جعل الانخلاعات في وضع أكثر استقرارا وترسيب الكربيد من المارتنسايت الذي يعمل على إعاقة حركة الانخلاعة والتي هي مسؤولة بدورها عن استقرارية الاجهادات المتبقية بالإضافة إلى إن حركة الانخلاعات هي المسؤولة عن تولد شق الكلال ونشونه والتي هي بداية التشوه اللدن من مرحلة الانزلاق وصولا إلى نشوء الشق^[10]. ونلاحظ أيضا من الشكل (6) انه للعينات المراجعة وغير المراجعة على السواء إن العينة المخمدة بالماء هي العينة التي تحملت أكبر قدر من دورات الإجهاد نفسه مقارنة مع بقية العينات وهذه النتيجة تعتبر نتيجة منطقية بسبب الاجهادات المتبقية الضغطية العالية والتي تتواجد حتى في العينة المراجعة حيث إن المراجعة عند (200 C°) لا تزيل كل الاجهادات المتبقية حيث إن أفضل خواص كلال للصلب تستحصل من بنية المارتنسايت المراجع^[11]. إن الإخماد بالماء يعطي بنية يسود فيها المارتنسايت أكثر من بقية المجاميع الأخرى وكما إن البنية ذات الصلابة العالية توفر أكثر اجهادات متبقية استقرارا^[12]. ويلاحظ كذلك من الشكل (6) إن عينات الكلال للصلب ثنائي الطور (عينات المجموعة C) تحملت عدد دورات أكبر من عدد دورات العينات المخمدة بالزيت من درجة (900 C°) (عينات المجموعة B) على الرغم من إن طور المارتنسايت في عينات المجموعة (B) سائد أكثر من عينات المجموعة (C) وذلك يعود إلى إن قيمة الإجهاد المتبقي للعينة (B₁) هو (254.6 MPa) وللعينة (B₂) هو (166.6 MPa) بينما لعينات المجموعة (C) فإن الإجهاد المتبقي للعينة (C₁) هو (326 MPa) وحوالي (197.8 MPa) للعينة (C₂). وذلك بسبب تولد مقدار كبير من الاجهادات نتيجة للفرق بالحجم بين طوري الفيرايث والمارتنسايت السائدين في بنية هذه العينة بالإضافة للاجهادات الحرارية العالية فيها.

الاستنتاجات

- 1- إن مقدار الإجهاد المتبقي يعتمد على درجة حرارة الإخماد ونوع وسط الإخماد.
- 2- المراجعة عند (200 C°) لا تزيل كل الاجهادات ولكن تقلل من قيمتها كما إنها قللت من سرعة الموجات فوق الصوتية.
- 3- المراجعة عند (200 C°) أدت إلى رفع حد الكلال على الرغم من إنها قد قللت من مقدار الإجهاد الضغطي لكنها في الوقت نفسه أعادت ترتيب الاجهادات.
- 4- إن معادلة التنبؤ بحد الكلال أعطت نتيجة مقاربة لحد الكلال للعينات بحالتها المستلمة بينما لبقية العينات فإن القيمة تبتعد ابتعادا كبيرا عن القيمة العملية وذلك بسبب إن المعادلة لا تأخذ بنظر الاعتبار الإجهاد المتبقي .

المصادر:

- [1] Nikulari, A. "Advance in surface treatment" international guide book on residual stresses. Vol.4, McGraw-hill (1987).
- [2]Kanchanomai C. and W.Limtrakarn, "Effect of residual stress on fatigue failure of carbonitrided low carbon-steel" Journal of Materials Engineering and Performance ,Volume 17, Number 6, 879-887, (2007).
- [3]E.J. Hearn, "Mechanics of materials", 2nd edition vol.2,John Wiley and Sons, (1973)
- [4]C.O. Ruud "A review of selected nondestructive methods for residual stress measurement", J. NDT International, February, volume 15, pp. (15 -23), (1982).

- [5]A. Moro, "Measurement of ultrasonic wave velocity in steel for various structure and degrees of cold working", J.NDT International, August, volume 13, pp (169-175), (1980).
- [6]D.Vanaken,"Transformation induced residual stresses" internet published 8/9/2001. <http://www.industrialheating.com>
- [7]M. B. Ndaliman" An Assessment of Mechanical Properties of Medium Carbon Steel under Different Quenching Media" AU J.T. 10(2): 100-104, (Oct. 2006).
- [8] . العلكاوي, حسين جاسم "الصلادة كاسلوب لتقييم الكلال للمعادن الحديدية وغير الحديدية " مجلة كلية الهندسة العسكرية , وزارة الدفاع بغداد- العراق , (39-31 p) 2000 .
- [9]Eric kula and Volker Weiss, "Residual stress and stress relaxation", Plenum Publishing Corporation, 28thed, (1982).
- [10]George E. Totten, "Steel heat treatment Hand Book", 2nd edition, Taylor and Francis Group,(2007) .
- [11]Addiso Wesley, "Elements of Physical Metallurgy", 3thed, pp. (148-153), John Wiley and Sons, (1974).
- [12]N. Yoshitaka and M. Susumu, "A study of residual stress for opening and closing behaviors of fatigue cracks " JSME International Journal, series 1, vol. 33, No.2, p.483, (1990).