

## دراسة تأثير درجة حرارة المعاملات الحرارية على الخواص الميكانيكية والكلال للفولاذ الكربوني ( CK 35 )

الدكتور أمين دواي ثامر\*

تاريخ التسلم: ٢٠٠٧/٢/٤

تاريخ القبول: ٢٠٠٧/٧/٥

### الخلاصة

هدف البحث هو دراسة تأثير درجة حرارة المعاملات الحرارية على الخواص الميكانيكية والكلال لفولاذ CK35 اجريت اختبارات الشد والصدمة والكلال بالاحناء الدوار بمتوسط اجهاد ( Mean Stress ) قيمته صفر. تمت عمليات المعاملة الحرارية في تسخين الفولاذ CK35 عند درجة حرارة (٨٤٠) م<sup>°</sup> وتقسيته في الماء ثم اجراء مراجعة عند درجات حرارية (٢٠٠،٤٠٠،٦٠٠) م<sup>°</sup> وتبريد بالهواء. ساهمت درجات الحرارة للمعاملات الحرارية في تحسين الخواص الميكانيكية وتحسين مقاومة الكلال واعتمد مقدار التحسين على قيم الخواص الميكانيكية وحد الكلال قبل وبعد المعاملات الحرارية ، اذ تغير التركيب المجهرى من ( فرايت ، برلايت ) قبل المعاملات الحرارية الى مارتنزيت مراجع سواء كان ( تروستايت او سوربايت ) حيث ساهمت هذه التراكيب في تكوين الحواجز البنائية التي عملت على توقف نمو الشقوق وبالتالي تحسين في حد الكلل والخواص الميكانيكية الاخرى. لقد اظهرت صور المجهر الالكتروني الماسح (SEM) لسطح الكسر صور تتبع نمو شقوق الكلال وان شق الكلال ينشئ في الاطوار المصلدة وينمو في المنطقة اللدنة بشكل اقل.

مفتاح الكلمات: الكلال، الخواص الميكانيكية، المعاملات الحرارية

### A Study on The Effect Heat Treatment Temperature On Mechanical Properties And Fatigue For Steel CK35

#### Abstract

The aim of the research is to study the influence of heat treatment temperature on mechanical properties and limit fatigue of steel CK35. Tensile, impact and fatigue rotating bending tests with the mean stress estimated to zero. All the tests of heat treatment were conducted which include heating the steel to 840 °C and then quenching by water and after that tempering at temperature of (200, 400, 600) °C and then cooling in air, show that the temperatures of heat treatment improve the mechanical properties and fatigue limit before and after heat treatment. The change in microstructure of steel before heat treatment (ferrite and pearlite) and after quenching martensite and martempering (Trostate or Sorbite) microstructures. Shown that structural barriers that may help in depriving the growth of the crack. The mechanical properties and fatigue limit were improved. The electronic microscope slides-scanner (SEM) of the fractured surface showed the fatigue cracks growth which may be formed under the hard phases and then reduction in growth in the plasticity region.

\*الجامعة التكنولوجية / قسم هندسة الانتاج والمعادن

**١ - المقدمة**

تتعرض العديد من الاجزاء الهندسية للفشل نتيجة للاجهادات الميكانيكية لاسباب تصميمية او ميتالورجية وتمثل ظاهرة فشل الكلال الحيز الاكبر من فشل الاجزاء الهندسية والتي تكون معرضة الى اجهادات دورية . ان خطورة فشل الكلال تكمن في حصوله بدون سابق انذار، لذلك اخذت ظاهرة الكلال جانب كبير من الدراسات والبحوث التي تعالج فشل المعادن، حيث تركز هذه البحوث على طبيعة الكلال والية الكسر ابتداءا من تكون الشقوق وسلوكها خلال فترات نموها وانتهاءا بالعمر العملي للاجزاء التي تتعرض للاجهادات المتكررة التي تسبب الكلال<sup>(١)</sup>.

ومن المعلوم ان مقاومة الكلال للفولاذ متوسط الكربون عالية لذلك تم التركيز في هذا البحث على كيفية تأثير البنية المجهرية على مقاومة الكلال لهذا النوع من المعدن بعد اجراء المعاملات الحرارية عليه واختبار الحالة المثلى.

وقد اجريت دراسات وبحوث عديدة حول تأثير الاطوار والبنى المجهرية المتكونة على سلوك الكلال للفولاذ متوسط الكربون منها الدراسة التي قام بها الباحث ( 1984) (DE los Rios)<sup>(٢)</sup>، والباحث (1988) (T.Tokaji)<sup>(٣)</sup> للفولاذ متوسط الكربون (CK 0.45%) باجراء الكلال بالاحناء الدوار حيث توصلوا الى ان معدل نمو الشقوق القصيرة تتأثر بالبنية المجهرية في المراحل المبكرة من النمو ولحد طول شق معين وكذلك تعتمد هذه الشقوق على مستوى الاجهاد حيث تزداد بنقصان مستوى الاجهاد، وان شقوق الكلال تبدأ وتتوسع عبر صفائح الفرايت .

كذلك قام الباحث ( J.Lankford ) (1985)<sup>(٤)</sup> بدراسة تأثير البنية المجهرية على نمو شقوق الكلال القصيرة في الفولاذ الواطئ والمتوسط الكربون المقسى والمراجع عند درجات حرارية مختلفة واستنتج بان شقوق الكلال

القصيرة تنمو اسرع من الشقوق الطويلة عندما يكون حجم المنطقة الملدنة اصغر من حجم البنية المجهرية.

اما الباحث ( K. A. (2000) Padmanabhan)<sup>(٥)</sup> فقد قام بدراسة تأثير البنية المجهرية على خواص الكلال لفولاذ سباتكي متوسط الكربون وتوصل الى ان عمر الكلال واطئ الدورات يساوي (135%) اكثر للبيرلايت الخشن مقارنة بالبيرلايت الناعم وان حد الكلال لبنية البيرلايت هي (400Mpa) بينما للبيرلايت الخشن هي (245Mpa) اما بالنسبة لبنية الفرايت الابري/البينايت فكان (365Mpaع).

**٢ - الجانب العملي****٢-١ المعدن المستخدم**

ان المعدن المستخدم في هذا البحث هو فولاذ متوسط الكربون (CK 35%) وقد تم فحص التركيب الكيماوي بجهاز المطياف (Spectrometer) وكما مبين في جدول (١).

**٢-٢ تصنيع العينات**

تم تصنيع عينات اختبار الكلال الموضحة في الشكل (١) وفقا للمواصفات القياسية لفحصها على جهاز الكلال بالاحناء الدوار ( Schenck Rotating Bending ) (punn).

**٢-٣ المعاملات الحرارية**

اجريت المعاملات الحرارية الانية على عينات الفولاذ متوسط الكربون ( CK 0/35%).

**٢-٣-١ التنقية في الماء**

رفعت درجة حرارة الفرن الى (840C°) وهي الدرجة الحرارية الملائمة لتنقية الفولاذ متوسط الكربون ( CK 0/35%) ثم تم وضع عينات الفولاذ لمدة

دراسة تأثير درجة حرارة المعاملات الحرارية على الخواص الميكانيكية والكلال للفولاذ الكربوني (CK 35 كاربون)

P : الحمل المسلط ( kg )  
D<sub>av</sub> : معدل قطر الاثر ( mm )

#### ٢-٤-٣ فحص البنية المجهرية

تم اجراء الفحص المجهرى على المقطع العرضي لعينات المجاميع المختلفة بعد اجراء التقسية والمراجعة عند درجات حرارية مختلفة واجريت عمليات تحضير العينات لغرض فحص البنية المجهرية وان نتائج البنية المجهرية موضحة في الشكل رقم (٣) .

#### ٢-٤-٤ فحص مقطع الكسر بواسطة المجهر الالكتروني الماسح ( SEM )

تم دراسة مقطع الكسر الناتج من الكلال بواسطة المجهر الالكتروني الماسح ( SEM ) وتم قياس اطوال الشقوق ودراسة مناطق الحزوز ( Striation ) وتم دراسة عمر الكلال للفولاذ المعامل حراريا ، وشكل (٤) يوضح الصور الماخوذة بالمجهر الالكتروني الماسح.

#### ٢-٤-٥ اختبار الكلال

اجري اختبار الكلال من نوع الاحناء الدوار ( Rotating Bending ) وذلك برسم العلاقة بين الاجهاد عدد الدورات ( S-N curve ) للفولاذ متوسط الكاربون بدون تعامل والمقسى بالماء والمراجع في درجات حرارة ( 200, 400, 600°C ) ، وتم تحديد حد الكلال لكل معاملة حرارية ، كما موضح في شكل (٦) .

#### ٢-٤-٦ اختبار الصدمة

اجري اختبار الصدمة بطريقة Charpy V ( للعينات المعاملة في مختلف الظروف ، وان نتائج اختبار الصدمة موضحة في الجدول (٢) .

(٢٠) دقيقة بعد ذلك تم اخمادها في الماء بشكل عمودي مع التحريك المستمر للعيينة لغرض تحطيم طبقة البخار<sup>(٦)</sup> .

#### ٢-٣-٢ المراجعة

جرت مراجعة العينات المقساء عند درجة حرارة C° ( 200, 400, 600 ) لمدة 1 hr. ومن ثم التبريد في الهواء لازالة الاجهادات الداخلية ولاعطاء المتانة المطلوبة للفولاذ المراجع وللحصول على نسبة مجهرية مختلفة لغرض دراسة تأثيرها على مقاومة الكلال<sup>(٧)</sup> .

#### ٢-٤ الفحوصات والاختبارات

##### ٢-٤-١ اختبار الشد

اجري اختبار الشد للفولاذ متوسط الكاربون ( CK 35 ) ، اذ تم تصنيف عينة واحدة لكل معاملة حرارية بموجب المواصفات القياسية رقم ( DIN 50125 ) فعينة اختبار الشد والموضحة في الشكل (٢) . والجدول (٢) يوضح نتائج اختبار الشد لفولاذ متوسط الكاربون وفقا لنوع المعاملة الحرارية.

##### ٢-٤-٢ اختبار الصلادة

اجري اختبار الصلادة بطريقتين هما روكويل ( HRC ) وفيكرز ( HV ) وكان الحمل المستخدم في طريقة روكويل هو ( 150kg ) وفي طريقة فيكرز ( 5kg ) وتم اخذ معدل لثلاث قراءات لكل عينة وتم قياس الصلادة بطريقة روكويل ( HRC ) بشكل مباشر من الجهاز ، اما الصلادة بطريقة فيكرز فقد تم اعتماد القانون

$$Hv = 1.8544 * p/D_{av}^2$$

الاتي :-

**حيث ان**

HV : صلادة فيكرز لا ( kg/mm<sup>2</sup> )

**٣ - النتائج العملية****٣-١ الخواص الميكانيكية**

الجدول (٢) يوضح نتائج اختبار الشد والصدمة والكلال والصلادة للفولاذ متوسط الكربون (CK35) .

تم رسم علاقة بين كل من مقاومة الشد والصدمة والكلال والصلادة مع درجة حرارة المراجعة ، كما موضح في الشكل (٥) .

**٣-٢ منحنيات الاجهاد- عدد الدورات (S-N) curve**

تم رسم علاقة بين الاجهاد - عدد الدورات للمعدن الاساس والمعدن المعامل حراريا في الحالات المختلفة كما موضح في الشكل (٦) .

**٤ - مناقشة النتائج**

من خلال النتائج التي حصلنا عليها وجد ان بنية المعدن الاساس تتكون من الفرايت والبرلايت وهذا ماتوضحه صور التركيب المجهرى وان حد الكلال الذي تم الحصول عليه لهذه البنية هو  $\sigma_f = 320 \text{ Mpa}$  وبان نمو شقوق الكلال لهذه البنية يتم عبر حبيبات الفرايت حيث ان حبيبات البرلايت تعتبر عوائق لنمو شق الكلال وهذا ما اوضحته صور المجهر الالكتروني الماسح من خلال تكون الحزوز (striation) في حين وجد ان حد الكلال لمجموعة العينات التي تم تقسيئها بالماء وصل الى  $\sigma_f = 740 \text{ Mpa}$  اي ان حد الكلال ازيد اكثر من الضعف مقارنة بالمعدن الاساس والبنية التي تم الحصول عليها هي المارتنزيت التي تمتاز بصلادة عالية ومطيلية ومقاومة صدمة منخفضة<sup>(٧)</sup> اي انواع الكسر يكون هش ويحصل ما بين الحبيبات اما بالنسبة لمجموعة العينات التي تم تقسيئها في الماء ومراجعتها عند  $200^\circ \text{C}$  فقد وصل حد الكلال الى مقدار  $780 \text{ Mpa}$   $\sigma_f =$  اي تضاعف حد الكلال مرتين ونصف

تقريبا ان عدد دورات الفشل قليلة ومقاربة لقيم الاجهاد المسلط اذ تحصل اعاقه لنمو الشقوق بسبب الحواجز البنائية للمارتنزيت مما يؤدي الى وضع قيم معامل شدة الاجهاد. اذ ان النسبة الناتجة التي تم الحصول عليها المارتنزيت المراجع مع كاربيد ايسلون ( $\text{Fe}_3\text{C}_4$ ) وان نوع الكسر هش نوعا على الرغم من تكون بعض الحزوز .

اما فيما يحصل لمجاميع العينات التي تم تقسيئها في الماء ومراجعتها عند  $400^\circ \text{C}$  فكانت النسبة الناتجة هي التروستايت وقد بلغ حد الكلال لهذه البنية  $\sigma_f = 520 \text{ Mpa}$  وكان الكسر من النوع المطيلي اي يحدث عبر الحبيبات مع حدوث تشكيل لدن مصحوب بتكوين الحزوز كما موضح في الشكل (٤) في حين بلغ حد الكلال لمجموعة العينات التي تم تقسيئها بالماء عند درجة حرارة مراجعة  $200^\circ \text{C}$   $\sigma_f = 520 \text{ Mpa}$  وان البنية الناتجة عبارة عن سيمنتايت كروي او حبيبي في ارضية فرايتية وتدعى بالسوربايت ويحدث الكسر عبر الحبيبات مع حدوث تشكيل لدن عال اذ يتكون الشق من التحام الفجوات وتتمو هذه الشقوق عبر صفائح الفرايت كما هو موضح في صور المجهر الالكتروني .

**٥ - الاستنتاجات**

- ١- تتخفف كل من مقاومة الكلال والشد والصلادة بزيادة درجة حرارة المراجعة.
- ٢- تزداد مقاومة الصدمة بزيادة درجة حرارة المراجعة الى حد ما .
- ٣- ان اعلى مقاومة كلال تم الحصول عليها للفولاذ المقسى والمراجع كانت في درجة حرارة  $200^\circ \text{C}$  .

دراسة تأثير درجة حرارة المعاملات الحرارية على الخواص الميكانيكية والكلال للفولاذ الكربوني (CK 35 كاربون)

مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد ٢٥، العدد ٨، ٢٠٠٧

- 4 Mik Corite., “Heat Treatment of Steel”, 2002.
- 5 Fogg P., “Hardening”, Home Book Store Available Feed Back, 2001.
- 6 Research Group. School of Engineering Sciences, University of South Ampton, High Field. Internet, 2003.
- 7 Renzhi and Wang, “Effect of Residual Stress of Shot Preening of thr Fatigue Behaviour of Carbon Steel”, 2004.
- 8 Inghabil, and Hans-Joachim, H.C., Technology in the Heat Treatment of Steel. Internet, 2001.

٤ - اعطت درجة حرارة المراجعة  $400^{\circ}C$  الخواص المتلى للفولاذ من ناحية الصلادة ومقاومة الصدمة والكلال.

٥ - ان زيادة درجة حرارة المراجعة تؤدي الى تحويل نوع الكسر من الكسر الهش الى الكسر المطيلي.

٦ - اظهر الانموذج الذي يعتمد على شدة الاجهاد في حساب عمر الكلال دقة تخمين امين من الانموذج الذي يعتمد على سرعة تقدم الشق.

#### المصادر

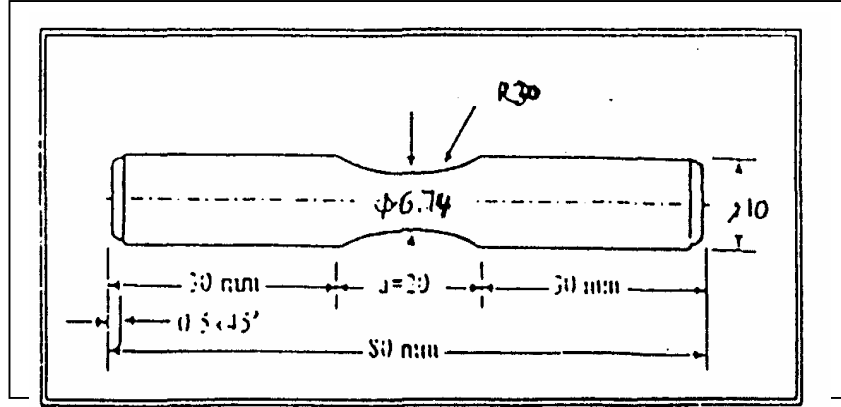
- 1 John A.L.UTZ. Manager of Engineering the June, Issue of ASM Heat Treating Progress, 1997.
- 2 Ewing, J.A and Humphery, J.C, Proc. Roy Series A.P.P, 211-250, 2000.
- 3 Smith, R.A., “Fatigue Crack Growth”, Pergoman Press 1999.

جدول رقم (١) نتائج التحليل الكيماوي للفولاذ ( CK 0/35% ).

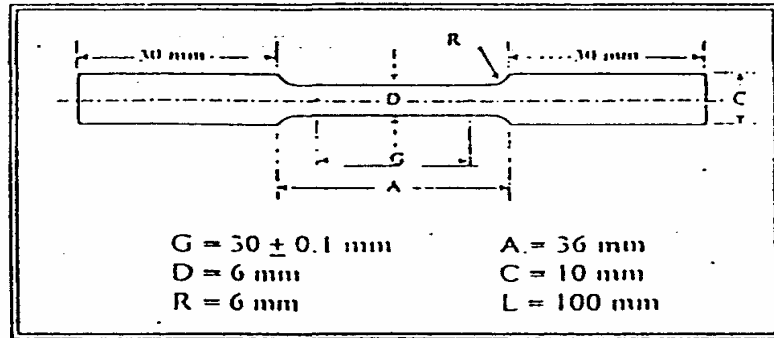
دراسة تأثير درجة حرارة المعاملات الحرارية على  
الخواص الميكانيكية والكلال للفولاذ الكربوني  
(CK 35 كاربون)

مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد ٢٥، العدد ٨، ٢٠٠٧

العنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Fe
القيمة الفعلية (wt%)	0.35	0.212	0.57	0.015	0.03	0.026	0.082	0.027	0.003	0.015	Rem



شكل (١) أبعاد عينة الكلال القياسية



شكل (٢) أبعاد عينة الشد القياسية

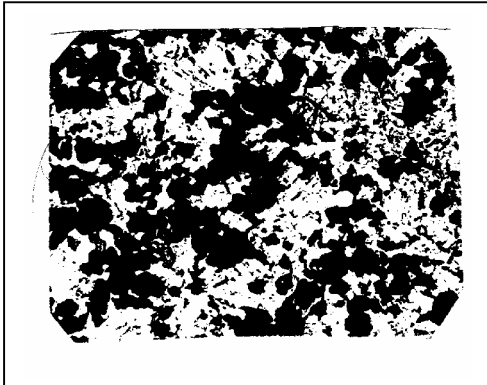
دراسة تأثير درجة حرارة المعاملات الحرارية على  
الخواص الميكانيكية والكلال للفولاذ الكربوني  
(CK 35 كاربون)



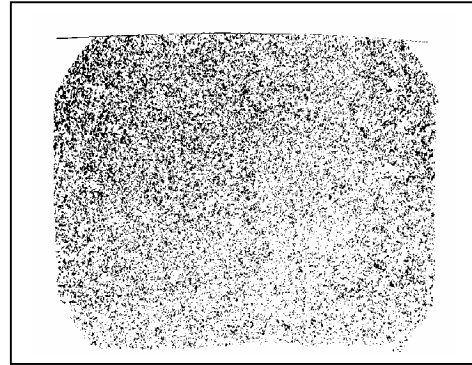
عينة فولاذ كاربوني ( 0.35 c% ) ( 840 C° )  
ملدن قوة التكبير ( 150 X )



عينة فولاذ كاربوني بعد التقسية بالماء  
وقوة التكبير ( 400 X )



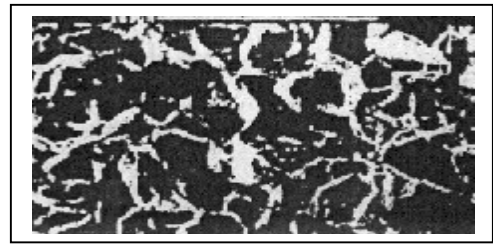
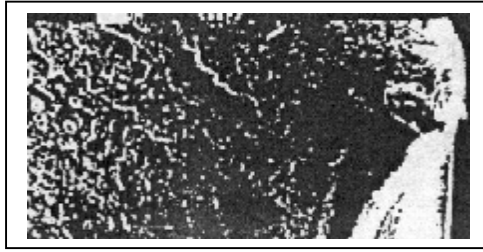
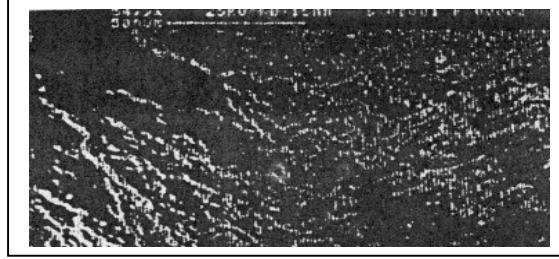
عينة فولاذ كاربوني بعد التقسية بالماء  
والمراجعة ( 400Co ) وقوة تكبير ( 400X )



عينة فولاذ كاربوني بعد التقسية بالماء  
والمراجعة ( 600Co ) وقوة تكبير ( 150X )

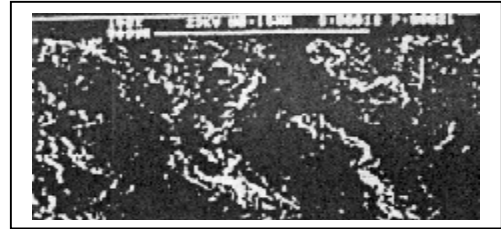
الشكل (٣) البنية المجهرية للفولاذ متوسط الكاربون

بدون تعامل ، قوة التكبير ( 55X )



تقسية في الماء ، مع مراجعة عند ( 200C° )  
قوة تكبير ( 36X )

تقسية في الماء ، قوة التكبير ( 500X )



، الماء مع مراجعة عند ( 600Co ) قوة التكبير ( 100X )

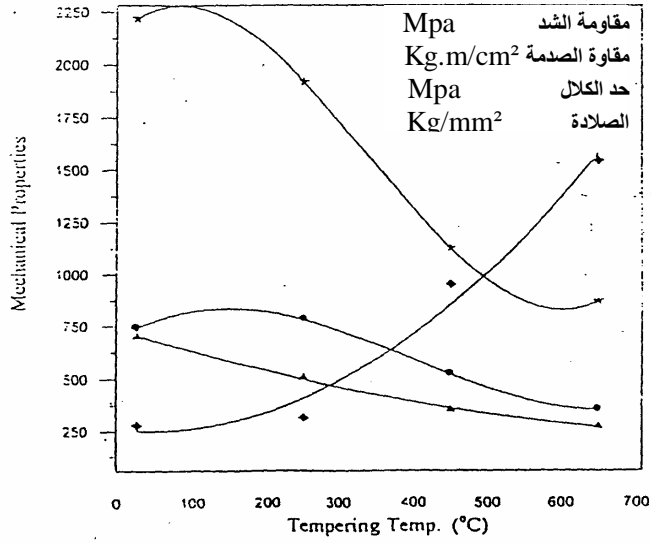
تقسية في الماء ، مع مراجعة عند (400C°)

الشكل (٤) فحص مقطع الكسر لفولاذ متوسط الكربون



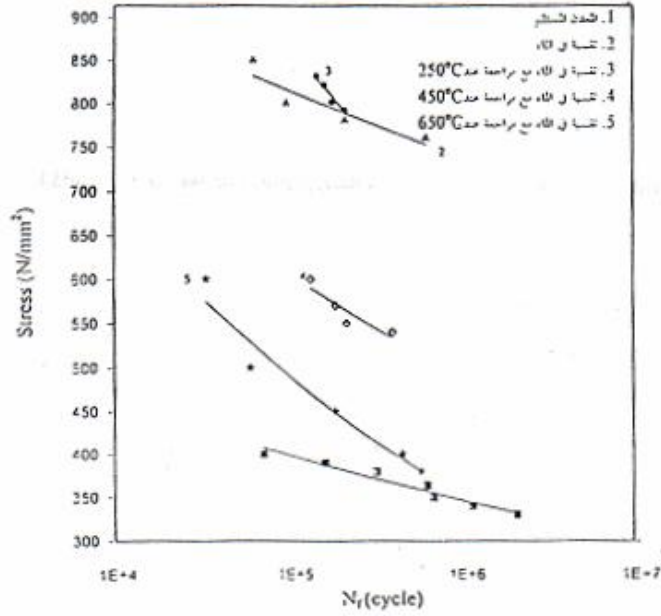
جدول (٢) نتائج اختبار الشد والصدمة والكلال والصلادة للفولاذ المتوسط الكاربون (CK 35)

No.	نوع المعاملة	مقاومة الشد Mpa	مقاومة الخضوع Mpa	مقاومة الصدمة Kg.m/cm <sup>2</sup>	حد الكلال σ <sub>f</sub> Mpa	الصلادة	
						HV	HRC
1	بدون تعامل	622	595	270	320	218	17.1
2	تقسية في الماء من (840°C) لمدة 15min	2220	2030	243	740	702	59.3
3	تقسية في الماء - مراجعة عند (200°C) لمدة 1hr	1920	1810	270	780	505	49.1
4	تقسية في الماء - مراجعة عند (400°C) لمدة 1hr	1125	985	941	520	350	35.5
5	تقسية في الماء + مراجعة عند (600°C) لمدة 1hr	870	745	1338	350	270	25

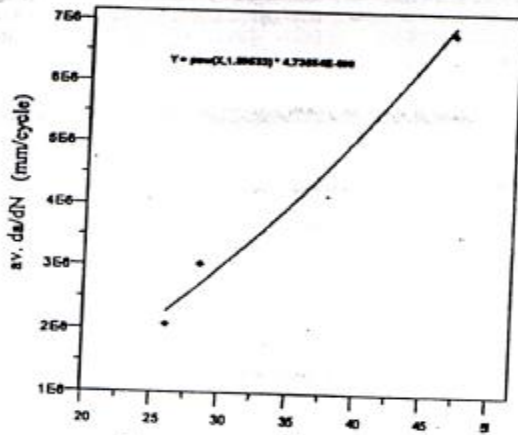


شكل (٥) العلاقة بين الخواص الميكانيكية ودرجة حرارة المراجعة

دراسة تأثير درجة حرارة المعاملات الحرارية على الخواص الميكانيكية والكلال للفولاذ الكربوني (CK 35 كاربون)

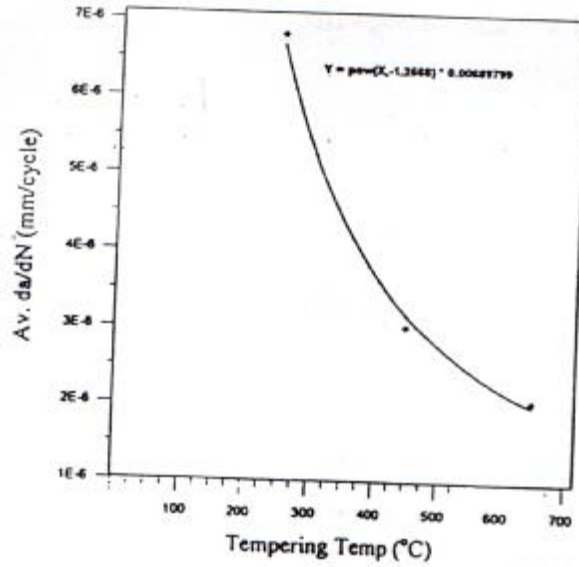


شكل (٦) العلاقة بين الاجهاد- عدد الدورات لفولاذ متوسط الكربون معامل بطرق مختلفة

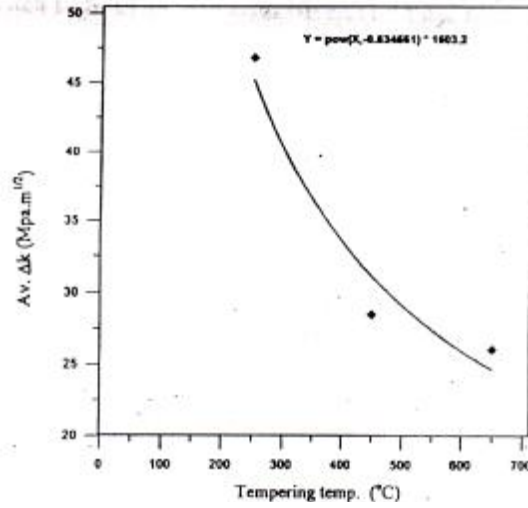


شكل (٧) العلاقة بين معدل سرعة تقدم الشق-معدل شدة الاجهاد لفولاذ متوسط مقسى في الماء ومراجع عند درجات حرارة (٢٠٠،٤٠٠،٦٠٠)

دراسة تأثير درجة حرارة المعاملات الحرارية على الخواص الميكانيكية والكلال للفولاذ الكاربوني (CK 35 كاربون)



شكل (٨) العلاقة بين معدل سرعة تقدم الشق - درجة حرارة المراجعة لفولاذ متوسط مقسى في الماء ومراجع عند درجات حرارة (٢٠٠،٤٠٠،٦٠٠)



شكل (٩) العلاقة بين معدل سرعة تقدم الشق - درجة حرارة المراجعة لفولاذ متوسط مقسى في الماء ومراجع عند درجات حرارة (٢٠٠،٤٠٠،٦٠٠)

جدول (٣) الحسابات الخاصة بنمو الشقوق للفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند (٢٠٠ C<sup>0</sup>)

b <sub>0</sub> =-0.06408		b <sub>1</sub> =9.3095*10 <sup>-6</sup>		b <sub>2</sub> =1.49138*10 <sup>-11</sup>	
a (mm)	N <sub>f</sub> (cycle)	S (N/mm <sup>2</sup> )	da/dN (mm/cycle)	Δk (Mpa.m <sup>1/2</sup> )	
0.956	1.39*10 <sup>3</sup>	830	7.230*10 <sup>-6</sup>	45.49	
0.982	1.54*10 <sup>3</sup>	820	7.013*10 <sup>-6</sup>	45.55	
1.12	1.72*10 <sup>3</sup>	800	6.744*10 <sup>-6</sup>	47.45	
1.21	2.04*10 <sup>3</sup>	790	6.267*10 <sup>-6</sup>	48.71	
-	-	-	av.(da/dN)=6.8*10 <sup>-6</sup>	av. Δk =46.8	

جدول (٤) الحسابات الخاصة بنمو الشقوق للفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند (٤٠٠ C<sup>0</sup>)

b <sub>0</sub> =-0.19283		b <sub>1</sub> =4.2591*10 <sup>-6</sup>		b <sub>2</sub> =5.54997*10 <sup>-12</sup>	
a (mm)	N <sub>f</sub> (cycle)	S (N/mm <sup>2</sup> )	da/dN (mm/cycle)	Δk (Mpa.m <sup>1/2</sup> )	
0.64	1.27*10 <sup>3</sup>	600	3.554*10 <sup>-6</sup>	26.9	
0.785	1.76*10 <sup>3</sup>	570	3.282*10 <sup>-6</sup>	28.81	
0.82	2.04*10 <sup>3</sup>	550	3.127*10 <sup>-6</sup>	27.92	
1.01	3.75*10 <sup>3</sup>	540	2.178*10 <sup>-6</sup>	30.42	
-	-	-	av.(da/dN)=3.03*10 <sup>-6</sup>	av. Δk =28.5	

جدول (٥) الحسابات الخاصة بنمو الشقوق للفولاذ المقسى في الماء والمراجع عند (٦٠٠ C<sup>0</sup>)

b <sub>0</sub> =-0.639		b <sub>1</sub> =2.4056*10 <sup>-6</sup>		b <sub>2</sub> =1.11096*10 <sup>-12</sup>	
a (mm)	N <sub>f</sub> (cycle)	S (N/mm <sup>2</sup> )	da/dN (mm/cycle)	Δk (Mpa.m <sup>1/2</sup> )	
0.762	5.60*10 <sup>3</sup>	500	2.343*10 <sup>-6</sup>	24.46	
1.04	1.74*10 <sup>3</sup>	450	2.212*10 <sup>-6</sup>	25.72	
1.44	4.22*10 <sup>3</sup>	400	1.936*10 <sup>-6</sup>	26.90	
1.62	5.38*10 <sup>3</sup>	380	1.808*10 <sup>-6</sup>	27.11	
-	-	-	av.(da/dN)=2.075*10 <sup>-6</sup>	av. Δk =26.05	