

تأثير زمن الكربنة الغازية على الخواص الميكانيكية للفولاذ المنخفض الكربون

الدكتور نبيل مقدسي*
الدكتور خليل عزيمة**
معن معلا***

(تاريخ الإيداع 4 / 2 / 2007. قبل للنشر في 13/3/2007)

□ الملخص □

تعتبر الكربنة الغازية إحدى تقنيات المعالجة السطحية المستخدمة لتحسين خواص سطوح المحاور والمسننات وعناصر الآلات المعرضة للاجهادات، ولزيادة متانة التعب و الاهتراء والحصول على قساوة سطحية عالية. تم في هذا البحث تطبيق الكربنة الغازية عند الدرجة 910°C لمدة (10,5) ساعة، بهدف تحسين الخواص الميكانيكية لأحد أنواع الفولاذ المنخفض الكربون المستخدم محلياً في تصنيع بعض عناصر الآلات. أظهر البحث أن زيادة زمن دورة الكربنة يؤدي إلى زيادة العمق الفعال والعمق الكلي للقشرة المصددة، وإلى تحسين متانة الشد والخضوع وتناقص الاستطالة وزيادة القساوة السطحية.

كلمات مفتاحية: الكربنة الغازية، فولاذ منخفض الكربون، القساوة الميكروية، الخواص الميكانيكية.

* أستاذ في قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** أستاذ في قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.
*** طالب ماجستير في قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

The Effect of Gas Carburizing Time on Mechanical Properties of Low Carbon Steel

Dr. Nabil Makdissi *
Dr. Khalil Azimeh **
Maan Moualla ***

(Received 4 / 2 / 2007. Accepted 13/3/2007)

□ ABSTRACT □

Gas carburizing is one of the surface treatment techniques used to improve surface properties of shafts, gears and stressed machine parts to obtain very high surface hardness as well as fatigue and wear resistance.

In this study gas carburizing applied at 910⁰C for (5,10) h to improve the mechanical properties on one of low carbon steel containing 0.15%C locally used in manufacturing some machine elements.

This study showed that the effective and total case depth of carburized layer on the surface and tensile, yield strength increased by increasing the carburizing time.

Key words: Gas carburizing, Low carbon steel, Micro hardness, Mechanical properties.

* Professor, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Professor Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

*** Postgraduate Student, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

يعتبر اختيار مادة عناصر الآلات من المقاييس المهمة والأساسية التي تحدد مقدرة الآلات على العمل. فلهذا الاختيار دور كبير في تحقيق التشغيل الأمثل لهذه الآلات، ويتحدد هذا الاختيار بمجموعة من المتطلبات المهمة كالمتانة ومقاومة التآكل والاهتراء.

لذلك عكف العلماء والمختصون على دراسة مواصفات المواد وتطوير خواصها بطرق مختلفة منها معالجة سطحها الخارجي، وتتمثل المعالجة السطحية surface treatment في تكوين طبقة رقيقة جداً مقارنة بعمق المادة. أو إضافة طبقة خارجية للمادة الأصلية.

وتهدف معالجة السطح الخارجي إلى [1]:

1. تحسين مقاومة السطح الخارجي للتآكل وتطوير المقاومة الخارجية للمادة مقارنة بكامل الجسم وتجرى هذه العملية لكل من المواد الحديدية وغير الحديدية من خلال عملية التغطية أو التغليف.
2. زيادة صلادة السطح الخارجي وتحسين الخواص الميكانيكية، وزيادة مقاومة السطح للحت والاهتراء في حالة تعرض السطح لاحتكاكات خارجية مع احتفاظ بقية الجسم بالمتانة. وهذه المواصفات مطلوبة في كثير من التطبيقات الصناعية خاصة الفولاذ المستخدم في صناعة عناصر الآلات كالمسننات بأنواعها والمحاور. الخ. وتعرف هذه المعالجة باسم تصليد التغليف للفولاذ case hardening of steel.
3. إكساب المادة مظهراً خارجياً جذاباً، وإضفاء مسحة جمالية عليه ويتم ذلك بتغطية السطح بمواد معدنية أو من خلال عمليات الطلاء.

المعالجة الحرارية الكيميائية للفولاذ:

يعتمد في هذا النوع من المعالجة على تغيير التركيب الكيميائي للقشرة السطحية للفولاذ، وذلك عن طريق انتشار ذرات العناصر المضافة في سطح القطعة، وبذلك تتغير خواص الطبقة السطحية عن لبها.

تتلخص المعالجة الحرارية الكيميائية السطحية للفولاذ بما يأتي [2]:

1. وضع القطعة المراد معالجتها السطحية في وسط صلب أو سائل أو غاز يحوي العنصر المراد إضافته بشكل حر أو على شكل مركب كيميائي قابل للتفكك.
2. رفع درجة حرارة القطعة مع الوسط الحاوي على العنصر المراد إضافته إلى درجة الحرارة التي يتفكك فيها المركب الكيميائي، وعندها يصبح العنصر فعالاً وتصبح سرعة الانتشار ملائمة لانتشار هذا العنصر داخل سطح القطعة، وهذا يتطلب المحافظة على درجة الحرارة فترة معينة من الزمن حتى يتم الانتشار بالشكل المطلوب.

والطرق الرئيسية المتبعة هي:

1. الكربنة.
2. النتردة (النترجة).
3. السيندة (الكربونترده).
4. المعالجة بالمعادن (الألمنيوم، الكروم، البورون. ... الخ)

هدف البحث:

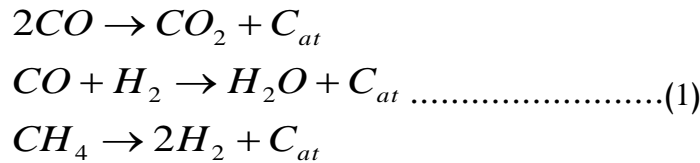
يهدف البحث إلى تطبيق الكربنة الغازية كإحدى طرق المعالجة السطحية لأحد أنواع الفولاذ منخفض الكربون المستخدم محلياً في تصنيع بعض عناصر الآلات (كالمحاور، المسننات بأنواعها، البراغي، الصواميل، أجزاء السلاسل) بغية تحسين الخواص الميكانيكية لتقاوم الاحتكاك والشد.

عمليات الكربنة carburizing processes:

تعتبر عمليات الكربنة من أقدم عمليات المعالجة الحرارية الكيميائية للفولاذ وأوسعها انتشاراً. والهدف من عملية الكربنة بشكل رئيس هو إشباع الطبقات السطحية للفولاذ بالكربون. تطبق عمليات الكربنة على الفولاذ منخفض الكربون low carbon steel والفولاذ منخفض السبائكية low alloy steel حيث لا تزيد نسبة الكربون عن (0.25% C)، وهذا يعني تكوين طبقة سطحية غنية بالكربون (حيث يكون المعدن الأصلي بالأساس منخفض الكربون)، ويبقى القلب (المنخفض الكربون) طرياً متيناً حتى بعد تعرّض الطبقة السطحية المكربنة للتقسية. وتتنوع طرق الكربنة تبعاً للوسط الذي تجري فيه (صلبة، سائلة، غازية، بالخلاء) [1،2،3].

الكربنة الغازية gas carburizing:

تعتبر الكربنة الغازية من الطرق المهمة لتحسين خواص سطوح عناصر الآلات المعرضة للاجهادات، وللحصول على قساوة سطحية عالية، ولتحسين الخواص الميكانيكية، ولزيادة متانة التعب ومقاومة الاهتراء [4]. تجري الكربنة الغازية بتسخين المنتج في وسط من الغازات المحتوية على الكربون عند درجات حرارة تتراوح بين (900 و 950) درجة مئوية. تستعمل لتنفيذ هذه العملية غازات تحتوي على الكربون مثل أول أكسيد الكربون والكربونات الهيدروجينية، حيث تتفكك في درجة حرارة العملية مكونة الكربون الذري. تعتبر الكربونات الهيدروجينية المشبعة (C_nH_{2n+2}) (ميثان، إيثان، بروبان، بوتان... الخ) من أكثر المكربنات الغازية المستخدمة لتحقيق هذا الهدف. كما وتم الكربنة الغازية باستعمال مواد ايدروكربونية (الكاز، الكيروسين، البنزين) حيث يتم تزويدها إلى الفرن بطريقة الرزاز وبشكل مستمر إلى فرن الكربنة حيث تتفكك إلى مزيج غازي من الميثان وأول أكسيد الكربون والهيدروجين الحر حيث تحدث التفاعلات الآتية [3]:



الكربون ينتشر داخل المعدن

إن معدل تشكل القشرة في عملية الكربنة يتعلّق بعدة عوامل [5]:

1. المحتوى الكربوني في جو الفرن.
 2. معامل انتقال الكربون عبر السطح.
 3. معدل انتشار الكربون داخل الفولاذ وهذا يزداد بازدياد درجة الحرارة وزمن المعالجة.
- يعبر عن عمق طبقة الكربنة carburizing case depth من خلال العلاقة (2) [5]:

$$x = \frac{0.79\sqrt{D.t}}{0.24 + \frac{(C_{x,t} - C_0)}{(C_s - C_0)}} - 0.7 \frac{D}{\beta} \quad (2)$$

X: عمق طبقة الكربنة (cm).

D: معامل انتشار الكربون في الأوستنيت (cm²/S).

t: زمن الكربنة (s).

C_x: محتوى الكربون عند عمق x خلال الزمن t (atoms/cm³).

C₀: التركيز الابتدائي للكربون داخل الفولاذ (atoms/cm³).

C_s: المحتوى الكربوني في جو الفرن (تركيز الكربون على السطح) (atoms/cm³).

β: معامل انتقال الكربون الى سطح الفولاذ (cm/s).

يوجد تعبيران مهمان في التصليد الكربوني للسطوح هما [5,1]:

1. العمق الفعال للقشرة (Effective case depth (ECD): العمق بدءاً من السطح باتجاه النواة الذي تتكون عنده القساوة مساوية 550HV.

2. العمق الكلي للقشرة (Total case depth (TCD): العمق بدءاً من السطح باتجاه النواة الذي تكون عنده القساوة أكبر من قساوة النواة بـ 10%.

تتكون طبقة الكربنة من ثلاث مناطق [3,2]:

1. طبقة السطح التي تحتوي أكثر من 0.8-0.9% C وتملك هذه الطبقة بنية البرليت والسمنتيت وهذا ما يدعى منطقة فوق اليوتكتويد.

2. منطقة اليوتكتويد المحتوية على كمية كربون حوالي 0.8% C.

3. منطقة تحت اليوتكتويد التي تحتوي أقل من 0.7% C.

وهكذا يتغير محتوى الكربون تدريجياً حتى الوصول إلى البنية الأصلية في النواة.

معامل انتقال الكربون β Carbon transfer coefficient

يكون معدّل الكربنة عالياً عندما يكون جو الفرن يحتوي على كمية كبيرة من الغازات المؤكسدة carburant

gases المتدفقة [5].

إن تدفق الغاز المؤكسدة يعطى بالعلاقة الآتية:

$$J = \frac{Mc}{S.t} \quad (3)$$

حيث:

J: تدفق الغاز المؤكسدة (atoms/cm².s).

Mc: كمية الكربون المنتقلة عبر السطح (atoms).

S: مساحة السطح cm².

t: الزمن (s).

خلال تشكل غاز CO في جو الفرن، فإن الكربون الذري ينفصل وينتشر داخل الفولاذ، لكن في المراحل الأولى فإن الأوكسجين يُمتص إلى داخل سطح الفولاذ وهذا بدوره يشكل مقاومة لانتقال الكربون، وبعد فترة من الوقت فإن الأوكسجين يتحول إلى طور غازي مثل (H₂O،CO₂،O₂) [6].
يعطى معامل انتقال الكربون من خلال العلاقة (4)[7]:

$$\beta = \frac{A.K_4.P_{co}.\sqrt{P_{H2}}}{a_c + B.K_4.P_{co}.\sqrt{P_{H2}}} \quad (4)$$

حيث إن: K₄ ثابت يتعلق بدرجة حرارة المعالجة.

$$K_4 = \frac{7130}{T} - 7.494$$

T: درجة الحرارة المطلقة (K).

a_c: فاعلية الكربون وتعلق بالمحتوى الكربوني في جو الفرن .

P: الضغط الجزئي.

تعتمد قيمة β على العوامل التالية:

1. تركيب جو الفرن (الغازات المتشكلة بجو الفرن).
2. درجة الحرارة.
3. ممانعة انتقال الكربون بسبب امتصاص الأوكسجين.

معامل انتشار الكربون D :Coefficient of carbon diffusion

يعتمد معدل انتشار الكربون في الأوستنيت عند درجة حرارة محددة على عاملين أساسيين هما [8]:

1. معامل انتشار الكربون في الفولاذ D.

يمكن أن يعرف معامل انتشار الكربون في الأوستنيت من قوانين فيكز للانتشار Fick's laws

أ- يعطى القانون الأول للانتشار من خلال العلاقة:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (5)$$

J: التدفق (atoms/cm².s).

C: تركيز الكربون (atoms/cm³).

X: العمق عند الزمن t (cm).

D: معامل الانتشار (cm²/S).

ب- يعطى القانون الثاني للانتشار من خلال العلاقة:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial^2 X} \quad (6)$$

$$D = 0.2e \frac{-16608}{T}$$

يصبح قانون فيكز للانتشار وفق العلاقة الآتية:

$$\frac{C_{x,t} - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{X}{2\sqrt{D.t}}\right) \quad (7)$$

erf: معامل تصحيح يعطى بجداول خاصة.

2. تدرج تركيز الكربون carbon concentration gradient في الفولاذ المعالج.

مواد وطرق البحث:

أجري البحث على عينات من الفولاذ المنخفض الكربون المستخدم محليا في تصنيع بعض الآلات حيث تم أخذ العينات من قضبان طويلة وتم خراطتها إلى القطر 14mm وقصها بالمخرطة إلى الطول 15mm وبعد ذلك تم تنعيمها بورق صنفرة بدءا من الدرجة 400 وصولا للدرجة 1200.

ويبين الجدول (1) التركيب الكيميائي للفولاذ المستخدم حيث أجري اختبار التحليل الكيميائي باستخدام جهاز التحليل الطيفي للمعادن في مخبر تحليل المعادن في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين حيث تم أخذ ثلاث قراءات و أخذ المتوسط للقراءات الثلاث.

الجدول (1) يبين التركيب الكيميائي للفولاذ المستخدم

العنصر	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
النسبة المئوية	97.0	0.148	0.0254	1.49	0.08	0.369	0.076	0.109

التجارب والاختبارات:

1. الكربنة الغازية:

تم إجراء الكربنة الغازية في مؤسسة معامل الدفاع، حيث وضعت العينات في بوتقة كبيرة داخل فرن الكربنة من أجل إخراج العينات عند الزمن المطلوب مع استمرار تشغيل الفرن، وتم التسخين إلى الدرجة 910°C لمدة (5,10) ساعة مع تدوير الكاز بشكل مستمر إلى داخل الفرن.

برنامج المعالجة الحرارية (تم تحديد برنامج المعالجة الحرارية بناء على البرنامج المتبع في المؤسسة)

1. دورة الكربنة Carburizing cycle

- التسخين حتى الدرجة 910 والإبقاء عند هذه الدرجة لمدة 5 ساعات ثم التبريد البطيء مع الفرن.
- التسخين حتى الدرجة 910 والإبقاء عند هذه الدرجة لمدة 10 ساعات ثم التبريد البطيء مع الفرن.

2. التقسية Quenching

- التسخين إلى الدرجة 810°C والإبقاء عند هذه الدرجة لمدة 4 دقائق ثم التبريد بالماء.

3. الإرجاع Tempering

- التسخين إلى الدرجة 200°C لمدة ساعة واحدة ثم التبريد بالهواء.

اختبار البنية والقساوة: Hardness and microstructure testing:

أجري اختبار القساوة الميكروية Microhardness والبنية المجهرية في مؤسسة معامل الدفاع. تصل قوة تكبير المجهر الضوئي فيه إلى 1000X. تعطى قساوة فيكرز وفق العلاقة الآتية:

$$HV = 1.8544 \frac{P}{d^2} [kg / mm^2] \quad (8)$$

P: الحمل المطبق [Kg] .

d: متوسط قطر الأثر الذي يتركه الهرم [mm] .

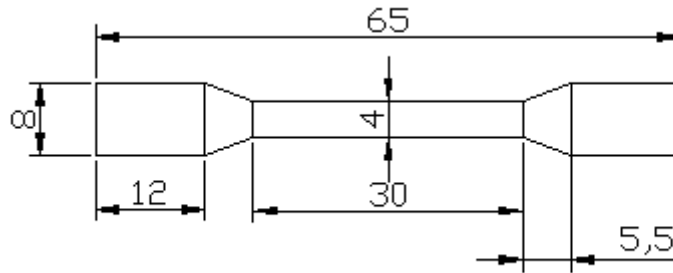
الحمل المطبق أثناء الاختبار يساوي 400 gr.

خضعت العينات المعالجة إلى عمليات ميكانيكية (جليخ وصلق)، وعمليات كيميائية (تخريش في محلول حمض الآزوت بتركيز 4%) .

اختبار الشد Tensile test

تم إجراء اختبار الشد في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق على آلة نوع Inestron بريطانية الصنع مزودة براسم بياني الكتروني لمنحني الشد.

تم تحضير عينات الشد وفقاً للمواصفة الأمريكية (ASTM E8)، حيث تم خراطة العينات إلى الأبعاد المبينة بالشكل (1)، وبعد الخراطة تم تعقيم العينات بواسطة ورق صنفرة بنعومة 600.



الشكل (1) أبعاد عينة الشد وفقاً للمواصفة ASTM E8 الأبعاد بالـ mm

النتائج والمناقشة:**اختبار البنية والقساوة:**

بعد إجراء عملية الكربنة والتقسية والإرجاع تم قياس تدرج القساوة الميكروية بدءاً من السطح باتجاه الداخل عن طريق إجراء مقطع عرضي، حيث كانت النتائج كما هو موضح بالجدولين (2،3) (أخذ متوسط ثلاث قراءات) قساوة الفولاذ بدون معالجة 196 HV).

الجدول (2) بين قيم القساوة الميكروية عند درجة حرارة المعالجة والزمن 5 ساعات

العمق [mm]	القساوة [HV]	العمق [mm]	القساوة [HV]
-	694	0.630	560
0.05	694	0.780	511
0.155	683	0.986	473
0.215	665	1.286	235
0.312	654	1.634	199
0.496	644		

الجدول (3) بين قيم القساوة الميكروية عند درجة حرارة المعالجة والزمن 10 ساعات

العمق [mm]	القساوة [HV]	العمق [mm]	القساوة [HV]
-	715	0.630	615
0.05	711	0.780	585
0.155	706	0.986	545
0.215	692	1.286	300
0.312	661	1.634	230
0.496	650	1.68	202

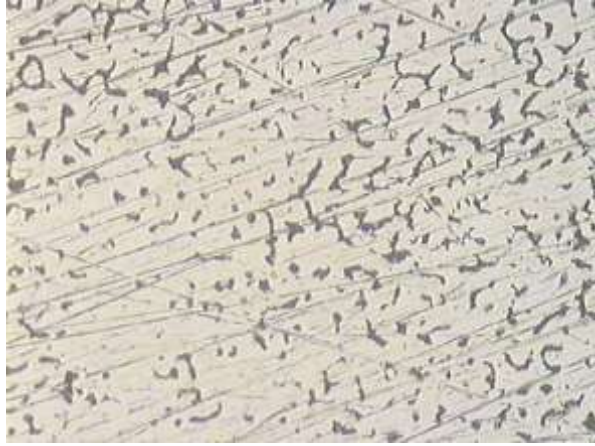
ويكون العمق الفعال والكلي للقشرة المتشكلة كما هو موضح بالجدول (4)

الجدول (4) يبين العمق الفعال والعمق الكلي للقشرة المتشكلة

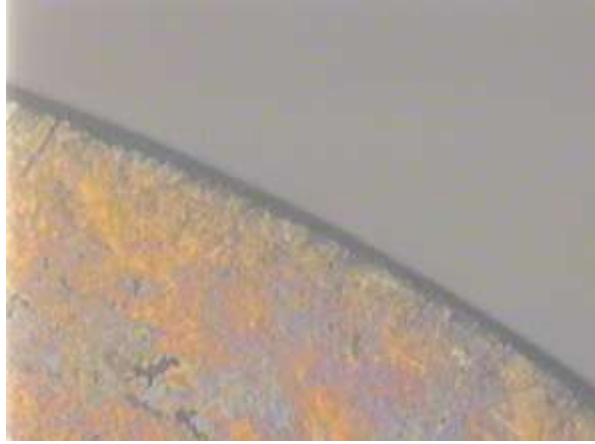
زمن المعالجة [ساعة]	5 ساعة	10 ساعة
العمق الفعال [mm]	0.630	0.986
العمق الكلي [mm]	1.286	1.634

إن العمق الفعال والعمق الكلي للقشرة المتشكلة يتعلق بشكل مباشر بزمن المعالجة، فزيادة زمن المعالجة يؤدي لزيادة العمق الفعال والعمق الكلي.

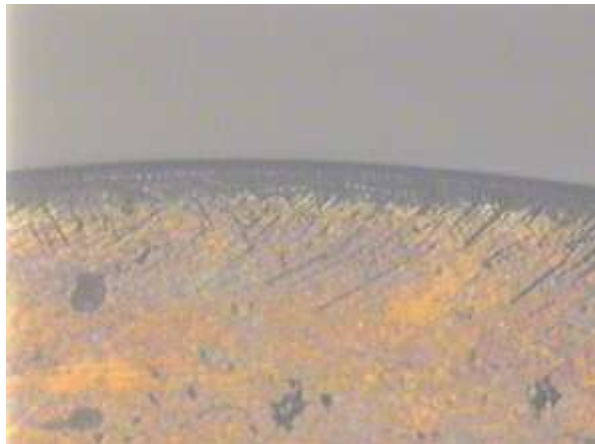
بنتيجة الفحص المجهرى للقشرة المصددة فإن بنية القشرة المصددة تتألف من المارتنسييت المراجع tempered martensite ونسب قليلة من الأوستنيت المتبقي retained austenite. إن نسبة الأوستنيت المتبقي تقل بدءاً من سطح القشرة باتجاه النواة بسبب تناقص نسبة الكربون بدءاً من السطح، وهذا يؤدي لزيادة درجة حرارة بداية التحول المارتنسييني M_s ونهايته M_f . ويبين الشكل (2) القشرة المتشكلة على سطح الفولاذ عند درجة حرارة المعالجة والزمن (10،5) ساعة ويبين الشكل (3) التخطيط البياني لعلاقة القساوة الميكروية مع العمق تحت السطح.



A: البنية المجهرية للفولاذ

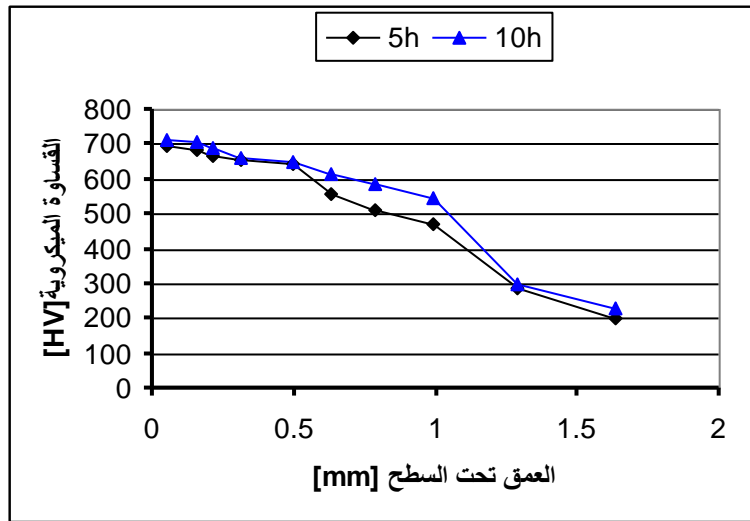


B: عند زمن 5 ساعات



C: عند زمن 10 ساعات

الشكل (2) بين البنية المجهرية للفولاذ قبل الكربنة والقشرة المتشكلة بعد عملية الكربنة عند تكبير 50X



الشكل (3) التخطيط البياني لعلاقة القساوة الميكروية مع العمق تحت السطح

اختبار الشد:

يبين الجدول (5) الخواص الميكانيكية للفولاذ المستخدم:

الجدول(5) الخواص الميكانيكية للفولاذ المستخدم

الاستطالة %	متانة الخضوع kg/mm ²	متانة الشد kg/mm ²
18.2	45	67

يبين الجدول (6) الخواص الميكانيكية المستنتجة من اختبار الشد بعد إجراء الكربنة الغازية (تم أخذ متوسط ثلاث

قراءات).

الجدول(6) الخواص الميكانيكية للفولاذ المستخدم بعد إجراء عملية الكربنة الغازية

الاستطالة %	متانة الخضوع kg/mm ²	متانة الشد kg/mm ²	نسبة الكربون على السطح %	زمن المعالجة [ساعة]
11.9	70.46	91.69	0.921	5
10.22	73.24	102.7	0.964	10

نلاحظ ازدياد متانة الشد والخضوع tensile and yield strength بازدياد زمن المعالجة، حيث ازدادت متانة الشد بنسبة 35% عند زمن 5 ساعات إلى 52% عند زمن 10 ساعات، وازدياد متانة الخضوع بنسبة 56% عند زمن 5 ساعات إلى 62% عند زمن 10 ساعات. بينما تناقصت الاستطالة بنسبة 34% إلى 43% عند زمن 10,5 ساعة.

تتعلق الخواص الميكانيكية للفولاذ المكرن بنسبة الأوستنيت المتبقي [4] في القشرة وهذا يتعلق بدرجة حرارة بداية التحول المارتنسي M_s ونهايته M_f ، فالفولاذ الذي يحتوي على نسبة كربون أعلى من 0.7% في القشرة فإن، درجة حرارة M_f تقع تحت درجة حرارة الغرفة ونتيجة لذلك، لا يتحول كامل الأوستنيت إلى مارتنسييت.

تؤثر الاجهادات المتبقية في القشرة والنواة على بقية الخواص الميكانيكية كالتعب والالتواء والاهتراء، حيث تنشأ الاجهادات المتبقية نتيجة التأثير المتبادل بين القشرة والنواة خلال عملية التقسية، و نتيجة لذلك تنشأ إجهادات ضاغطة

متبقية في الطبقة السطحية واجهادات شد متبقية في النواة، تشكل هذه الاجهادات الضاغطة يحسن خواص الفولاذ أثناء تعرض الفولاذ لاجهادات التعب والالتواء، وترفع مقاومة الفولاذ للاهتراء [4،9].

الاستنتاجات والتوصيات:

1. بالنظر إلى الاختبارات الميكانيكية (قساوة - شد)، يمكن أن نخلص إلى أن استخدام الكربنة الغازية أدت إلى تحسين الخواص الميكانيكية (متانة الشد، متانة الخضوع)، وإلى زيادة قيمة القساوة السطحية بمقدار 3.5 مرة التي تؤدي لزيادة مقاومة سطح الفولاذ للاحتكاك.
2. إن مضاعفة زمن المعالجة أدى إلى ازدياد العمق الفعال والكلي للقشرة المتشكلة على السطح.
3. اختلاف قيم القساوة الميكروية عند العمق نفسه، وهذا يعود لوجود الاوستنيت المتبقي.
4. تحديد نسبة الاوستنيت المتبقي في القشرة بشكل دقيق تبعاً للعمق باستخدام جهاز حيود أشعة X عند أزمان مختلفة للمعالجة.
5. دراسة تأثير المعالجات الانتشارية بالمعادن (كالكروم والبورون) بهدف رفع مقاومة الفولاذ للتآكل.
6. نقل النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة إلى الواقع العملي خاصة إلى القطاع الخاص بما يساهم في رفع مستوى التنمية في سورية.

المراجع:

1. عزيزة، خليل، خزندار، محمد خميس، الحلبي، بسام. *المعالجة السطحية للفولاذ بالكربون*، جامعة دمشق. 2002، 122.
2. هترة، علي. *المعالجات الحرارية للمعادن*، منشورات جامعة تشرين، 2000، 331.
3. يولاختين. *علم المعادن والمعاملة الحرارية للمعادن*، دار مير للطباعة والنشر، موسكو 1983، 446.
4. KRAUSS. *Heat Treatment and Processing Principles*, ASM International, Metals Park, OH, 1989, 291-305.
5. HIRSCHHEIMER, L.R, *The Mathematical Basis for Carburization Processes*. In Proceedings of 2nd International Conference on Carburizing and Nitriding with Atmospheres by ASM Internationals, Materials Park, OH, Dec 1995, 129-131.
6. PRASANNAN,P.C. *Carburization of Steels – An Overview*. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences vol. 1, Aug 1994, 221-228.
7. RAIC K.T. *Control of Gas Carburizing by the Diagram Method*. in Scand. J. Metallurgy22, 50-54.
8. DISLER, W.D. *Using On-line Predictive Computer Modeling to Optimize Heat-treat Processing*. in Proceedings of 2nd International Conference on Carburizing and Nitriding with Atmospheres by ASM Internationals, Materials Park, OH; Dec 1995, 29-34.
9. DONG,M, CHANG,Y. *fatigue properties of plasma carburized low carbon Cr-Mo steel*. ISIJ international, Vol.42, 2002, No9, 1042-1048.