

نمذجة ديناميكية لانتشار شقوق التعب في نقاط التعشيق بين أسنان المسننات المستقيمة

د. ثائر احمد عثمان *

(تاريخ الإيداع 18 / 4 / 2020. قُبل للنشر في 24 / 1 / 2021)

□ ملخص □

قمنا في هذا البحث بالبحث بدراسة تأثير شروط التحميل الديناميكي على فترة انتشار شقوق التعب للمسننات ذات الأسنان المستقيمة والمعالجة بالتردد. من خلال تطوير نموذج حسابي باستخدام لغة الماتلاب لنقل الحركة بالمسننات المستقيمة وحيد الدرجة الحرة. تم نمذجة فترة انتشار شقوق التعب بالاعتماد على قانون باريس المطور. بينت أن شروط التحميل الديناميكي تؤثر بشكل كبير على حجم التعب المتكون من جهة، وعلى عدد دورات التحميل اللازمة لانتشار الشقوق من جهة أخرى. كلمات مفتاحية: انتشار الشق - التعب - دورات تحميل - شروط ديناميكية.

Dynamic modeling of fatigue crack propagation on spur gears teeth

Dr. Thaer Ahmad OSMAN *

(Received 18/ 10/2020. Accepted 24/ 1/2021)

□ ABSTRACT □

This article aims to calculate the number of loading cycles required to fatigue crack propagation on spur gear teeth treated in nitriding. For this end , a dynamic model of gear with one freedom degrees in torsion developed in Matlab , and the fatigue crack propagation had been modeled by using Paris's law. The obtained results show that, the fatigue size and cycles number required to propagate the crack depend strongly on the dynamic load.

Keywords: crack propagation- fatigue - cycles load- dynamic condition

* Associated Professor, Technical Engineering Faculty, Tartous University

1. مقدمة:

تعتبر المسننات من أكثر آليات نقل الحركة استخداماً، لما تتمتع به من وثوقية عالية، ومردود مرتفع، وغالباً ما تكون سطوح اسنان المسننات معالجة حرارياً، بطريقة الكرينة، النتردة أو التفسية، وذلك لخلق بنية قاسية على السطح وبنية طرية متينة في اللب بهدف زيادة القدرة المنقولة، نتيجة المعالجات الحرارية تتولد في البنية إجهادات داخلية متبقية ناتجة عن التحولات الطورية، وكذلك عن التشوهات غير المنتظمة بسبب التسخين والتبريد غير المتجانس. فبسبب التغيرات الطورية من فريت و برليت إلى اوستنيت بالتسخين، ومن ثم إلى مارتنيسيت بالتبريد يزداد الحجم ، ففي حال وجود إعاقة لهذه الزيادة بسبب البنية أو الأطوار الأخرى المحيطة تنشأ إجهادات ضغط داخلية متبقية compressive residual stresses. تؤثر هذه الإجهادات حسب طبيعتها وقيمتها وتوزعها على خواص المعدن ومنها خواص التعب، [3-1]. وعلى الرغم من المعالجات الحرارية ونتيجة للحمل القاسي الذي تتعرض له المسننات، قد تنشأ العيوب على سطحها، ومن أهم أنواع العيوب هو التعب (Fatigue)، إذ يعتبر انهيار التعب عموماً المشكلة الرئيسية التي تؤثر على عناصر الآلات الخاضعة لحمولات ديناميكية، حيث أن 90% من حالات الانهيار في العناصر الميكانيكية تنتج عن التعب [3-6]. بشكل عام، تقسم فترة الانهيار بالتعب إلى ثلاث فترات أساسية: فترة نشوء الشق الأولي (fatigue crack initiation) على السطح أو ضمن طبقات المادة تبعاً لشروط التماس بين الأجسام، فترة انتشار الشق (fatigue crack propagation) نتيجة لتكرار الحمل المؤثر وفترة الانهيار (failure)، حيث تعتبر فترة انتشار شقوق التعب من أخطر الفترات لأن الشق الأولي المتكون، سينتشر بسرعة كبيرة، تحت تأثير تكرار الحمل المؤثر.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تم نمذجة شروط التماس بين اسنان المسننات المستقيمة، باستخدام نموذج حسابي وحيد درجة الحرية (1DOF) في الفتل للمسننات، باستخدام لغة الماتلاب (Matlab). بهدف حساب قيمة الضغط المؤثر على كافة نقاط التماس بين اسنان المسننات، وحساب توزع الاجهادات الناطمية والتماسية في تلك النقاط. إن فترة انتشار الشق تم نمذجتها بالاعتماد على قانون باريس (Paris's Law) المطور وذلك لحساب عدد دورات التحميل اللازمة لانتشار الشق من طوله الابتدائي حتى طوله الحرج. وبالتالي فالهدف من هذا البحث هو دراسة تأثير شروط التحميل الديناميكي على فترة انتشار شقوق التعب للمسننات ذات الاسنان المستقيمة والمعالجة بالنتردة. ومن هنا تأتي أهمية هذا البحث في تحديد شروط التحميل الديناميكية، وكذلك عدد دورات التحميل اللازمة لانتشار الشقوق، وبالتالي تحديد العمر الاستثماري للمسننات قبل الوصول إلى مرحلة الانهيار تحت تأثير شقوق التعب.

3. طرائق البحث ومواده:

3-1: نمذجة شروط التماس بين أسنان المسننات

تعطى معادلة الحركة للنموذج الديناميكي أحادي درجة الحرية في الفتل للمسننات بوجود التخميد (c)، الشكل

(1)، وفقاً للشكل لتفاضلياً التالي

$$m_{tot} \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F_s$$

m_{tot} : الكتلة الكلية المكافئة للمسننات وتعطى بالعلاقة التالية:

$$m_{tot} = \frac{J_1 J_2}{J_1 Rb_2^2 + J_2 Rb_1^2}$$

Rb_2, Rb_1 : نصف قطر الدائرة الأساسية للمسنن القائد والمقاد على الترتيب.

J_2, J_1 : عزم العطالة القطبي للمسنن القائد والمقاد على الترتيب.

x : موجه درجة الحرية (الإزاحة) ويعطى بالاعتماد على درجة الحرية في الفتل للمسنن القائد والمقاد (θ_1) ،

(θ_2) بالشكل :

$$x = Rb_1 \cdot \theta_1 + Rb_2 \theta_2$$

k : ثابت صلابة التعشيق المكافئ للنموذج الديناميكي الذي يعطى بالاستناد على نظام [7] ISO 6336 أو بالشكل التالي:

$$k = k_m (1 + a \cdot g)$$

حيث أن k_m : ثابت صلابة التعشيق الوسطي . a : التغير النسبي في شروط التماس بين أسنان المسننات

($a < 1$) . g : ثابت يأخذ بعين الاعتبار جهة الدوران للمحرك الكهربائي ويملك القيمة 1 (الدوران مع عقارب الساعة)

أو -1 (الدوران عكس عقارب الساعة) .

F_s : الحمل السناتيكي المؤثر على المسننات ويحسب وفق العلاقة التالية:

$$F_s = \frac{C_m}{Rb_1} = \frac{C_r}{Rb_2}$$

C_r, C_m : عزم الدوران للمسنن القائد (عزم المحرك) وللمسنن المقاد على الترتيب .

بالأخذ بعين الاعتبار التردد الطبيعي للنظام الميكانيكي $\omega = \sqrt{\frac{k_m}{m_{tot}}}$ والتقسيم على الكتلة المكافئة m_{tot}

تصبح معادلة الحركة من الشكل :

$$\ddot{x} + 2 \cdot \zeta \cdot \omega \cdot \dot{x} + \omega^2 (1 + a \cdot g) x = \frac{Rb_1}{J_1} \cdot C_m + \frac{Rb_2}{J_2} \cdot C_r$$

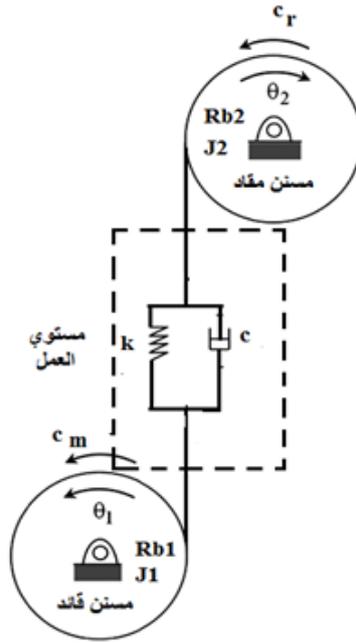
ζ : عاملا لإخماد وتتراوح قيمته بين 0.02 ÷ 0.1 لنقل الحركة بالمسننات، في حال المسننات المستقيمة فأن القيمة

المثالية $\zeta = 0.05$, [7] ،

أن معادلة الحركة السابقة ، تكون محللة خطوة بخطوة مع الزمن ، باستخدام طريقة نيومارك [8]، والتي تعتبر

من أكثر طرق التحليل استخداماً في إيجاد حلول للمشاكل الديناميكية ، وتحليل معادلات الحركة لجمل النقل، [9].

خلال تحليل معادلة الحركة يجب التأكد من عدم وجود حمل سالب وعدم وجود نقاط تماس تقع خارج مستوي التعشيق



الشكل (1): نموذج ديناميكي لنقل الحركة بالمسنتات المستقيمة وحيد درجة الحرية (1DOF)

بعد حساب الحمل الديناميكي F في كل نقطة تماس على أسنان المسنتات (مع ملاحظة أن المسافة بين نقاط التماس لسنتين متتاليتين تساوي $p \cdot \cos \alpha$ حيث أن p : الخطوة. α : زاوية الضغط) بالنسبة لعرض السن (d) ، فإن توزيع الضغط الناظمي $P(x)$ على عرض منطقة التماس aH يحسب بالاعتماد على نظرية هرتز (Hertz theory) وفق مايلي:

$$P(x) = \frac{2 \cdot \pi}{aH(M)} \cdot \frac{F(M)}{d} \sqrt{1 - \frac{x}{aH(M)}}$$

إن نصف قطر التماس يعطى وفق العلاقة التالية:

$$aH = \sqrt{\frac{8 \cdot F \cdot R^*}{\pi \cdot E^*}}$$

R^*, E^* : معامل يونغ المكافئ (موديل المرنة) و نصف القطر المكافئ على الترتيب ويعطيان

بالعلاقات التالية:

$$R^* = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}; \quad E^* = \frac{2E_1 E_2}{E_1(1 - \nu_2^2) + E_2(1 - \nu_1^2)}$$

ν, R, E : معامل يونغ، نصف قطر ونسبة بواسون على الترتيب حيث يشير الرمز 1 للجسم الأول 2

للجسم الثاني.

بينما الضغط المماسي $q(x)$ فيحسب بالاعتماد على نظرية كولومب (Coulomb theory) بالاعتماد

على معامل الاحتكاك μ وفق العلاقة التالية:

$$q(x) = \mu \cdot P(x)$$

يحسب معامل الاحتكاك بالاعتماد على سرعة الانزلاق ($= u_1 - u_2 V_s$) وسرعة الدوران ($V_r = u_1 + u_2$) واللزوجة الحركية η_0 وفق مايلي، [9]:

$$\mu = 0,0127 \cdot \log \left[\frac{29,66 \cdot \frac{F(M_{ij})}{d}}{\eta_{0,V_s} V_r^2} \right]$$

بعد تحديد النقطة المدروسة فإنحقل الإجهادات الكلية يتمثل بمجموع الإجهادات الناشئة عن الحمل الناظمي $\sigma_{ij}^n(x, y)$ والإجهادات الناشئة عن الحمل المماسي. $\sigma_{ij}^t(x, y)$ هذه الإجهادات الناظمية والمماسية تكون محسوبة ضمن شروط التشوهات المستوية، [9]. من جهة أخرى، فإن المسننات المستعملة في جمل نقل الحركة تكون غالباً معالجة حرارياً بهدف زيادة القدرة المنقولة، وبسبب هذه المعالجة تنشأ في طبقات المادة إجهادات متبقية سالبة، حيث تلعب هذه الإجهادات دوراً مهماً في زيادة مقاومة مادة المسننات للتعب. لأجل هذا الغرض فإن توزع الإجهادات المتبقية $\sigma_{ij}^r(x, y)$ ضمن طبقات المادة سيؤخذ بعين الاعتبار. وبالتالي يصبح حقل الإجهاد الكلي في كل نقطة تماس معطى بالعلاقة التالية:

$$\sigma_{i,j}(x, y) = \sigma_{i,j}^n(x, y) + \sigma_{i,j}^t(x, y) + \sigma_{i,j}^r(x, y) \quad \forall i, j \in x, y, z$$

يوجد العديد من العلاقات التجريبية في المراجع العلمية لحساب توزع الإجهادات، تبعاً لتغير القساوة ضمن طبقات المادة، والتي تتعلق بنوع المعالجات الحرارية لسطوح المسننات (تصليد (hardening) -تتردة (nitriding)، كربنة (carburizing)). في بحثنا هذا سنستخدم العلاقة التجريبية، المقدمة من العالم Tobe ، لوصف توزع الإجهادات المتبقية في حالة المعالجة بالتتردة، [10]. وفقاً لهذه العلاقة فإن توزع الإجهادات المتبقية، تبعاً للعمق تحت سطح المسننات، يتعلق بقيم قساوة فيكرز (Vickers) في السطح HV_s والقلب HV_c .

2-3: نمذجة فترة انتشار شقوق التعب:

تشير الدراسات التجريبية بأن الشق الأولي للتعب ينشأ في المنطقة الموافقة للقيمة العظمى لإجهادات القص الأعظمية، حيث ينشأ شق أولي a_0 طوله يساوي نصف قطر الحبيبة D ، [11]، وينتشر هذا الشق تحت تأثير تكرار الحمل حتى الوصول للطول الحرج الذي يحدث عنده الانهيار a_{cl} . ولحساب عدد دورات التحميل لانتشار هذا الشق سنعتمد على العلاقة المقدمة من العالم باريس [12]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \Rightarrow N = \int_{a_0}^a C(\Delta K)^n \cdot da = \int_{a_0}^a C(Y\Delta\tau\sqrt{\pi a})^n \cdot da$$

a : طول الكسر والذي يحسب من خلال طول الكسر الابتدائي المتكون a_0 والموافق لنقطة ظهور إجهادات القص الأعظمية ومجموع تزايدات طول الكسر خلال انتشاره:

$$a = a_0 + \sum \Delta a$$

Δa : تزايد طول الشق والذي يحسب من خلال علاقة أرون بالاعتماد على عامل كثافة

الاجهادات k_{max} ، [13]:

$$\Delta a = \frac{0.1}{6\pi} \left(\frac{k_{max}}{\sigma_z} \right)$$

σ_z حد التعب للمادة ويعطى وفق العلاقة التالية، [14]:

$$\sigma_z = 1.36 \cdot HV \quad [MPa]$$

Y : عامل هندسية الشق ($Y=1$: الكسر متوضع ضمن المادة. $Y=1.12$: الكسر على سطح المادة).

C.n : ثوابت قانون باريس .

$$\Delta\tau = \tau_{max} - \tau_{min} \text{ مجال (مدى) إجهاد القص الأعظمي.}$$

$$k_{max} = Y\tau_{max}\sqrt{\pi a}$$

ومنه عدد الدورات الكلية لانتشار الكسر من طوله الابتدائي المتكون للطول الكلي a يمكن كتابتها وفق

ما يلي:

$$N = \sum_{a_0}^a N$$

4. النتائج والمناقشة:

إن التركيب الكيميائي للمسننات المستخدمة في الدراسة وتوزع القساوة موضح في الجدول (1).

الجدول (1): التركيب الكيميائي وتوزع القساوة للمسننات (42CrMoS4) المصنوعة من الفولاذ

C%	Si %	Mn%	S %	Cr %	P %	Mo %
0.38-0.45	0.25	0.6 -0.9	<0.025	0.90-1.20	<0.025	0.22
m(m/cycle)	n	قطر الحبيبة	قساوة السطح	قساوة اللب	العمق الفعال	معامل يونغ
6.9×10^{-12}	3.0	50 μ m	624 HV	326 HV	0.5 mm	MPa2.06.10 ⁵

بينما يظهر الجدول (2) المعطيات الوظيفية والهندسية للمسننات ذات الاسنان المستقيمة المستخدمة في

الحساب.

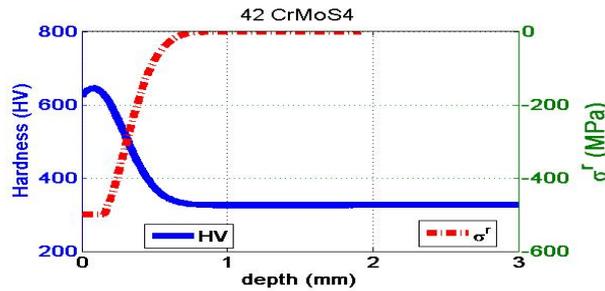
الجدول (2): المعطيات الوظيفية والهندسية للمسننات

Z1=16,	Z2=28	عدد أسنان المسنن القائد والمقاد
b1 =14 ,	b2= 14	عرض المسنن القائد والمقاد (mm)
2.85		المودول (mm)
20		زاوية الضغط (درجة)
250		عزم المحرك (N.m)
w ₁ =325		سرعة دوران المسنن القائد (rad/sec)
$\eta_0 =1,56.10^{-2}$ pa.sec		خصائص التزييت: زيت معدني ISO VG 150

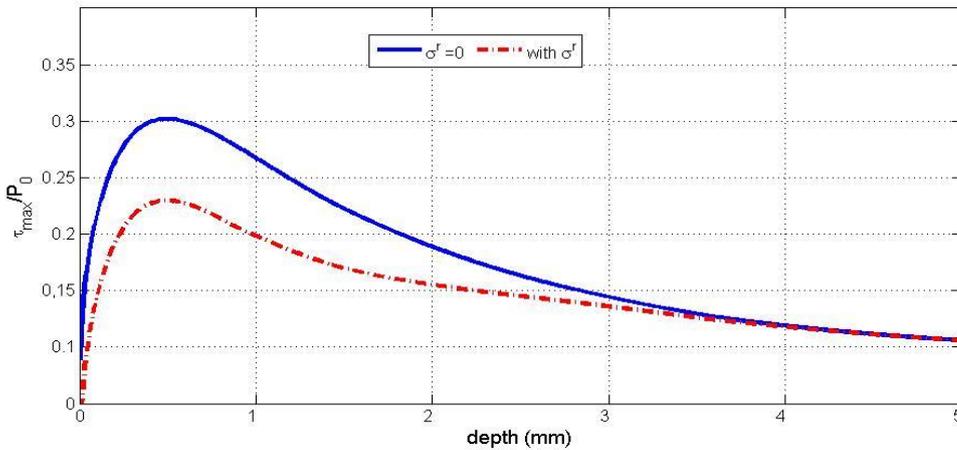
1-4. توزع القساوة والاجهادات المتبقية:

يظهر الشكل (2) توزع الاجهادات المتبقية σ^r والقساوة HV ضمن طبقات المادة للمسننات. حيث يمكننا ملاحظة أن القيمة العظمى للقساوة تتوضع على السطح ثم تبدأ بالانخفاض مع ازدياد العمق من السطح حتى تستقر عند قيمة ثابتة لمسافة معينة من السطح. بالمقابل لذلك، فإن الإجهادات المتبقية تملك قيمة أعظمية بالقرب من السطح، ثم تبدأ بالتناقص كلما ازدادت المسافة باتجاه العمق لتصبح قيمتها تساوي الصفر ($\sigma^r = 0$) بعد مسافة معينة من السطح. أن الإجهادات المتبقية والناجمة عن معالجة السطوح تنتج إجهادات ذات قيم سالبة (*negative*) وبالتالي ستملك تأثيراً إيجابياً على مقاومة التعب، حيث تنقص قيمة إجهادات القص الأعظمية τ_{max} وتغير من توزعها ضمن طبقات المادة، الشكل (3). وبالنتيجة زيادة فترة عمل الأجسام

أي زيادة عدد دورات التحميل اللازمة لانتشار شقوق التعب نتيجة لتناقص قيمة هذه الإجهادات. من الشكل (3) نلاحظ أن القيمة العظمى τ_{max} تساوي تقريباً $0.3P_0$ ولكن بوجود الإجهادات المتبقية تتناقص هذه القيمة العظمى لتصبح تقريباً $0.238P_{max}$. تطبق المعالجة السطحية بالترتدة بعد إجراء التقسية والمراجعة لفلوآد غني بالكربون عند درجة حرارة حوالي $500C^\circ$ مئوية، حيث يكون الطور السائد هو الفريت $\alpha-Fe$. للنتروجين انحلالية منخفضة وسرعة انتشار بطيئة في الفريت لتشكيل محلول صلب تغلغلي. إن النتريجة لا تترافق بتحولات طورية (أي لا يوجد تغيرات في حجوم الأطوار). تعود التقسية بسبب النتريجة إلى تكون المحلول الصلب وتكون نترجات الحديد - Precipitation-hardening القاسية FeN ونتريدات العناصر السبائكية الشهرة للنتروجين مثل Mo, Cr ، حيث تتوزع نتريدات هذه العناصر في البنية مسببة تصليد البنية وزيادة ومقاومة التعب ورفع حد الصمود [15], Endurance limit.



الشكل (2): توزيع القساوة HV والاجهادات المتبقية بالنسبة للبعد عن السطح

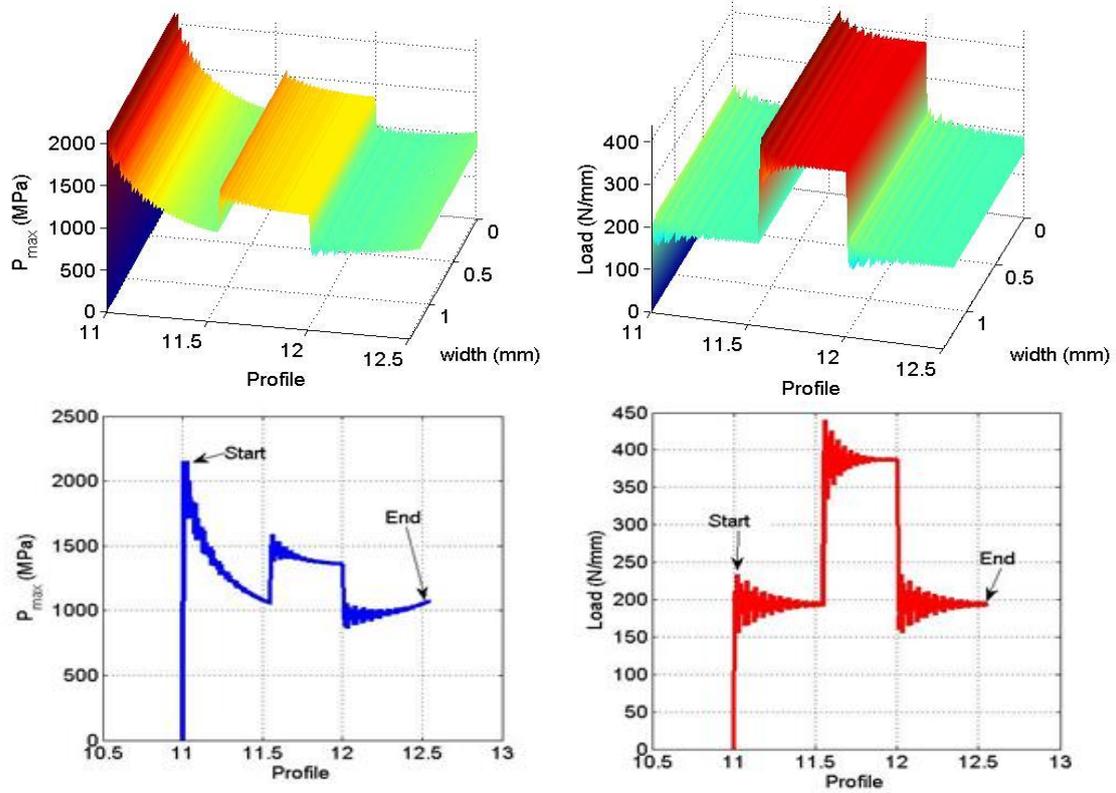


الشكل (3) تأثير الاجهادات المتبقية على توزيع إجهادات القص الأعظمية بالنسبة للعمق من السطح

2-4. توزيع بارامترات التعشيق:

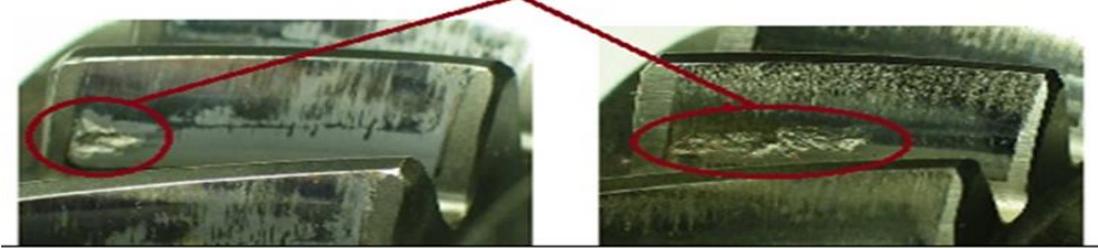
من المعلوم من كينيماتيكا التعشيق بين اسنان المسننات بأن حركة التعشيق ستنقل من نقطة لأخرى على البروفائل الفعال للسن، وبالتالي فإن كل نقطة تعشيق على هذا البروفائل ستملك قيم مختلفة للحمل المطبق والضغط الأعظمي المؤثر، الشكل (4). حيث يمكننا ملاحظة من الشكل (4) أن توزيع الحمل يكون متجانس بشكل كبير بين نقاط بداية التعشيق (Start) ونقاط نهاية التعشيق (End) مع تركيز القيم العظمى للحمولة في منتصف السن (منطقة النقطة الابتدائية)، بالمقابل لذلك. فإن نقاط بداية التعشيق على السن ستملك قيم مرتفعة للضغط الأعظمي مقارنة بالنقاط الأخرى على البروفائل الفعال، وبالأخص نقاط نهاية التعشيق. وكما هو معلوم بأن قيم الإجهادات المتكونة (إجهادات القص الأعظمية) في اسنان المسننات تعتمد على قيم الضغط الأعظمي وبالتالي فإن نقاط بداية التعشيق هي النقاط

الأخطر على أسنان المسننات مقارنة ببقية نقاط التعشيق. وهذا يتطابق مع الملاحظات التجريبية والتي تشير بأن منطقة بداية التعشيق على أسنان المسننات هي المنطقة الأخطر لنشوء تعب التماس، كما هو مبين في الشكل (5).



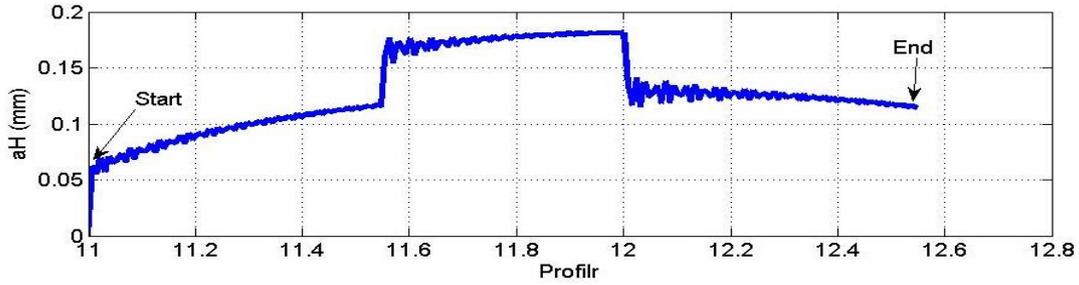
الشكل (4): توزيع الحمل والضغط الأعظمي في نقاط التعشيق على أسنان المسننات المستقيمة

ظهور التعب في نقاط بداية التعشيق



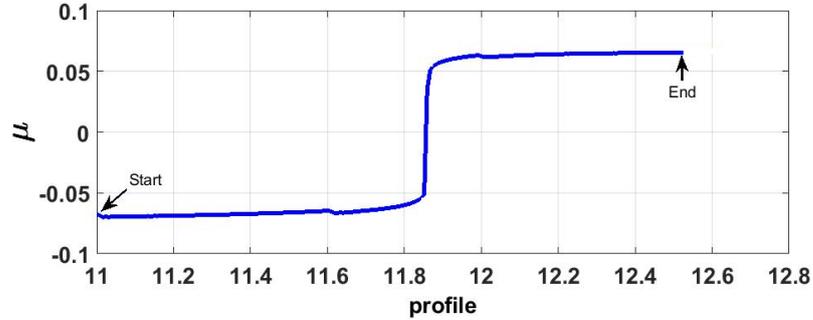
الشكل (5): ظهور التعب في نقاط بداية التعشيق على سطح أسنان المسننات

هنا لا بد من الإشارة إلى أن سبب القيم المرتفعة للضغط الأعظمي في نقاط بداية التعشيق هو القيم المنخفضة لعرض منطقة التماس (aH) مقارنة ببقية نقاط التعشيق على البروفائل الفعال للسن والتي تملك قيم مرتفعة لعرض منطقة التماس، كما هو مبين في الشكل (6).



الشكل (6): عرض منطقة التماس (aH) في نقاط التشقيق على البروفائل الفعال للسن

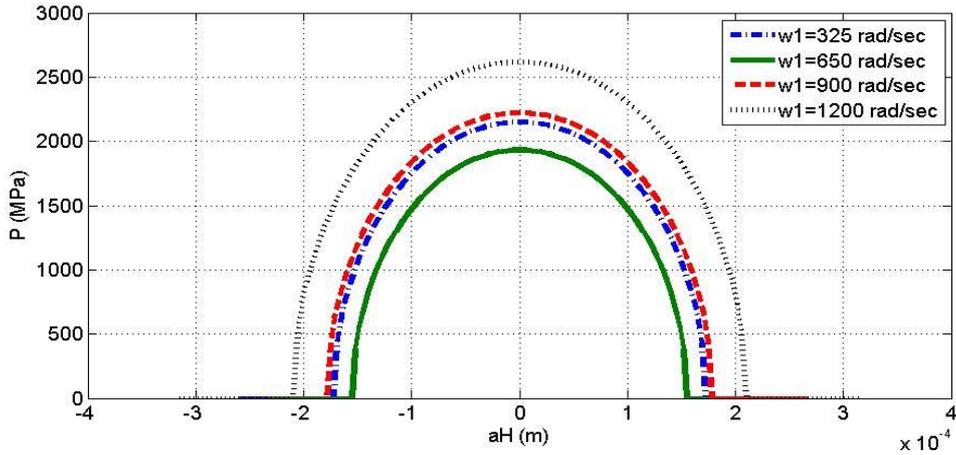
وبما أن معامل الاحتكاك بين أسنان المسننات يتعلق بقيم سرعة الانزلاق والسرعة المحيطة، فإن قيمه تكون أعظمية في نقاط بداية التشقيق ونهاية التشقيق مقارنة ببقية نقاط التماس بين أسنان المسننات، الشكل (7)، مع ملاحظة أن نقاط بداية التشقيق تتميز بقيم الانزلاق السالبة، حيث يكون اتجاه الانزلاق معاكس لاتجاه الدوران. بينما في نقاط نهاية التشقيق يكون اتجاه الانزلاق مطابق لاتجاه الدوران.



الشكل (7): معامل الاحتكاك في نقاط التشقيق على البروفائل الفعال للسن

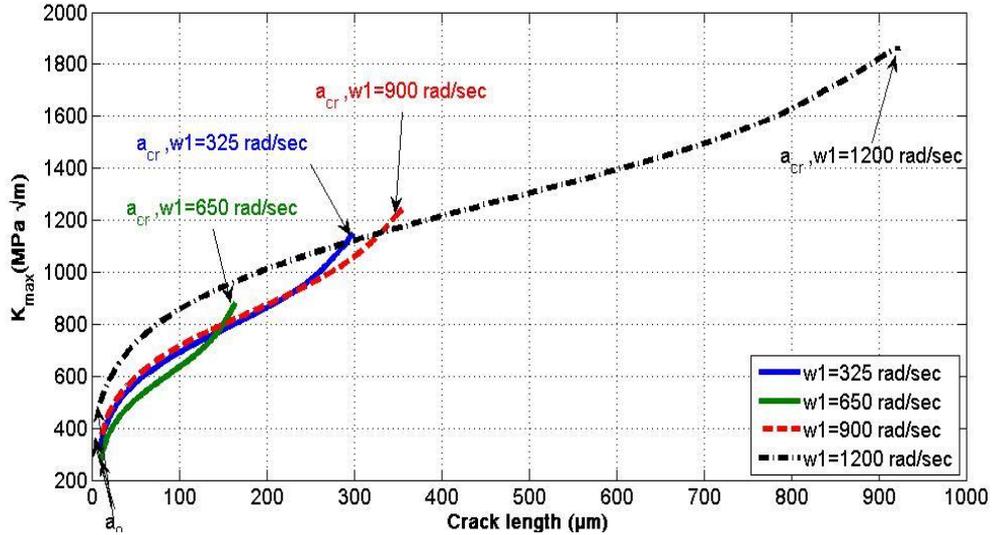
3-4 . حساب عدد دورات التحميل اللازمة لانتشار شقوق التعب:

كما وجدنا سابقاً بأن نقاط بداية التشقيق هي النقاط الأخطر على أسنان المسننات، وبالتالي سندرس هذه النقاط من خلال تأثير سرعة دوران المسنن القائد على قيمة الضغط الأعظمي. حيث يبين الشكل (8) تأثير سرعة الدوران على توزيع الضغط في نقاط بداية التشقيق. حيث يمكننا ملاحظة بأن قيم الضغط المتكون في هذه النقاط يختلف باختلاف السرعة الدورانية وذلك نتيجة اختلاف شروط التحميل الديناميكي، [16]. ونتيجة لإختلاف قيم هذه الضغوط فإن قيم إجهادات القص الأعظمية ستختلف تبعاً لقيم الشرع الدورانية المستخدمة.



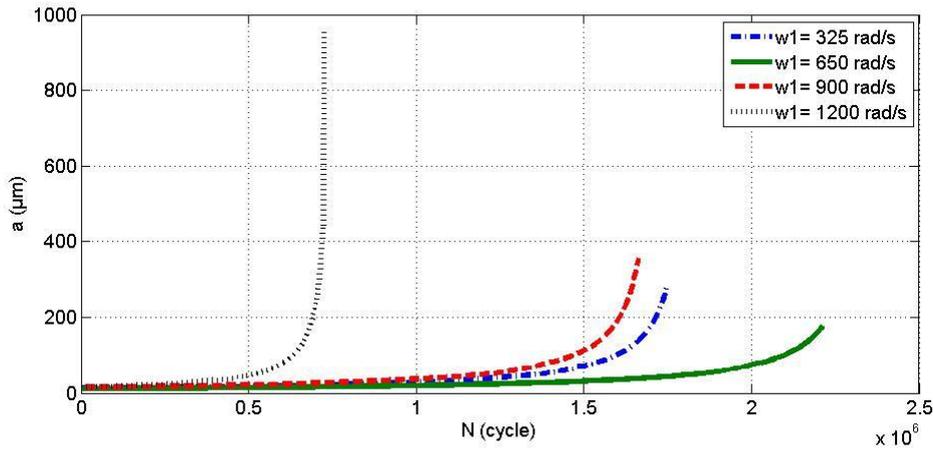
الشكل (8): تأثير سرعة الدوران على توزع الضغط في نقاط بداية التشقق.

وبما أن الشق الابتدائي سينشأ في المنطقة الموافقة للقيمة العظمى لـ τ_{max} ضمن طبقات المادة بطول يساوي نصف قطر الحبيبة للمادة ($a_0=0.025 \text{ mm}$). ونتيجة لاختلاف قيم إجهادات القص الأعظمية فأن عامل كثافة الإجهادات الأعظمية K_{max} سيملك قيم مختلفة تبعاً للسرعة الدورانية. حيث تكون القيمة الأعظمية في مثالنا هذا موافقة للسرعة الدورانية $w_1 = 1200 \text{ rad/sec}$. ونتيجة لانتشار الشق من طوله الابتدائي حتى طوله الحرج a_{cr} فأن عوامل كثافة الاجهادات ستزداد قيمتها. حيث يمكننا ملاحظة من الشكل (9) اختلاف قيم عوامل كثافة الإجهادات الأعظمية من جهة واختلاف طول الكسر المتكون من جهة أخرى تبعاً لسرعة الدوران. وبالنتيجة يمكن القول بأن حجم التعب يتعلق بالقيم المرتفعة للضغط الناتجة عن سرعة الدوران، في نقاط التشقق حيث أن القيم المرتفعة للضغط ستؤدي إلى قيم مرتفعة لعوامل كثافة الإجهادات وبالنتيجة قيم مرتفعة لطول الشق المتكون.



الشكل (9): تأثير السرعة الدورانية على عوامل كثافة الاجهادات وطول الشق الناتج.

ونتيجة لهذا الاختلاف الناتج في قيم عوامل كثافة الاجهادات وطول الشق نتيجة لاختلاف سرعة الدوران، فأن عدد دورات التحميل N اللازمة لانتشار الشق من طوله الابتدائي إلى طوله الحرج ستختلف، الشكل (10). حيث يمكننا ملاحظة بأن قصر فترة الحياة للمسنن عند سرعة الدوران $w_1=1200 \text{ rad/sec}$ مقارنة عند عمل المسنن عند سرعة دورانية $w_1=650 \text{ rad/sec}$.



الشكل (10): تأثير السرعة الدورانية على فترة انتشار شقوق التعب

وبالنسبة يمكننا أن نستنتج بأن حجم التعب الناشئ على أسنان المسننات يتعلق بالسرعة الدورانية (شروط التحميل الديناميكي) للمسنن القائد. حيث أن السرعة الدورانية التي تؤدي إلى قيم ضغط أعظمية سينتج عنها حجم تعب كبير (طول شق كبير) وفترة حياة قصيرة للمسنن مقارنة بالسرعة الدورانية التي ينتج عنها ضغط تحميل منخفض. الجدول (3).

الجدول (3): تأثير سرعة الدوران على حجم وفترة حياة المسننات بالتعب

N (cycle)	K_{max}	$a_{cr} (\mu m)$	$a_0 (\mu m)$	$P_{max} (MPa)$	$\omega_1 (\frac{rad}{sec})$
1.749×10^6	1145.02	300	25	2195	325
2.212×10^6	879.6	169	25	1911	650
1.663×10^6	1239.11	356.8	25	2223	900
7.195×10^5	1862.20	921	25	2710	1200

5. الاستنتاجات والتوصيات:

في هذا البحث المقدم، تم نمذجة فترة انتشار شقوق التعب تحت تأثير الشروط الديناميكية للمسننات المعالجة بالتردد. حيث تم دراسة منطقة بداية التعشيق بين أسنان المسننات وذلك بسبب القيم المرتفعة لضغط التماس في هذه النقاط مقارنة ببقية نقاط التعشيق على امتداد البروفيل الفعال للسفن. حيث يمكننا أن نستنتج ما يلي:

- تساهم المعالجات الحرارية للمسننات، بشكل عام، في زيادة عدد دورات التحميل اللازمة لانتشار الشق، وبالتالي فترة عمل أطول، وذلك تبعاً لقيمة الإجهادات المتبقية الناتجة بسبب إنقاص قيمة إجهادات القص الأعظمية.
- تلعب الشروط الديناميكية دوراً هاماً في فترة انتشار الشقوق، وذلك من خلال طول الشق المتكون، وعدد الدورات اللازمة لانتشار هذا الشق. حيث يختلف طول الشق (وبالنسبة حجم التعب المتكون)، وعدد الدورات اللازمة لانتشاره، من طوله الابتدائي a_0 حتى طوله الحرج a_{cr} حسب السرعة الدورانية للمسنن القائد وذلك بسبب اختلاف قيم الضغط الأعظمي المتكون، وبالنتيجة اختلاف في قيمة إجهادات القص.

بناءً على نتائج هذا البحث فأنا نوصي بما يلي:

- استخدام المعالجة الحرارية بالتردد للمسننات المستقيمة لأنها تزيد من العمر الاستثمائي للمسننات تحت تأثير شروط التحميل الديناميكي.
- إجراء دراسات على تأثير أنواع أخرى من المعالجات الحرارية لاسنان المسننات (مثل : كرينة ، نتردة، تقسية، وغيرها) وإجراء مقارنة بين هذه الأنواع واختيار نوع المعالجة الأفضل، التي تساهم في رفع مقاومة المسننات للتعب.

6. المراجع:

- [1] Wei.L, Shuang. D, Bingshu. L,2020. *Experimental study on the influence of different carburized layer depth on gear contact fatigue strength*. Engineering Failure Analysis. Vol. 107, p.158-165.
- [2] Huaiju. L, Wei. W, Caichao. Z, Chenxu. J, Wei. W, Robert G.P. A,2019. *microstructure sensitive contact fatigue model of a carburized gears*. Wear, Vol. 436–437, 203-315.
- [3] BRANDAO. A. J, MARTINS. R, SEABRA. O. H. J, CASTRO. J, 2015.*An approach to the simulation of concurrent gear micropitting and mild wear*, Wear. Vol. 324-325. 64-73.
- [4] FABRE. A, EVANS. P. H, BARRALLIER. L, SHARIF. J. K, DESVIGNES. M, 2013. Prediction of microgeometrical influence on micropitting fatigue damage on 32CRMOV13 Steel, Tribology International. Vol. 59, p.129-140.
- [5] BRANDAO. A. J, SEABRA. O. H. J, CASTRO. J, 2010. *Surface initiated tooth flank damage. Part I: Numerical model*, Wear, Vol. 268, p. 1-12.
- [6] ASTM E 647, 2000.*Standard test methods for measurement of fatigue crack growth rate- ASTM Standard*
- [7] ISO/DIS 6336, 1998. *Calculation of load capacity of spur and helical gears- Part I: Basic principles and influence factors*. Draft International Standard, p. 87-95.
- [8] NEWMARK. N. M,1959. *A method of computation for structural Dynamics*. ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol.85, p. 67-94.
- [9] Johnson K. L 1985., *Contact mechanics*, Cambridge University press., 452p
- [10] Lang, O. R, 1979.*The dimensioning of complex steel members in the range of endurance strength and fatigue life*. Zeitschrift fuer Werkstoffechink, Vol. 10, P. 24-29.
- [11] Glodez. S, Flasker. J, Ren .Z, 1997 .*A new model for the numerical determination of pitting resistance of gear teeth flanks*. Fatigue Fracture, Eng. Maters. Struct. Vol. 22, , p. 71-83.
- [12] MackAldener. M, OLSSON. M,2002. *Analysis of crack propagation during tooth interior fatigue fracture*. Engineering Fracture Mechanics,.Vol . 69. P. 2147-2162.
- [13] Beretta. S, Matteazzi. S, 1996. *Short crack propagation in eutectoid steel wire*. International Journal of Fatigue, Vol. 18. P. 451-456
- [14] Roessle. M.L, Fatemi. A, 2000. *Strain controlled fatigue properties of steel and some simple approximations*. International Journal of Fatigue. Vol. 22. P. 495-511.
- [15] ASM,2013. *Steel Heat Treating Fundamentals and Processes- V4* ;
- [16] Sinsot. Ph, Vexex. Ph, 2020. *On contact deflection and stiffness in spur and helical gear*. Mechanism and Machine Theory .Vol. 154, , p.658-679.