

تقدير عمر التعب الستاتيكي للنوابض بالاعتماد على الاختبارات المسرعة

الدكتور محمد عطا بطل*

الدكتور أحمد السيد **

منهل حسن البري ***

(تاريخ الإيداع 17 / 12 / 2017. قَبْلُ للنشر في 8 / 11 / 2018)

□ ملخص □

تم في هذه المقالة تقديم طريقة جديدة وفعالة لتقدير عمر التعب الستاتيكي للنوابض وذلك عند عملها بتأثير إما حمل ثابت أو تعرضها لانفعال أو ضغط ثابتين لفترات زمنية كبيرة وذلك عند درجات حرارة عمل مختلفة، لما لهذا الموضوع من أهمية بالغة، حيث أن النوابض تعتبر مدخرات للقوة من خلال إحداث انفعال فيها (شدها أو ضغط) ويجب أن تحافظ على حد أدنى من قيمة هذه القوة.

تم في البداية تقديم دراسة نظرية للظواهر المعنية بالأحمال الثابتة لفترات زمنية طويلة ودرجات حرارة مختلفة (الزحف - التراخي) وكيفية تسريع الاختبار للحصول على النتائج، ومن ثم اقتراح طريقة لتسريع الحصول على الزمن الذي يصل فيه النابض و هو تحت الانفعال إلى القوة الحرجة الدنيا المخزنة ضمنه عند درجة حرارة العمل، تعتمد هذه الطريقة على إجراء اختبارات على عينات ضمن الأفران عند درجات حرارة مختلفة وأعلى من درجات حرارة الاستمرار والتخزين للنوابض ومن ثم استخدام النتائج في تقدير عمر التعب الستاتيكي للنوابض عند درجات حرارة التخزين أو العمل الحقيقي.

الكلمات المفتاحية: التراخي، التعب، الزحف، الاختبارات المسرعة.

* أستاذ في قسم القوى - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين

** مدير بحوث - مركز الدراسات والبحوث العلمية

*** ماجستير في هندسة هياكل ومحركات الطيران - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب - (يعمل في مركز الدراسات والبحوث العلمية) - طالب دكتوراه قسم القوى الميكانيكية كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية جامعة تشرين

Estimate The Static Fatigue Age For Springs Depending On Accelerated Tests

Dr. Mohamad Ata Batal*
Dr. Ahmad Alsaeed**
manhal hasan Albarry***

(Received 17 / 12 / 2017. Accepted 8 / 11 / 2018)

□ ABSTRACT □

In this article we present a new and effective method to Estimate the static fatigue age for springs, when it works by static load or static strain for a long time at deferent temperature, this case is very important because the spring is a battery for force and it must save allow value of the force.

At the first we present a theory study for “creep and relaxation “and how we can accelerate the test to get the results, then we suggest method to accelerate the test to know when the spring retch to the minimum allowable value of the force at work temperature degree, this method depend on tests at samples at deferent temperature degrees, higher than work and storage temperature, and then use the results to estimate the static fatigue age for springs at real storage and work temperature.

Key words: relaxation, fatigue, creep, accelerated tests.

* professor at forces department -mechanical and electrical faculty-Teshreen university.

** Research manager at scientific studies and research center

*** master of aircrafts structure and engine - mechanical and electrical faculty- Aleppo university.
(working at scientific studies and research center)-PHD student at forces department mechanical and electrical faculty Teshreen university

مقدمة:

تعتبر ظاهرتا الزحف والتراخي ظاهرتين مرتبطتين مع بعضهما حيث أنه عند الحديث عن إحداها يتضمن الحديث عن الثانية، وهما مرتبطتان بشكل أساسي وكبير بالحرارة والزمن وهما من الظواهر الأساسية الواجب دراستها وأخذها بعين الاعتبار عند تقدير عمر الأجزاء الميكانيكية التي تحمل عند درجات الحرارة الطبيعية وعند درجات حرارة مرتفعة (عمر التعب الستاتيكي).

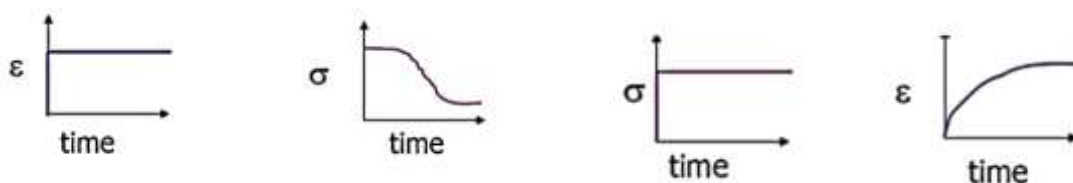
منهجية البحث:

تم إنجاز هذه الدراسة بالتعاون بين جامعة تشرين ومركز الدراسات والبحوث العلمية، باعتماد منهجية بحث وفق التالي:

- تعريف و دراسة نظرية لظاهرتي الزحف والتراخي والقوانين التي تحكمهما .
- دراسة آلية تأثير الحرارة والزمن على الظاهرتين.
- دراسة إمكانية التسريع للاختبارات التي تجري لاستخلاص مواصفات الزحف والتراخي للمادة (السلوك مع الزمن) .من خلال إجراء هذه التجارب عند درجات حرارة عالية
- إجراء تجارب على مواد محددة عند درجات حرارة عالية وفق قانون أرينوس لاستخلاص الخصائص للمادة.
- الاستفادة من التجارب في تحديد عمر التعب الستاتيكي وفق ظاهرتي الزحف والتراخي عند درجات حرارة مختلفة.

الزحف والتراخي [3] [1]:

يتم دراسة ظاهرة الزحف بحيث نطبق حمل ثابت ويتم مراقبة تغير الانفعال مع الزمن كما هو موضح بالشكل (a-1) ويتم دراسة ظاهرة التراخي بحيث يتم تطبيق انفعال ثابت ويتم مراقبة الاجهاد أو القوة المخزنة ضمن المادة وتغيرها مع الزمن الشكل (b-1) وفي كلتا الحالتين تعتبر الحرارة العامل الأساسي الذي يجب مراقبته أيضاً .



الشكل (b-1) التراخي

الشكل (a-1) الزحف

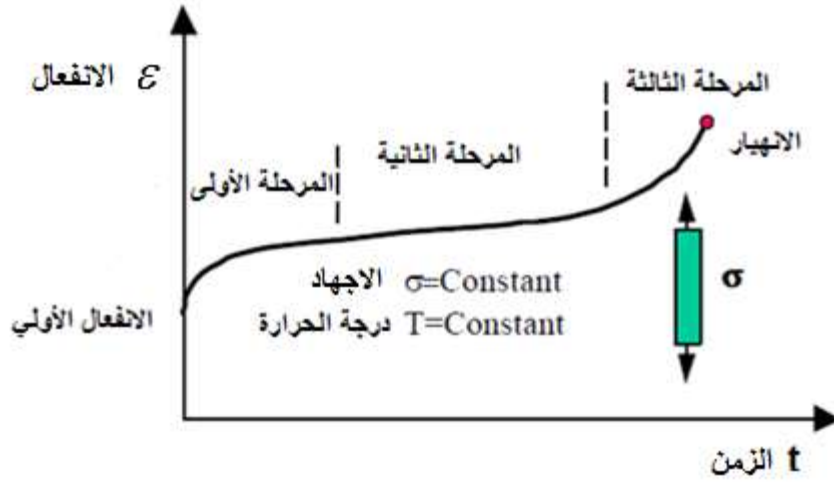
الشكل (1) ظاهرتا الزحف والتراخي

بالنسبة لمعظم المعادن يجب اختيار درجة الحرارة أثناء تنفيذ اختبار الزحف تحت نقطة الانصهار

يظهر الشكل (2) المراحل الرئيسية لظاهرة الزحف والذي تحكمه المعادلة :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A(\sigma)^n \quad (1)$$

حيث : A و n بارامترات المادة .



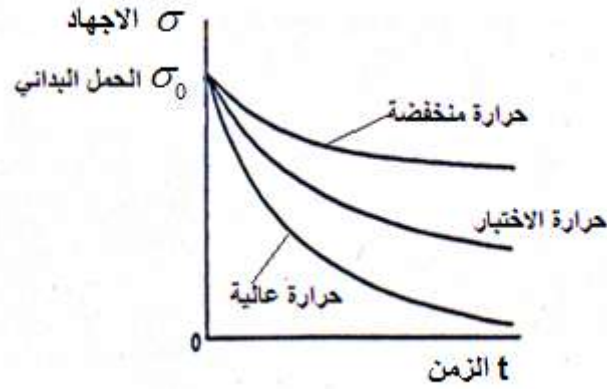
الشكل (2) المراحل الأساسية لظاهرة الزحف

كما يظهر الشكل (3) تراخي الإجهاد تحت انفعال ثابت والذي تحكمه المعادلة :

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E.t/\eta} \quad (2)$$

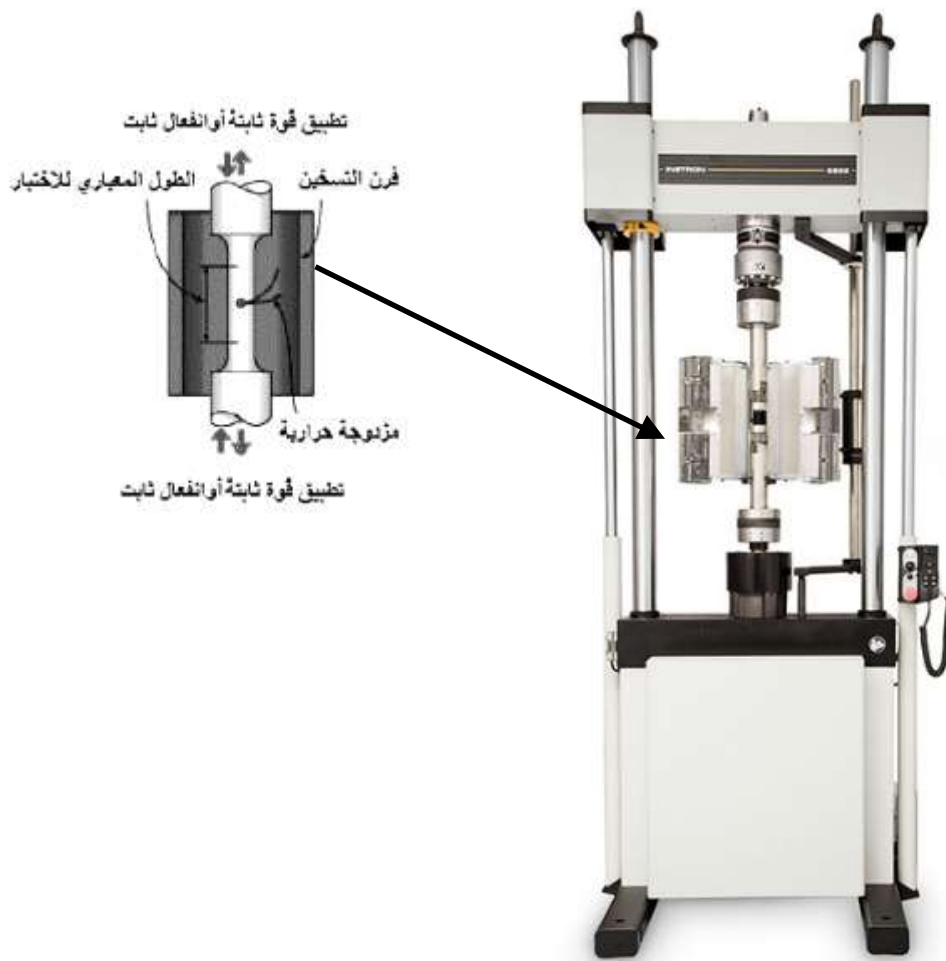
حيث : E و η بارامترات المادة .

σ_0 : الحمل البدائي



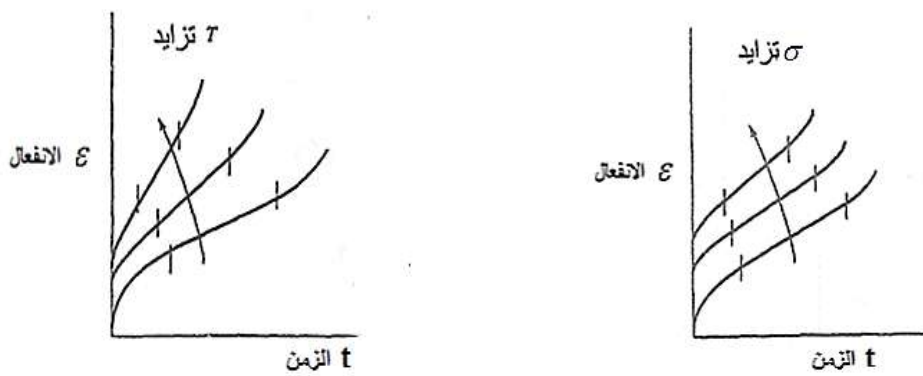
الشكل (3) تراخي العينات مع مرور الزمن عند درجات حرارة مختلفة وحمل بدائي ثابت

يتم تنفيذ اختبار الزحف وفقاً لما هو مبين في الشكل (4) وذلك باستخدام آلة شد بسيطة مزودة بفرن وباستخدام عينة ذات حلزنة من الطرفين.



الشكل (4) آلة اختبار الزحف والتراخي

يوضح الشكل (5) تأثير درجة الحرارة والإجهاد على منحنى الزحف .



(a) تأثير الاجهاد الأولي على منحنى الزحف (b) تأثير درجة الحرارة على منحنى الزحف

الشكل (5) تأثير درجة الحرارة والاجهاد الأولي على منحنى الزحف

ويمكن تعريف :

انفعال الزحف بأنه انفعال لدن يحدث عند درجات حرارة مرتفعة وحمولة ثابتة تؤثر لفترة طويلة من الزمن .

يلاحظ سلوك الزحف في المعادن ذات درجات الانصهار المنخفضة عند درجات الحرارة العادية ومع مرور الزمن ويحصل الزحف في المواد الأخرى عند درجات الحرارة المرتفعة .حيث إن الزحف يحدث وفقاً لآلية انسياب لزج حيث تتزلق الحبيبات بالنسبة لبعضها البعض خلال مدة زمنية طويلة مما يؤدي إلى تحول جزء من الانفعال المرن إلى انفعال لدن .

إذاً معدل الانفعال الناجم عن الزحف يكون تابعاً لـ:

- خصائص المادة
- زمن تأثير القوة
- درجة الحرارة
- قيمة الحمل المطبق .

كما أن انفعال الزحف يمكن أن يصل إلى قيمة تصبح بعدها القطعة المدروسة (العنصر المتعرض لانفعال الزحف) غير قادرة على تأدية مهامها. فمثلاً زحف شفرات العنفة قد يكون سبباً في تماس الشفرات مع جسم العنفة مما قد يؤدي إلى انهيارها .

إن مجال درجات الحرارة التي يحدث فيها الزحف يكون مختلفاً بحسب المواد و بشكل عام درجة الحرارة الأصغرية المطلوبة لانفعال الزحف هي بحدود 30% من درجة انصهار المعدن و 40-50% من درجة انصهار السيراميك .

1- مراحل الزحف :

1- في المرحلة الابتدائية للزحف يكون معدل الزحف (الانفعال الناجم عن الزحف) مرتفعاً نسبياً ولكن مع زيادة الزمن فإن معدل الانفعال يتباطئ .

2- يصل معدل الزحف إلى قيمة دنيا ويصبح ثابتاً تقريباً (مرحلة الزحف المستقر)

3- ومن ثم تبدأ المرحلة الثالثة حيث يزداد معدل الانفعال بشكل أسي .

2- النماذج الميكانيكية للسلوك اللزج- المرن [4][1] :

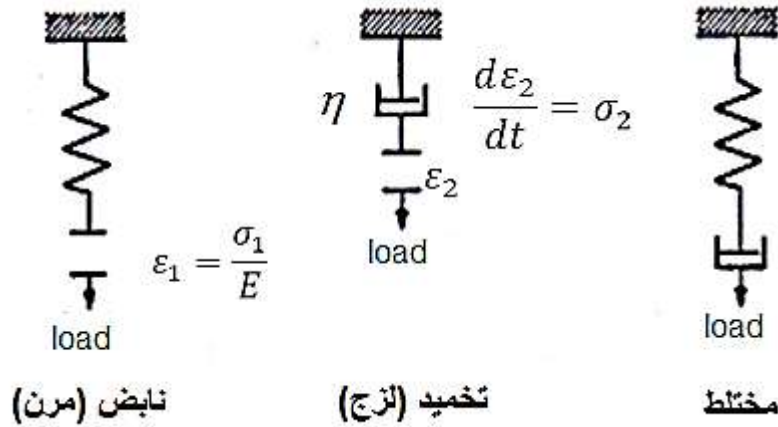
إن الزحف وتراخي الإجهاد هي ظواهر مركبة من السلوك اللزج للسوائل والسلوك المرن للأجسام الصلبة . إن الظاهرة التي ندعوها السلوك اللزج- المرن يمكن نمذجتها باستخدام مكونات ميكانيكية بسيطة مثل : النوابض springs والمنزلاقات اللزجة (مخمدات) dashpots كما يظهر من الشكل (6) .

نعبر عن نموذج Maxwell للزحف تحت تأثير إجهاد ثابت σ_0 بالعلاقة :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E} + \frac{1}{\eta} \int_0^t \sigma_0 dt = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0 t}{\eta} \quad (3)$$

وعند التراخي تكون $\varepsilon = \text{const}$ وتكون σ متغيرة .

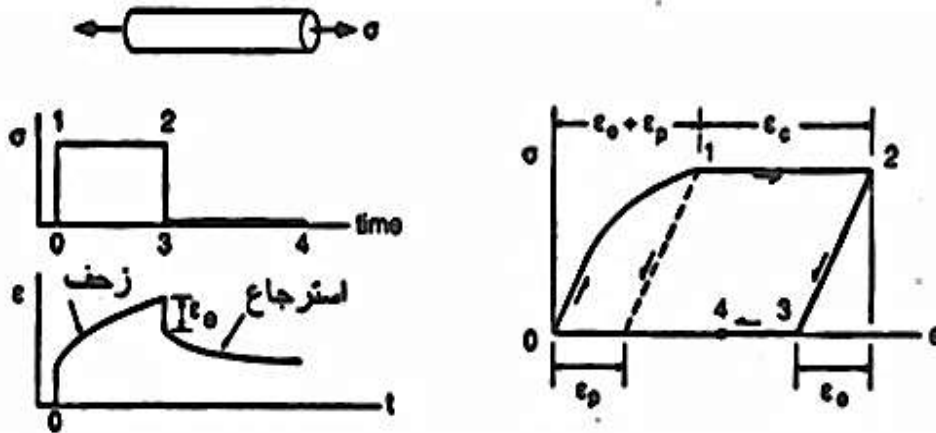
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0 = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (4)$$



الشكل (6) النماذج الميكانيكية للسلوك اللزج - المرن

بإعادة هذه الدراسة وذلك عند درجات حرارة مرتفعة (حوالي $\frac{1}{2}$ ، $\frac{1}{3}$ من درجة حرارة الانصهار) فإنه نلاحظ نتائج مختلفة كلياً حيث يزداد الانفعال ϵ تدريجياً مع الزمن بعد التحميل الأولي المرن .

يحسب انفعال القضيبي المبين على الشكل (7) بعد تطبيق سريع للإجهاد كمجموع للانفعالين : المرن و اللدن



الشكل (7) تأثير الإجهاد لفترة زمنية يولد انفعال كلي يشمل مركبات الانفعال المرن واللدن والزحف

(المرحلة 0-1) يحدد الانفعال اللدن ϵ_p بنزع الحمولة (النقطة 1) كما هو مبين بخط منقط في الشكل (7) . ولكن في حالة استمرار تأثير الإجهاد تحصل انفعالات الزحف ϵ_c (المرحلة 1-2). يزول الانفعال المرن بزوال الحمولة فوراً، بينما يمكن أن يزول جزء من انفعال الزحف بعد زمن معين كما هو مشار إليه بالمرحلة 3-4. الانفعال المتبقي هو مجموع الانفعال اللدن وجزء من انفعال الزحف. بناءً عليه يعرف الزحف كانفعال لدن دائم يحدث عند درجات الحرارة المرتفعة والحمولة الثابتة المؤثرة لفترة زمنية طويلة.

يلاحظ سلوك الزحف في مواد البناء (البيتون والحجر والبلاستيك) والمعادن الملونة، ذات درجات الانصهار المنخفضة، عند درجة حرارة الغرفة ولهذا السلوك أهمية في عمل المنشآت. يمكن أن تزداد الإجهادات في هيكل المنشآت البيتونية المسلحة حتى 200% والانتقالات بحدود 300-400% بسبب ظاهرة الزحف. ويمكن أن تنهار الأنابيب الفولاذية في

المرآجل العاملة تحت الضغط . يحصل زحف ملحوظ في المعادن والسيراميك فوق درجة الحرارة $0.5T_m$ (درجة حرارة الانصهار).

3- أنواع الزحف [4] [3]:

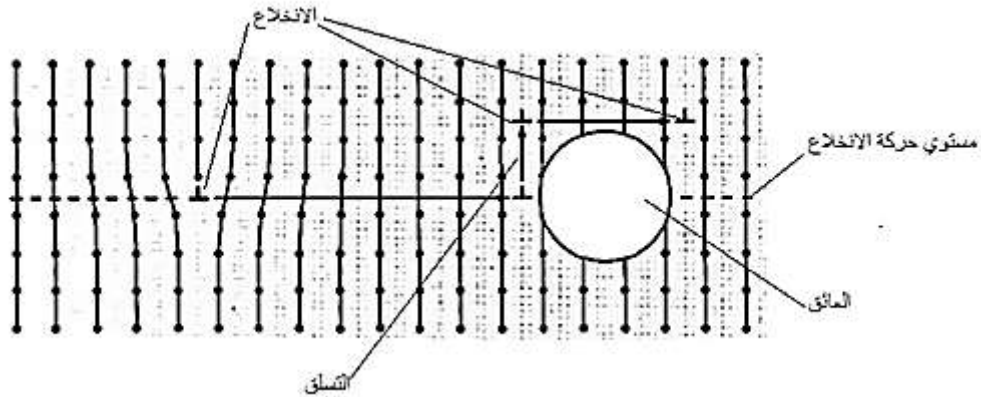
يوجد نوعين أساسيين من الزحف في المواد البلورية بالرغم من أن الآلية الفيزيائية لانفعال الزحف متماثلة :

1- الانسياب بالانتشار (Diffusional flow) : ويحصل عند اجهادات منخفضة لكن عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً. وهو عبارة عن حركة الشواغر في الشبكة البلورية ، حيث أن حدود الحبيبات مناطق غير منتظمة تنتقل الشواغر منها إلى داخل الشبكة البلورية. كما أن عدم التجانس للحالة الإجهادية للحبيبات وحدودها يجعل الشواغر تنتقل إلى حدود الحبيبات التي تعاني من انفعال الضغط (وتتحرك الذرات بالاتجاه المعاكس) بسبب هذا الانتقال تشوه الحبيبة ، ويتعلق هذا التشوه بأبعاد الحبيبات.

2- الزحف بحركة الانخلاعات (Dislocation Creep):

وهو عبارة عن حركة حادة للانخلاعات الخطية، عند تأثير اجهادات عالية ودرجات حرارة معتدلة . ويتم وفق آلية معقدة غير مدروسة لكن يمكن تفسيرها باعتماد مفهوم تسلق الانخلاع (Dislocation Climp) ، حيث يتحرك الانخلاع الطرفي في المستوي الشبكي البلوري بتأثير الإجهادات المطبقة (دون انزلاق) .

عندما تصادف حركة الانخلاع إحدى العوائق في المستوي البلوري يحصل تشوه لاحق بانتقال الانخلاع إلى مستوي بلوري آخر (تسلق الانخلاع) . وبذلك يتم إعادة ترتيب الذرات بسبب انتشار الشواغر الشكل (8) .



شكل (8) إعادة ترتيب الذرات بسبب انتشار الشواغر مسبباً الانفعال.

لا يتعلق هذا الانفعال بحجم الحبيبات بل له علاقة قوية مع الاجهاد ومعادلة هذا النوع من الزحف يحكمه قانون ارينوس

$$\dot{\epsilon} = A.e^{-\frac{Q}{R.T}} \quad (5)$$

حيث أن:

$\dot{\epsilon}$ - سرعة الانفعال.

Q - ثابت فيزيائي يدعى الطاقة المحفزة أو طاقة التنشيط (Activation energy) .

T - درجة الحرارة المطلقة .

R - ثابت الغازات العام .

A - ثابت يتعلق بالمادة.

مع ارتفاع درجة الحرارة تصبح حركة الجزيئات أنشط وتزداد سعة اهتزاز الذرات مما يؤدي إلى إعادة ترتيب الجزيئات التي بدورها تؤدي إلى انفعال الزحف.

كما أشرنا سابقاً فإن لدراسة ظاهرتي الزحف والتراخي أهمية كبيرة حيث أن انفعال الزحف يمكن أن يصل إلى قيمة تصبح بعدها القطعة المدروسة (العنصر المتعرض لانفعال الزحف) غير قادرة على تأدية مهامها. فمثلاً زحف شفرات العنفة قد يكون سبباً في تماس الشفرات مع جسم العنفة مما قد يؤدي إلى انهيارها. ويكون الزحف والتراخي حرجاً ويثير اهتمام المصممين عندما تعمل القطعة المدروسة تحت تأثير إجهاد عالي أو درجة حرارة عالية أو الاثنين معاً.

كما أن القوة المخزنة ضمن نابض معرض لانفعال مطلوب أن تعمل في وقت وزمن محدد ، ولكن النوابض تتعرض للتراخي وكما ذكرنا سابقاً فإن القوة المخزنة فيها تتناقص مع مرور الزمن عند درجات الحرارة العادية ولمعرفة خصائص التراخي للنوابض يجب القيام باختبارات عند انفعالات مختلفة ودرجات حرارة مختلفة ولكن الحصول على النتائج يتطلب زمن كبير و لتسهيل الأمر فإننا سوف نلجأ للاختبارات المسرعة .

4- الاختبارات المسرعة للتراخي [4] [5]:

سوف يتم الاختبار على نابض يعمل ضمن منظومة محددة ومهمة والمطلوب من هذا النابض الاحتفاظ بحد أدنى من القوة مخزنة ضمنه ليقدمها لمرة واحدة وبالسرعة المطلوبة، ويتم اختبار التراخي بتطبيق انفعال حقيقي مساو للانفعال الذي يتعرض له النابض خلال مرحلة تخزين القوة وقياس تدني القوة مع الزمن ومن ثم رسم العلاقة بين القوة والزمن

يشكل الزمن الطويل لمثل هذه التجارب مشكلة كبيرة لذلك نلجأ الى تسريع هذه الاختبارات عن طريق زيادة درجة الحرارة (اقل من 0.4 من درجة الحرارة المطلقة للانصهار) معتمدين على قانون ارينوس في تسريع هذه التجارب ، ويظهر الشكل (9) جدولاً بدرجات حرارة وأزمنة اختبار التراخي لبعض العناصر:

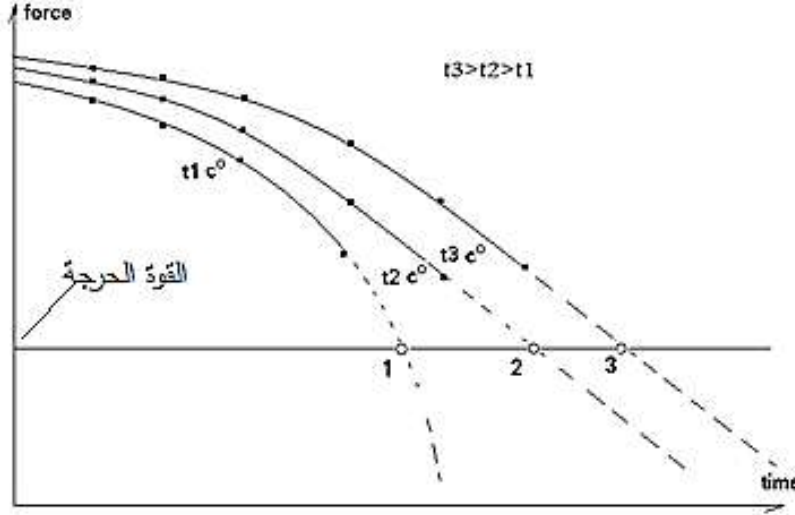
Table 1. Categories of Relaxation Tests

| Application | Typical Materials | Type of Machine Used | Testing Temperature Relative to Melting Temperature | Typical Hold Time (hr) |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|------------------------|
| Bolting | High Yield Strength | Modified Creep, Compliance Rigs | <0.5 | 100-10,000 |
| Springs | High Yield Strength | Modified Creep, Bending | <0.4 | 100-10,000 |
| Stress Relief | Carbon and Low Alloy Steels | Servo-controlled Electro Hydraulic | >0.5 | 0.1-10 |
| Redistribution of Stress | Structural Alloys | " | >0.4 | 1-100 |
| Creep-Fatigue | Structural Alloys | " | >0.4 | 0.01-10 |
| Creep-Ratchetting | Structural Alloys | " | >0.4 | 1-100 |
| Constitutive Equations Development | All | All | 0.2-0.9 | 0.001-100 |

الشكل (9) [1] درجات حرارة وأزمنة اختبار التراخي

ولإظهار تأثير درجة الحرارة على تدني القوة المخزنة ضمن النابض مع الزمن عند درجات حرارة الاختبار لا بد من اعتبار التعريف التالي :

القوة الدنيا الحرجة: وهي القوة الدنيا التي يعطيها النابض و اللازمة لتنفيذ المهمة الموكلة له. ويظهر الشكل (10) تغير القوة ضمن النابض مع الزمن وذلك عند درجات حرارة عمل مختلفة .



الشكل (10) تغير القوة ضمن النابض مع الزمن وذلك عند درجات حرارة عمل مختلفة

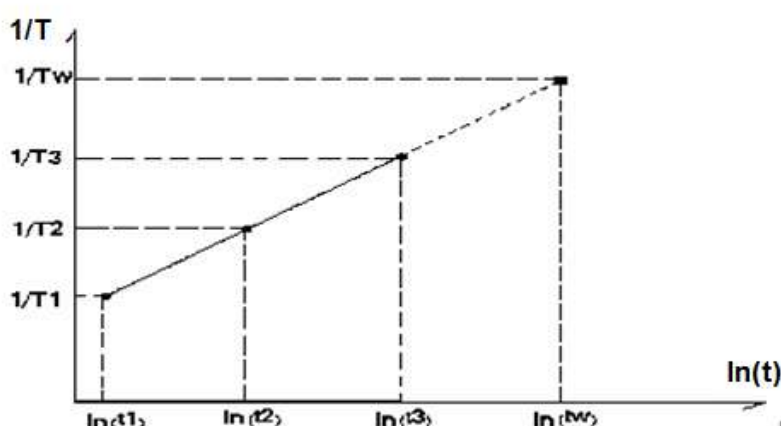
وباعتماد مبدأ ارينوس والمعادلة الناظمة لظاهرة التراخي :

$$\frac{1}{t} = Ae^{\frac{-Q}{RT}} \quad (6)$$

حيث أنه بازياد درجة الحرارة يزداد معدل الانفعال وبالتالي فقد القوة المخزنة ضمن المادة المنفعلة يمكن كتابة المعادلة السابقة بالشكل:

$$K + \frac{R}{Q} \ln t = \frac{1}{T} \quad (7)$$

ومن المعادلة السابقة يمكن رسم العلاقة $\frac{1}{T} = f(\ln(t))$ ويعبر عن الزمن اللازم للوصول إلى انفعال معين وذلك عند درجة حرارة محددة كما بالشكل :



الشكل (11) الزمن اللازم للوصول إلى انفعال معين وذلك عند درجة حرارة محددة

5- التجارب العملية :

لاختبار الطريقة السابقة قمنا بإجراء تجارب على نوابض هي جزء من منظومة محددة ومتكاملة، وذلك وفق طريقة محددة للاختبار [2] ، وضبط حرارة حجرة الاختبار والتحكم بها [4] ، واستقراء تقريبي لنتائج الاختبار [5] ، و من حيث المبدأ يمكن توسيع الدراسة والتجارب مستقبلاً لشمّل أي نوع آخر من النوابض، حيث يقوم النابض بتخزين القوة لفترات زمنية طويلة وتقديمها خلال زمن محدد، ويظهر الجدول (1) مواصفات النابض:

الجدول (1) مواصفات النابض المستخدم في التجارب:

| | | |
|--|------|-------------------------------|
| [mm] | 57 | الطول النهائي (النابض مضغوط) |
| [mm] | 117 | الطول الحر للنابض |
| [N/mm] | 12.5 | ثابت الصلابة للنابض |
| [mm] | 2.5 | قطر السلك للنابض |
| [mm] | 8.5 | القطر الداخلي |
| [mm] | 13.5 | القطر الخارجي |
| المادة فولاذ كرومي خليطة 301 حسب الجمعية الأمريكية ASTM A240-ASTM A666 | | |

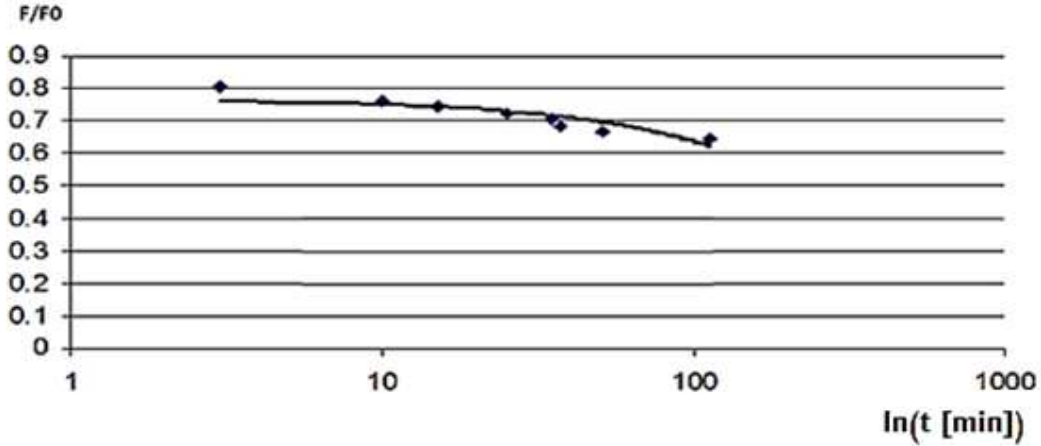
- مراحل إجراء التجربة :

تم إجراء التجارب وفق وثيقة الاختبار :

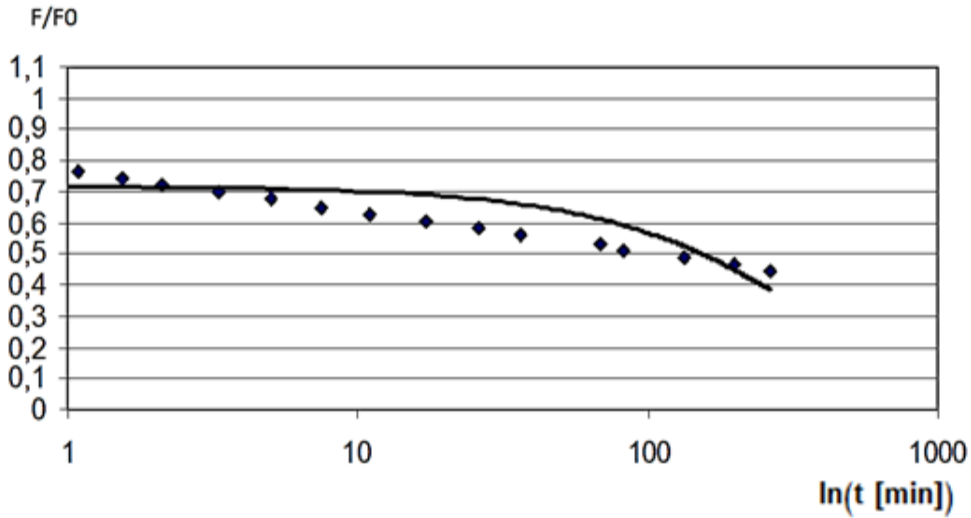
ASTM E328 -13 (Standard Test Methods for Stress Relaxation Tests for Materials and Structures) باختبار درجات الحرارة $C^{\circ}(475-500-525)$ بحيث لا تؤثر درجة حرارة الاختبار على خواص معدن النابض، وباستخدام نوابض بطول حر [mm]117، وجهاز اختبار طراز (iBertest (iB-CREEP 30)، والتنفيذ وفق ما يلي:

1. ضغط النابض (تطبيق انفعال) وذلك بسرعة ثابتة إلى الطول [mm]57
2. وضع النابض ضمن حامل خاص في الحجرة الحرارية المعاييرة ، والمثبتة على جهاز لقياس القوة (وهو عبارة عن جهاز اختبار الشد والضغط)، ورفع درجة الحرارة تدريجياً حتى الوصول إلى درجة الحرارة المطلوبة للتجربة .

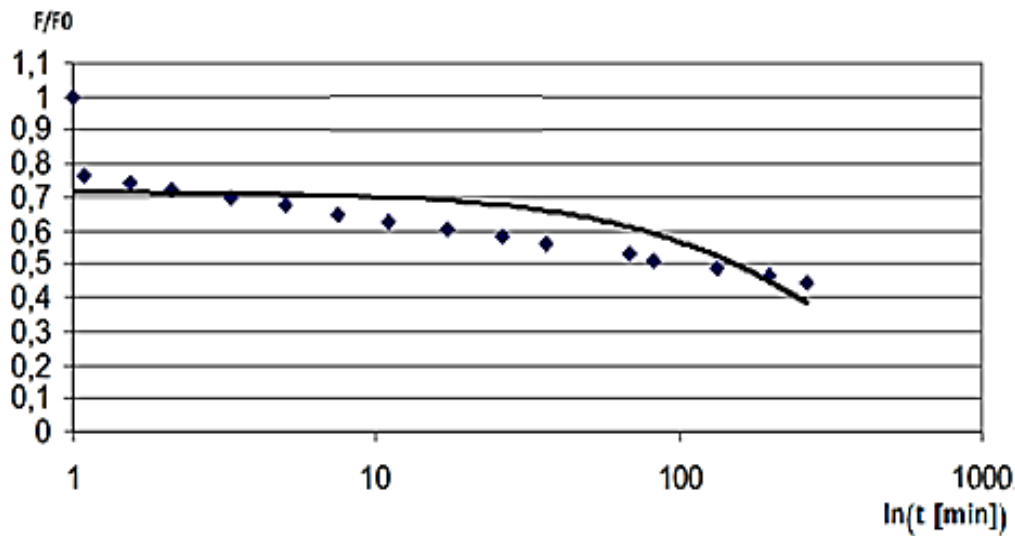
3. مراقبة تغير القوة وذلك بقياسها من جهاز اختبار الشد (حيث أن طول النابض يبقى ثابتاً) وذلك في أوقات وأزمنة محددة ، ورسم العلاقة بين القوة والزمن، و بإجراء الاستيفاء الداخلي والخارجي لمعرفة القيم المطلوبة .
4. اخذ قيم الزمن عند نقطة تقاطع المنحنيات مع مستقيم القوة الدنيا الحرجة (50% من القوة الصفرية).
وتُظهر الأشكال (12-13-14) النتائج التي حصلنا عليها وتظهر النتائج التجريبية على شكل نقاط حيث أن F_0 القوة الأولية ضمن النابض عند بداية التجربة :



الشكل (12) تغير قيمة القوة ضمن النابض المضغوط مع مرور الزمن عند درجة حرارة 475 C°

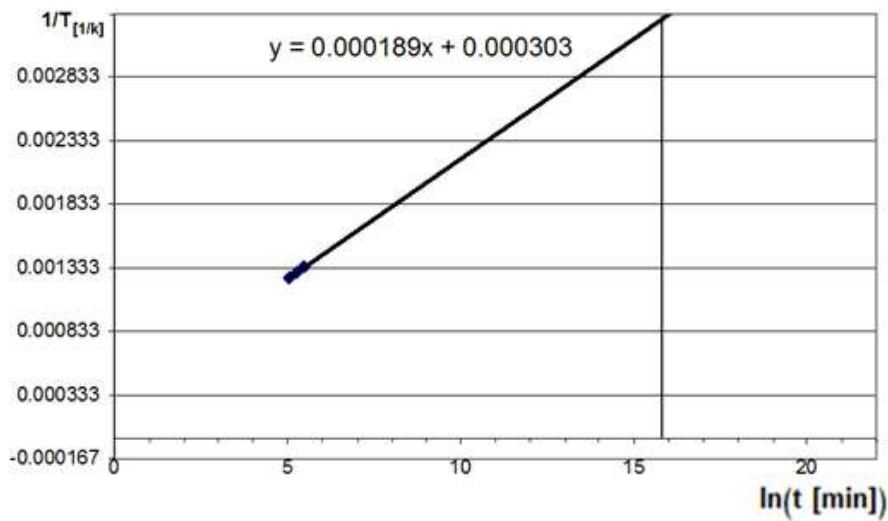


الشكل (13) تغير قيمة القوة في النابض المضغوط مع مرور الزمن عند درجة الحرارة 500 C°



الشكل (14) تغير قيمة القوة في النابض المضغوط مع مرور الزمن عند درجة حرارة 525 C°

وبحساب $\frac{1}{T}$ والزمن الذي فقدت فيه النوابض 50% من القوة يمكن رسم المنحني $\frac{1}{T} = f(\ln(t))$ والمبين بالشكل (15)



الشكل (15) منحني حساب الزمن الذي وصلت فيه النوابض لقيمة القوة الدنيا عند درجات حرارة مختلفة

وهو عبارة عن خط مستقيم حيث يمكن من خلاله تقدير عمر النابض المضغوط وفق المواصفات المذكورة سابقاً حتى يفقد 50% من قوة شدة الابتدائي وذلك عند درجات حرارة مختلفة فمثال عند درجة حرارة الغرفة $t=25^{\circ}\text{C}$ أي $T=298\text{[K]}$ يكون العمر 19.7 سنة .

$$19.7 * 365 * 24 * 60 = 1035000 \text{ [min]}$$

$$1/288 = 0.003472 \text{ [1/K]}$$

$$0.003472=0.000189*(\ln(1035000))+0.000303$$

كما تم إجراء التحليل الطيفي لمادة النوابض للتأكد من عدم تغير التركيب الكيميائي للمعدن بتأثير الحرارة وفق الجدول (2):

الجدول (2) نتائج تحليل الطيف للمعدن فولاذ كرومي خليطة 301 بعد اختبار التراخي المسرع:

| المادة | الكمية (Wt %) حسب (ASTM A240–ASTM A666) | نتيجة الاختبار |
|----------------|--|----------------|
| Carbon (C) | 0.15 max | 0.14 |
| Manganese (Mn) | 2.00 max | 0.193 |
| Phosphorus (p) | 0.045 max | 0.041 |
| Sulfur (s) | 0.030 max | 0.03 |
| Silicon (Si) | 0.75 max | 0.73 |
| Chromium (Cr) | 18.00 -16.00 | 17.1 |
| Nickel (Ni) | 8.00 – 6.00 | 7.8 |
| Nitrogen (N) | 0.10 max | 0.1 |

و تم ايضا قياس قساوة معدن النوابض بعد الاختبار وكانت النتائج تشير الى استقرار القساوة مما عزز ثقتنا في درجة الحرارة المختارة لاختبار التراخي المسرع [4] والنتائج موضحة بالجدول (3):

الجدول (3) نتائج تحليل القساوة للمعدن فولاذ كرومي خليطة 301 بعد اختبار التراخي المسرع:

| القساوة للمعدن فولاذ كرومي خليطة 301 حسب: (ASTM A240–ASTM A666) | نتيجة اختبار القساوة | |
|--|----------------------|--------------------|
| | العينة | قيمة القساوة [Mpa] |
| 758 [Mpa] | 1 | 752 |
| | 2 | 755 |
| | 3 | 759 |

الاستنتاجات والتوصيات:

يمكن تقدير العمر التخزيني للنوابض باستخدام الاختبارات المسرعة (اختصار الزمن) وذلك عن طريق رفع درجة حرارة الاختبار ولكن بالشروط المحددة وفق الستاندرات العالمية بحيث لا يتشوه سلوك التقادم الطبيعي (التراخي الطبيعي)، ولا تتأثر المواصفات الميكانيكية للعينة المختبرة، وذلك بعد تحديد معيار انتهاء الحياة .

تم في هذه الدراسة وضع منهجية يمكن اتباعها لأي نوع من النوابض لحساب و تدقيق التراخي للنوابض و تطبيق المنهجية التي نستطيع من خلالها تحديد عمر النوابض على التعب الستاتيكي (التراخي)، تنطلق هذه المنهجية على دراسة نظرية لظاهرتي الزحف والتراخي والقوانين التي توصفهما، وتم التأكد من النتائج النظرية بإجراء تجارب على مجموعة من النوابض وتم اعتماد المنهجية لتحديد العمر للنوابض عند استخدامه لتخزين القوة بحيث يعطي القوة الدنيا المطلوبة عند درجات حرارة مختلفة .

لم يتم التطرق الى تعديل التصميم من اجل تحسين العمر وهو ما يدعى بالتصميم من اجل التراخي،

و تعتبر ظاهرة التعب الستاتيكي ظاهرة هامة ليس فقط في النواض، و تكتسب أهمية خاصة ايضا" في البوليميرات التي تعتبر أوساط لزجة - مرنة والتي سلوكها يتغير مع الزمن والحرارة بشكل واضح.

المراجع:

- [1] MANARDI, F. SPADA , G. "Creep relaxation and viscosity properties for basic fractional models in phenology". The European physical journal . Vol 139,2011, 133-160.
- [2] TAHERI , F . LIU,Y ."A new experimental testing method for investigation of creep-dominant creep-fatigue interaction in alloy 617 at 950co".international journal of pressuer vessels and piping. Vol 154, 2017,75-82.
- [3] POIRIER,J.P."Creep of crystals high-tempreture deformation processes in metals , ceramics and minerais" . 2nd. ed. cambredege university press. Newyork , 2005,950.
- [4] KRAMPLE , E."An experimental study of room-temperature rate-sencivitivity ,creep and relaxation of AISI type 304 stainless steel ". Journal of the mechanics and physics of solids. Vol 27, 1979, 363-375.
- [5] MANGYUAN,B.XINLING ,L. "Prediction on strong life of 65Mn springs . Failure analysis and prevention". vol 2,2007,10-13.