التجربة 07: التمدد الحراري

مقدمة

ان تغير درجة حرارة المادة يؤدي الى تغيرات في الخواص الاخرى للمادة ومن ابرز هذه التغيرات هو تغير ابعادها او تغير حالتها ،و ان رفع درجة حرارة المادة يؤدي الى زيادة الطاقة الاهتزازية لذراتها او جزيئاتها وعندما تزداد سعة اهتزاز تلك الجسيمات ، يزداد معدل او متوسط المسافة بين ذراتها او جزيئاتها أي ان جميع ابعاد المادة سوف تتغير، وتزداد بارتفاع درجة حرارتها وتنكمش بانخفاض درجة حرارتها. وتسمى ظاهرة تغير ابعاد المادة نتيجة لتغير درجة حرارتها بالتمدد الحراري.

ومن المعلوم أن معظم الأجسام تتمدد عندما تزداد درجة حرارتها ،ويتوقف مقدار تمددها بالتسخين على مقدار قوى التماسك بين جزيئاتها، فالمادة الصلبة يكون مقدار تمددها بالتسخين صغيرا جدا نظرا لكبر قوى التماسك بين جزيئاتها، في حين أن تمدد السوائل يكون أكبر من تمدد الأجسام الصلبة بالتسخين، أما الغازات فيكون تمددها بالتسخين أكبر بكثير من السوائل لأن قوى التماسك بين جزيئات الغاز تكاد تكون معدومة. وهذه الظاهرة تلعب دورًا رئيسيا في العديد من التطبيقات الهندسية، فعلى سبيل المثال يتم ترك مسافات بين الوصلات الحديدية في المباني والجسور والسكك الحديدية والطرق السريعة لتعطي المجال للتمدد و الانكماش وإذا لم يتم فعل ذلك يمكن ان يتصدع المبنى أو تنهار الجسور وتلتوي السكك الحديدية بفعل التمدد الحراري للمواد المصنوعة منه .إن التمدد الحراري **expansion thermal** للأجسام هو نتيجة عن التغير الذي يحدث للمسافات الفاصلة بين جزيئات وذرات المادة

و أثناء دراستنا لاهتزازات الشبكة البلورية، افترضنا أن اهتزازات هذه الأخيرة توافقية، حيث كان قانون القوة يتناسب مع الإزاحة النسبية للذرات $\boldsymbol{F = -\beta x}$ و الطاقة الكامنة تتناسب مع مربع الازاحة، $\boldsymbol{U(x) = -\frac{1}{2}\beta x}$، ولكن لهذا التقريب عيوب أساسية منها:

- ✓ لا يوجد تمدد حراري على أساس هذه التقريب.
- ✓ لا تعتمد ثوابت المرونة على الضغط ودرجة الحرارة في التقريب التوافقي.
- ✓ تبقى الحرارة النوعية ثابتة عند درجات الحرارة العالية طبقا للتقريب التوافقي.
- ✓ على أساس هذا التقريب لا تتفاعل موجات المرونة مع بعضها، لذلك فالموجة الواحدة لا تضعف بمرور الزمن ولا يتغير شكلها. وعلى أساس عدم التفاعل فإن الناقلية الحرارية تكون كبيرة جدا، ويمكننا تفسير ذلك بملاحظة أن زيادة سعة اهتزاز الذرة الواقعة قرب المنطقة الساخنة للبلورة يؤدي إلى ظهور أمواج مرنة تنتشر بسرعة الصوت من المنطقة الساخنة إلى الباردة ناقلة بذلك الطاقة الزائدة من ذرة إلى أخرى، هذا يعني أنه لا توجد مقاومة للناقلية الحرارية يسبب اختفاء استطارة (تبعثر) الأمواج.

إن التقريب التوافقي يهمل وجود عناصر لا توافقية في معادلة الطاقة الكامنة: $\boldsymbol{U(x) = \frac{1}{2}\beta x^2 - \frac{1}{3}g x^3 - f x^4}$ ، حيث $\boldsymbol{f}$ و $\boldsymbol{g}$ و $\boldsymbol{\beta}$ ثوابت موجبة.

الحد β هو حد توافقي، أما الحد g فهو حد لا توافقي يصف اللاتناظر المتبادل لتدافع الذرت، و f يمثل تخفيف الاهتزازات ذات السعات الكبيرة.

لقد بينت التجارب أن كثيرا من الظواهر الهامة كالتمدد الحراري و التأثير المتبادل بين الأمواج المرنة (تفاعل الفونونات)، و ثبوت السعة الحرارية في درجات الحرارة العالية، لا يمكن تفسيرها إلا بالاعتماد على الحدود اللاتوافقية، كما بين ديباي (Debye) عام 1914 أن المقاومة الحرارية في الأجسام الصلبة تتعلق بالاهتزازات اللاتوافقية للذرات، وأنها تنعدم في التقريب التوافقي.

التمدد الحراري

التمدد الحراري هو إحدى الخواص الفيزيائية الأساسية للمعادن والمواد، وهو ناتج عن زيادة معدل المسافة بين دقائق الجسم الصلب أثناء تسخينه، وهذا راجع إلى الطبيعة اللاتوافقية لتذبذب ذرات الجسم الصلب.

يمكننا فهم التمدد الحراري و إيجاد معامل التمدد الخطي، وذلك بدراسة هزازة كلاسيكية أخذين بعين الاعتبار الحدود اللاتوافقية في كمون التأثير المتبادل واستنتاج القيمة المتوسطة لانزياح زوج من الذرات مسافة (R) في درجة الحرارة (T) ، ولإيجاد القيمة المتوسطة للانزياح (R) نستخدم توزيع بولتزمان الذي يسمح لنا بإيجاد هذه القيمة وفق الاحتمال الترموديناميكي:

$$< R >= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} R e^{\left(-\frac{U(R)}{KT}\right)} dR}{\int_{-\infty}^{\infty} e^{\left(-\frac{U(R)}{KT}\right)} dR}$$ ، في حالة القيم الصغيرة للانزياح (R) يمكننا نشر الطاقة الكامنة وفق سلسلة تايلور:

$$U(R) = \frac{1}{2}\beta R^2 - \frac{1}{3}gR^3 - fR^4.$$

ومنه نجد مايلي:

$$\int_{-\infty}^{\infty} Re^{\left(-\frac{U(R)}{KT}\right)} dR = \int_{-\infty}^{\infty} Re^{\left(-\frac{hR^2}{KT}\right)} e^{\left(\frac{lR^2+mR^4}{KT}\right)} dR = \int_{-\infty}^{\infty} Re^{\left(-\frac{hR^2}{KT}\right)} \left[1 + \frac{l}{KT}R^3 + \frac{m}{KT}R^4 + \cdots\right] dR$$

حيث أن: $(h=\frac{1}{2})$ و $(l=\frac{1}{3})$ و $(m=f)$.

نلاحظ أن التكاملان الأول والثالث معدومان لأن ما تحت إشارة التكامل دالة فردية، أما التكامل الثاني فهو شهير ويساوي: $\int_{-\infty}^{\infty} Re^{\left(-\frac{U(R)}{KT}\right)} dR = \int_{-\infty}^{\infty} R^4 e^{\left(-\frac{hR^2}{KT}\right)} dR = \frac{3l\sqrt{\pi}}{4KT}\left(\frac{KT}{h}\right)^{\frac{5}{2}}$ ، وبنفس الطريقة نحصل على النتيجة التالية من أجل المخرج: $\int_{-\infty}^{\infty} Re^{\left(-\frac{U(R)}{KT}\right)} dR = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\left(-\frac{hR^2}{KT}\right)} dR = \left(\frac{\pi KT}{h}\right)^{\frac{1}{2}}$.

ومنه نجد: $< R >= \frac{3KT}{4h^2}l = \frac{3KT}{2\beta^2}g = \frac{gE}{\beta^2}$، وهكذا نرى أن القيمة المتوسطة للانزياح *(R)* ثابتة، أما معامل التمدد الخطي فيحدد تعريفا بالعلاقة: $\alpha = \frac{1}{R_0}\frac{d<R>}{dT} = \frac{g}{R_0\beta^2}\frac{dE}{dT} = \chi C_v^a$، حيث : $\frac{g}{R_0\beta^2} = \chi$.

و C_v^a السعة الحرارية منسوبة لذرة واحدة.

نلاحظ من العلاقة الأخيرة أن معامل التمدد الخطي يتناسب مع الحرارة النوعية للجسم الصلب.

التمدد له حساسية كبيرة للتغيرات البنيوية مثل التحولات التآصلية وظهور أو ترسب أطوار جديدة و تغير نسبة العيوب، وبالتالي يعتبر التمدد الحراري طريقة فعالة لتحليل مخططات الأطوار.

مصدر التمدد الحراري هو الضغوط الداخلية الناتجة عن:

- عدم انتظام درجة الحرارة.
- كون المادة ذات خواص تمددية متباينة.
- كون المادة مركبة من أطوار ذات معاملات تمدد حرارية مختلفة تماما.

إن وجود أي من هذه الضغوط يغير من التمدد الكلي للمادة، كما يمكن للتمدد أن يتأثر بظواهر أخرى مثل *(Fluage)* عند درجات الحرارة العالية.

معامل التمدد الحراري

بالاعتماد على منحنى التمدد الذي يمثل التغير في طول المادة بدلالة درجة الحرارة، (الشكل –01)، فإننا نستطيع التعبير عن التغير في الطول و درجة الحرارة حسب المحورين *(x)* و *(Y)* ، كالتالي : $\begin{cases} x_2 - x_1 = \Delta x = k_x(T_1 - T_0) \\ y_2 - y_1 = \Delta y = k_y(\ell_{T_1} - \ell_{T_0}) \end{cases}$،

حيث كل من: k_x و k_y هما معاملا تضخيم لدرجة الحرارة والطول ويتعلقان بالجهاز المستعمل، كما يشترط أن يكون سلم درجة الحرارة خطي.

$\Delta y = k_y\, \ell_{T_0} \frac{(\ell_{T_1} - \ell_{T_0})}{\ell_{T_0}} = k_y\, \ell_{T_0} \Delta \ell_{T_0}^{T_1}$ ، حيث أن: $\Delta \ell_{T_0}^{T_1}$ هو التمدد النوعي و يعبر عنه بالتغير النسبي لطول المادة بين درجتي الحرارة T_1 و T_0.

يعرف معامل التمدد الخطي المتوسط بالعلاقة: $\propto_{moy}{}_{T_0}^{T_1} = \frac{1}{T_1 - T_0} \frac{\Delta \ell_{T_0}^{T_1}}{\ell_{T_0}}$.

يعرف معامل التمدد الخطي الحقيقي $\propto_T$ عند درجة الحرارة T بمشتق منحنى التمدد عند النقطة M (الشكل 01)، بالعلاقة التالية: $\propto_T = \frac{1}{\ell_T} \frac{d\ell}{dT}$ ومنه: $\propto_T = \frac{d\Delta\ell}{dT} = \frac{1}{\ell_T} \frac{dy}{dx} \frac{k_x}{k_y}$، حيث يمثل $\frac{dy}{dx}$ ميل المماس عند درجة الحرارة T لمنحنى التمدد.

يعرف معامل التمدد الحجمي $\propto_V$ بالعلاقة التالية: $(\propto_V)_T = \frac{1}{V_T} \frac{dV}{dT}$، وبالنسبة للمواد موحدة الخواص أين يكون التمدد الخطي متماثل حسب كل الاتجاهات البلورية، فتصبح العلاقة السابقة كالتالي $(\propto_V)_T = 3 \propto_T$.

طرق تحليل التمدد

توجد عدة طرق لتحليل التمدد منها جهرية مثل القياس المباشر بالمشاهدة الضوئية أو القياس باستعمال الممدد الحراري، والمجهرية باستعمال مقياس الحيود للأشعة السينية.

نركز في دراستنا على مقياس التمدد ذو الساق الكابسة، في هذا الجهاز يتم انتقال التغير في طول المادة مع تغير درجة الحرارة إلى جملة تقع خارج الفرن بواسطة ساق كابسة، تتكون الساق الكابسة والاسطوانة التي توضع بداخلها العينة من نفس المادة وهي عادة مواد معروفة و ضعيفة معامل التمدد مثل: الالومين الملبد و السيليس و الغرافيت.

مجالات استعمال التمدد الحراري

يستعمل التمدد الحراري في حساب معاملات التمدد لجميع الأجسام الصلبة و البلورية وغير البلورية بالطرق العيانية.

التحولات المتعددة الشكل البلوري

تمتاز مجموعة من المواد بتعدد الشكل البلوري في الحالة الصلبة، وفي مجالات معينة من درجة الحرارة والضغط، حيث يرافق التحولات المتعددة الشكل البلوري تغير في الحجم ناتج عن تغير في طريقة التكديس وكذلك في طاقات الربط، مما يؤدي إلى تغير في نصف القطر الذري حسب الأنظمة البلورية للاطوار، وعلى سبيل المثال لا الحصر الحديد ذو الطور α (بنية مكعبة ممركزة الجسم) المستقر عند درجات الحرارة المنخفضة، يتحول أثناء تسخينه إلى الطور γ *(Fe(γ))* ذو مكعبة ممركزة الوجوه.

جهاز مقياس التمدد الحراري (Dilatomètre): نوع NETZSCH 402

يمثل الشكل (2)، مخطط مقياس التمدد نوع *NETZSCH 402*، والذي يتكون من فرن و ساق كابسة بجانبها مزدوج حراري من نوع *NiCr-Ni* ، وكذلك أجهزة تسجيل.

يتكون الفرن من مقاومة كهربائية، حيث يتم تسخين العينة بسرعة ثابتة (يختارها المجرب)، يتم نقل التغير في الطول بواسطة الساق الكابسة (تتحول إلى إشارة كهربائية) إلى جهاز قياس الطول حيث تضخم هذه الأخيرة و ترسل إلى أجهزة التسجيل.

تقاس درجة الحرارة بواسطة المزدوج الحراري و الذي يتواجد بجوار العينة، حيث تقاس درجة الحرارة عند كل لحظة زمنية. يتم تسجيل المنحنى $\Delta\ell = f(t)$ الشكل (03) و كذلك $T = f(t)$ وهما يمثلان على الترتيب التغير في الطول ودرجة الحرارة بدلالة الزمن.

حساب معامل التمدد الحراري الخطي

لدينا $\alpha_{moy}{}_{T_1}^{T_2} = \frac{\ell_{T_2}-\ell_{T_1}}{\ell_{T_1}}\frac{1}{T_1-T_0}$ و $\Delta\ell_1 = \frac{\ell_{T_1}-\ell_{T_0}}{\ell_{T_0}}$ و $\Delta\ell_2 = \frac{\ell_{T_2}-\ell_{T_0}}{\ell_{T_0}}$.

ومنه نجد: $\alpha_{moy}{}_{T_1}^{T_2} = \frac{\Delta\ell_2-\Delta\ell_1}{1+\Delta\ell_1}\frac{1}{T_1-T_0}$. إذا كان سلم درجة الحرارة خطي فيمكننا حساب معامل التمدد الحقيقي باستعمال ميل المنحنى $\frac{d\Delta\ell}{dT}$ عند النقطة M الشكل 04.

حساب التغير في الحجم لمادة ذات تحول متعدد الأطوار

لتكن لدينا مادة *(A)* أثناء تسخينها تتحول من طور α إلى الطور γ (الشكل 05)، كما هو ملاحظ من الشكل يمكننا تحديد درجة حرارة التحول الإبتدائية والنهائية T_1 و T_2 من منحنى التمدد كما يتم تقدير التغير في الطول أو الحجم عند درجة الحرارة T_θ، حيث : $T_\theta = \frac{T_1+T_2}{2}$ بالعلاقة: $\frac{\Delta\ell}{\ell}\% = 100\frac{\ell^\gamma_{T_\theta}-\ell^\alpha_{T_\theta}}{\ell^\alpha_{T_\theta}}$ وبما أن: $\frac{\Delta\ell_2}{\ell_0} = \frac{\ell^\gamma_{T_\theta}-\ell_0}{\ell_0}$ و $\frac{\Delta\ell_1}{\ell_0} = \frac{\ell^\alpha_{T_\theta}-\ell_0}{\ell_0}$ ، إذا $\frac{\Delta\ell}{\ell}\% = 100\frac{\Delta\ell_2-\Delta\ell_1}{1+\Delta\ell_1}$. ومنه: $\frac{\Delta\ell}{\ell}\% \approx 100(\Delta\ell_2 - \Delta\ell_1)$.

ويقدر التغير في الحجم للمادة المتجانسة موحدة الخواص بالشكل التالي: $\frac{\Delta V}{V}\% = 3\frac{\Delta\ell}{\ell}\%$.

العمل التجريبي

تقوم كل مجموعة من الطلبة، بتحضير مجموعة من المواد لدراستها تحليليا بواسطة جهاز مقياس التمدد الطولي و ذلك من أجل متابعة و معرفة الأطوار المتشكلة تبعا لدرجة الحرارة، ومن منحنى التبريد نقوم بحساب معامل التمدد الحراري.

المواد المستعملة

- أكسيد الألمنيوم المخبري Al_2O_3.
- مجموعة من المعادن Fe و Al.....الخ.

دراسة Al_2O_3.

من منحنى التمدد الحراري لـ Al_2O_3 قم بتعيين مايلي:

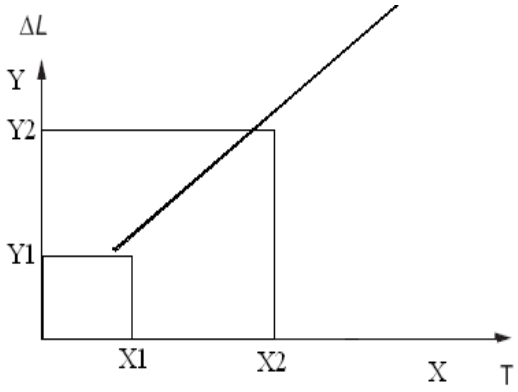
1. معامل التمدد الحراري لـ Al_2O_3 في المجال الحراري 200°C و 1000°C.
2. مقدار التقلص

دراسة المعادن السابقة

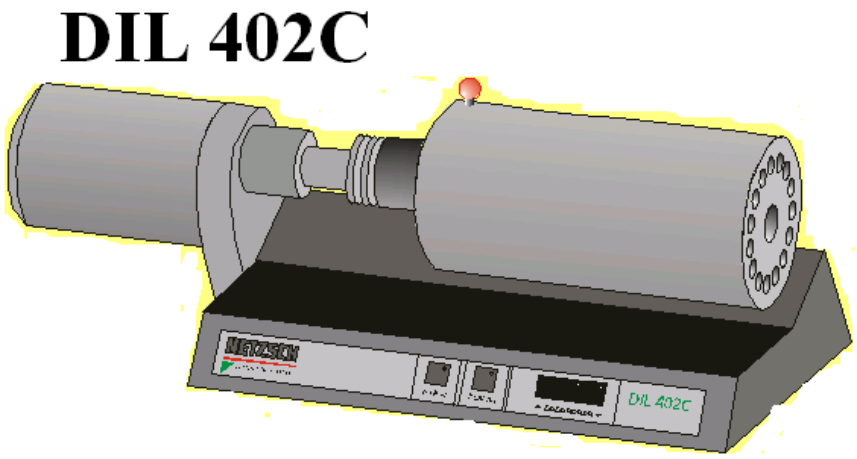
من منحنى التمدد الحراري لكل معدن قم بتعيين مايلي:

1. جميع التحولات الطورية الحاصلة (إن وجدت)، مع تعيين نهاية وبداية درجة حرارة كل تحول، وكذلك وصف دقيق للتحولات الحادثة.
2. معامل التمدد الحراري.

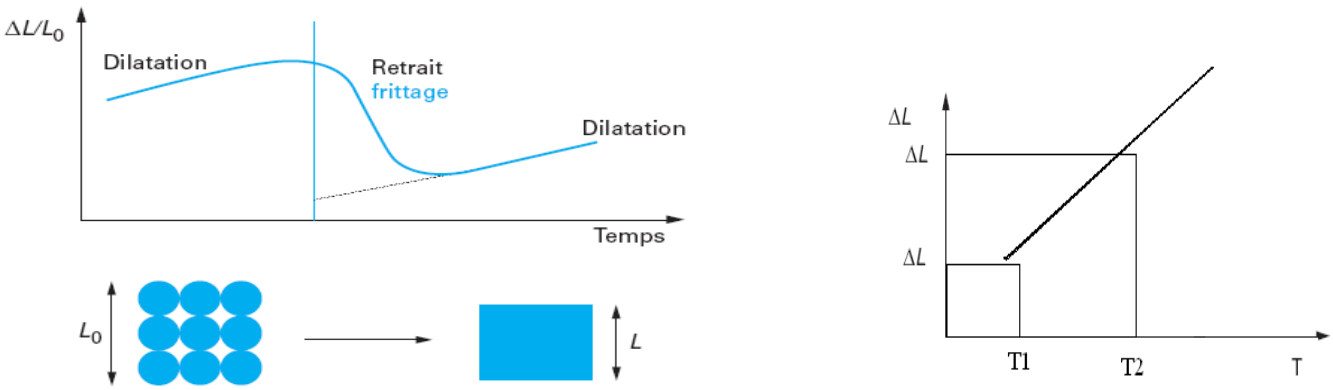
3. مقدار التقلص لكل حالة.



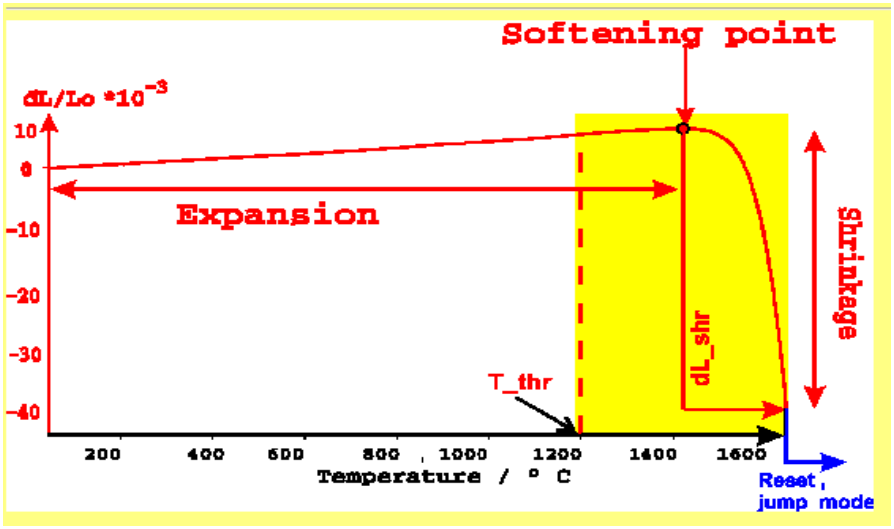
الشكل (01)



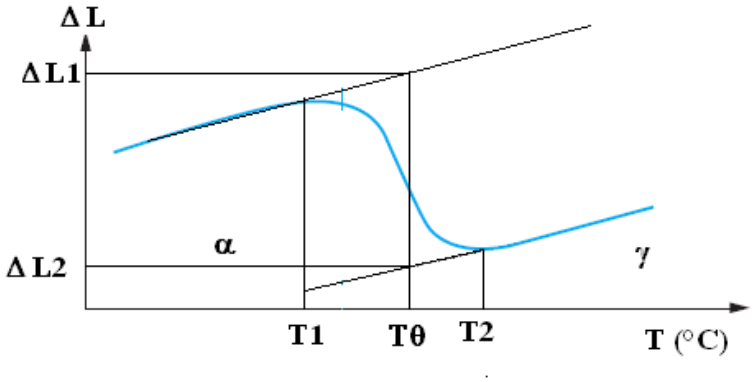
الشكل (02)



الشكل (03)



الشكل (04)



الشكل (05)