

Measuring the Expansivity of Tungsten at Elevated Temperatures using laser of wavelength 532 nm

Dr. Bassam Ghazouline*
Dr. Atef El Joundi**
Adweaya Hessi***

(Received 10 / 5 / 2023. Accepted 31 / 10 / 2023)

□ ABSTRACT □

In this work, we performed a simple experiment to measure the linear expansion of a tungsten wire over the temperature range 300-3600 K. This experiment is based on the using of a laser with a wavelength of 532 nm to light the ordinary tungsten filament of P21W car lamps under gradual heating, which leads to a change in the dimensions of the filament, the dimensional changes are measured in the shadow images, these changes are associated with current-voltage values in order to calculate temperatures and then calculate the coefficient of linear thermal expansion CTE(The coefficient of thermal expansion) in this field. In addition to measuring the frequency of vibration of the wire in the field 300-1400K. This low-cost experiment with tungsten enables science students to understand the thermal behavior of tungsten as a refractory metal, and allows for many low-cost measurement to aid in future refractoriness and to test new classes of refractory materials.

Keywords: linear expansion, high(elevated) temperature, Laser shadow images.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Ph.D. -, Faculty of Science, Department of Physics, Tishreen University, Latakia, Syria.
Bassam.Ghazouline@2021

**Professor Doctor -, Faculty of Science, Department of Physics ,Tishreen University, Latakia, Syria.
Atef.El-joundi@2021

***Postgraduate student (Master) - Faculty of Science, Department of Physics, Tishreen University Latakia, Syria. adwea1611@gmail.com

قياس تمدد التتغستين عند درجات حرارة مرتفعة باستخدام ليزر بطول موجي 532 nm

د. بسام غزولين*

د. عاطف الجندي**

عدوية حصي***

تاريخ الإيداع 10 / 5 / 2023. قُبِلَ للنشر في 31 / 10 / 2023

□ ملخص □

في هذا العمل قمنا بإجراء تجربة بسيطة لقياس التمدد الخطي لسلك التتغستين على مجال درجات الحرارة 300-3600 K. تعتمد هذه التجربة على استخدام ليزر ذو طول موجي 532 nm لإضاءة أسلاك التتغستين العادي لمصابيح السيارات P21W تحت التسخين التدريجي، مما يؤدي إلى تغير أبعاد السلك، يتم قياس تغيرات الأبعاد في صور الظل، هذه التغيرات ترتبط مع قيم تيار-جهد من أجل حساب درجات الحرارة ومن ثم حساب معامل التمدد الحراري الخطي CTE للتتغستين في هذا المجال، بالإضافة إلى قياس تردد اهتزاز السلك في المجال 1400K-300. هذه التجربة منخفضة التكلفة تمكن طلاب العلوم من فهم السلوك الحراري للتتغستين كمعدن حراري، كما تتيح إجراء قياسات عديدة منخفضة التكلفة تساعد في التألف في المستقبل واختبار فئات جديدة من المواد المقاومة للحرارة.

الكلمات المفتاحية: التمدد الخطي- درجات حرارة مرتفعة- صور الظل باستخدام الليزر.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص  CC BY-NC-SA 04

* دكتور- كلية العلوم- جامعة- تشرين- اللاذقية- سورية Bassam.Ghazouline@2021

**أستاذ دكتور- كلية العلوم- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية Atef.El-joundi@2021

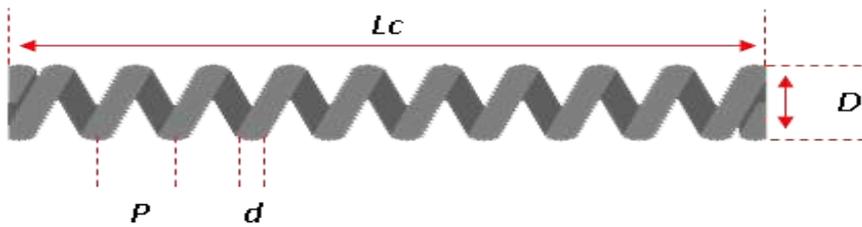
***طالبة دراسات عليا(ماجستير)- كلية العلوم- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية adwea1611@gmail.com

مقدمة:

يمكن تعريف المعادن المقاومة للصح (النيوبيوم والمولبيديوم والتانتالوم والتتغستين والرنيوم) على أنها تلك المعادن التي لها درجة انصهار أكبر من 2273°K . حيث تعتبر سبائكها مواد حيوية لكل صناعة رئيسية تقريباً وللعديد من فروع العلوم التطبيقية بما في ذلك الفضاء (حيث تحتاج وسائط النقل والمركبات الفضائية الى دروع حرارية لبعثاتها الاستكشافية أو أثناء عودتها الى الغلاف الجوي من أجل مقاومة درجات الحرارة التي يمكن أن تتجاوز 2500 درجة مئوية) والسيارات والتكنولوجيا النووية والإضاءة ومعالجة المعادن والتعدين والإلكترونيات والأطراف الصناعية. تشترك في بعض الخصائص المميزة، بما في ذلك، درجة انصهار عالية، وصلابة عالية في درجة حرارة الغرفة، ولها كثافة عالية نسبياً ومستقرة ضد التثوه في الشكل حتى درجات حرارة عالية جداً [1,2]. يعد تمددها الحراري اعتباراً مهماً في اختيار المواد، خاصة عند تصميم الأشكال الهندسية للمكونات المعقدة التي تخضع لدورات حرارية منتظمة [3]. يتم قياس التمدد الحراري للمواد المقاومة للصح بواسطة مقاييس تمدد خاصة [4، 5]، قادرة على أداء عملية قياس التمدد لدرجات الحرارة المرتفعة وقياس الحرارة في وقت واحد. كما يعد كشف الاهتزاز أحد الاحتياجات الأساسية في الفيزياء التجريبية والهندسة الميكانيكية. ربما يكون مقياس دوپلر الليزري للاهتزاز هو الأداة الأكثر أهمية التي تم استخدامها لهذا الغرض [6]، وهو أيضاً أكثر المعدات تطوراً وغلاءً والتي قد لا تكون متاحة للعديد من الباحثين. على الرغم من حساسيتها الشديدة، فإن أداء هذه المعدات يعتمد إلى حد كبير على محددات السطح والانبعاث للعنصر قيد الاختبار. قد لا يكون من السهل اختبار العنصر المتوهج ذو السطوح العالي عن مدى بعيد في حالات معينة [7]، بالإضافة إلى التأثيرات السلبية لنفاذ الليزر من خلال نوافذ حجرة الاختبار التي تسبب تخفيف الحزمة وانعكاسات متعددة وخطأ في قراءات الحركة النسبية.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث من استخدام ليزر ذو طول موجي 532 nm لدراسة التمدد الحراري للتتغستين بطريقة رسم الخيال(الظل) عند درجات حرارة مرتفعة. حيث يمكن ذلك من دراسة التمدد الحراري الخطي للتتغستين كمدن حراري وهذه الطريقة مختلفة عن أجهزة التمدد التدريسية التي تكون من أجل مجال درجات حرارة ضيقة جداً تتراوح من $20-90^{\circ}\text{C}$ أي ما يعادل $(293-363)\text{K}$. كما تمكن من قياس الاهتزاز عندما يكون مقياس دوپلر الاهتزازي الليزري غير فعال وذلك بسبب الأبعاد الصغيرة والسطوح العالي والانعكاس الضعيف للعنصر المختبر.

1. التمدد الخطي لملف ذو نهايات ثابتة

شكل (1) البارامترات الهندسية الأساسية للعينات الملفوفة

تبين المعادلة (1) نسبة التمدد الحراري الخطي لملف ذو نهاية حيث تم استنتاج هذه المعادلة بالاعتماد على البارامترات الأساسية لملف ذو نهاية ثابتة.

$$\Delta l / l_0 = (\Delta D / D_0) + [(\Delta Lc)^2 / (Lc_0 (Lc_0 + \Delta Lc))] \quad (1)$$

حيث أن: Lc_0 : طول الملف عند درجة حرارة الغرفة.

D_0 : متوسط قطر الملف عند درجة حرارة الغرفة.

ΔD : التغير في قطر الملف.

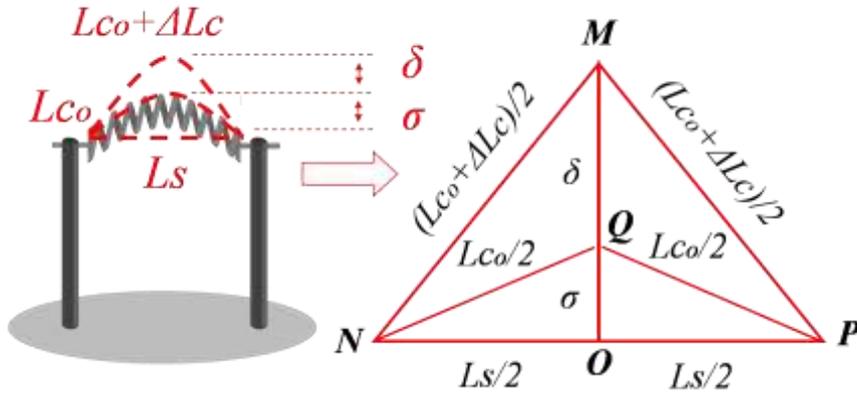
ΔLc : التغير في طول الملف.

يمكن اعتبار عملية التمدد الخطي تراكمًا لمصطلحين فعالين ، الأول $(\Delta D / D_0)$ يرجع إلى تمدد قطر الملف الثابت (تمدد الملف غير المنحرف) ، والثاني $[(\Delta Lc)^2 / (Lc_0 (Lc_0 + \Delta Lc))]$ يرجع إلى تمدد طول الملف (تمدد الملف المنحرف). إذا كانت ΔLc تساوي صفرًا ، فإن تمدد الملف يكون غير منحرف تمامًا وتصبح المعادلة (1) بالشكل:

$$\Delta l / l_0 = \Delta D / D_0 \quad (2)$$

في هذه الحالة ، يكون التمدد الخطي لمادة الملف يتم الحصول عليها ببساطة مباشرة، عن طريق قياس تمدد قطر الملف ، وهو أمر ضروري لتكبيره قدر الإمكان لتسهيل عملية القياس.

لحساب ΔLc تم استنتاج المعادلة (3) من خلال ربط هندسة تمدد الملف بمتثلثات كما في الشكل (2):



شكل (2) النمذجة الهندسية لتمدد أسلاك محصورة في المتثلث

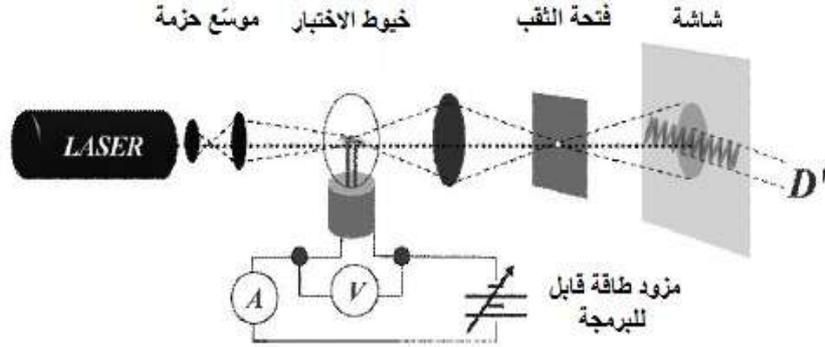
$$\Delta Lc = 2 ((Lc_0/2)^2 + 2\sigma\delta + \delta^2)1/2 - Lc_0 \quad (3)$$

حيث أن: δ : الانحراف الرأسي للملف.

σ : المسافة العمودية بين خط الامتداد والفتيل.

طرائق البحث ومواده:

يتم ترتيب الأجهزة كما هو موضح بالشكل (3):



الشكل (3): مخطط توضيحي للتجربة المستخدمة.

بعد تركيب وضبط الإعداد البصري ، يتحقق الإجراء التالي:

1. قبل بدء عملية القياس ، تم التأكد مما يلي:
- أ- تم قياس البيانات الهامة على وجه التحديد $W, V_{op}, R_o, D, \mu, I_{op}$ لكل عينة. حيث:

$$I_{op} = W / V_{op} \quad (4)$$

$$\mu = D_0 / d \quad (5)$$

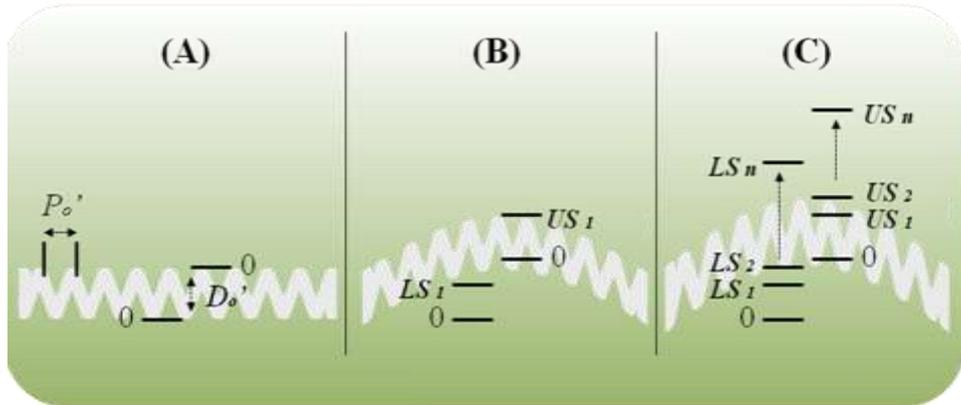
علما أن: W : الاستطاعة، I_{op} : تيار التشغيل الأسمي، V_{op} : جهد التشغيل الأسمي، μ : مؤشر التمدد، D_0 : قطر الملف عند درجة حرارة الغرفة، d : قطر سلك الملف

ب- يستهدف شعاع الليزر دائما مركز أسلاك التتغستن بعد تنظيف زجاجة المصباح بعناية.

ج- يجب أن يكون دائما ظل الملف داخل منطقة الشاشة ، ولا يُسمح بإجراء أي تعديل بعد بدء القياسات.

2. تم إسقاط مخطط الظل الذي تم إنشاؤه على الزجاج الأرضي ، أو ببساطة على شاشة الحائط للحصول على مزيد من التكبير وكذلك لتمكين تتبع العلامة يدويًا لتسهيل القياسات.

3. من أجل تحديد $\Delta D'$ والانحراف δ' للملف المقاس من خط الإسناد إلى مركز قطره الممتد في وقت واحد ، كان من الضروري اجراء طريقة بسيطة للحصول على القياس مباشرة من الظل، وهذه الطريقة تعتمد على ما يلي:



شكل (4) التحول العلوي / السفلي لطريقة وضع العلامات على الشاشة

- أ- تتبع علامتين محددتين تشيران إلى الحافة العلوية والسفلية لقطر الملف. كما هو مبين في الشكل (4A). يمثل هذا الزوج من العلامات موضع الملف الحالي الصفري أو نقاط المسند ، يتم حساب التكبير M باستخدام المعادلة التالية:

$$M = D_0' / D_0 \quad (6)$$

ب. لبدء القياسات ، تمّ زيادة الجهد تدريجياً عند الزيادات المتدرجة ، مع تحديد موضع الملف الجديد على الشاشة كما هو موضح في الشكل (4B) ، مع تسجيل قيمة I و V للحصول على R و T باستخدام قانون أوم والمعادلة (7).

$$T = 293 \times (R/R_0)^{0.83} \quad (7)$$

ج. بحلول نهاية التجربة ، تم الحصول على مجموعتين من العلامات ، الأولى هي المجموعة العليا (US) والثانية هي المجموعة السفلية (LS) كما هو موضح في الشكل (4 C) داخل كل مجموعة من العلامات ، تم قياس حجم δ' فيما يتعلق بعلامة الإسناد الأولى.

د. عند كل زيادة حالية ، تم الحصول على القيم الصافية لـ δ' بأخذ متوسط قيمة كل زوج من القراءات التناظرية في كلتا المجموعتين ، بينما تم الحصول على القيم الصافية لـ $\Delta D'$ بأخذ اختلافها ومن ثم تم استخدام δ' و D' لاستنتاج δ و ΔD ، في ضوء التكبير البصري المعروف.

4. تم بعد ذلك حساب التمدد الخطي للعينة باستخدام الصيغ المستنبطة سابقاً ، ورسمها مقابل T ، ثم تم تتبع منحنى أفضل ملاءمة.

5. يجب تنقيح المنحنى الناتج وتنعيمه عن طريق الانحدار للحصول على التمدد الخطي كدالة لدرجة الحرارة على شكل معادلة متعددة الحدود من الدرجة n كما هو موضح في المعادلة (8) ، حيث $3 \leq n \leq 5$

$$\frac{\Delta l}{l_0} = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4 + \dots + C_n T^n \quad (8)$$

6. لبدء الانحدار ، تم تحديد مجموعة من أزواج البيانات $\{T_i, (\Delta l/l_0)_i\}$ التي تمثل منحنى مناسب ، حيث يساوي الحد الأدنى المطلوب لعدد أزواج البيانات $(n+1)$ حيث $(i = 0, 1, 2, 3, \dots, n)$:

$$\{T_i, (\Delta l/l_0)_i\} = \{(T_0, (\Delta l/l_0)_0), (T_1, (\Delta l/l_0)_1), (T_2, (\Delta l/l_0)_2), \dots, (T_n, (\Delta l/l_0)_n)\} \quad (9)$$

7. ثم باستخدام المعادلة (8) و مجموعة البيانات من المعادلة (9) لتوليد مجموعة من n معادلة لحلها في وقت واحد للحصول على $(C_0, C_1, C_2, \dots, C_n)$:

$$\begin{aligned} C_0 + C_1 T_0 + C_2 T_0^2 + \dots + C_n T_0^n &= (\Delta l/l_0)_0 \\ C_0 + C_1 T_1 + C_2 T_1^2 + \dots + C_n T_1^n &= (\Delta l/l_0)_1 \\ C_0 + C_1 T_2 + C_2 T_2^2 + \dots + C_n T_2^n &= (\Delta l/l_0)_2 \\ &\vdots \\ C_0 + C_1 T_n + C_2 T_n^2 + \dots + C_n T_n^n &= (\Delta l/l_0)_n \end{aligned}$$

8. أخيراً ، يمكن الحصول على دالة CTE عن طريق التفريق بين المعادلة متعددة الحدود ل التمدد الخطي ، وتقليل ترتيبه بواحد ، والتخطيط له مقابل T .

9. نقوم بحساب تردد اهتزاز سلك التتغستن كتابع لدرجة الحرارة من العلاقة التالية:

$$f = 7 \times 10^2 - 4.42 \times 10^{-2} T + 2.86 \times 10^{-4} T^2 - 8.18 \times 10^{-7} T^3 + 9.2 \times 10^{-10} T^4 - 4.59 \times 10^{-13} T^5 \quad (10)$$

هذه المعادلة صالحة لدرجات حرارة ضمن المجال $K (300 - 2000)$ [9].

10. تمّ حساب وقياس قيم التمدد من أجل عينات مختلفة من المصاييح ورسمها مقابل $T(K)$ ومقارنتها بالخط البياني للبيانات المرجعية للتتغستن.

11. كما تم رسم $f(T) = \frac{\Delta L}{L_0} \%$ للعيبة G وذلك عند التسخين والتبريد ومقارنة الخطوط الناتجة مع الخط البياني للبيانات المرجعية.

2. الأجهزة والأدوات:

- عينات من مصابيح السيارات المتوهج العادي $P21W$
- ليزر ذو طول موجي 532 nm
- عدسات توسيع الشعاع
- عدسة اسقاط
- مقياس فولط، مقياس أمبير.
- مزود طاقة مختبر رقمي.
- شاشة شفافة

3. النتائج العملية:

- تم ترتيب الأجهزة كما في الشكل (5) وذلك في مخبر الليزر في كلية العلوم:



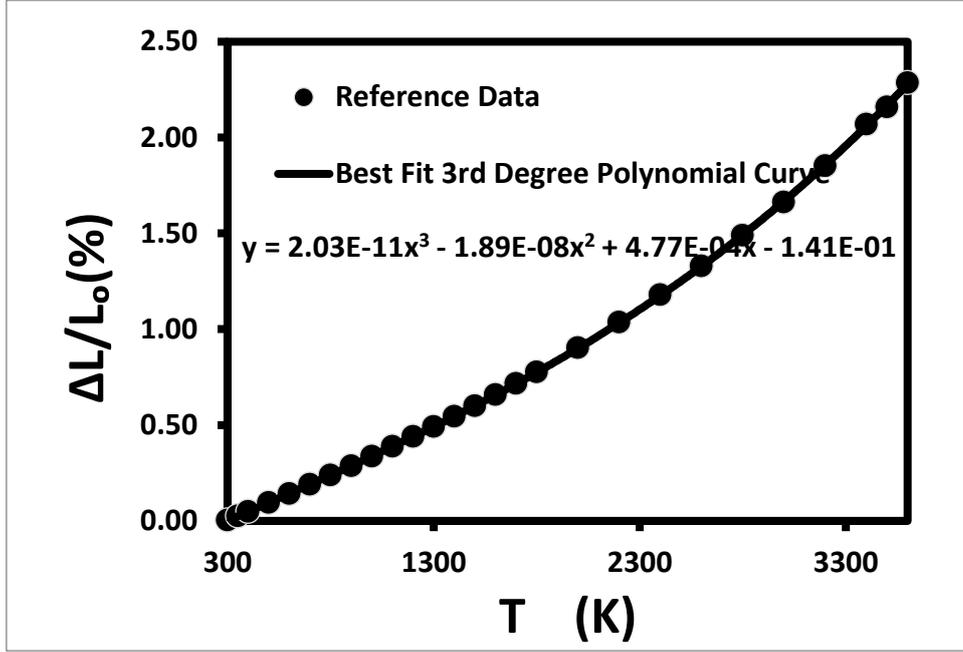
الشكل(5): ترتيب الأجهزة.

الجدول(1): البيانات المرجعية لنسبة التمدد الحراري الخطي و CTE.

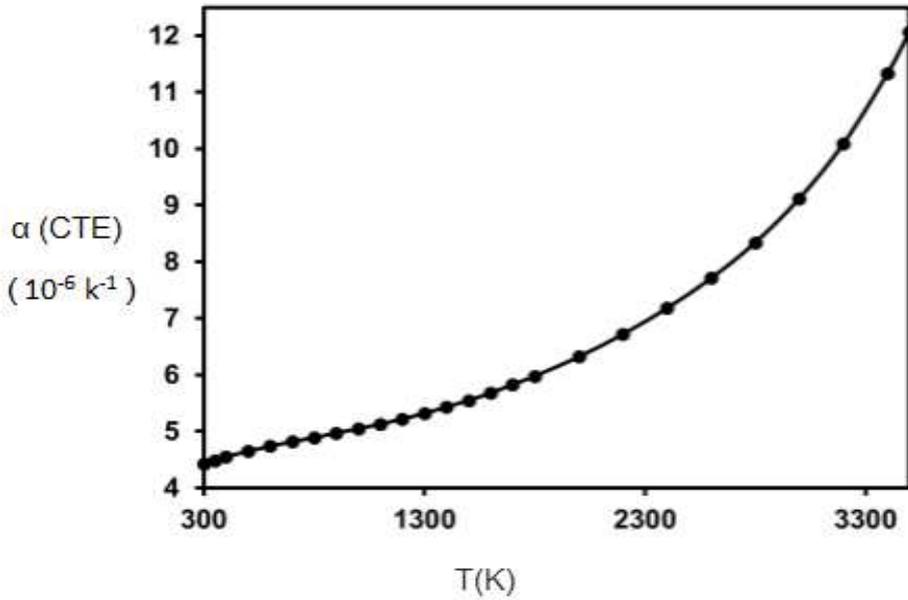
البيانات المرجعية [10]		البيانات المرجعية [8]		T(K)	f(Hz)
T(K)	$\frac{\Delta D}{D_0} \%$	T(K)	$\alpha(CTE)$ $10^{-6} K^{-1}$		

300	0.0031	300	4.43	383.5	695.06
350	0.0254	350	4.48	540	687.88
400	0.0479	400	4.55	554	686.92
500	0.094	500	4.65	682.5	674.62
600	0.141	600	4.74	876.33	635.77
700	0.189	700	4.82	958.23	605.38
800	0.2375	800	4.89	1012.83	574.48
900	0.2865	900	4.97	1094.73	520.85
1000	0.3365	1000	5.05	1143.87	475.6
1100	0.387	1100	5.13	1193.01	419.77
1200	0.439	1200	5.22	1242.15	351.41
1300	0.491	1300	5.32	1277.64	293.21
1400	0.545	1400	5.43	1362.27	117.57
1500	0.6	1500	5.55	1403.22	10.77
1600	0.657	1600	5.68		
1700	0.716	1700	5.83		
1800	0.776	1800	5.98		
2000	0.902	2000	6.32		
2200	1.036	2200	6.72		
2400	1.178	2400	7.18		
2600	1.328	2600	7.71		
2800	1.489	2800	8.34		
3000	1.662	3000	9.12		
3200	1.852	3200	10.09		
3400	2.068	3400	11.33		
3500	2.158	3500	12.07		
3600	2.285	3600	12.87		

- تمّ رسم المنحني البياني لنسبة التمدد الحراري الخطي و $\alpha(CTE)$ حسب البيانات التي حصل عليها White و Minges [10][8] بدلالة درجة الحرارة $T(K)$ كما في الشكل (6) والشكل (7):

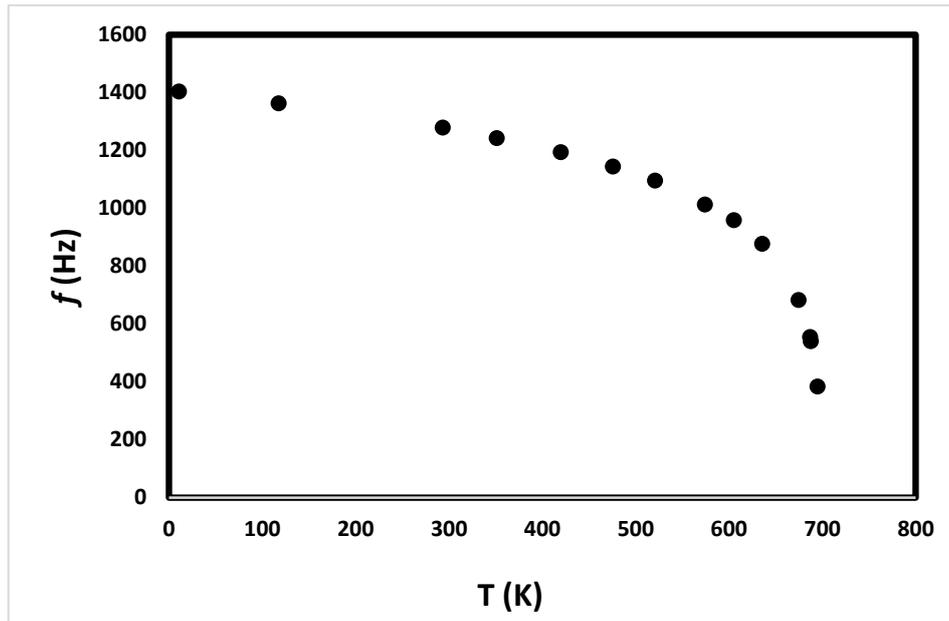


الشكل(6): البيانات المرجعية لنسبة التمدد الحراري الخطي للتتغستين وفقا ل White و Minges [10].



الشكل(7): البيانات المرجعية لمعامل التمدد الحراري $\alpha(CTE)$ وفقا ل White و Minges [8].

- تم حساب تردد اهتزاز سلك التتغستين $f(Hz)$ من العلاقة (10) القيم التي تم الحصول عليها كما في الجدول (1). ومن ثم رسم تردد اهتزاز سلك التتغستين كتابع لدرجة الحرارة كما في الشكل (8):



الشكل (8): تردد الاهتزاز الطولي لسلك التنغستين مقابل درجة الحرارة.

من الخط البياني نلاحظ انخفاض في تردد السلك مع زيادة درجة الحرارة، يعود هذا التغير الى الانخفاض في

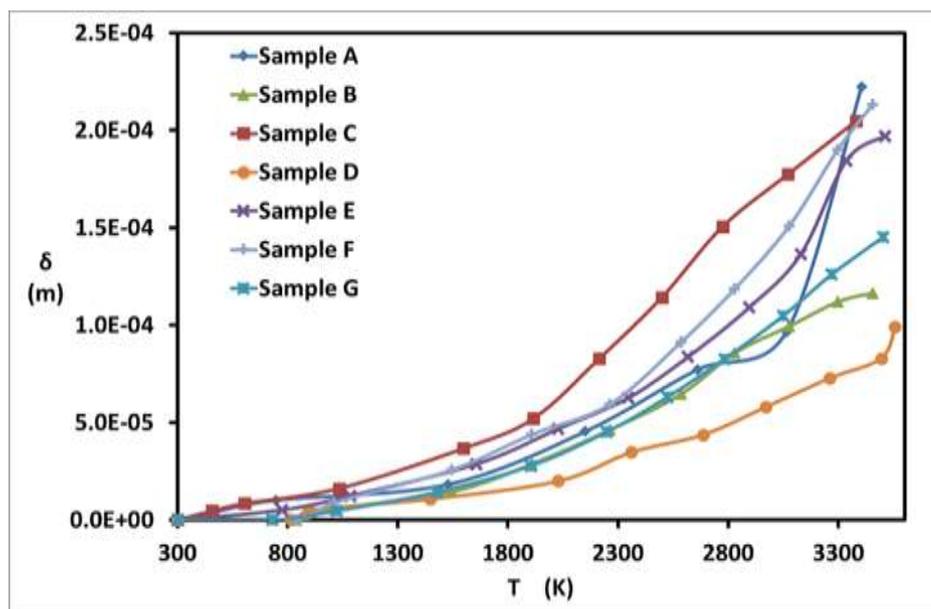
معامل القص G_{of} للتغستين نتيجة تغير درجة الحرارة [11].

• يشير الجدول (2) الى بارامترات المصابيح المستخدمة وقيم مؤشر التمدد μ المحسوبة لكل عينة.

الجدول(2): بارامترات عينات المصابيح المختارة.

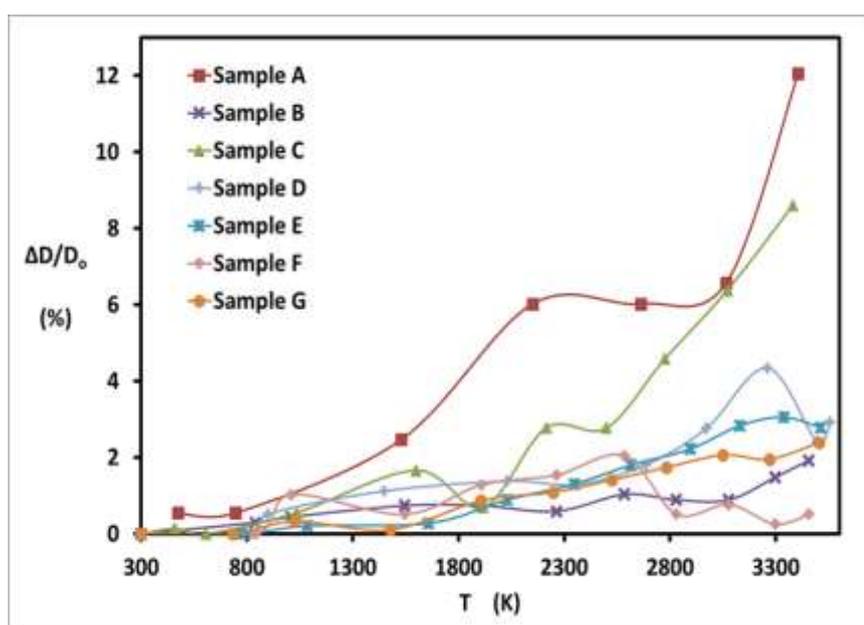
Sample	Form	R_o (Ω)	قطر السلك d(mm)	قطر الفتيل D_0 (mm)	L_c (mm)	l_o (mm)	μ
[A] TAIWAN P21W6V	C-6	0.18	0.08	0.31	10	16	3.87
[B] ZEEMOH 12V21W	C-6	0.55	0.08	0.345	8	48.9	4.31
[C] HALAWA 21W6V	C-6	0.18	0.125	0.615	6	39	4.9
[D] AU-LITE P21W12V E13	C-6	0.55	0.08	0.58	7	48.9	6.5
[E] TARIFA 21W12V	C-6	0.55	0.08	0.57	6.3	48.9	7.1
[F] TUNGSRAM 12V 21W	C-6	0.55	0.08	0.59	6.2	48.9	7.3
[G] EAGLEYE 12V21W Korea	C-6	0.55	0.09	0.71	7.6	61.9	7.8

• تم رسم قيم الانحرافات الرأسية للملف δ مقابل درجة الحرارة (T) كما في الشكل(9):

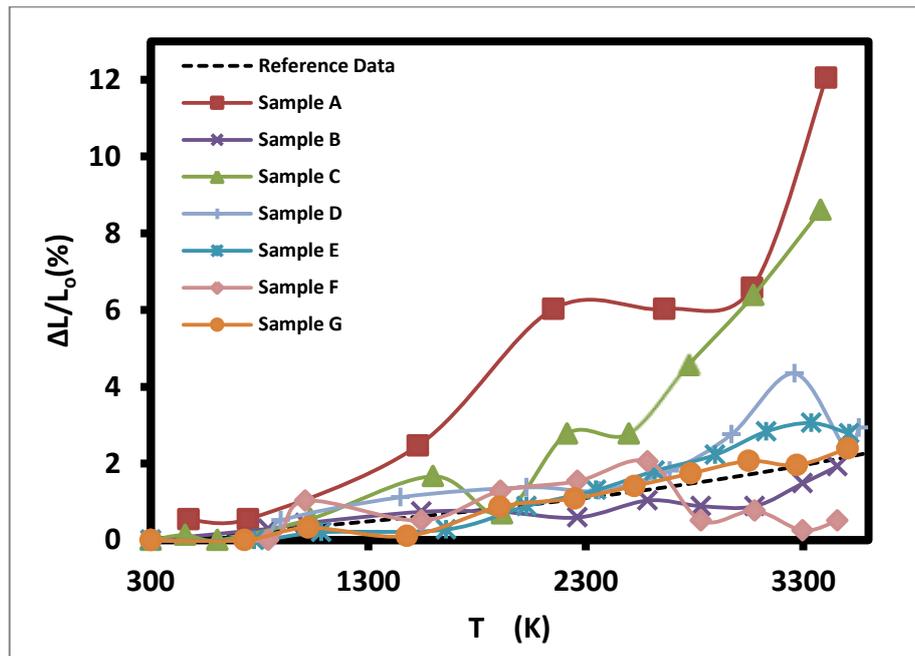


الشكل(9): الانحراف الرأسي لأسلاك التتغستين مقابل درجة الحرارة لجميع العينات.

- من أجل تقييم النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها بواسطة رسم الظل بالليزر، يوضح الشكلين (10) (11) القيم المقاسة لنسبة التمدد الخطي لعينات الاختبار المختلفة مقارنة بالبيانات المرجعية التي تم الحصول عليها بواسطة White and Minges [8,10]، كما نلاحظ من الشكل (11) أن عينات الاختبار تصنف الى ثلاث مجموعات:
 1. المجموعة الأولى: عينات تحفظية (عينة G, E, D) حيث سلوك التمدد يتبع النموذج المرجعي.
 2. المجموعة الثانية: العينات التقدمية (عينة C, A) حيث تقفز عملية التمدد النموذج المرجعي.
 3. المجموعة الثالثة: عينات ارتدادية (عينة F, B) حيث تكشف عملية التمدد التخلف عن النموذج المرجعي.



الشكل(10): نسبة التمدد غير المنحرف مقابل درجة الحرارة لجميع العينات.



الشكل (11): مقارنة نسبة التمدد الخطي للعينات مقابل درجة الحرارة بالبيانات المرجعية للتغستن.

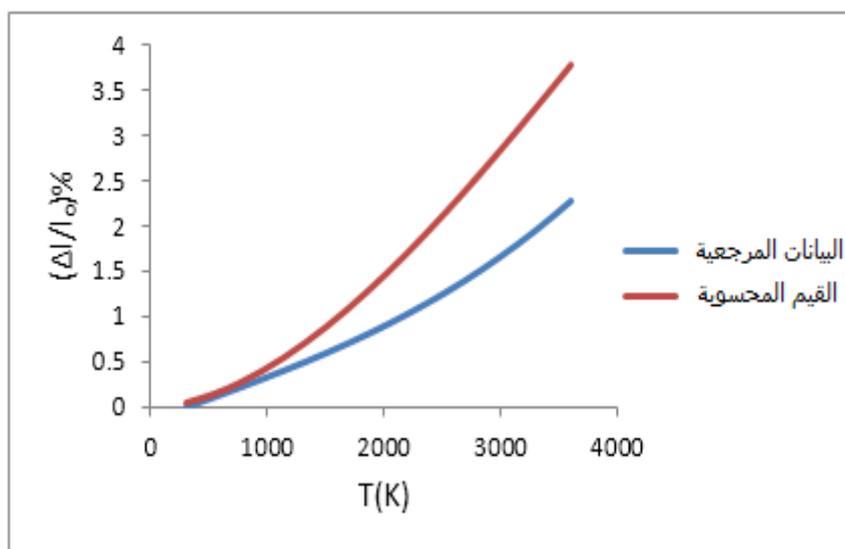
- العوامل وراء انحراف تمدد العينات عن النموذج المرجعي عديدة: التوزيع الحراري غير الخطي [12] على طول الفتيل، تتم جميع القياسات عند مركز الفتيل وهو الجزء الأكثر سخونة في العينة ومن ثم يصبح الجزء الأكثر ليونة أثناء التسخين وبالتالي يفقد قوته بسرعة مما يجعل أطراف الخيوط أكثر صلابة، بالإضافة الى ذلك يختلف سلوك التغستن المشبع بالبوتاسيوم المستخدم كمواد أسلاك اختلافا طفيفا [13] عن سلوك التغستن النقي للبيانات المرجعية.
- تم حساب قيم معاملات الانحدار C_0, C_1, C_2, C_3 ومعامل التمدد الخطي لمجموعة عينات المصاييح، كما في الجدول (3).

الجدول (3): قيم معاملات الانحدار وقيم التمدد الخطي.

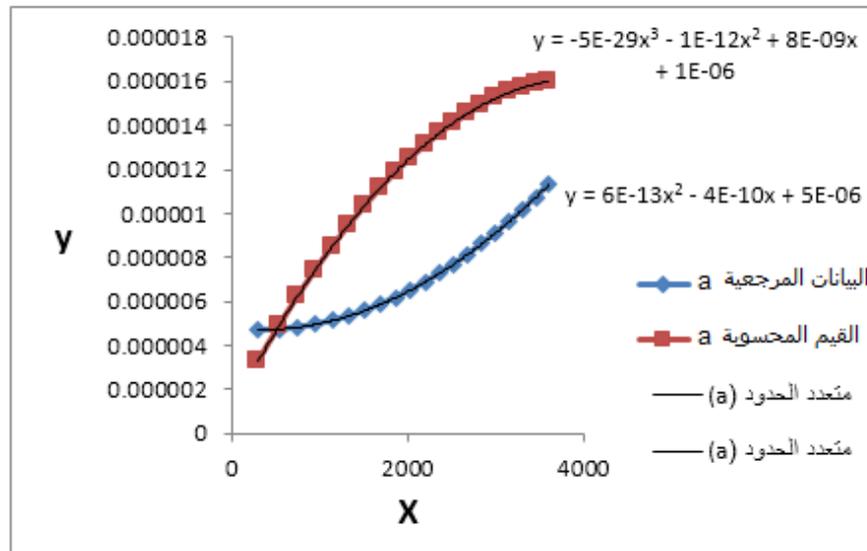
R/R ₀	T/T ₀	T	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	(Δl/l ₀)	(Δl/l ₀)%	2C ₁
1	1	300	-1.41E-03	1.43E-03	-1.70E-05	5.48E-06	1.03E-05	0.001034	-1.1E-07
2	1.777685	533.3056	-1.41E-03	2.54E-03	-5.36E-05	3.08E-05	1.11E-03	0.111101	-2E-07
3	2.488918	746.6755	-1.41E-03	3.56E-03	-1.05E-04	8.45E-05	2.13E-03	0.213023	-2.8E-07
4	3.160165	948.0496	-1.41E-03	4.52E-03	-1.69E-04	1.73E-04	3.11E-03	0.311419	-3.6E-07
5	3.803164	1140.949	-1.41E-03	5.44E-03	-2.45E-04	3.02E-04	4.09E-03	0.40862	-4.3E-07
6	4.424514	1327.354	-1.41E-03	6.33E-03	-3.32E-04	4.75E-04	5.06E-03	0.506118	-5E-07
7	5.028418	1508.525	-1.41E-03	7.19E-03	-4.29E-04	6.97E-04	6.05E-03	0.605002	-5.7E-07
8	5.61778	1685.334	-1.41E-03	8.03E-03	-5.36E-04	9.72E-04	7.06E-03	0.706121	-6.4E-07
9	6.194714	1858.414	-1.41E-03	8.86E-03	-6.51E-04	1.30E-03	8.10E-03	0.810179	-7E-07
10	6.76083	2028.249	-1.41E-03	9.67E-03	-7.76E-04	1.69E-03	9.18E-03	0.917776	-7.6E-07
11	7.317385	2195.216	-1.41E-03	1.05E-02	-9.09E-04	2.15E-03	1.03E-02	1.029441	-8.3E-07
12	7.865393	2359.618	-1.41E-03	1.12E-02	-1.05E-03	2.67E-03	1.15E-02	1.145645	-8.9E-07
13	8.405683	2521.705	-1.41E-03	1.20E-02	-1.20E-03	3.26E-03	1.27E-02	1.266819	-9.5E-07
14	8.938945	2681.684	-1.41E-03	1.28E-02	-1.36E-03	3.92E-03	1.39E-02	1.393358	-1E-06
15	9.465766	2839.73	-1.41E-03	1.35E-02	-1.52E-03	4.65E-03	1.53E-02	1.525629	-1.1E-06
16	9.986644	2995.993	-1.41E-03	1.43E-02	-1.69E-03	5.46E-03	1.66E-02	1.663976	-1.1E-06

17	10.50201	3150.604	-1.41E-03	1.50E-02	-1.87E-03	6.35E-03	1.81E-02	1.808724	-1.2E-06
18	11.01225	3303.676	-1.41E-03	1.57E-02	-2.06E-03	7.32E-03	1.96E-02	1.960181	-1.2E-06
19	11.51769	3455.308	-1.41E-03	1.65E-02	-2.25E-03	8.38E-03	2.12E-02	2.118638	-1.3E-06
20	12.01863	3605.588	-1.41E-03	1.72E-02	-2.45E-03	9.52E-03	2.28E-02	2.284376	-1.4E-06

$3c_2$	a	C_0	C_1	C_2	C_3	$(\Delta l/l_0)$	$(\Delta l/l_0)\%$	$2C_1$	$3c_2$	a
5.48E-08	4.71E-06	-3.97E-04	3.33E-04	3.40E-04	-8.56E-06	2.68E-04	0.026764	2.27E-06	-8.6E-08	3.29E-06
1.73E-07	4.74E-06	-3.97E-04	5.92E-04	1.08E-03	-4.81E-05	1.22E-03	0.122197	4.03E-06	-2.7E-07	4.87E-06
3.4E-07	4.82E-06	-3.97E-04	8.29E-04	2.11E-03	-1.32E-04	2.41E-03	0.240729	5.64E-06	-5.3E-07	6.22E-06
5.48E-07	4.96E-06	-3.97E-04	1.05E-03	3.40E-03	-2.70E-04	3.78E-03	0.378267	7.17E-06	-8.5E-07	7.42E-06
7.93E-07	5.13E-06	-3.97E-04	1.27E-03	4.92E-03	-4.71E-04	5.32E-03	0.531193	8.63E-06	-1.2E-06	8.5E-06
1.07E-06	5.34E-06	-3.97E-04	1.47E-03	6.66E-03	-7.41E-04	6.99E-03	0.699488	1E-05	-1.7E-06	9.47E-06
1.39E-06	5.58E-06	-3.97E-04	1.67E-03	8.60E-03	-1.09E-03	8.79E-03	0.879119	1.14E-05	-2.2E-06	1.04E-05
1.73E-06	5.86E-06	-3.97E-04	1.87E-03	1.07E-02	-1.52E-03	1.07E-02	1.069278	1.27E-05	-2.7E-06	1.11E-05
2.1E-06	6.17E-06	-3.97E-04	2.06E-03	1.31E-02	-2.03E-03	1.27E-02	1.26862	1.4E-05	-3.3E-06	1.19E-05
2.51E-06	6.51E-06	-3.97E-04	2.25E-03	1.56E-02	-2.64E-03	1.48E-02	1.475951	1.53E-05	-3.9E-06	1.25E-05
2.94E-06	6.87E-06	-3.97E-04	2.44E-03	1.82E-02	-3.35E-03	1.69E-02	1.690196	1.66E-05	-4.6E-06	1.31E-05
3.39E-06	7.27E-06	-3.97E-04	2.62E-03	2.10E-02	-4.16E-03	1.91E-02	1.910374	1.78E-05	-5.3E-06	1.37E-05
3.87E-06	7.69E-06	-3.97E-04	2.80E-03	2.40E-02	-5.08E-03	2.14E-02	2.135584	1.91E-05	-6E-06	1.41E-05
4.38E-06	8.14E-06	-3.97E-04	2.98E-03	2.72E-02	-6.11E-03	2.36E-02	2.364987	2.03E-05	-6.8E-06	1.45E-05
4.91E-06	8.61E-06	-3.97E-04	3.15E-03	3.05E-02	-7.26E-03	2.60E-02	2.597804	2.15E-05	-7.7E-06	1.49E-05
5.47E-06	9.1E-06	-3.97E-04	3.33E-03	3.39E-02	-8.52E-03	2.83E-02	2.833299	2.26E-05	-8.5E-06	1.52E-05
6.05E-06	9.62E-06	-3.97E-04	3.50E-03	3.75E-02	-9.91E-03	3.07E-02	3.07078	2.38E-05	-9.4E-06	1.55E-05
6.65E-06	1.02E-05	-3.97E-04	3.67E-03	4.13E-02	-1.14E-02	3.31E-02	3.30959	2.5E-05	-1E-05	1.57E-05
7.27E-06	1.07E-05	-3.97E-04	3.84E-03	4.51E-02	-1.31E-02	3.55E-02	3.549104	2.61E-05	-1.1E-05	1.59E-05
7.92E-06	1.13E-05	-3.97E-04	4.00E-03	4.91E-02	-1.49E-02	3.79E-02	3.788728	2.73E-05	-1.2E-05	1.6E-05



الشكل(12): نسبة التمدد الحراري الخطي لمجموعة العينات مقابل درجة الحرارة مقارنة بالبيانات المرجعية للتتغستين.

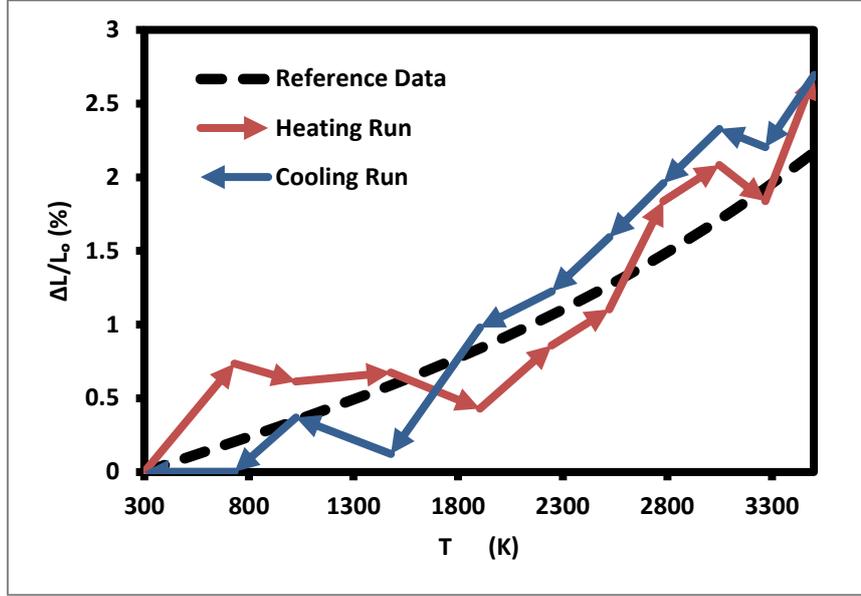


الشكل (13): معامل التمدد الحراري الخطي (CTE) α لمجموعة العينات مقابل درجة الحرارة مقارنة بالبيانات المرجعية للتغستن.

- يتم تصنيع التغستن وسبائكه بواسطة عملية ميتالورجيا المسحوق [14,15] وبالتالي فإن الخيوط المصنعة هشة للغاية بسبب خصائصها الكريستالية الضعيفة والخلع الشبكي. عندما يتم تسخين عينات الشعيرة لأول مرة فإنها تبدأ في إعادة التبلور وبالتالي يختلف سلوك التمدد الحراري عند التبريد ويظهر تباطؤ التمدد الحراري [16,17] كما هو موضح بالشكل (14). لتقليل هذه الظاهرة يجب تسخين جميع العينات مسبقا الى 1000K لمدة ساعة واحدة على الأقل قبل الاختبار للسماح باستقرار حجم الحبيبات المعدنية.

الجدول (4): قيم التمدد الحراري الخطي للعيينة G عند التبريد والتسخين.

T (K)	I(A)	البيانات المرجعية ($\Delta L/L_0$)%	التبريد ($\Delta L/L_0$)%	($\Delta D/D_0$)%	($\Delta D/D_0$)%	التسخين ($\Delta L/L_0$)%
300	0	0.001034	0	0	0	0
731.5282	0.25	0.205722	0	0	0	0.734844
1024.205	0.5	0.349399	0.367422	0.122474	0.122474	0.61237
1477.923	0.75	0.587982	0.122474	0.244948	0.367422	0.673607
1904.281	1	0.838676	0.979792	1.22474	0.306185	0.428659
2247.608	1.25	1.065773	1.22474	1.775873	0.520514	0.857318
2523.014	1.5	1.267826	1.592162	1.898347	0.489896	1.102266
2782.122	1.75	1.47655	1.959584	2.571953	0.673607	1.83711
3048.967	2	1.712667	2.327006	1.83711	0.979792	2.082058
3269.788	2.25	1.925929	2.204532	1.714636	1.653399	1.83711
3503.1	2.5	2.170388	2.694427	1.469688	2.106552	2.694427



الشكل(14): التمدد الحراري الخطي للعيينة G عند التسخين والتبريد.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- أثبت الليزر ذو الطول الموجي 532 nm أنه مصدر مناسب لإضاءة الخلفية، مما يسمح بالكشف عن التمدد والانحناء للأسلاك المحصورة تحت تأثير الاجهاد الحراري في درجات حرارة متوهجة. هذا يمكن أن يفسر صوت أزيز بعض المصابيح الخيطية [18,19].
- تمدد قطر الفتيل هو العامل الرئيسي الذي يمثل التمدد الخطي للعيينة.
- الخط البياني لقيم $\frac{\Delta D}{D_0}$ بدلالة درجة الحرارة جاءت مع توافق جيد مع الخط البياني للبيانات المرجعية.
- الخط البياني لعامل التمدد الخطي $\alpha(CTE)$ للتتغستن يأتي مع اتفاق جيد مع الخط البياني للبيانات المرجعية.
- يكشف سلوك التمدد للعينات بعض التباطؤ في التبريد وهي ظاهرة وردت من قبل العديدين.
- مكّنت هذه الطريقة من مراقبة الانحراف المتوقع لأسلاك التتغستن عند ارتفاع درجات حرارة متوهجة تصل الى 3500K.
- يكشف اهتزاز سلك التتغستن عن قدرة تقنية قياس اهتزاز الظل على اجراء قياسات دقيقة عن بعد في درجات حرارة مرتفعة مع معدات بسيطة نسبياً.
- أثبتت هذه التقنية أنها أداة فعالة للكشف عن الأمتزاز للعناصر المتوهجة ذات درجات الحرارة المرتفعة.

التوصيات:

نوصي بدراسة التمدد الخطي بتقنيات قياس تمدد حديثة، مثل تقنيات:

- Laser (Non-Interferometric)
- Laser Interferometers

References:

- [1] Tietz, T. E. and Wilson, J. W., Behavior and Properties Of Refractory Metals, Stanford University Press, Stanford, CA, p1–28. ISBN 978-0-8047-0162-4 (1965).
- [2] Bruno Hay, Olivier Beaumont, Uncertainty Assessment for Very High Temperature Thermal Diffusivity Measurements on Molybdenum, Tungsten and Isotropic Graphite. International Journal of Thermophysics (2022).
- [3] Jack A Wilson, Lee J Evitts, Predicting the thermal expansion of body-centred cubic (BCC) high entropy alloys in the Mo–Nb–Ta–Ti–W system, *J. Phys. Energy* **4** (2022).
- [4] Taylor, R. E. et al, Thermal Expansion of Solids, Materials, Park, OH: ASM Int., ISBN 0-87170-623-7 (1998).
- [5] Bernard Yates, Thermal Expansion, Plenum Press, New York (1972)
- [6] P. Castellini, M. Martarelli, E. P. Tomasini, Laser Doppler Vibrometry: Development of Advanced Solutions Answering to Technologys needs, Mechanical systems and Signal Processing **20**, 1265-1285, 2006.
- [7] J. Vass, R. Smid, R. B. Randall, P. Sovka, C. Cristalli, B. Torcianti, Avoidance of speckle noise in laser Vibrometry by the use of kurtosis ratio: Application to mechanical fault diagnostics, Mechanical Systems and Signal Processing **22**, 647-671, 2008.
- [8] White, G. K., and Minges, M. L., Thermophysical properties of some key solids, International Journal of Thermophysics, **15**, 6, 1333-1343 (1994).
- [9] H. S. Ayoub, Ashraf F. El-Sherif, H. H. Hassan, S. A. Khairy. A Laser Shadowgraphy Method for Studying Vibrations of Incandescent Solid. April 3-5, 2018.
- [10] White, G. K., and Minges, M. L., Thermophysical properties of some key solids: An update, International Journal of Thermophysics, **18**, 5, 1269-1327 (1997).
- [11] BERLEC, "The effect of impurities and heat treatment on the internal friction of tungsten at high temperatures", Metallurgical Transactions, **1**, 2677-2683, 1970.
- [12] Halas, S. and Durakiewicz, T., Temperature distribution along a metal filament heated in vacuum by DC current. Pergamon Press, Vacuum, **49**, 4, 331 - 336 (1998).
- [13] Wirtz, O. M., Thermal Shock Behavior of Different Tungsten Grades under Varying Conditions. Forschungszentrum, Jülich, ISBN 978-3-89336-842-6 (2013).
- [14] Lassner, E. and Schubert, W. F., Tungsten: Properties. Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds, Kluwer Academic Plenum Publishers, New York, NY, ISBN 0-306-45053-4 (1999).
- [15] Machlin, I., Begley, R. T., and Weiser, E. D., Eds. Refractory Metal Alloys: Metallurgy and Technology. Plenum Press (1968).
- [16] Demarquay, M. J., Nouvelle methode pour l'étude de la dilatation des corps aux températures élevées, C. R. Acad. Sci. **220**, 2, 81-83 (1945). (In French)
- [17] D. S. Neel, C. D. Pears and S. Oglesby, The Thermal Properties of Thirteen Solid Materials to 5000 F or Their Destruction Temperatures, U. S. Air Force Rept. WADD-TR-60-924, 216 (1962).
- [18] Wendt, G. R., Filament noises in incandescent lamps, The Journal of General Psychology, **27**, 2, 353-354 (1942).
- [19] Lutron Electronics Co., Inc., Coopersburg, U.S.A, Lamp Buzz with Solid State Incandescent Dimmers, Application Note #3, Rev. C, 360-476 (1995)