

The use of gamma rays in studying the homogeneity of the alloy (AL-Co-Ni) reinforced with chromium oxide

Laith Rabih¹, Raad A. Rasool², Ali K. Hussein³

^{1,2,3}Physics Department, College of Education for Pure Science, IRAQ

E-mail: ¹ laithrabih@uomosul.edu.iq, ^{2,*} dr.raadrasool@uomosul.edu.iq, ³ alikhatab@yahoo.com,

(Received April 07, 2021; Accepted July 16, 2021; Available online December 01, 2021)

DOI: [10.33899/edusj.2021.129868.1156](https://doi.org/10.33899/edusj.2021.129868.1156), © 2021, College of Education for Pure Science, University of Mosul.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract

This research deals with the preparation number of composite materials by casting the base alloy (Al-Co-Ni) by adding chromium oxide (Cr₂O₃) as reinforcement material, by weight ratios of (5, 10, 15 wt%) for the base alloy, with heat treatment of the prepared alloys. The basic alloys and composite materials were prepared by using solution casting method and manual mixing method to disperse reinforcement grains in the base alloy floor and with pressure of 5 ton in purpose of forming. The materials were melted and poured into molds and suddenly cooled in cold water, after the molten samples were frozen. The attenuation factor of gamma rays was founded the prepared alloys and their homogeneity was examined by shining a narrow beam of single energy gamma rays emitted from the radiating source (¹³⁷Cs) with different energies (511, 662, 1173, 1284, 1333) keV respectively, gamma ray system (UCS-20) was being used which bounded to NaI(Tl) scintillation detector. The homogeneity of base alloy and composite material was determined by studying the contrast of gamma ray intensity, the linear attenuation coefficient at seven different locations at any samples and the percentage standard deviation. The results showed that the highest value of the linear attenuation coefficient was 0.252 mm⁻¹ for sample [5%Cr₂O₃+Al+Co+Ni] with the energy (511 keV) and that the lowest value for the ratio of linear attenuation coefficient was 0.062 mm⁻¹ at the energy of sample [15%Cr₂O₃+Al+Co+Ni] with the energy (1333 keV) indicating that the homogeneity of the sample [15%Cr₂O₃+Al+Co+Ni] at energy (1333 KeV).

Keywords: Compounds, homogeneity, gamma rays, chromium oxide, alloy [Cr₂O₃+Al+Co+Ni]

استخدام أشعة كاما في دراسة تجانس السبيكة (AL-Co-Ni) المقواة بأوكسيد الكروم

لايث رايح محمد .¹ رعد احمد رسول،² علي خطاب حسين

^{1,2,3}قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، العراق

الخلاصة

يتناول البحث تحضير عدد من المواد المتراكبة بطريقة السباكة للسبيكة الأساس (Al-Co-Ni) بإضافة أوكسيد الكروم (Cr₂O₃) كمادة تدعيم وبنسب وزنية (5, 10, 15 wt%) للسبيكة الأساس، مع إجراء المعالجة الحرارية

للسبائك المحضرة. حُضرت السبائك الأساسية والمواد المترابطة معها باستخدام طريقة السباكة المحلولية وطريقة الخلط اليدوي لتفريق حبيبات التسليح في أرضية سبيكة القاعدة وبضغط 5ton لغرض التشكيل، تم صهر المواد وصبها في قوالب وتبريدها بشكل مفاجئ في الماء البارد، بعد تجميد العينات المصهورة.

تم إيجاد معامل التوهين لأشعة غاما للسبائك المحضرة وفحص درجة تجانسها من خلال تسليط حزمة ضيقة أحادية الطاقة من أشعة غاما المنبعثة من المصدر المشع (137Cs) وبطاقات مختلفة KeV (511,662,1173,1284,1333) على التوالي، إذ تم إجراء الفحص باستعمال منظومة أشعة غاما (UCS-) المرتبطة بالكاشف ألوميضي NaI(Tl). حددت درجة تجانس السبيكة الأساس والمواد المترابطة من خلال دراسة تباين شدة أشعة غاما ومعامل التوهين الخطي في سبع مواقع مختلفة من المادة والنسبة المئوية للانحراف المعياري. بينت النتائج أن أعلى قيمة لمعدل معامل التوهين الخطي كانت 0.252mm^{-1} للعينة [5%Cr₂O₃+Al+Co+Ni] ذات النسبة الوزنية 5w% عند الطاقة (511KeV) وأن أقل قيمة لمعدل معامل التوهين الخطي كانت 0.062mm^{-1} عند الطاقة (1333 KeV) للعينة [15%Cr₂O₃+Al+Co+Ni]، دلالة على ان التجانس للعينة [15%Cr₂O₃+Al+Co+Ni] عند الطاقة (1333 KeV).

الكلمات الدالة: المواد المترابطة، التجانس، اشعة كاما، اوكسيد الكروم، السبيكة [Cr₂O₃+Al+Co+Ni]

المقدمة

لقد أدى التطور الصناعي والمدني الى الحاجة لإيجاد مواد ذات مواصفات نوعية عالية من حيث الكلفة وخفة الوزن وخواص عامة بحيث يمكن تطبيقها في الصناعات الحديثة لتكون بدائل للسبائك المعدنية الإعتيادية، إذ لوحظ في مجال علم المواد وجود إختلاف في خواص تلك المواد من حيث تحملها لدرجات الحرارة والإجهادات الخارجية والمتانة والصلادة والليونة، وهي خصائص مرغوبة في التطبيقات الصناعية [1,2].

ادى الإهتمام الكبير في إنتاج المواد المترابطة من مواد معدنية وسيراميكية، والتي لاقت إهتماماً واسعاً في الحصول على مواد ذات متانة عالية وخفيفة الوزن ولها القابلية على تحمل درجات الحرارة العالية وهي بإختصار تربط ما بين المادة الأساس Matrix ومادة التقوية Reinforcement material [3].

تتضمن السباكة الخلائط الميكانيكية تصنيع منتجات من مساحيق المواد الأولية بدون عمليات صهر وإدماجها معاً وتقويتها بعمليات التلبيد الحراري والتي تعد من أهم التقانات المتبعة في تصنيع المواد المترابطة [4].

هناك العديد من المواد يمكن استعمالها دروعاً واقية من الإشعاع بسبب قدرتها على توهين الإشعاع وإمتصاصه. تُعد هذه الوسيلة من أهم وسائل الحماية من الإشعاع لما توفره من سلامة مطلقة للعاملين في حقول الإشعاع. يتوقف نوع مادة الدرع وسمكه على نوع الإشعاعات وطاقتها والنشاط الإشعاعي للمصدر وعلى معدل الجرعة المحددة خارج

هذا الدرء. تعتمد عملية توهين الأشعة الكهرومغناطيسية على الشكل الهندسي للحزمة الإشعاعية من ناحية كونها منتظمة أو غير منتظمة هندسياً. إن لمعامل توهين أشعة غاما الخطي أهمية كبيرة في دراسة تأثير هذه الأشعة على المادة وحسابات الجرعة الإشعاعية وتحقيق المستوى الآمن للتعرض الإشعاعي ومنع الخطر الناتج من التعرض للإشعاع من خلال تصميم الدرء المناسبة [5,6].

إن إضافة المواد المترابطة لبعض أنواع السبائك تُظهر تعزيزاً واضحاً في الخصائص الميكانيكية والبنية البلورية [7]. يهدف البحث الحالي إلى تصنيع السبيكة الأساس (Al-Zn-Mg) وإضافة دقائق من أكسيد الكروم (Cr_2O_3) وبنسب وزنية مختلفة (5,10,15wt%) مع إمكانية إستخدامها كسبائك واقية للأشعة ذات الطاقات العالية مثل أشعة غاما، حيث تم دراسة هذه السبائك من خلال تسليط أشعة غاما المنبعثة من المصدر المشع (^{137}Cs) وبطاقات مختلفة (511,662,1173,1284,1333KeV) على التوالي، إذ تم إجراء الفحص باستعمال منظومة أشعة غاما (UCS-20) المرتبطة بالكاشف الوميضي (NaI(Tl)).

الجانب العملي

1. تحضير السبيكة الأساس

حضرت السبيكة الأساس (Al- 4%CO- 1%Ni) بصهر قطعة من الألمنيوم ذات نقاوة (99%) وبكتلة معلومة في داخل بودقة من معدن الصلب (steel) داخل فرن كهربائي، ولضمان إتمام عملية الإنصهار بالكامل أجريت عملية الصهر في درجة حرارة ($850^{\circ}C$)، بعد التأكد من حدوث الإنصهار التام غمرت داخل المنصهر دقائق من الكوبالت النقي بنسبة وزنية 4wt%، وتقادياً لحدوث عملية أكسدة تعيق عملية الصهر فقد كانت عملية الغمر سريعة جداً مع التحريك المستمر للمنصهر بقضيب من الصلب، ثم أضيفت دقائق من النيكل النقي بنسب وزنية (1wt%) محفوظة داخل دقائق من الألمنيوم لمنع إحتراقها عند ملامستها المادة المنصهرة، أُعيدت البودقة إلى الفرن بعد الإنتهاء من عملية الإضافة تلك، ولتجانس عناصر السبك بشكل تام تكرر مزج المنصهر (3 مرات)، وللمحافظة على إستمرار سيولة المنصهر أُعيدت البودقة للفرن بعد كل عملية مزج، ثم سُكِبَت محتويات البودقة في قالب إسطواني الشكل من الحديد الصلب قطره (1.5cm) وإرتقاعه (13cm)، ولمنع حدوث تبريد مفاجيء للمنصهر فقد سُخِن القالب مسبقاً إلى درجة حرارة ($250^{\circ}C$)، وبعد انجماد المنصهر كاملاً تم تبريد العينة بالماء البارد لمنع زيادة مسافة أذرع الشجيرات [8]. ثم تخرج العينة المصبوبة من القالب للحصول على السبيكة الأساس.

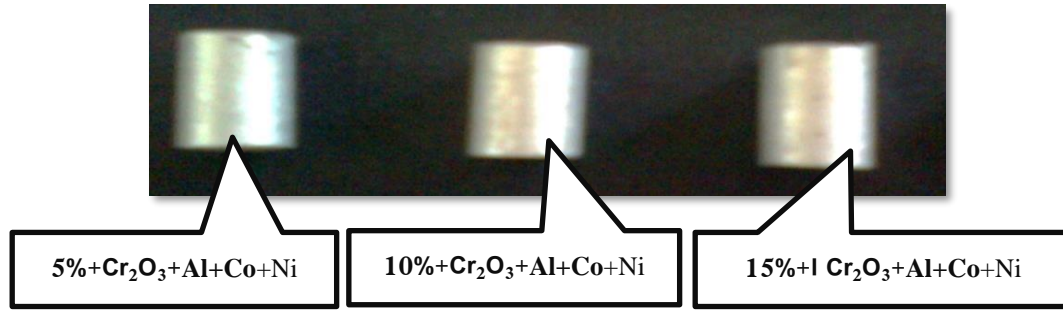
2. تحضير المادة المترابطة

حضرت المادة المترابطة بالسباكة المعدنية، إذ قطعت السبيكة الأساس قطعاً صغيرة لتحديد الوزن المطلوب منها استناداً إلى الكسر الوزني لمادة التقوية، وضعت القطع الموزونة داخل بودقة ووضعت داخل الفرن الكهربائي الذي

نُظمت درجة حرارته إلى (850°C) بعد التأكد من إنصهار السبيكة بشكل تام، أُضيفت دقائق أكسيد الكروم وبنسب وزنية مقدارها (5, 10, 15 wt%) مع التسخين المسبق لتلك الدقائق قبل إضافتها ولضمان توزيع الدقائق داخل المنصهر أُستعمل الخلط اليدوي لها للحصول على المزيد من التجانس في التوزيع للدقائق داخل السبيكة كررت عملية المزج من (2-3) مرات، وفي كل مرة تعاد البودقة للفرن لضمان إستمرار سيولة المنصهر، تم صب المنصهر في القالب المعدني الذي سخن إلى درجة حرارة (250°C)، وبعد إنجمادها بُردت العينة المصبوبة بالماء فجأةً .

3. المعاملة الحرارية

بعد تقطيع العينات بالأبعاد القياسية للسبيكة الاساس والمترابطة اجريت المعاملة الحرارية المحلولية للعينات في درجة حرارة ($480\pm 5^{\circ}\text{C}$) لمدة (1h) أعقبها التقسية بالماء ثم وضعت في الفرن بدرجة حرارة (150°C) ولمدة (2 h). الشكل 1. يمثل صورة للعينات المستخدمة.



الشكل 1. العينات المستخدمة في فحص التجانس

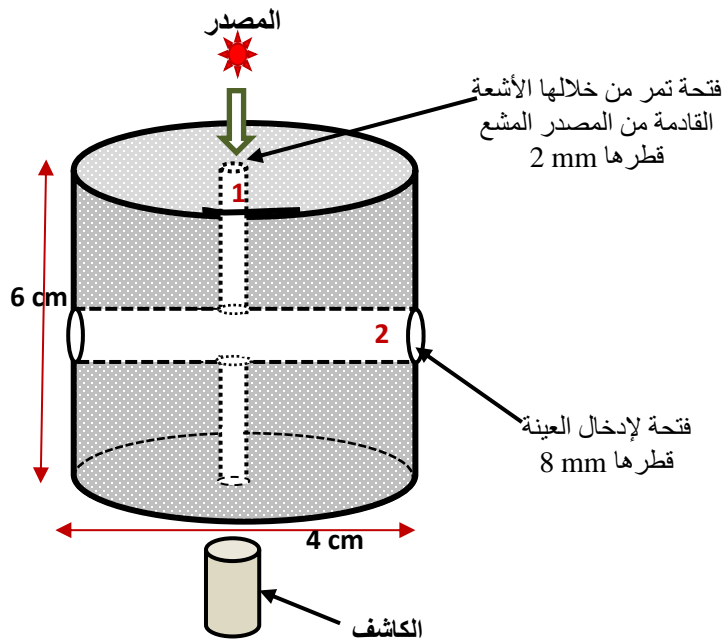
4. منظومة القياس

تم إيجاد معامل توهين أشعة غاما للسبائك أعلاه وفحص درجة تجانسها من خلال تسليط أشعة غاما المنبعثة من المصدر المشع (137Cs) وبطاقات مختلفة ($511,662,1173,1284,1333\text{keV}$) على التوالي، إذ اجري الفحص باستعمال منظومة أشعة غاما UCS-20 المرتبطة بالكاشف الوميضي NaI(Tl) ذي الأبعاد $2.5\text{cm}\times 3.8\text{cm}$ والموضحة في الشكل 2. تتكون هذه المنظومة من مضخم ابتدائي ومضخم رئيس ومجهز للفولتية ومحلل متعدد القنوات وترتبط هذه المنظومة بجهاز حاسوب لغرض تشغيلها وقراءة قياساتها وتحليل النتائج.



الشكل 2. المنظومة الإلكترونية الخاصة لقياس تجانس العينات

أستعملت حزمة ضيقة من أشعة غاما وذلك باستخدام مسدد من الرصاص إسطواني الشكل إرتفاعه 6cm وقطره 4cm ويحتوي على فتحة قطرها 2mm (المؤشرة في الموقع 1) تمر من خلالها الأشعة القادمة من المصدر المشع. يحتوي المسدد على فتحة ضيقة قطرها 8mm (المؤشرة في الموقع 2) توضع بداخلها العينة المراد قياس معامل توهينها ونسبة تجانسها كما هو موضح ذلك في الشكل (3).



الشكل 3. مخطط للمسدد المصنوع من الرصاص والذي يبين طريقة اختراق اشعة

الحسابات

1. عامل توهين الخطي لأشعة غاما

عند سقوط حزمة متوازية من إشعاعات غاما على المادة تتفاعل مع ذرات المادة بإحدى التفاعلات الثلاثة (التأثير الكهروضوئي أو تأثير كومبتن أو إنتاج الأزواج) فإذا كانت شدة الإشعاعات (عدد الفوتونات) الساقطة على المادة I_0 وتكون شدتها I بعد إختراق سُمك معين من المادة مقداره x هي [9]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots \dots \dots (1)$$

اذ إن μ : هو عبارة عن معامل التوهين الخطي لأشعة غاما.

2. درجة التجانس المادة

يمكن تحديد درجة تجانس السبيكة الأساس والمواد المترابطة من خلال دراسة تباين شدة أشعة غاما ومعامل التوهين الخطي والانحراف المعياري.

3. تباين الشدة

يمكن معرفة تجانس المادة من خلال مقارنة شدة أشعة غاما I النافذة من المواقع المحددة في المادة مع معدل قيمها I' ولجميع المواقع .

يمكن تحديد النسبة المئوية لتجانس المادة (Δ_I %) باستعمال العلاقة التالية [11] :

$$\dots \dots \dots (2) \Delta_I (\%) = \frac{I' - I}{I'} \times 100\%$$

4. تباين معامل التوهين الخطي

يتم حساب معامل التوهين الخطي μ باستعمال العلاقة (1).

ويمكن معرفة تجانس المادة من خلال مقارنة قيم μ في المواقع المحددة في المادة مع معدل قيمها μ' . النسبة المئوية لتجانس المادة (Δ_μ %) هي [11]:

$$\Delta_\mu (\%) = \frac{\mu' - \mu}{\mu'} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (3)$$

5. الانحراف المعياري

يتم حساب الانحراف المعياري لمعامل التوهين $\sigma(\mu)$ باستعمال العلاقة الآتية [11]:

$$\sigma(\mu) = [\Delta (\mu_i - \mu')^2 / (N-1)]^{0.5} \quad \dots \dots \dots (4) \quad \Delta$$

إذ إن:

μ_i - معامل التوهين الخطي عند الموقع i μ' - معدل معامل التوهين الخطي N - عدد المواقع في المادة
يمكن استعمال المعادلة (4) لحساب مقدار الانحراف المعياري لشدة أشعة غاما النافذة $\sigma(I)$. أما النسبة المئوية للانحراف المعياري لكل من معامل التوهين الخطي وشدة أشعة غاما النافذة فتحسب من خلال قسمة الانحراف

المعياري على معدل القيم $(\sigma / Ave) \times 100$ فكلما كانت قيم $\Delta_I(\%)$ و $\Delta_\mu(\%)$ و $(\sigma / Ave) \times 100$ صغيرة فهذا يعني أن المادة متجانسة (التباين قليل) [10].

النتائج والمناقشة

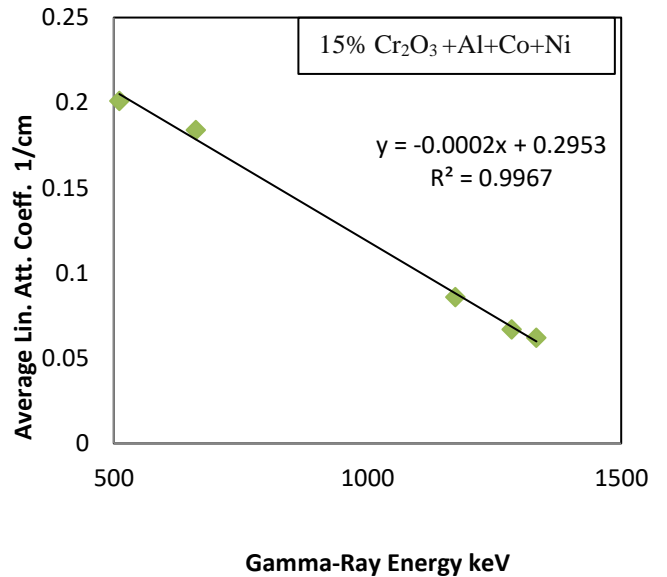
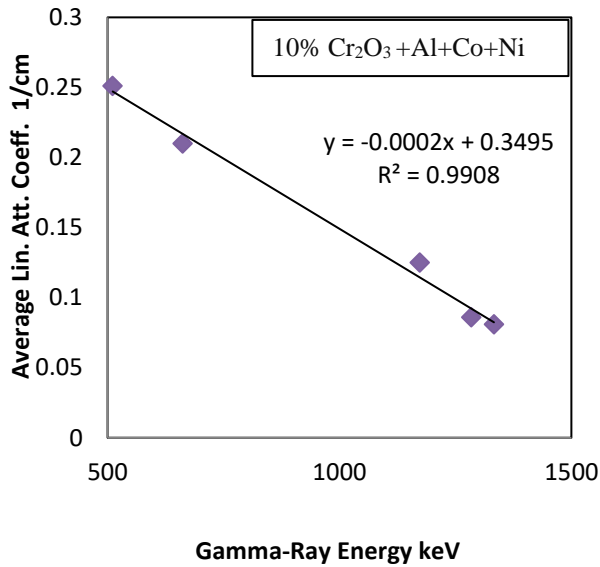
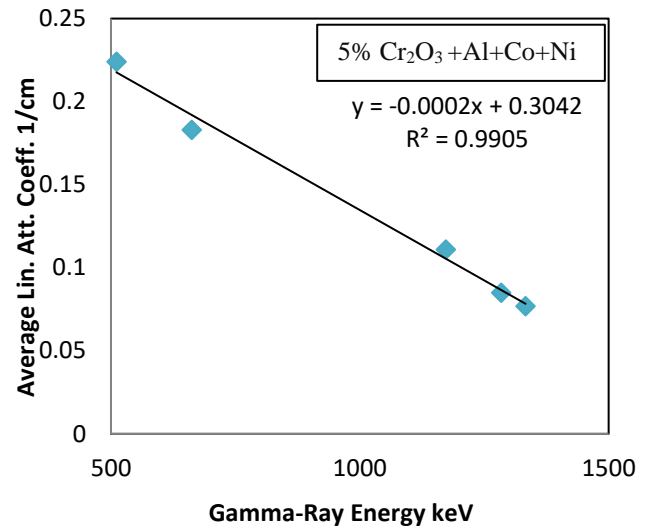
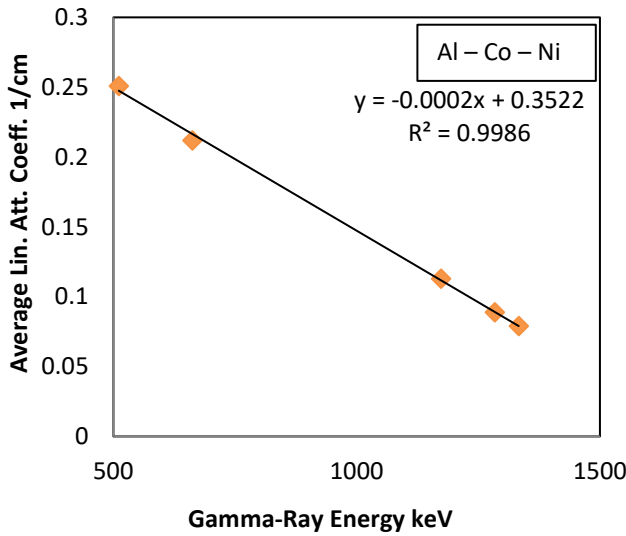
يوضح الجدول (1) أن معدل معامل التوهين الخطي يقل مع زيادة الطاقة وأن أعلى معدل لمعامل التوهين كان عند الطاقة 511 keV لجميع العينات حيث يتراوح بين 0.251 cm^{-1} و 0.201 cm^{-1} وأقل معدل كان عند الطاقة (1333 KeV) كذلك لجميع العينات ويتراوح بين $(0.079 \text{ cm}^{-1}$ و $0.062 \text{ cm}^{-1})$ ، وبذلك يلاحظ أن قيم متوسط معامل التوهين الخطي كانت واضحة لكل عينة عند الطاقات الواطئة وتتقارب هذه القيم مع بعضها مع زيادة الطاقة وتكون أكثر تقارباً عند الطاقات العالية.

الجدول (1): نتائج الدراسة الحالية لمعدل معامل التوهين الخطي والانحراف المعياري والنسبة المئوية للانحراف المعياري ولطاقات مختلفة من أشعة غاما.

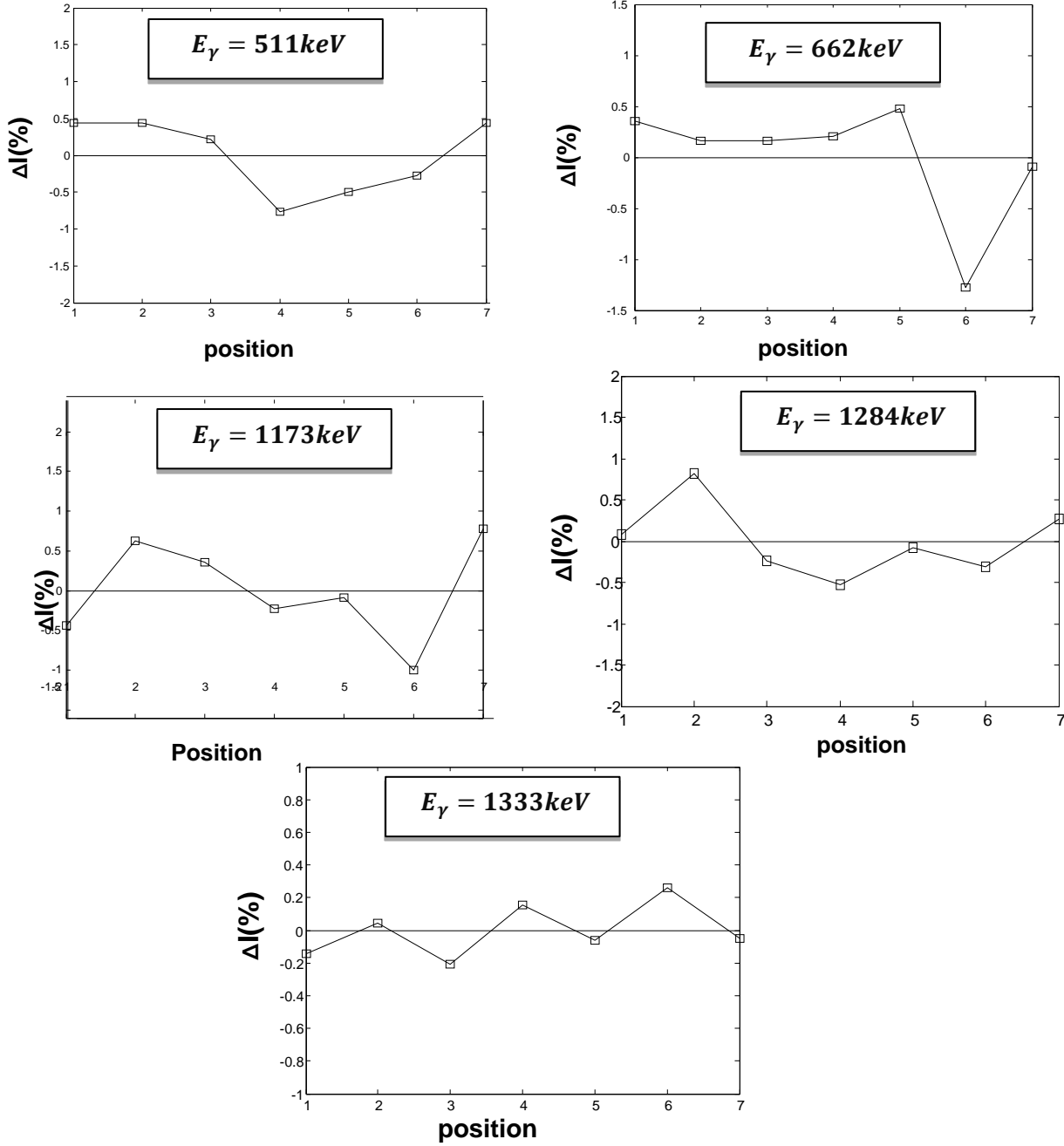
Sample	$\mu \pm \sigma \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ $((\sigma / \mu) \times 100 \text{ (\%)})$				
	511 keV	662 keV	1173 keV	1284 keV	1333 keV
Al – Co – Ni	0.251 ± 0.008 (3.3)	0.212 ± 0.002 (1.1)	0.113 ± 0.006 (5.2)	0.089 ± 0.004 (4.5)	0.079 ± 0.006 (7.3)
5% Cr ₂ O ₃ + Al + Co + Ni	0.252 ± 0.005 (2.4)	0.183 ± 0.005 (2.9)	0.111 ± 0.004 (3.2)	0.085 ± 0.002 (2.3)	0.077 ± 0.006 (7.8)
10% Cr ₂ O ₃ + Al + Co + Ni	0.251 ± 0.006 (2.4)	0.210 ± 0.004 (2.0)	0.125 ± 0.004 (3.2)	0.086 ± 0.004 (4.4)	0.081 ± 0.004 (5.1)
15% Cr ₂ O ₃ + Al + Co + Ni	0.201 ± 0.008 (4.0)	0.184 ± 0.004 (2.2)	0.086 ± 0.004 (4.8)	0.062 ± 0.004 (6.4)	0.062 ± 0.003 (4.8)

رسمت العلاقة بين معدل معامل التوهين الخطي والطاقة لكل عينة وتبين أن العلاقة بينهما كانت خطية عكسية وأن مقدار الميل ودرجة الملائمة بحدود -0.002 و $R^2 = 0.99$ لجميع العينات كما هو موضح في الشكل (4). يمكن تحديد درجة تجانس السبيكة الأساس وتلك المدعمة بنسب مختلفة من مسحوق الكروم وذلك من خلال دراسة تباين شدة أشعة غاما ومعامل التوهين الخطي لها، والشكل (5) يوضح نموذج لإحدى العينات وهي (10% Cr₂O₃)

(+Al+ Co+Ni) والتي كانت الأكثر تجانساً بين العينات الأخرى، ويتضح أن قيم $\Delta_I(\%)$ كانت متقاربة وتراوح ما بين 0.046% و 1.27% في جميع الطاقات، كما يلاحظ أن القيم الموجبة لـ $\Delta_I(\%)$ يقابلها قيم سالبة لـ $\Delta\mu(\%)$ ، أي عند نقصان معامل التوهين الخطي يقابله زيادة في شدة الأشعة النافذة عند نفس المواقع والعكس صحيح أيضاً. تكون المواد أكثر تجانساً عندما كانت قيم $\Delta\mu(\%)$ و $\Delta_I(\%)$ تقترب من الصفر، ويلاحظ من خلال الشكل 4 أن قيم $\Delta\mu(\%)$ هي أعلى دائماً من قيم $\Delta_I(\%)$ عند نفس الموقع وهذا يعني أن قياس التجانس تصبح أكثر وضوحاً من خلال قيم $\Delta\mu(\%)$ ، وكذلك وجد أن مثل هذه السلوكية تكررت في السبائك الأخرى قيد الدراسة.

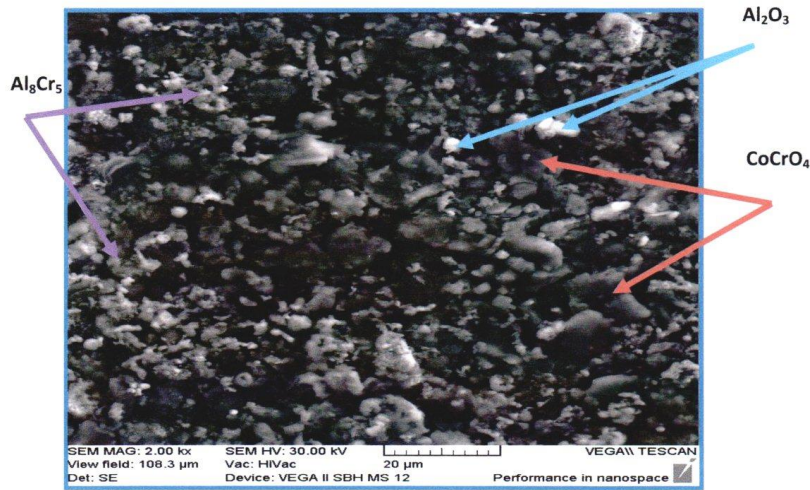
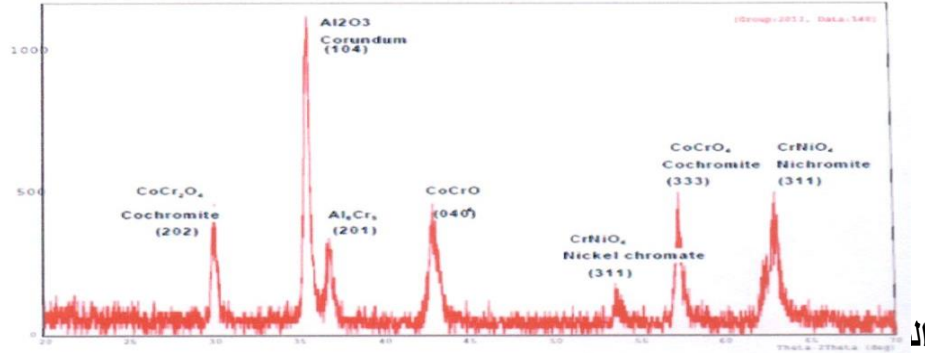


الشكل 4. العلاقة الخطية بين الطاقة ومعدل معامل التوهين الخطي للعينات



الشكل 5. يوضح النسبة المئوية للتباين في الشدة ومعامل التوهين مع الموقع للمادة المترابطة قبل المعاملة الحرارية ولطاقات مختلفة من أشعة غاما (10wt% Cr_2O_3 +Al+ Co+Ni)

يبين كل من الشكل 6 والشكل 7 فحص الأشعة السينية XRD للعينة [5wt%Cr₂O₃+Al+Co+Ni] والفحص المجهر SEM وهذا تأكيد آخر على التجانس المنتظم للعينة.



الشكل 6. التصوير المجهر SEM للعينة [5wt% Cr₂O₃ +Al+ Co+Ni]

الإستنتاجات

- 1- يمكن تحديد درجة تجانس السبيكة الأساس والمواد المترابطة من خلال دراسة تباين شدة أشعة غاما ومعامل التوهين الخطي والانحراف المعياري.
- 2- انخفضت قيم النسبة المئوية للتباين في الشدة ومعامل التوهين الخطي والانحراف المعياري للسبيكة الأساس والمادة المترابطة (Cr₂O₃ +Al+ Co+Ni) عند الطاقات الواطئة مما يدل على أن المادة أصبحت أكثر تجانساً ولم يكن ذلك في الطاقات العالية للعينة بعد المعاملة الحرارية.

3- أعطت قيم معدل معامل التوهين الخطي تبايناً واضحاً في الطاقات العالية في حين كانت القيم في الطاقات الواطئة متقاربة جداً.

4- بينت النتائج أن معدل معامل التوهين الخطي يتناسب عكسياً مع الطاقة وأن درجة الملائمة للعينات جميعها متساوية (0.99).

5- كانت النسبة المئوية للانحراف المعياري لمعامل التوهين الخطي للسبيكة الأساس والمواد المترابطة منخفضة عند الطاقات الواطئة (511 KeV) و(662 KeV) وأقل نسبة عند الطاقة (662 KeV) لمعظم العينات وكان ذلك واضحاً حين أخذ المعدل لكل طاقة وللعينات جميعها وتكون اعلى القيم عند الطاقات العالية. أن أفضل دراسة للتجانس تكون عند الطاقة (662 KeV).

شكر وتقدير

نود أن نعبر عن شكرنا وتقديرنا لمختبر بحوث الاغشية الرقيقة في قسم الفيزياء بكلية التربية للعلوم الصرفة في جامعة الموصل على توفير متطلبات البحث والتسهيلات المفيدة في مجال العمل.

المصادر

- [1] M.M. Schwartz, "Composite Materials Hand Book" McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [2] R.J. Bruls, "The Thermal Conductivity of Magnetism Silicon Nitride (MgSiN₂) Ceramic and Related Materials", PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 2000.
- [3] A.C.Chaklader and K.R. Linklander and K.R. Linger, "Ceramic Metal Composites Using Metal Coated Aluminum Powder", Elsevier Composites, Vol.7, Issues 4, PP.239-243. 1976.
- [4] S.B. Yousoff, "Effect of Milling Time on Mechanical and Physical Behavior of Al MMC Reinforced with Al₂O₃", Faculty of Mechanical Engineering, University Malaysia Pahang, 2008.
- [5] A.M. Al-Sariyah ,A. M. Farouk, A. B. Mohammed , "Principles of Ionizing Radiation and Prevention". Kingdom of Saudi Arabia, King Saud University, Standing Committee for the Prevention of Radiation, 2007.
- [6] M.M. Mohamed , "Radiological Protection Principles and Applications", Amman, Jordan, 2005.
- [7] K.Tibor and B. Róbert, "Aluminium Alloys Theory and Applications", 1^{ed.}, Printed in India, Published by InTech. 2011.
- [8] W.D. Callistre, "Material Science and Engineering", 5th ed. U,S.A. Lilley J." Nuclear physics principles and application". Wiley, University of Manchester, New York. 2002
- [9] S.J.Stankovic,R.D. Ilic. K. Jankovic, D. Bojovic and D.B. Loncar, "Gamma radiation absorption characteristics of concrete with components of different type metals", Acta Physica Polonica A Vol. 117, No. 5, 812-816. 2010
- [10] L. Rabih, "The effect of DC-sputtering parameters and Al doping on conductivity and transparency of TiO₂ thin films", doctoral dissertation. Gadjah Mada University, Yogyakarta, Indonesia, 2013.
- [11] A.K. Mheemeed, I.H.Hasan, F.M. Al-Jomaily, "Gamma-ray absorption using rubber-lead mixtures as radiation protection shields". J Radioanal Nucl Chem., Vol. 291, No. 3,653–659. 2012