مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد الخامس والعشرون - المجلد الأول - علوم الفيزياء - آذار 2025 م
doi.org/10.52866/esj.2025.01.25.07

دراسة تأثير تغير درجة حرارة التلبيد على بعض الخصائص التركيبية والميكانيكية لسبيكة (Ni-47Ti-3Cu) المحضرة بتقانة المساحيق

مصطفى خالد نصيف ، رشا حامد احمد
قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة تكريت، العراق
mi230044pep@st.tu.edu.iq

مستخلص:

يهدف هذا البحث الى تحضير سبيكة (**Ni-47Ti-3Cu**) بتقنية المساحيق، ودراسة الخصائص التركيبة والميكانيكية للسبيكة قبل وبعد تلبيدها ضمن درجات حرارة مختلفة. إذ تم خلط مساحيق كل من النيكل، التيتانيوم والنحاس والتي كانت نقاوتهم على التوالي ٪ (99.99 ، 99.95،99.98) مع بعضها البعض، وصولا الى التجانس فيما بينها، ومن ثم تمت عملية الكبس بضغط (5Ton) ولمدة (2min) ، والتي افضت الى الحصول على ست عينات متماسكة، بعدها جرت عملية التلبيد عند درجات الحرارة C° (1050,950,850,750,650) ولمدة (1hr). تمت دراسة الخصائص التركيبية من خلال فحص حيود الاشعة السينية (XRD) وفحص المجهر الضوئي (O.M) ودراسة الخصائص الميكانيكية من خلال فحص صلادة فيكرز. بينت نتائج فحوصات (XRD)، ظهور طور جديد مختلف في تركيبه البلوري عن العناصر الداخلة في تحضير النماذج وهو الطور (TiCuNi2)، ذا النظام البلوري الثلاثي الميل (rhombohedral)، اما الفحص المجهري بالمجهر الضوئي (O.M) فقد اعطى معلومات عن معدل الحجم الحبيبي ونسبة المسامات في السبيكة، بينما بينت نتائج فحص صلادة فيكرز تحسن صلادة السبيكة مع ارتفاع درجة حرارة التلبيد.

الكلمات المفتاحية: السبائك، ميتالورجيا المساحيق، التلبيد، الخصائص الميكانيكية، الصلادة.

Study of the effect of changing sintering temperature on some structural and mechanical properties of (Ni-47Ti-3Cu) alloy prepared by powder technology

Abstract :

This research aims to prepare an (Ni-47Ti-3Cu) alloy using powder metallurgy and to study the structural and mechanical properties of the alloy before and after sintering at different temperatures. Nickel, titanium, and copper powders, with purities of (99.99%, 99.98%, and 99.95% respectively), were mixed together to achieve homogeneity. The mixture was then pressed at a pressure of (5 tons) for (2 minutes) to obtain cohesive samples. The samples were then sintered at temperatures of (650°C, 750°C, 850°C, 950°C, 1050°C) for (1hour). The structural properties were studied using X-ray diffraction (XRD) and optical microscopy (O.M), while the mechanical properties were examined using the Vickers hardness test. The XRD results revealed the formation of a new phase with a different crystal structure from the elements used in the sample preparation. This new phase is (TiCuNi2) with a rhombohedral crystal system. The optical microscopy examination provided information about the average grain size and porosity of the alloy. The Vickers hardness test results indicated an improvement in the hardness of the alloy with an increase in the sintering temperature.

Keywords: Alloys, Powder Metallurgy, Sintering, Mechanical Properties, Hardness.

المقدمة

تتطلب التطبيقات الهندسية في كثير من الأحيان الى مواد ذات خصائص تركيبية وفيزيائية وميكانيكية قد لا تمتلكها العناصر النقية ولذلك فإن خليط من عناصر ذات الخصائص متباينة قد يعطيها خصائص مناسبة للعمل في كثير من تلك التطبيقات الهندسية. قد يكون هذا الخليط عبارة عن سبيكة، والتي هي خليط يتكون من اتحاد كلي أو جزئي بين عنصرين أو أكثر من العناصر الكيميائية التي لها خصائص تختلف عن المعدن الأساسي الذي يدخل في تكونيها [1] . يعد النيكل من المعادن ذات الخواص الميكانيكية الجيدة وله مقاومة عالية للتآكل. يتمتع النيكل ايضاً بالقدرة على الاندماج بسهولة مع العديد من المعادن، لذلك يتم تضمينه في العديد من السبائك ومن اهمها سبيكة (Ni-TI) وسبيكة المونيل (Ni-Cu)[2]. اما التيتانيوم فيمتاز بخصائص مشابهة لخصائص لفولاذ فهو يتمتع بمقاومة ميكانيكية عالية ومقاومة كبيرة للتآكل، إلا أنه يمتاز عن الفولاذ بكونه خفيف الوزن [4,3]، ويُستخدم في العديد من السبائك إلى جانب الحديد والألومنيوم والنيكل وغيرها من العناصر لإنتاج سبائك قوية وخفيفة [5]. أما النحاس فيتميز بأنه معدن يمكن تشكيله بسهولة الى جانب موصليته الكهربائية العالية وله مجموعة واسعة من السبائك أشهرها سبائك البراص (Brasses) والبرونز (Bronzes) بالإضافة إلى سبيكة النحاس والنيكل (Cupronickels) إذ يضاف النحاس للنيكل لتحسين الخواص الميكانيكية وتخفيض ثمن السبائك [6] هناك طرائق متعددة لتحضير السبائك من أهمها هي تقنية المساحيق، والتي تُكمن أهميتها في القدرة على إنشاء هياكل مجهرية متنوعة وإنتاج مواد تتمتع بكافة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية المميزة مع إمكانية تصنيع المنتجات من أي معدن تقريبًا، بما في ذلك السبائك التي لا يمكن تصنيعها باستخدام طرائق التعدين التقليدية [7]. تُعد عملية التلبيد إحدى أهم المعالجات الحرارية للمنتجات المكبوسة على البارد والتي تتلخص برفع درجة حرارة المنتج الى درجة حرارة تبلغ ٪(90-70) من درجة حرارة انصهار المعدن لغرض تقليل المسامية والحصول على جسم كثيف وصلد، إذ أن المنتج المكبوس على البارد يتمتع بمقاومة خضراء ضعيفة، ولهذا السبب هناك حاجة إليه لتحسين خصائصه الميكانيكية والفيزيائية من خلال عملية التلبيد، والتي هي عملية لا إرجاعيه[9,8].

الجزء العملي:

تم تحضير مساحيق العناصر المستخدمة في انتاج السبيكة (Ni-47Ti-3Cu)، كلاً من النيكل (Ni) والنحاس بالنقاوة ٪99.95 من انتاج شركة (Buchs Fluka AG الألمانية)، ومسحوق والتيتانيوم بنقاوة ٪99.99 من انتاج شركة Sky Spring Nano-materials) الامريكية). ثم تم وزن تلك المساحيق باستخدام ميزان حساس من نوع (sartorius) ذو المنشأ الياباني وبدقة (0.0001) وذلك حسب النسب الاتية: (Ni+47%Ti+3%Cu 50%)، ومن ثم تم خلطها يدوياً لمدة نصف ساعة باستخدام هاون من العقيق. بعد الانتهاء من عملية الخلط، تمت عملية الكبس بتقنية الكبس احادي الاتجاه، باستخدام مكبس هيدروليكي احادي الاتجاه من نوع (HONMAKSAN تركي المنشأ) وبضغط كبس مقداره (5Ton) ولمدة (2min) لتجنب الارجاع المرن.

تم انتاج ست عينات من السبيكة. أعقبَ ذلك، عملية التلبيد على هذه العينات الست باستخدام فرن كهربائي نوع (CARBOLITE) الماني المنشأ عند درجات الحرارة C° (1050,950,850,750,650) ولمدة (1hr). ولمعرفة الخصائص التركيبية تم فحص العينات بتقنية حيود الاشعة السينية (XRD) باستخدام جهاز نوع (PANALYTICAL'SAERIS امريكي المنشأ) واستخدام بطاقات المركز الدولي للحيود (ICDD)، كذلك تم استخدام الفحص المجهري باستخدام المجهر الضوئي نوع (OPTIKA إيطالي المنشأ) لمعرفة الحجم الحبيبي ونسبة المسامية الظاهرية، بينما تم قياس الخصائص الميكانيكية (الصلادة) عن طريق جهاز صلادة فيكرز (نوع EBP INSTRUMENTS صيني المنشأ) وذلك بتسليط ضغط مقداره (5Ton) ولمدة (2min).

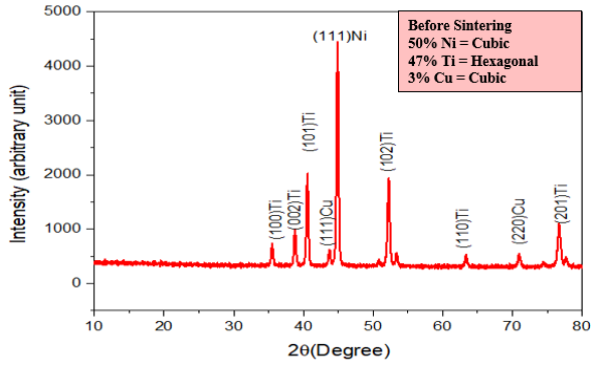
النتائج والمناقشة:

أولاً: الخصائص التركيبية

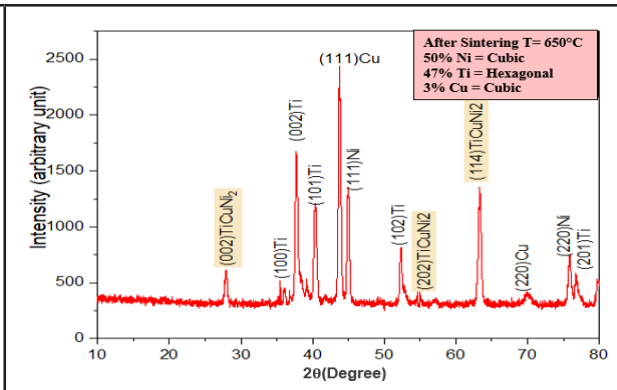
1- فحص حيود الاشعة السينية (XRD)

تم اللجوء الى هذه التقنية من اجل معرفة وفهم التركيب البلوري للسبيكة المحضرة ومعرفة تأثير ارتفاع درجة حرارة التلبيد على البنية التركيبة لها. قبل التلبيد أظهرت نتائج التحليل بتقنية (XRD) ومن خلال الاستعانة ببطاقات المركز الدولي للحيود (ICDD)، قمم المواد الأساسية فقط، وهذا يعني أن المكونات الرئيسية للسبيكة (Ti وNi وCu) كانت في حالة غير متفاعلة ولم تتشكل فيها مركبات جديدة. فحسب الجدول (1) ظهر النيكل بالزوايا (°44.2583، °76.9792) وبمعاملات ميلر (111)، (220) وذلك حسب البطاقة المرقمة (03-065-2865)، وظهر النحاس بالزوايا (°43.0907, °72.3016) وبمعاملات ميلر (111)، (220) وذلك حسب البطاقة المرقمة (01-085-1326) وبذلك يكون التركيب البلوري لكل من النيكل والنحاس ذو نظام بلوري مكعبي متمركز الأوجه (F.C.C). اما التيتانيوم فقد ظهر بالزوايا (°35.8834، °39.1697, °40.936, °52.5847, °77.0167) وبمعاملات ميلر (100)، (002)، (101)، (102)، (201) وذلك حسب البطاقة المرقمة (00-001-1197)، وبذلك فأن التركيب البلوري للتيتانيوم يكون ذو نظام بلوري سداسي (Hexagonal). أما بعد التلبيد، ولجميع عينات النموذج فقد ظهر الطور (TiCuNi2). أي ظهرت سبيكة ثلاثية جديدة من العناصر المستخدمة ذات النظام البلوري الثلاثي الميل (rhombohedral) إذ ظهرَ هذا المركب بزوايا (°28.9164 ، °54.7647 ،°63.2788)، ومعاملات ميلر (002)، (200)، (114) وذلك حسب البطاقة المرقمة (00-101-0026)، أن هذا يشير إلى حدوث تفاعل تبادل بين ذرات العناصر المكونة للسبيكة وتَشكل روابط جديد بين الذرات وتكّون الطور (TiCuNi2) أثناء عملية التلبيد وهذا مما سيُلقي بأثره الكبير على تغيير في الخصائص التركيبة، الفيزيائية والميكانيكية [10]. ومن الملاحظ كذلك أنه وبزيادة درجة حرارة التلبيد، تتناقص قمم شدة المواد الأساسية، كما هو موضح في الاشكال(1) ، (2)، (3)، (4)، (5) و(6). أن ذلك سببه؛ التفاعل الذي حدث أثناء عملية التلبيد والذي ادى الى تحول بعض المواد الأساسية إلى المركب (TiCuNi2) ذو البنية المختلفة، اضافة إلى التغيير في الخواص البلورية نتيجة ارتفاع درجات الحرارة وتكون هذا المركب. كذلك نلاحظ ارتفاع في قمم شدة المركب (TiCuNi2) والتي زادت

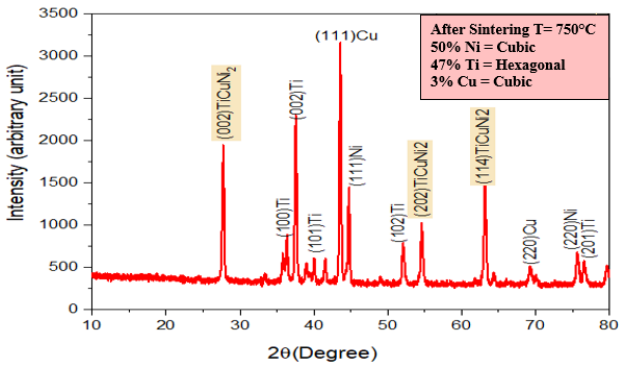
مع رفع درجة الحرارة ولاسيما في العينة رقم (5) عند درجة الحرارة (950°C) ، ثم انخفاضها قليلا في العينة رقم (6)عند درجة الحرارة (1050°c)، ويُعزى ذلك الى أن ارتفاع درجة الحرارة ضمن المدى من (650°C) الى (950°C) قد أدى الى زيادة تشكل هذا المركب مع زيادة تجانس بنيته البلورية، بينما قد يكون سبب انخفاض قمم شدة المركب (TiCuNi2) في العينة رقم (6) عند درجة الحرارة (1050°C) هو تغيير في الخواص البلورية لهذا المركب (عدم انتظامية للسطوح البلورية) وزيادة النمو الحبيبي [11].



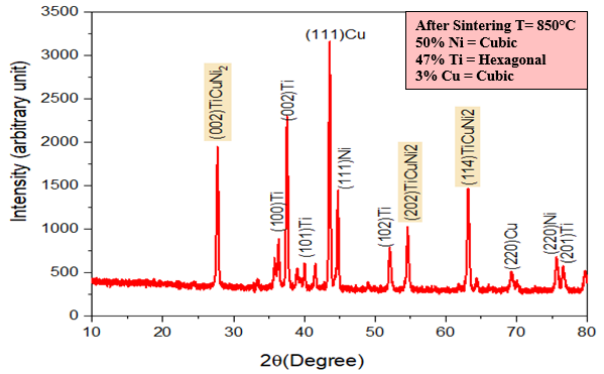
الشكل (1): حيود الاشعة السينية للعينة (1) قبل التلبيد.



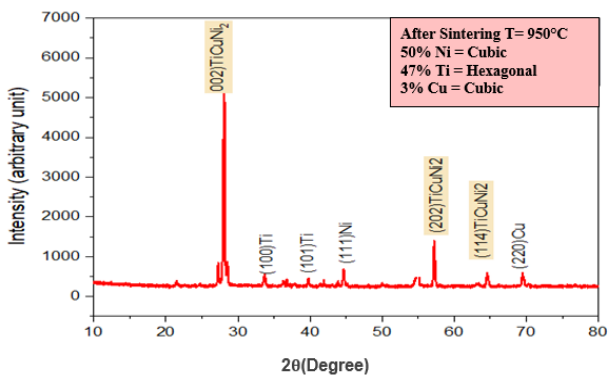
الشكل (2): حيود الاشعة السينية للعينة (2) عند درجة حرارة (650°C).



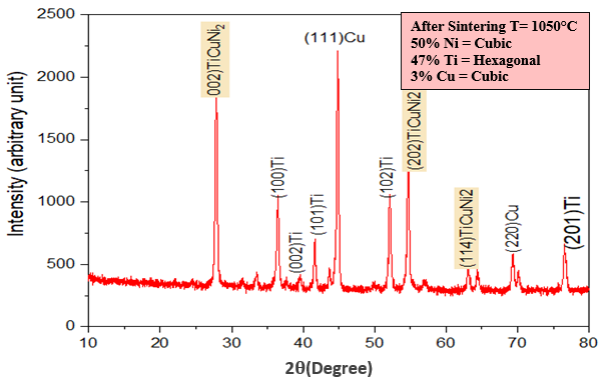
الشكل (3): حيود الاشعة السينية للعينة (3) عند درجة حرارة (750°C).



الشكل (4): حيود الاشعة السينية للعينة (4) عند درجة حرارة (850°C).



الشكل (5): حيود الاشعة السينية للعينة (5) عند درجة حرارة (950°C).



الشكل(6): حيود الاشعة السينية للعينة (6) عند درجة حرارة (1050°C).

الجدول (1): نتائج حيود الاشعة السينية قبل وبعد التلبيد

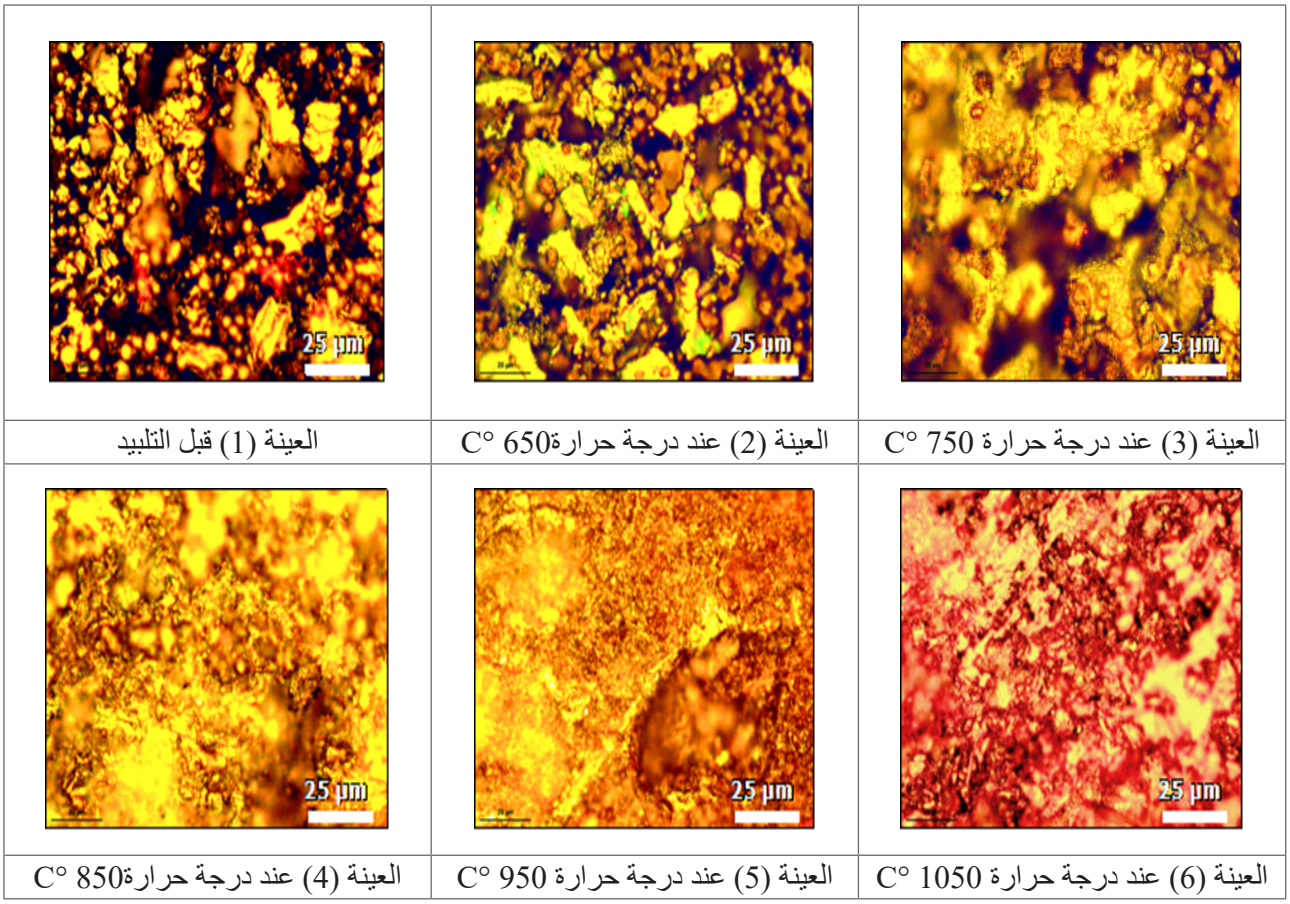
Temperatures (°C)	2Theta (Degree)	FWHM (Deg)	d_{hkl} Exp (°A)	C.S (nm)	hkl	Phase	System	Card No
Before Sintering	35.8834	0.1864	2.50057	53.16678975	(100)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	39.1697	0.1863	2.29801	55.59222847	(002)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	40.936	0.1945	2.20284	54.64671388	(101)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	43.0907	0.1763	2.05227	62.36588454	(111)	Cu	Cubic	01-085-1326
	44.2583	0.1918	2.002	58.45226024	(111)	Ni	Cubic	03-065-2865
	52.5847	0.2433	1.78239	54.31671306	(102)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	72.3016	0.2591	1.73901	101.937628	(220)	Cu	Cubic	01-085-1326
	76.9792	0.3847	1.70471	92.63864309	(220)	Ni	Cubic	03-065-2865
	77.0167	0.2531	1.46057	141.2060248	(201)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
650	28.9164	0.4219	3.19342	21.53792964	(002)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	35.4111	0.2806	2.53284	35.11002843	(100)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	38.5352	0.5735	2.33438	17.89861055	(002)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	40.3886	0.1829	2.23142	57.63758283	(101)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	43.7542	0.3375	2.06727	32.93710127	(111)	Cu	Tetragonal	01-085-1326
	44.9561	0.2966	2.01475	38.255694	(111)	Ni	Cubic	03-065-2865
	52.3238	0.2849	1.74707	46.1115948	(102)	Ti	Hexagonal	00-001-1292
	54.7647	0.3562	1.67483	39.07180315	(200)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	63.2788	0.4179	1.46844	42.73052576	(114)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	70.163	1.17	1.34025	20.22352523	(220)	Cu	Cubic	01-085-1326
	75.8052	0.4302	1.2539	76.11311788	(220)	Ni	Cubic	03-065-2865
	76.7675	0.4219	1.24057	90.68733649	(201)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
750	28.0683	0.1983	2.23226	45.47838455	(002)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	35.4955	0.1703	2.06107	57.91082293	(100)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	39.3382	0.2857	2.01074	36.33794546	(002)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	40.3729	0.1628	1.74446	64.73868192	(101)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	43.8927	0.1749	1.67057	63.70549611	(111)	Cu	Tetragonal	01-085-1326
	44.0507	0.1727	1.46537	65.81002343	(111)	Ni	Cubic	03-065-2865
	52.4079	0.1907	1.3493	69.0205868	(102)	Ti	Hexagonal	00-001-1292
	54.9161	0.2187	1.25255	63.87601915	(200)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	63.4265	0.2535	1.23926	70.80496717	(114)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	69.6244	0.5021	2.23226	45.93033401	(220)	Cu	Cubic	01-085-1326
	75.9017	0.3418	2.06107	96.44060905	(220)	Ni	Cubic	03-065-2865
	76.8632	0.1889	2.01074	87.0241243	(201)	Ti	Hexagonal	00-001-1197

Temperatures (°C)	2Theta (Degree)	FWHM (Deg)	d_{hkl} Exp (°A)	C.S (nm)	hkl	Phase	System	Card No
850	28.3296	0.1013	3.26065	89.2229227	(002)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	35.7268	0.2144	2.44506	46.72599899	(100)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	37.8762	0.2433	2.37346	41.80988514	(002)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	39.8107	0.2078	2.26247	50.30200192	(101)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	43.9024	0.2303	2.06063	48.3886518	(111)	Cu	Tetragonal	01-085-1326
	44.7005	0.2439	2.02568	46.31584566	(111)	Ni	Cubic	03-065-2865
	52.3799	0.2698	2.00993	48.75418054	(102)	Ti	Hexagonal	00-001-1292
	54.9291	0.2138	1.74533	65.36108426	(200)	TiCuNi2	Rhombohedral	00-101-0026
	63.3507	0.3231	1.67021	55.40614607	(114)	TiCuNi2	Rhombohedral	00-101-0026
	70.3216	0.2909	1.46694	81.96829829	(220)	Cu	Cubic	01-085-1326
	75.98	0.2354	1.33762	140.7976927	(220)	Ni	Cubic	03-065-2865
	76.7919	0.3053	1.24023	115.1048403	(201)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
950	28.5275	0.1561	3.12639	58.5459125	(002)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	35.6361	0.2485	2.4509	40.26659318	(100)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	40.7517	0.1971	2.2657	52.98730529	(101)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	44.621	0.1626	2.0291	69.37857118	(111)	Ni	Cubic	03-065-2865
	54.8489	0.1693	1.67246	82.37688798	(200)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	57.1949	0.1495	1.60931	99.13297883	(202)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	63.1681	0.498	1.47074	35.72057596	(114)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	70.2464	0.1897	1.33887	125.2367364	(220)	Cu	Cubic	01-085-1326
1050	28.3353	0.1699	3.14716	53.69296095	(002)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	35.9389	0.2227	2.43151	44.53185409	(100)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	40.0413	0.1592	2.24997	65.87954437	(101)	Ti	Hexagonal	00-001-1197
	44.8972	0.157	2.01726	72.19751953	(111)	Ni	Cubic	03-065-2865
	54.136	0.1425	1.66443	98.57221845	(200)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	57.4548	0.1269	1.60264	117.6167777	(202)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	63.4646	0.5165	1.46458	34.79759402	(114)	TiCuNi2	rhombohedral	00-101-0026
	70.5442	0.1254	1.33394	192.237987	(220)	Cu	Cubic	01-085-1326

2- نتائج فحص المجهر الضوئي

Results of Optical microscopy Test

اُستخدام المجهر الضوئي، للتعرف على البنية المجهرية للعينات ولاسيما معرفة الحجم الحبيبي لمكونات العينة فضلا عن معرفة نسبة المسامية فيها، وبالتالي مقارنة تلك النتائج قبل وبعد التلبيد، ومع ارتفاع درجة حرارة التلبيد في كل مرة، أن الشكل (7) يوضح التصوير المجهري بقوة تكبير (50x) لعينات السبيكة.



العينة (1) قبل التلبيد	العينة (2) عند درجة حرارة650 C°	العينة (3) عند درجة حرارة 750 C°
العينة (4) عند درجة حرارة850 C°	العينة (5) عند درجة حرارة 950 C°	العينة (6) عند درجة حرارة 1050 C°

الشكل (7) صور المجهر الضوئي لعينات السبيكة

بينت صور المجهر الضوئي لكافة العينات، ومن خلال تحليلها في برنامج (ImageJ)، معلومات عن الحجم الحبيبي ونسبة المسامية لكل عينة، إذ يوضح الشكل (8) العلاقة بين الحجم الحبيبي كدالة لتغيير درجة حرارة التلبيد (650,750,850,950,1050) °C، علماً التلبيد استمر لمدة ساعة واحد، كما يُبين الجدول (2) الحجم الحبيبي لهذه العينات ، إذ يُلاحظ ما هو ات:

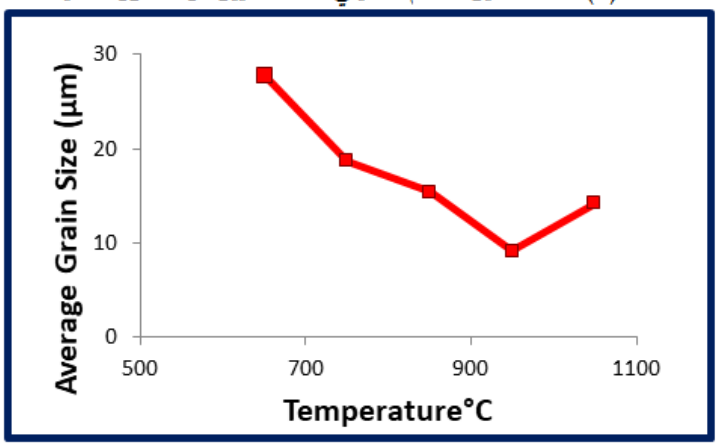
أولاً: عند تلبيد العينات ، فأن الحجم الحبيبي قد أنخفض عن قيمته قبل التلبيد.

ثانياً: بزيادة درجة حرارة التلبيد يصغر الحجم الحبيبي ويعزى هذا الى تقليل العيوب البلورية وتحسن التركيب البلوري بعد عملية التلبيد نتيجة لارتفاع درجة الحرارة [12-15].

الجدول (2): الحجم الحبيبي لعينات السبيكة.

درجة الحرارة (°C)	معدل الحجم الحبيبي (µm)
قبل التلبيد	28.04
650	27.82
750	18.68
850	15.46
950	9.24
1050	14.13

الشكل (8): العلاقة بين الحجم الحبيبي كدالة لتغيير درجة حرارة التلبيد



اما الشكل (9) فأنه يوضح العلاقة بين نسبة المسامية للعينات كدالة لتغير درجة حرارة التلبيد وحسب الدرجات المذكورة آنفاً، كما يبين الجدول (3) نسبة المسامية لتلك العينات ، إذ يُلاحظ ما هو ات:

أولاً: أنه بزيادة درجات الحرارة تنخفض نسبة المسامية ولكافة العينات اذ ان نسبة المسامية قبل التلبيد كانت أكبر منها بعد التلبيد ويعزى ذلك الى الانكماش في المسام الاصلية نتيجة الحرارة [16].

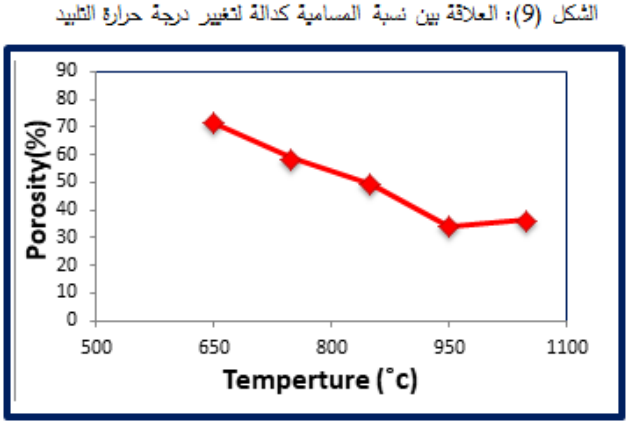
ثانياً: مع ارتفاع درجة حرارة التلبيد يُلاحظ أن نسبة المسامية قد انخفضت، أن تفسير ذلك يكمن في أن الذرات اخذت موقعها بشكل أفضل وزاد ترابط حبيبات العينة مما أدى الى تغير شكل المسامات وتقلصها، فضلا عن تشكل الطور (Ti-CuNi2) حسب نتائج تحليل حيود الاشعة السينية والذي جعل المادة أكثر تراصاً [15].

ثالثاً: أن نسبة المسامية وعند درجة حرارة التلبيد (1050°C) تبدأ بالارتفاع قليلا، إذ تكون أكبر قليلا من قيمتها عند درجة الحرارة (950°C)، وتفسير هذا ، أن ارتفاع درجة حرارة التلبيد الى هذه الدرجة العالية سيؤدي الى زيادة انتشار كل من عنصر النيكل والنحاس في التيتانيوم، (العنصر الذي درجة انصهاره اقل سينتشر في العنصر الذي درجة انصهاره اعلى)، وبذلك فأن هنالك مناطق في العينة (الغنية بالنيكل والنحاس) ستخسر ذرات أكثر، وبالتالي يختل توازن الفجوات في منطقة عن الأخرى، وبتجمع الفجوات ستتشكل المسامات [17].

الجدول (3): نسبة المسامية لعينات السبيكة

درجة الحرارة (°C)	نسبة المسامية (%)
قبل التلبيد	79.63
650	71.56
750	58.45
850	49.18
950	34.24
1050	36.38

الشكل (9): العلاقة بين نسبة المسامية كدالة لتغيير درجة حرارة التلبيد



ثانياً: الخصائص الميكانيكية

فحص صلادة فيكرز:

يوضح الشكل (10) العلاقة بين قيم صلادة فيكرز كدالة لتغيير درجة حرارة التلبيد (650,750,850,950,1050) °C، كما يبين الجدول (4) قيم صلادة فيكرز لعينات السبيكة قبل وبعد التلبيد وقد لوحظ ما هو ات:

أولاً : إن الصلادة قد ارتفعت بعد التلبيد عن قيمتها قبل التلبيد وذلك بسبب دور الحرارة في زيادة الترابط بين جسيمات عناصر السبيكة والذي ادى الى تقليص المسامات وزيادة الكثافة وبالتالي زيادة الصلادة، كما ان تشكل طور جديد (TiCu-Ni2) جعل المادة أكثر تراصاً وبالتالي كان هذا الطور سببا اخرا لزيادة الصلادة [18].

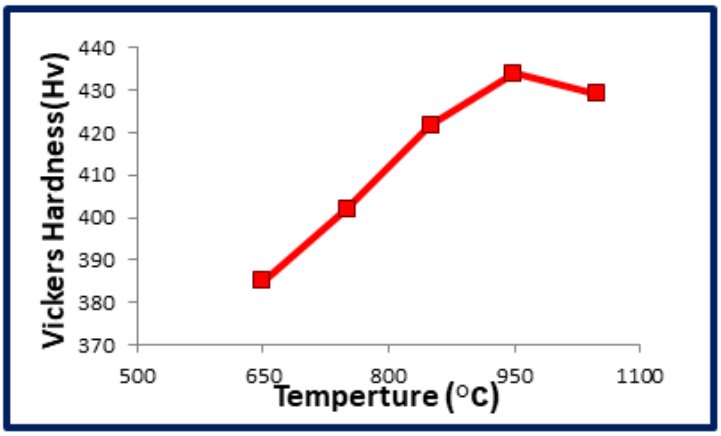
ثانيا: تزداد الصلادة مع ارتفاع درجة حرارة التلبيد، ويُعزى ذلك الى أن ذرات وجزيئات عناصر السبيكة قد اتخذت مواقع أفضل بفعل ارتفاع درجة الحرارة فأزداد الترابط فيما بينها وأصبح هنالك نمو حبيبي ومزيد من تشكل الطور (TiCuNi2)، فيتغير شكل المسامات ويتقلص حجمها باضطراد، أي يحدث هنالك تغيير في الترتيب البلوري، وهذه العوامل من شأنها تقوية المادة وانكماش مساميتها وازدياد كثافتها وهذا كله سيؤدي الى زيادة صلادة السبيكة كذلك فأن للحجم الحبيبي تأثير على قيم الصلادة والعلاقة عكسية إذ كلما قل الحجم الحبيبي ازدادت قيم الصلادة إذ كانت افضل قيمة للصلادة (434 g/mm^2) عند درجة حرارة (950°C)، وهذا ما اكدته نتائج الحجم الحبيبي حسب فحص المجهر الضوئي [19].

ثالثاً: أن الصلادة وعند درجة حرارة التلبيد (1050°C) تبدأ بالانخفاض قليلاً إذ تكون أقل قليلا من قيمتها عند درجة الحرارة (950°C)، وهذا يمكن تفسيره، على أن ارتفاع درجة حرارة التلبيد الى هذه الدرجة العالية، سيؤدي الى زيادة الانتشار وبالتالي زيادة نسبة المسامات وانخفاض الكثافة وبالمحصلة انخفاض الصلادة [17].

الجدول (4):قيم صلادة فيكرز لعينات السبيكة

صلادة فيكرز (g/mm^2)	درجة الحرارة (°C)
369	قبل التلبيد
385	650
402	750
422	850
434	950
429	1050

الشكل (10): العلاقة بين قيم صلادة فيكرز كدالة لتغير درجة حرارة التلبيد



الاستنتاجات:

بعد الاختبارات التي أُجريت على عينات السبيكة (Ni-47Ti-3Cu)، تم التوصل الى الاستنتاجات الآتية:

1. نجاح طريقة التحضير المستخدمة (تقنية المساحيق).

2. تحسن جميع الخصائص المدروسة (التركيبية والميكانيكية) بعد التلبيد، إذ انخفض الحجم الحبيبي ونسبة المسامية وتحسنت الصلادة، وذلك مع ارتفاع درجة حرارة التلبيد.

3. بالإمكان الحصول على طور جديد مختلف عن اطوار مكونات السبيكة الاصلية، اذ تم الحصول على الطور ($TiCuNi_2$) ذو النظام البلوري الثلاثي الميل (rhombohedral)، علما ان النظام البلوري للعناصر الداخلة في تكوين السبيكة هي مكعب متمركز الأوجه (F.C.C) لكل من النيكل والنحاس، وسداسي (Hexagonal) للتيتانيوم.

4. أفضل قيمة صلادة كانت عند درجة حرارة (950°C) إذ كانت في هذه الدرجة بأعلى قيمة.

5. تجدر الاشارة هنا بان نتائج فحص المجهر الضوئي ونتائج فحص الصلادة عززت إحداهما الاخرى خصوصاً في تحديد العينة ذات القيم المثلى والتي كانت عن درجة حرارة تلبيد (950°C).

المصادر:

[1] عادل محمود حسن وفداء صفاء محمد علي – مبادئ علم المعادن» الجزء الاول، جامعة الموصل، مديرية دار الكتب للطباعة والنشر، 1986.

[2] عيسى مسعود بغني «اساسيات هندسة المواد» الجمهورية الليبية، الهيئة الليبية للبحث والعلوم والتكنولوجيا، ادارة الاعلام والنشر، دار الكتب الوطنية – بنغازي، الطبعة الأولى، 2014، ص 145.

[3] عائض بن سعد مرزن الشهري، محمد علي خلفية صالح، د. حسين محمد عبد الفتاح علي، «كيمياء العناصر الانتقالية "، مؤسسة العبيكان للنشر، طبعة الاولى، 2005، ص255.

[4] Matthew J. Donachie, "Titanium a technical Guide", second Edition, pp 2-4, 2000.

[5] حسن بوزيّان "دراسة كيميائية تحليلية مفصلة لعناصر الجدول الدوري" الجزء الأول، الجزائر (د.ن)، 2017، ص 146-143.

[6] قحطان خلف الخزرجي "المعادن اللاحديدية وسبائكها"، دار دجلة للنشر، الطبعة الأولى ، 2009 ، جمهورية العراق، ص 20.

[7] A. K. Sinha " Powder Metallurgy " Ianpat Rai Publications (P) LTD New Delhi, 1987.

[8] برماكوف فيازنيكوف « استعمال ميتالورجيا المساحيق في الصناعة « موسكو، دار مير للنشر، الطبعة الاولى، 1968.

[9] G. S. Upadhyaya " Powder Metallurgy Technology " Published by Cambridge International Science Publishing, England, 2002.

[10] Y. Zhang, J. L. Jin and Z. O. Ji, "Two-stage Transformation in a Ti-Ni-Cu Alloy"

International Journal of Materials Research, vol. 86, no. 2, pp. 91-96, 1995.

[11] Song K., Aindow M. Grain growth and particle pinning in a model Ni-based superalloy. Mater. Sci. Eng. A. 2008; 479:365–372. doi: /j.msea.2007.09.055.

[12] T. Goryczka and J. Van Humbeeck "Characterization of a NiTiCu shape memory alloy produced by powder technology" journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 17, PP. 4925–4930, 2006.

[13] H.J.Chang, J.S.Rho, and Y.C. Chang ''Optical and Electrical Properties of Thin Film Electroluminescent Devices with SrS : Cu , Ag Phosphor Layer'' Journal of the Microelectronics & Packaging Society Vol. 9, No.1, PP 29-33, 2002.

[14] Borgman, James M., et al. "The effect of energy density and Nb content on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-(10-30 wt.%) Nb." Journal of Materials Engineering and Performance 30 (2021): 8771-8783.

[15] عمر فاضل عبد الله « توظيف أشعة أكس لدراسة تأثير الحجم الحبيبي للنحاس بعض سبائكه على معاملات التوهين « رسالة ماجستير، كلية التربية، جامعة تكريت،2010 .

[16]Tomasz, Goryczka,"Ni25Ti50Cu25 shape memory alloy produced by nonconventional techniques" Shape Memory Alloys: Processing, Characterization and Applications, Dr. Francisco Manuel Braz Fernandes, pp.53-76, 2013.

[17] رشا حامد احمد،» دراسة الخصائص التركيبية والميكانيكية لسبيكة النظام الثنائي النحاس – النيكل المحضرة بتقنية تكنلوجيا المساحيق» رسالة ماجستير، جامعة تكريت، كلية التربية للعلوم الصرفة، قسم الفيزياء، 2013، ص 53.

[18] عقيل علي ناظم ، مهدي مطر حنون « تأثير اضافة كاربيد مسحوق السيليكون على خواص النيكل – النحاس، المنتجة بطريقة تكنلوجيا المساحيق» مجلة الهندسة والتكنلوجيا، مجلد 29، العدد 11، 2011، ص 497.

[19] Lopes, E. S. N., et al. "Effects of double aging heat treatment on the microstructure, Vickers hardness and elastic modulus of Ti–Nb alloys." Materials characterization 62.7 (2011): 673-680.