مجلة جامعة الملك عبدالعزيز: العلوم الهندسية، م ٢١ ع٢، ص ص: ١٢٧-١٥٠ (٢٠١٠م/١٤٣١هـ)
DOI: 10.4197 / Eng. 21-2.7

تأثير تدعيم سبيكة الأساس (Al-Cu-Mg) بحبيبات سيراميكية في قيم الصلادة ومقاومة الكلال

سهامة عيسى صالح، و صاحب مهدي الصفار، وسرمد عماد إبراهيم
قسم هندسة المواد – الجامعة التكنولوجية– بغداد – العراق

المستخلص. تناول البحث الحالي تحضير قضبان طولها ١٣ سم وقطرها ١,٥ سم من مواد متراكبة ذات أساس معدني متمثل بسبيكة (Al–Cu–Mg) مدعمة بدقائق الزركونيا (ZrO_2) من جهة ودقائق الألومينا (Al_2O_3) من جهة أخرى بنسب وزنية مختارة هي: ١،٣،٤،٥،٦ ٪.

حضرت سبيكة الأساس والمواد المتراكبة بطريقة السباكة باستخدام تقنية الدوامة (Vortex Technique) لتشتيت دقائق التقوية في أرضية سبيكة الأساس ، وقد تم تحضير مجموعتين رئيستين من المواد المتراكبة الأولى مادة متراكبة مقواة بدقائق الزركونيا والمتمثلة بالأحجام الحبيبية (25μm>p.size≥0.05μm) بينما تضمنت الثانية مادة متراكبة مقواة بدقائق الألومينا والمتمثلة بالأحجام الحبيبية (<30μm p.size≥0.1μm). وتضمنت الدراسة تأثير المعاملة الحرارية المحلولية عند درجة ٤٩٥°م وعملية التشكيل اللاحقة.

بينت النتائج ازدياد قيم كل من مقاومة الكلال والصلادة مع زيادة نسب دقائق التقوية المضافة. أما تأثير نوعية دقائق التقوية المضافة في الخواص الميكانيكية، فقد لوحظ أن هناك زيادة ملحوظة في قيم مقاومة الكلال والصلادة بالنسبة للمادة المتراكبة

المقواة بدقائق الألومينا مقارنة مع المادة المتراكبة المقواة بـدقائق الزركونيا والتي اكتسبت قيماً أعلى مما هي عليـه فـي الـسبيكة الأساس.

الكلمات الدالة : متراكب ذات أساس ألمنيـوم، دقـائق الزركونيـة والألومينا، مقاومة الكلال، الصلادة.

١. المقدمة

أجريت تحسينات كثيرة على طرق تصنيع المواد المتراكبة ذات الأساس المعدني (Metal Matrix Composite) منها تقنيـة الـسباكة الميكانيكيـة (Mechanical Alloying)[١] في تحضير مادة متراكبة ذات أسـاس مـن الألمنيـوم المقـوى بالسمنتيت (Fe_3C) وقد أنجزت تحت ظروف تحضير مختلفة (طحن المساحيق، والمعالجة الحرارية للمساحيق، وزمن ودرجة حرارة الكبس الساخن)، وأظهرت نتائج الفحص التوافق الممتاز ما بين مادة الأسـاس ومـواد التقويـة المتمثلـة بالدقائق. كما واستخدم الباحث (Sanna) وجماعته[٢] تقنية ميتالورجيا المـساحيق (Metallurgy Powder) عند تحضير مادة متراكبة من فولاذ العدة (Tool steel) كمادة أساس مقواة بدقائق Nbc، (Wc) بهدف السيطرة على التوزيـع المنـتظم للدقائق ذات الكسور الحجمية العالية داخل مادة الأسـاس. واسـتخدمت تقنيـة الترشيح بالعصر (Infiltration Squeeze) من قبل الباحث (Mortensen)[٣] وذلك من أجل الوصول إلى أفضل تغلغل للسائل المعـدني فـي الفراغـات البينيـة لمجموعة من الألياف القصيرة وزيادة تبلل الألياف لمادة الأساس ممـا أكـسب المادة المتراكبة خواص أفضل. كما اتجهت البحوث الحديثة إلى دراسـة تـأثير عناصر السبك ومواد التقوية المضافة إليها، وتضاربت النتائج حول تأثير حجـم وشكل مواد التقوية المضافة في آلية التصليد بالتشتيت لهذه الدقائق، فقـسم مـن الباحثين يشير إلى أن إضافة مواد التقوية تؤدي إلى تحـسين قابليـة الإصـلاد بالتعتيق، بينما يشير البعض الآخر إلى عدم تأثير هذه المواد في آلية تصليد هذه

السبائك[٤]. كما تناولت الدراسات طبيعة السطح البيني، فقد درس (Lou) وجماعته[٥] التفاعل الحاصل بين دقائق كاربيد التنكستن (Wc) ومادة الأساس في منطقة السطح البيني، وقد لاحظوا أن سبيكة الأساس المعدنية تتغلغل بين دقائق كاربيد التنكستن وتتفاعل مع الدقائق خلال عملية التصنيع، وأن خواص منطقة السطح البيني تعتمد على الخواص الفيزيائية والكيميائية لمادة الأساس ودقائق التدعيم الصلدة. وفيما يخص البنية المجهرية فقد درس (Mandal) وجماعته[٦] تأثير الكسر الوزني لمادة التقوية (TiB_2) على مدى التوزيع الإبري لعنصر السبك (Si) في داخل مادة الأساس (Al-7Si).

وقد لاحظوا أن زيادة الكسر الوزني لدقائق التقوية تؤدي إلى نقصان في النمو للحجم الإبري للسليكون، وقد نسبوا ذلك إلى أن مادة التقوية تعمل على تقليص النمو الإبري للسليكون. وفي مجال المواد المتراكبة النانوية (Nano Material Composite) فقد استطاع (Carvalho) وجماعته[٧] من إنتاج مادة متراكبة نانوية (Cu-FeC) من خلال تحضير مادة متراكبة بطريقة السبك الميكانيكي للعناصر، Fe، (Cu الكرافيت) والمعالجة الحرارية اللاحقة. وشملت الدراسات إمكانية فصل مكونات المادة المتراكبة، فقد استطاع (Ravi) وجماعته[٨] فصل مادة الأساس الألمنيوم عن مادة التقوية (SiC) من مواد الخردة (Scrap) للمتراكب (Al-SiC) وذلك بإضافة عامل صهر مساعد ملحي إلى منصهر السبيكة.

وفيما يخص خواص الكلال للألمنيوم وسبائكه والمواد المتراكبة، فقد لوحظ أن سلوك الكلال يعتمد على طرق تصنيع المواد وعلى عوامل أخرى منها حالة السطح، و نوع مادة الأساس، ومواد التدعيم ، والكسر الحجمي والحجم الحبيبي لدقائق التدعيم وكيفية توزيعها داخل مادة الأساس، وكذلك المعاملة الحرارية اللاحقة. ففي دراسة حول نمو شقوق الكلال على طول حدود الحبيبات لسبيكة (Al-Mg-Cu) فقد بينت الدراسة أن معدل نمو شق الكلال يقل

بزيادة زمن التعتيق (Aged Time) حيث يترسب المغنيسيوم وينعزل على حدود الحبيبات ويزداد تركيز الهيدروجين عند قمة الشق[٩]. كما وتمت دراسة معدل نمو شق الكلال لسبيكة (Al 2024-T3) قبل وبعد المعاملة الحرارية الطويلة عند درجة ١٣٠°م ولمدة ١٠٠ و١٠٠٠ ساعة[١٠] وقد وجد أن معدل نمو شق الكلال يعتمد على اتجاه الفحص ضمن شروط " Cold Worked after Solutionizing and Natural Aging" (T3) ويزول تأثير الاتجاه بعد المعاملة الحرارية الطويلة عند درجة ١٣٠°م. وفي دراسة حول تأثير المعالجة السطحية في خواص الكلال[١١] لسبيكة (Al 2024-T3) وسبيكة (Al 7075-T6) لوحظ أن سلوك الكلال متماثل لكلا السبيكتين فيما إذا عولجت أو لم تعالج حراريا. وهناك عدد من الدراسات اهتمت بخواص الكلال للمادة المتراكبة ذات اساس من سبائك الألمنيوم اعتمدت على الكسر الحجمي لدقائق التدعيم واغلبها مدعمة بدقائق (SiC)[١٢-١٤]. وفي دراسة حديثة حول تأثير الكسر الحجمي لدقائق (SiC) على دورات الفشل لسبيكة (2124\Al-Si-Cu) المحضرة بتقنية ميتالورجية المساحيق وسبيكة (AS7G\Al-Si-Mg) المحضرة بتقنية السباكة[١٥] فقد لوحظ انخفاض مقاومة الكلال للمادة المتراكبة ذات الأساس (AS7G) بالمقارنة مع مقاومة الكلال للمادة المتراكبة ذات الأساس (٢١٢٤). ومن خلال الفحص المجهري للعينات بالمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) فقد لوحظ أن بدايات تكون شقوق الكلال للمادة المتراكبة ذات الأساس (AS7G) تحدث عند السطح البيني (SiC\ matrix)، كما لوحظ أن هناك أعدادًا كبيرة من السطوح البينية تفتقر إلى الارتباط (Debonding) ما بين مادة الأساس (AS7G) ودقائق التقوية (SiC)، وقد عُوزي هذا إلى الانخفاض الحاصل في مقاومة الكلال للمادة المتراكبة ذات الأساس AS7G.

أما البحث الحالي فقد تناول دراسة تأثير إضافة دقائق الألومينا (Al_2O_3) من جهة ودقائق الزركونيا (ZrO_2) من جهة أخرى وبحجوم حبيبة دقيقة إلى

سبيكة الأساس (Al-Cu-Mg) ذات التطبيقات الواسعة[١٦] ودراسة تأثير الكسر الوزني لكل من دقائق الألومينا والزركونيا في مقاومة الكلال والصلادة للمادة المتراكبة والمحضرة بتقنية السباكة بالمزج، علاوة على ذلك تضمنت الدراسة تأثير المعالجة الحرارية المزدوجة على قيم الصلادة لكل من سبيكة الأساس والمادة المتراكبة.

٢. الجزء النظري

في دراسة حول تأثير تدعيم الألمنيوم وسبائكه بالحبيبات السيراميكية وتأثيرها في إمكانية تصليد سبيكة (Al-4%Cu) بأكثر من آلية، وذلك بدمج آليتي التصليد بالتشتيت والتصليد بالترسيب[١٧] وباستخدام دقائق الألومينا كمادة تقوية ودقائق المغنيسيا كمادة معززة للتبلل وبنسب ثابتة، فقد لوحظ أن الصلادة المايكروية تزداد مع زيادة نسبة الألومينا لتصل إلى أعلى قيمها البالغة (١٣٦) للسبيكة المدعمة بدقائق الألومينا ذات الحجم الحبيبي (0.5um) وبنسبة وزنية ٠,٥٪ والمعتقة عند درجة حرارة ١٦٠°م، كما لوحظ أن قيم الصلادة تقل مع زيادة الحجم الحبيبي للدقائق. وفي دراسة أخرى لمادة متراكبة ذات أساس (Cu-1.5%MgAl-4.5%) محضرة بتقنية السباكة[١٨]، وذلك بتشتيت دقائق الألومينا فيها ومن ثم إجراء معالجة حرارية محلولية فقد استنتج أن إضافة الألومينا يؤدي إلى زيادة الصلادة ونقصان معدلات البلى. وفي دراسة أخرى لنفس المادة المتراكبة السابقة ولكن بتشتيت دقائق من مادة الزركونيا (ZrO_2) وبكسر وزني وحجم حبيبي مختلفين[١٩] فقد تبين أن ازدياد قيم كل من الصلادة ومقاومة الشد مع زيادة نسبة الزركونيا المضافة قد وصلت إلى أعلى قيمها عند نسبة ٣,٥٪ والبالغة (M Pa 255, 557) على التوالي.

كما استخدمت تقنية السباكة في تحضير مادة متراكبة ذي أساس (2219 Al) وذلك بتشتت نسب وزنية مختلفة من دقائق (SiC) فيها[٢٠]، وتمت دراسة

سلوك البلى الانزلاقي الجاف، وأظهرت النتائج أن معدلات البلي للمادة المتراكبة هي أقل من سبيكة الأساس، وتتناقص هذه المعدلات مع زيادة دقائق (SiC). ومن خلال دراسة تأثير التدعيم بدقائق الزركونيا ذات الحجم الحبيبي (0.17um, 0.36um) في مقاومة الكلال لمادة متراكبة ذات أساس (2124\Al-Si-Cu) وأخرى ذات أساس (AS7G\Al-Si-Mg) فقد لوحظ انخفاض مقاومة الكلال للمادة المتراكبة ذات الأساس (AS7G\Al-Si-Mg) إلى (95Mpa) عند دورات الفشل البالغة (10^6) في حين بلغت مقاومة الكلال للمتراكب ذات الأساس (2124\Al-Si-Cu) إلى (363Mpa) عند نفس دورات الفشل، كما لوحظ أن زيادة الحجم الحبيبي لدقائق (SiC) أدى إلى انخفاض في مقاومة الكلال[١٥].

٣. الجزء العملى

تم تحضير السبيكة الأساس والمتكونة من (Al-Cu-Mg) وذلك بصهر قطع من الألمنيوم ذات نقاوة ٩٩,٨٪ معلومة الوزن، داخل بوتقة من الكرافيت، إلى درجة حرارة ٧٥٠°م، ثم أضيف رايش من النحاس النقي بنسبة وزنية ٤,٥٪ المحضر مسبقا محفوظا داخل رقائق من الألمنيوم، وبعد ذلك تمت إضافة رايش من المغنيسيوم النقي بنسبة وزنية ١,٥٪ إلى منصهر السبيكة مع التحريك المستمر، ومن ثم سكب المنصهر في داخل قوالب أسطوانية الشكل مصنوعة من الحديد الصلب و مسخنة مسبقا عند درجة حرارة ٢٥٠°م، ويبين الجدول١ مكونات السبيكة الأساس.

الجدول ١. التحليل الكيميائي للسبيكة الأساس.

Ti	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Metal
٠,٠٠٤	٠,٠١٨	١,٤١	٠,٠٠٨	٤,٣٧	٠,١٥	٠,٥٦	Wt%
	Al	Sb	Sn	Pb	Ni	Cr	Metal
	Rem%	٠,٠٢١٨٢	٠,٠٠٤	٠,٠٠١٢٢	٠,٠١	٠,٠٠٢	Wt%

أما المواد المتراكبة فقد حضرت بمجوعتين بالاعتماد على مواد التقوية:

أ- المجموعة الأولى (A): مواد متراكبة متكونة من (Al-Cu-Mg) مقواة بدقائق الزركونيا (Zirconia) ذات نقاوة ٩٩,٩٪ ذات أحجام حبيبية مختلفة تتراوح بين (25μm > Particle Size ≥0.05μm) وبنسب وزنية مختارة (1،3،4.5،6%).

ب- المجموعة الثانية (B): مواد متراكبة متكونة من (Al-Cu-Mg) مقواة بدقائق الألومينا (Alumina) ذات نقاوة ٩٩,٩٪ وذات أحجام حبيبية مختلفة تتراوح بين (30μm>particle size ≥0.1 μm) وبنسب وزنية مختارة (1،3،4.5،6%).

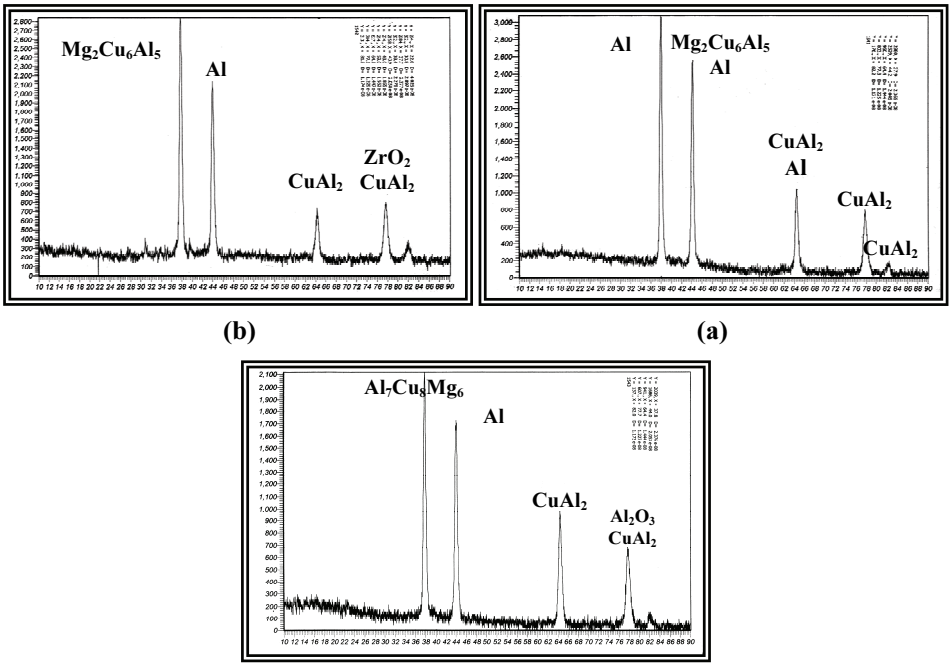
قطعت العينات بطول ١-١,٥ سم كنماذج لاختبار الصلادة والفحص المجهري و حيود الأشعة السينية واستخدم الباقي من النماذج في تحضير عينات اختبار كل من الكلال و الشد، ولغرض التجانس الحراري والتخلص من بعض عيوب السباكة كالانعزال ولضمان توزيع الأطوار بشكل متجانس في الصبة فقد أجريت المعاملة الحرارية للنماذج المحضرة لكل من السبيكة الأساس والمواد المتراكبة المنتجة وقد تم إجراء المعاملة المحلولية بدرجة حرارة ٤٩٥ °م لمدة أربع ساعات ثم الإخماد بالماء البارد تتبعها بعد ذلك عملية تعتيق صناعي للعينات المخصصة لفحص الصلادة بدرجة حرارة ١٥٠°م ولمدة ساعتين، ومن ثم تعتيق صناعي بدرجة حرارة ١٧٠°م والإبقاء فترات زمنية مختلفة ما بين٠,٥- ٥ ساعة. وقد فحصت مقاومة الشد القصوى للمادة الأساس وكانت مساوية إلى ٢٦٩,٤ نيوتن/ مم^{٢}.

تم إجراء فحص الحيود الأشعة السينية لمعرفة الأطوار التي تضمنتها السبيكة الأساس والمواد المتراكبة بعد إجراء المعاملة الحرارية المحلولية والتعتيق.

٤ . النتائج والمناقشة

٤-١ نتائج فحص الحيود بالأشعة السينية

من أنماط حيود الأشعة السينية عند درجة حرارة الغرفة لسبيكة الأساس والسبائك المدعمة بدقائق الزركونيا من جهة ودقائق الألومينا من جهة أخرى بعد المعاملة المحلولية والتعتيق والمبينة في الشكل١ (abc) على التوالي.



شكل١. أنماط حيود الأشعة السينية بعد المعاملة المحلولية والتشكيل والتعتيق: (a) سبيكة الأساس، (b) المادة المتراكبة المقواة بدقائق الزركونيا، (c) المادة المتراكبة المقواة بدقائق الألومينا.

ومن الجداول (٢-٤) تتضح الأطوار المتكونة في هذه العينات على التوالي. المتراكبة، فضلا عن ظهور دقائق كل من الألومينا والزركونيا. والمتمثلة بالطور الثاني ($CuAl_2$) والتي توضحها الجداول الثلاث وحسب زوايا

ظهورها، كما يوضح الجدول (٣) ظهور طور الزركونيا عند زاوية (٧٧,٥) وطور الألومينا في الجدول (٤) عند الزاوية (٧٧,٧) كذلك.

الجدول ٢. نتائج فحص حيود الأشعة السينية للسبيكة الأساس (Al-Cu-Mg) بعد السباكة والمعاملة المحلولية والتشكيل والتعتيق عند زمن قدره ساعتين.

2θ	dm (A^o)	ds (A^o)	Phase	I/I_o
37.9	2.36	2.34	Al	100
44.2	2.04	2.02	Al	47
44.2	2.04	2.02	$Mg_2Cu_6Al_5$	40
64.4	1.44	1.43	Al	22
64.4	1.44	1.41	$CuAl_2$	7
77.8	1.22	1.23	$CuAl_2$	16
82.2	1.17	1.17	$CuAl_2$	3

الجدول ٣. نتائج فحص حيود الأشعة السينية للمادة المتراكبة التي أساسها سبيكة البحث الحالي (Al-Cu-Mg) والمقواة بدقائق الزركونيا بعد السباكة والمعاملة المحلولية والتشكيل والتعتيق عند زمن قدره ساعتين.

2θ	dm (A^o)	ds (A^o)	Phase	I/I_o
37.7	2.37	2.36	$Al_7Cu_8Mg_6$	100
43.9	2.05	2.02	Al	47
64.2	1.44	1.41	$CuAl_2$	7
77.5	1.22	1.23	$CuAl_2$	16
77.5	1.22	1.26	ZrO_2	10
81.9	1.17	1.17	$CuAl_2$	3

الجدول ٤. نتائج فحص حيود الأشعة السينية للمادة المتراكبة التي أساسها سبيكة البحث الحالي (Al-Cu-Mg) والمقواة بدقائق الألومينا بعد السباكة والمعاملة المحلولية والتشكيل والتعتيق عند زمن قدره ساعتين.

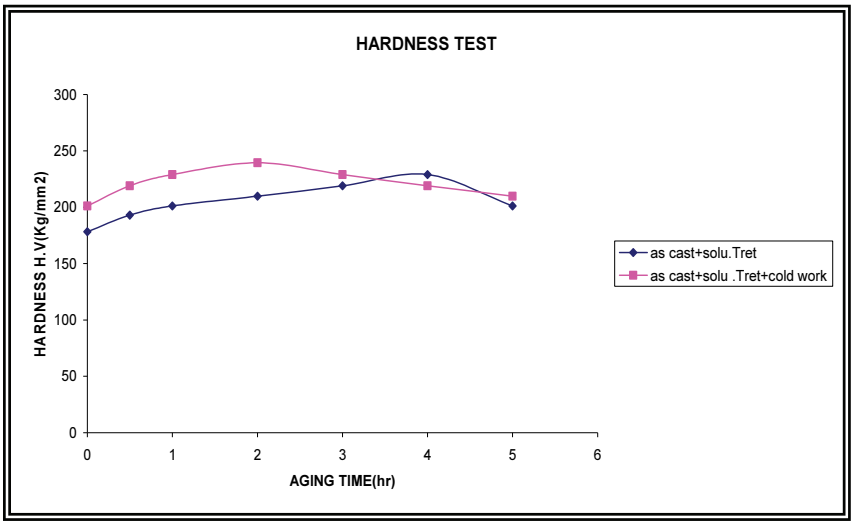
2θ	dm (A^o)	ds (A^o)	Phase	I/I_o
37.7	2.37	2.36	$Al_7Cu_8Mg_6$	100
44.0	2.05	2.02	Al	47
64.4	1.44	1.41	$CuAl_2$	7
77.7	1.22	1.23	$CuAl_2$	16
77.7	1.22	1.21	Al_2O_3	10
82.0	1.17	1.17	$CuAl_2$	3

٤-٢ نتائج فحص الصلادة للسبيكة الأساس

من خلال الشكل ٣، والذي يوضح تأثير مدة التعتيق في قيم الصلادة للسبيكة الأساس (Al-Cu-Mg) بعد إجراء المعاملة المحلولية عند درجة حرارة (٤٩٥°م) والتعتيق عند درجة حرارة ١٥٠°م ولمدة ساعتين ومن ثم تعتيق لاحق عند درجة حرارة ١٧٠°م ، وخلال فترات زمنية تتراوح بين ٠,٥- ٥ ساعة.

يلاحظ أن صلادة سبيكة الأساس بعد الصب والمعاملة المحلولية تزداد مع زيادة زمن التعتيق لتصل إلى أعلى قيمة لها عند زمن تعتيق مقداره ٤ ساعات ويعود سبب ذلك إلى ترسب دقائق صغيرة جدا من الطور ($CuAl_2$) حيث تعمل هذه الدقائق على إعاقة حركة الانخلاعات مما يؤدي إلى تصليد السبيكة وزيادة مقاومتها تدريجيا، وعند زيادة مدة التعتيق إلى أكثر من (٤) ساعات يلاحظ انخفاض قيم الصلادة ويعود سبب هذا إلى تجمع الدقائق المترسبة وتكوين جسيمات أكبر حجما فضلا عن فقدان انفعالات التطابق بين الأرضية والدقائق المترسبة[٢١]، علاوة على أن المعاملة الحرارية تعمل على تكوين أطوار وسطية ناتجة عن العمليات الانتشارية لعناصر السبك (النحاس والمغنيسيوم)، وهذا ما

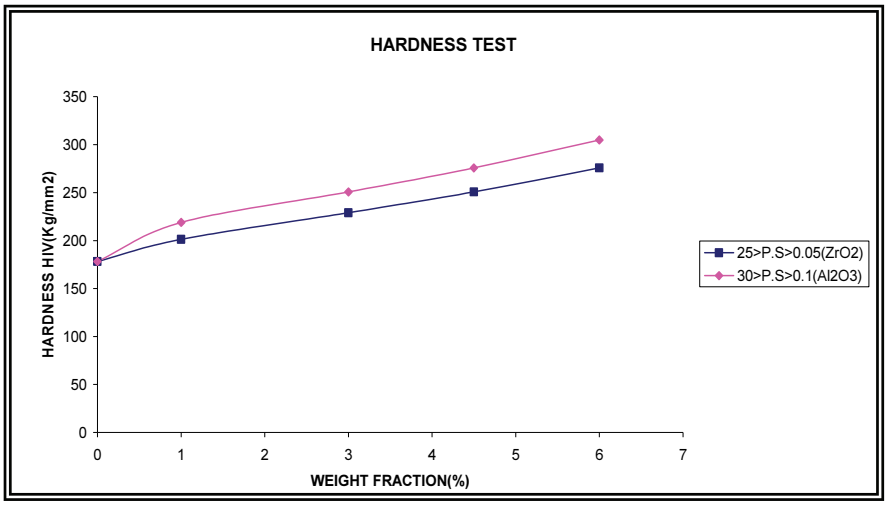
توثقه نتائج فحص حيود الأشعة السينية في الجدول٣، إذ يلاحظ ظهور الطور ($Mg_2Cu_6Al_5$) والذي يعمل على تأخير عملية ترسيب الطور ($CuAl_2$) وبالتالي انخفاض في معدل تشكيل عوائق لحركة الانخلاعات مما يؤدي إلى انخفاض قيم الصلادة.



شكل ٢. تأثير مدة التعتيق في قيم الصلادة للسبيكة الأساس.

أما بعد إجراء عملية التشكيل بعد المعاملة المحلولية نلاحظ زيادة قيم الصلادة للسبيكة الأساس عما كانت عليه قبل التشكيل وانخفاض المدة المطلوبة للوصول إلى قيم الصلادة العظمى، ويعود السبب في ذلك الى أن عملية التشكيل على البارد تؤدي الى زيادة عدد عيوب البلورية، مما يزيد من قيم مقاومة الشد وانخفاض اللدونة، كما أن التشكيل على البارد يزيد من سرعة التعتيق بسبب تكون فراغات كثيرة تساهم في سرعة انتشار الأطوار المترسبة أي زيادة سرعة عمليات التحول في البنية التركيبية للسبيكة[٢١].

أما الشكل ٣ فيبين تأثير النسبة الوزنية لدقائق كل من الزركونيا (ZrO_2) والألومينا (Al_2O_3) المضافة إلى سبيكة الأساس في قيم الصلادة للمواد المتراكبة المحضرة والمتمثلة بمجموعتين (A)، (B) بعد إجراء المعاملة المحلولية لها عند درجة حرارة ٤٩٥°م، إذ يلاحظ من الشكل أن قيم الصلادة لسبيكة الأساس تزداد مع زيادة نسب الإضافة لدقائق الألومينا أو الزركونيا لها. إذ تعمل الدقائق التي يزيد حجمها على مايكرون واحد كعوائق لتشويه سبيكة الأساس، وذلك بسبب صلادتها العالية[٢١]، و تلك التي حجمها أقل من ٠,١ مايكرون والمتشتتة داخل بنية سبيكة الأساس سوف تعمل على إعاقة حركة الانخلاعات المتكونة في مادة الأساس.



شكل ٣. تأثير النسبة الوزنية لدقائق كل من الزركونيا والألومينا المضافة للسبيكة الأساس في قيم الصلادة.

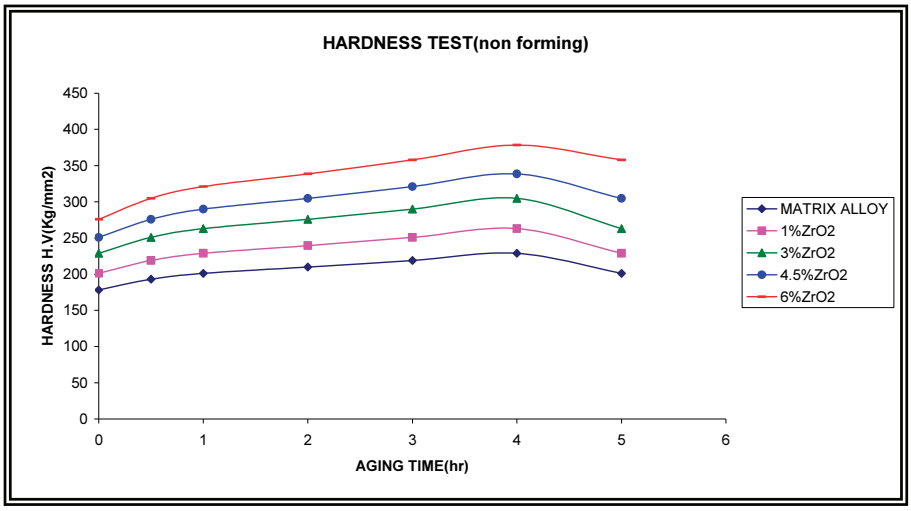
كما أن معدل الزيادة في قيم الصلادة لسبيكة الأساس تزداد مع زيادة نسب الإضافة لكل من دقائق الألومينا والزركونيا، ويمكن توضيح ذلك بأن هذه الدقائق عند توغلها في البنية الأساس وبنسب وزنية وأحجام مختلفة سوف يؤدى إلى تغير بعض العوامل ومن ضمنها المسافة بين الدقائق .

ويلاحظ من الشكل ٣ أن معدل الزيادة في قيم الصلادة متناظرا في كلا المجموعتين بالرغم من أن قيم الصلادة للمجموعة (B) تزيد قليلا عما هي عليه في المجموعة (A) ويعود سبب ذلك إلى الخواص الميكانيكية العالية لمادة الألومينا مقارنة مع مادة الزركونيا إذ تبلغ مقاومة الشد القصوى (U.T.S) للألومينا 250-550 Mpa وللزركونيا 100-700 MPa على التوالي بينما يبلغ معامل يونك (Young Modulus) للألومينا 285-392 GPa وللزركونيا 160-241 GPa على التوالي[٢٢].

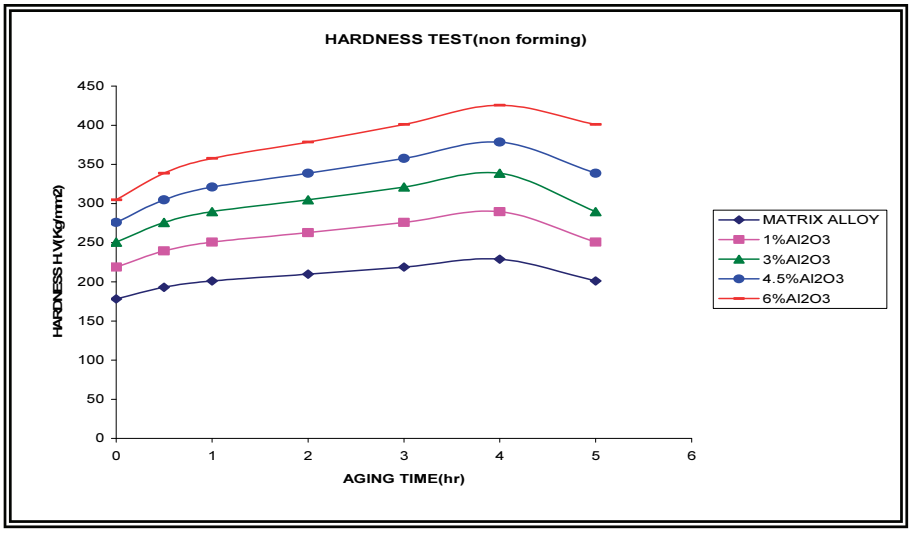
يبين الشكل ٤ أن إضافة دقائق التقوية لا يؤثر في مراحل التعتيق. إذ إن قيم الصلادة لكافة السبائك تزداد مع زيادة مدة التعتيق لتصل إلى قيمها العظمى عند مدة تعتيق مقدارها ٤ ساعات، ويعود السبب في ذلك إلى تفكك المحلول الجامد المفرط التشبع في السبيكة أثناء مراحل التعتيق وظهور الأطوار المستقرة مثل الطور ($CuAl_2$) والتي تؤدي إلى عرقلة حركة الانخلاعة، وبالتالي إلى زيادة قيم الصلادة.

٤-٣ نتائج فحص الكلال Result of Fatigue Test

يبين الشكل٥ نتائج فحص الكلال للسبيكة الأساس ويلاحظ عند سعة الإجهاد العالية يكون عدد دورات الفشل قليلا نتيجة التشوه المرن – اللدن (Elastic-Plastic-Fracture Mechanism "E.P.F.M.")، الذي يحدث على سطح المعدن وهذا يؤدي إلى نمو الشق الذي يؤدي إلى الفشل، أما عندما تكون سعة الإجهاد منخفضة فإن عدد الدورات المؤدية إلى الفشل تكون عالية نتيجة الفشل المرن المعروف بميكانيكية الكسر الخطي المرن (Linear Elastic Fracture Mechanism "L.E.F.M.").

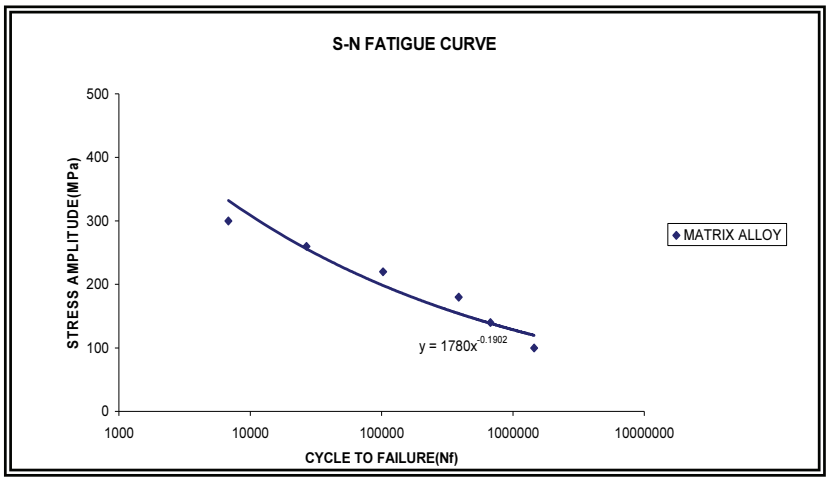


(a)



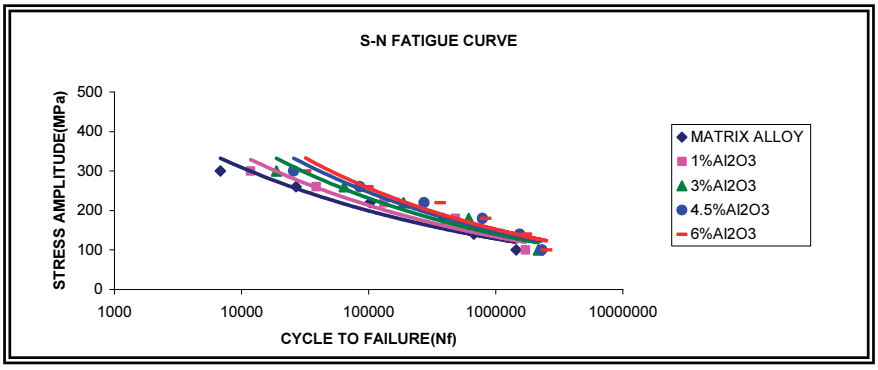
(b)

شكل (٤). تأثير مدة التعتيق الاصطناعي في قيم الصلادة للسبيكة الأساس المقواة بـــدقائق الزركونيا (a) والألومينا (b).

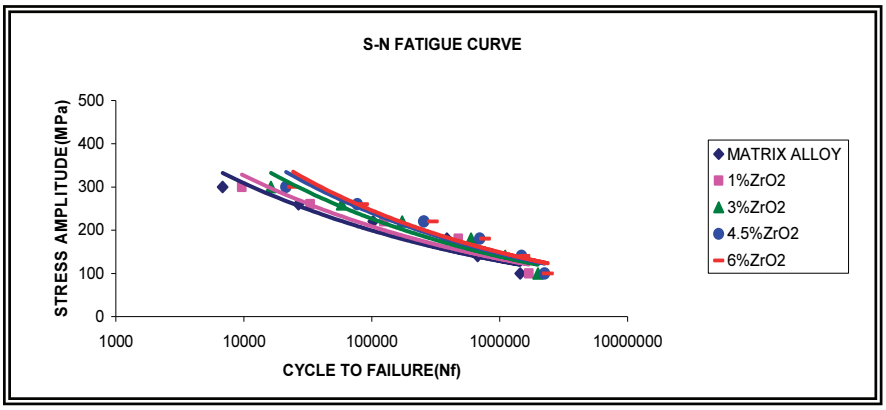


شكل ٥. العلاقة بين سعة الإجهاد وعدد دورات الفشل لسبيكة الأساس (Al-Cu-Mg).

من الشكلين٦و٧ لسبيكة الأساس والسبائك المقواة بدقائق الألومينا من جهة ودقائق الزركونيا من جهة أخرى على الترتيب، يلاحظ أن تقوية سبيكة الأساس بدقائق الألومينا أو الزركونيا أدت إلى زيادة مقاومة الكلال عما هي عليه في سبيكة الأساس، وأن معدل الزيادة يزداد مع زيادة النسب الوزنية للدقائق المضافة، هذه الزيادة في قيم مقاومة الكلال تعود إلى طبيعة هذه الدقائق الصلدة والموزعة في سبيكة الأساس بأحجام جزيئية مختلفة، والتي تعمل على زيادة متانة السبيكة خلال آلية الإصلاد بالتشتيت ، مما أدى إلى تزايد عدد دورات الفشل للسبائك المقواة بهذه الدقائق.

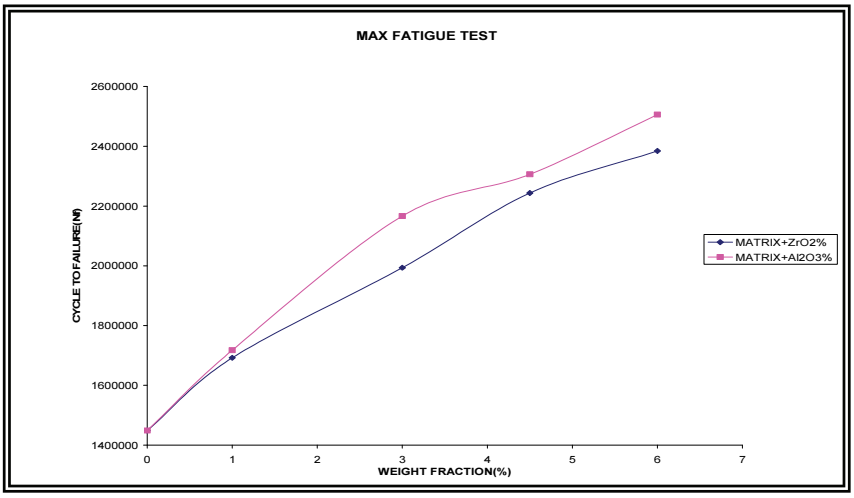


شكل ٦. العلاقة بين سعة الإجهاد وعدد دورات الفشل لكل من السبيكة والسبائك المقواة بدقائق الألومينا وبنسب وزنية (١، ٣، ٤,٥، ٦) ٪.

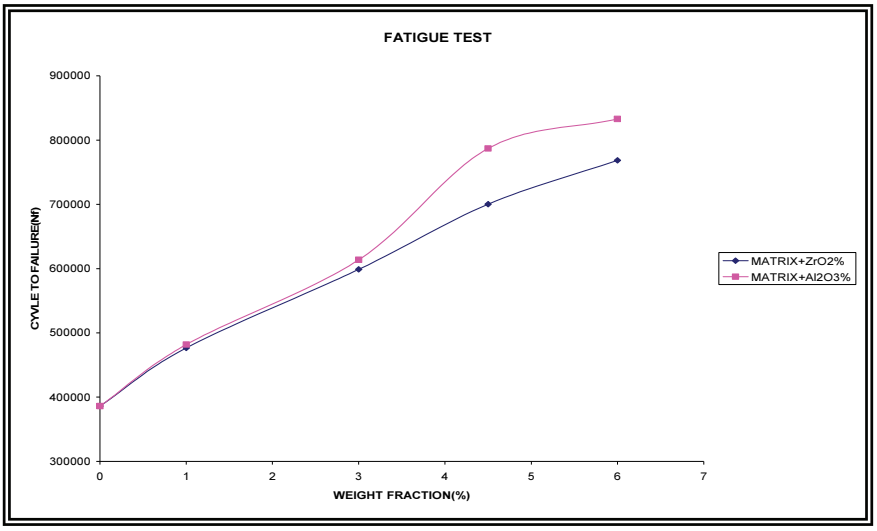


شكل ٧. العلاقة بين سعة الإجهاد وعدد دورات الفشل لكل من السبيكة الأساس والسبائك المقواة بدقائق الزركونيا وبنسب وزنية ١، ٣، ٤,٥، ٦٪.

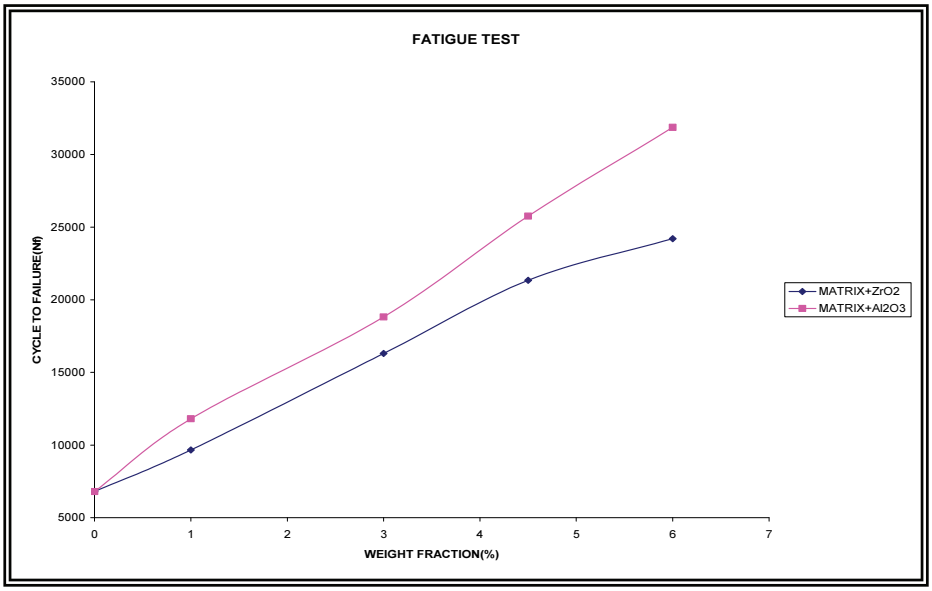
ولتوضيح دراسة تأثير النسب الوزنية المضافة من دقائق التقوية في دورات الفشل للسبائك المحضرة تم إنشاء العلاقة البيانية بين عدد دورات الفشل والنسب الوزنية المضافة لدقائق التقوية بثبوت الإجهاد المسلط والبالغ(100،180،300) MPa والمتمثلة بالأشكال ٨-١٠ على الترتيب.



شكل ٨. العلاقة البيانية بين عدد دورات الفشل والنسبة المئوية لدقائق التقوية المضافة بثبوت الإجهاد المسلط والبالغ 100 MPa .



شكل ٩. العلاقة البيانية بين عدد دورات الفشل والنسبة المئوية لدقائق التقوية المضافة بثبوت الإجهاد المسلط والبالغ 180 MPa .



شكل ١٠. العلاقة البيانية بين عدد دورات الفشل والنسبة المئوية لدقائق التقوية المضافة بثبوت الإجهاد المسلط والبالغ 300 MPa.

حيث نلاحظ من هذه الأشكال أن معدل الزيادة في قيم مقاومة الكلال متناظرة في كلتا المجموعتين (A & B) سوى فارق زيادة قليلة في عدد دورات الفشل(Nf) بالنسبة للمجموعة (B) المدعمة بدقائق الألومينا مقارنة مع المجموعة (A) المدعمة بدقائق الزركونيا ويعود سبب ذلك إلى الخواص الميكانيكية العالية التي تتمتع بها دقائق الألومينا مقارنة مع دقائق الزركونيا[٢٢].

إن الزيادة في الصلادة وعدد دورات الفشل عند فحص الكلال يمكن أن ينسب إلى وجود دقائق الألومينا أو الزركونيا في سبيكة الأساس بنسب وزنية مختلفة تعمل على تغير المسافة بين لدقائق علاوة على تغير معدل المسار الحر(m.f.p) والذي يتناسب عكسيا مع الكسر الحجمى للدقائق المضافة وطبقا للعلاقة الآتية[٢١]:

$$m.f.p = \frac{2d}{3V_p}(1 - V_p) \qquad (١)$$

حيث إن:

d: حجم الدقائق (مايكرون).

V_p: الكسر الحجمي للدقائق المضافة.

إن وجود مثل هذه الدقائق ستعمل على إعاقة حركة الانخلاعة، وسوف يكون معدل الإعاقة أكبر عند زيادة النسب الوزنية للدقائق المضافة. ولكي تمر الانخلاعة خلال الدقائق المشتتة في طور سبيكة الأساس لا بد أن يكون الإجهاد المسلط كافيا لحني الانخلاعة. وهذا الإجهاد (T_i) يتناسب عكسيا مع المسافة بين الدقائق(D_p) وحسب العلاقة الآتية[٢١]:

$$T_i = \frac{G_m * b'}{D_p} \qquad (٢)$$

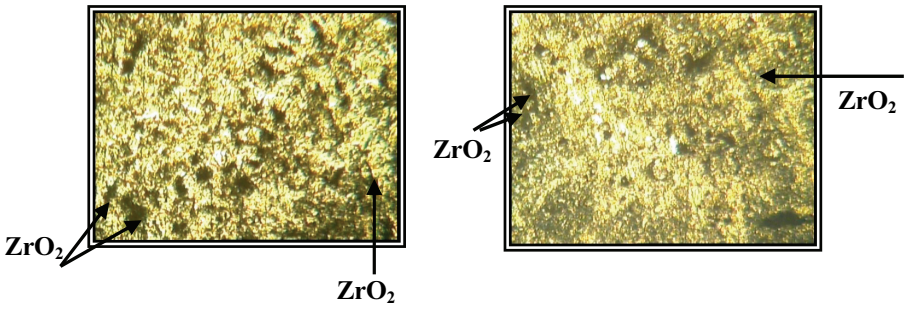
G_m: معامل القص للمادة الأساس.

b' : متجه بيرجر.

ويتبين من هذه العلاقة انه عند التشتيت المتجانس لدقائق التقوية سوف تقل المسافة بين الدقائق(Dp) مع زيادة نسبة الدقائق المضافة، وعليه سوف يحتاج إلى إجهاد أكبر لمرور الانخلاعة خلال هذه الدقائق وبالتالي إلى زيادة قيم كل من الصلادة ومقاومة الكلال.

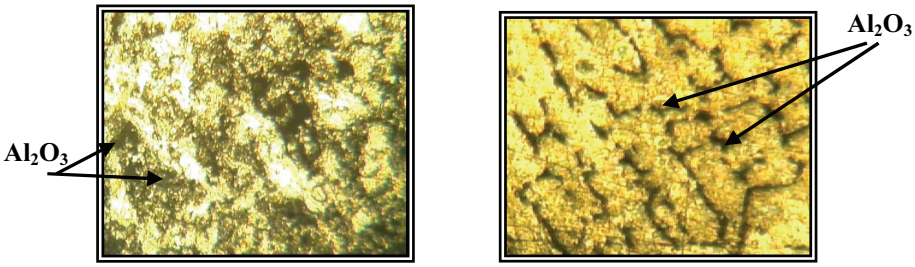
٤-٤ نتائج الفحص المجهري Result of Microstructure Test

إن البنية المجهرية للسبيكة الأساس (Al-Cu-Mg) قبل وبعد المعاملة المحلولية والتعتيق، عبارة عن محلول جامد (Solid Solution) متكون من النحاس في الألمنيوم وقد لوحظ كبر الحبيبات ووجود عيوب السباكة كالفجوات والانعزال، أما بعد المعاملة فوجد أن السبيكة الأساس عبارة عن حبيبات ناعمة ومتجانسة نوعا ما. فالشكلان (١١) و (١٢) يبينان البنية المجهرية للمادة المتراكبة المقواة بدقائق الزركونيا من جهة ودقائق الألومينا من جهة أخرى على التوالي قبل وبعد المعاملة المحلولية والتعتيق، إذ يلاحظ توزيع دقائق التقوية في أرضية مادة الأساس وترسبها على الحدود البلورية وضمن الحبيبات وهذا ما تؤكده نتائج حيود الأشعة السينية بظهور الأطوار المتمثلة بالزركونيا والمبينة في الشكل (1b) والجدول (٣) عند الزوايا (٧٧،٥) وكذلك الأطوار المتمثلة بالألومينا والمبينة في الشكل (1c) يبينها الجدول (٤) عند الزاوية (٧٧،٧)، وكذلك الطور المترسب وتوزيعها بشكل متجانس والذي تؤكدها نتائج فحص الأشعة السينية شكل(abc1) والتي تبينها الجداول ٢-٤ ، التابعة لحيود الأشعة السينية بظهور الطور الثاني ($CuAl_2$) في سبيكة الأساس والمادة المتراكبة، كما يلاحظ أيضا أن دقائق التقوية قد تداخلت ما بين هذه الأطوار.



(a) مادة متراكبة مضافاً إليها (6%) (ZrO_2) قبل المعاملة **(b)** مادة متراكبة مضافاً إليها (6%) (ZrO_2) بعد المعاملة

شكل ١١. البنية المجهرية للمادة المتراكبة (b,a) المقواة بدقائق الزركونيا قبل وبعد إجراء المعاملة المحلولية. قوة التكبير (320X).



(a) مادة متراكبة مضافاً إليها (٦)% (Al_2O_3) قبل المعاملة **(b)** مادة متراكبة مضافاً إليها (٦)% (Al_2O_3) بعد المعاملة

شكل ١٢. البنية المجهرية للمادة المتراكبة (b,a) المقواة بدقائق الألومينا قبل وبعد إجراء المعاملة المحلولية. قوة التكبير (320X)

٥. الاستنتاجات

١- أدت عملية التشكيل والمعاملة الحرارية إلى تقليل مدة التعتيق المطلوبة للوصول إلى قيم الصلادة العظمى لسبيكة الأساس والمادة المتراكبة المنتجة.

٢- إن إضافة دقائق الألومينا (Al_2O_3) من جهة ودقائق الزركونيا (ZrO_2) من جهة أخرى وتشتيتها في بنية السبيكة الأساس أدت إلى زيادة قيم الصلادة وأن نسبة الزيادة تزداد بزيادة نسبة الدقائق المضافة.

٣- التعتيق لمدة مقدارها (٤) ساعات أدى إلى الحصول على قيم الصلادة العظمى لكافة السبائك المحضرة والمدعمة بدقائق الألومينا أو الزركونيا.

٤- إن قيم مقاومة الكلال والصلادة للمادة المتراكبة المنتجة أعلى مما هي عليه في السبيكة الأساس، كما تزداد هذه القيم مع زيادة النسب الوزنية لدقائق التقوية المضافة لسبيكة الأساس.

٥- إن قيم مقاومة الكلال والصلادة بالنسبة للمادة المتراكبة المقواة بدقائق الألومينا هي أعلى من قيم مقاومة الكلال والصلادة للمادة المتراكبة المقواة بدقائق الزركونيا، ولكن في كلتا الحالتين تكون ذات خواص ميكانيكية أعلى مما هي عليه في السبيكة الأساس.

٦- أثبتت نتائج الفحص بحيود الأشعة السينية ظهور دقائق الطور الثاني ($CuAl_2$) في السبيكة الأساس والمادة المتراكبة، فضلا عن ظهور دقائق كل من الألومينا والزركونيا.

البحوث المستقبلية

هناك عمل جار بدراسة مقاومة الكلال ومقاومة الشد والصلادة عند درجات استخدام عالية، ودراسة أخرى في نفس المجال باستخدام دقائق الألومينا والزركونيا النانوية. بالإضافة إلى دراسة المعالجة الحرارية المزدوجة على خواص الكلال.

الرموز المستخدمة

(T_i): الإجهاد
V_p: الكسر الحجمي للدقائق المضافة
(D_p): المسافة بين الدقائق

d: حجم الدقائق(مايكرون)
b': متجه بيرجر
(m.f.p): معدل المسار الحر
G_m: معامل القص للمادة الأساس

المراجع

[١] **Chatterjee, U.K.** and **Dhindaw B.K**., **"**Synthesis of Aluminum- Cementite Metal matrix composite by mechanical alloying**"**. *International Conference on Advances in Materials and Materials Processing (ICAMMP-2006), 3-5 February (2006)* 79-85.

[٢] **Ala- Kleme, S., Kivikyto- Reponen, P., Liimatainen, J., Hellman, J. and Hannula, S., "**Abrasive wear properties of metal matrix composites produced by hot isostatic pressing**",** *Estonian Acad. Sci. Eng.,* **12**: 445-454(2006).

[٣] **Mortensen, A., "**Melt Infiltration of metal matrix composites, in comprehensive composite materials**",** *Metal Matrix Composites*, T.W. Clyn (ed.), Elsevier, 3 pp: 521-54 (2000).

[٤] **Massardier, V.** and **Merle, P.,** "Mechanisms of Interaction Controlling the Kineties of Zone Formation in MMC*"* *Materials Science and Eng*., **A249**: 109-120 (1998).

[٥] **Lou, D., Hellman, J., Luhnlima, D., Liimatainen, J.** and **Lindroos, V.K.**, **"**Interaction between tungsten carbide (WC) particulates and metal matrix in WC- reinforced composites", *Mater. Sci. Eng.*, **A340:** 155-162(2003).

[٦] **Maindal, A., Chakraborty, M.** and **Murty, B.S., "** Microstructural Evolution of Al–Si Based Composites Reinforced with In – Situ TiB_2 Particles", *International Symposium of research students on Material Science and Engineering (ISRS- 2004) December*, pp:20-22 (2004) chennat.

[٧] **Carvalho, P.A., Fonseca, I., Marque, M.T., Correia, J.B., Almeida, A.** and **Vilar, R.,** "Characterization of Copper- Cementite nano composite produced by Mechanical Alloying", *Acta Materialia*., **53**: 967-976(2005).

[٨] **Ravi, K.R., Pillai, R.M., Pai, B.C.** and **Chakraborty, M.,** " Seperation of matrix alloy and reinforcement from Aluminum metal matrix composites scrap by salt flux addition", *Bull. Mater. Sci.:***30** 393-398(2007).

[٩] **Tseng, M.K., Jin, Z.H.** and **Sun, F.C.,**" Effect of Magnisium Segregation To Grain Boundary on Corrosion Fatigue Crack Growth In An Al-Mg-Cu Alloy**"** Fatigue 90, ol.III, *Proceeding of the Fourth International Conference on Fatigue and Fatigue Thresholds, Honolulu, July* (1990).

[١٠] **Sarioglu, F.** and **Orhaner, F.O. "**Effect of prolonged heating at 130^0C on fatigue crack propagation of 2024 Al alloy in three orientation", *Materials Science and Engineering,* **A 248:** 115-119 (1998).

[١١] **Bystritskii, V., Garate, E., Earthman, J., Lavemia E., Peng, X.** and **Kharlov, A.,"**Fatigue properties of 2024-T_3And 7075-T_6 aluminium alloys modified using plasma enhanced ion beams**",** *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **32:** 47-53(1999).

[١٢] **Fouret, C.** and **Degallaix, S.**، "Experimental and numerical study of the low-cycle fatigue behavior of a cast metal Matrix composite Al-SiCp*", International journal of Fatigue***, 24** : 223-232(2002).

[١٣] **Chen, Z.Z.** and **Tokaji, K.,** "Effect of particle size on fatigueCrack initiation and Small crack growth iniCParticulate-reinforced aluminum alloy composite, *Materials Letters,* **58/17-18** :2314-2321(2004).

[١٤] **Ozdemir, I.** and**Onel, K.**، "Thermal Cycling behavior of An extruded aluminium alloy /SiCp composite", *Composites,* B35: 379-384(2004).

[١٥] **Bayraktor, E., Masounave, J., Caplain, R.** and **Bathias C.,** "Manufacturing and damage mechanisms in metalMatrix composites", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **31/2:** 294-300(2008).

[١٦] Norton R.L., ***"Machine Design An integrated Approach"*** Prentic Hall, USA, 1998 .

[١٧] **عيسى صالح، سهامة،** "تصليد سبائك الألمنيوم بأكثر من آلية"، *الهندسة والتكنولوجيا*، **المجلد الثاني** (١٩) :٧-١٨ (١٩٩٣).

[١٨] **الجرجري، عدنان إبراهيم،** "تاثير إضافة الألومينا على قابلية الإصلاد بالتشتيت لسبيكة الألمنيوم- نحاس"، *رسالة ماجستير*، هندسة الإنتاج والمعادن، الجامعة التكنولوجية (٢٠٠١).

[١٩] **الجنابي، ميرفت مهدي،** "دراسة الخواص الميكانيكية لمتراكبات ذات اساس سبيكة (**Al-Cu-Mg**)"، *رسالة ماجستير*، قسم العلوم التطبيقية، الجامعة التكنولوجية (٢٠٠٥).

[٢٠] **Basavarajappa, S., Chandramohan, G., Subramanian, R.** and **Chandrasekar, A.,** "Dry Sliding Wear behaviour of Al 2219/SiC metal matrix Composites" *Material Science Poland*, **24** : 357-363(2006).

[٢١] **Porter, D.A.** and **Easterling, K.E.,** "*Phase Transformations in Metals and Alloys*"2nd.ed.Champan and Hall India(1992).

[٢٢] **Michael, F. A., David, R.** and **Jones., H.,** *"Engineering Materials",* Third Edition, Published Elsvier Ltd. Press, Hungary (2005).

Effect of Ceramic Particles Addition on the Hardness and Fatigue Values of the Composite Metal Matrix (Al-Cu Mg)

Sahama E. Salih, Sahib.M.Al-Saffar, and **Sarmad I. Ibrahim**

University of Technology- Materials Engineering Department, Baghdad, Iraq

Abstract. This research had present the preparation of bars with length of about(13cm)and a diameter of (1.5) cm of composite material with metal matrix represented by (Al-Cu-Mg) cast reinforced by (ZrO_2) or (Al_2O_3) particles with chosen weight percentages (1, 3, 4.5, 6) wt %.

The reference alloy and the composite material were prepared by casting method and using vortex technique in order to disperse reinforced particles homogeneously in the reference alloy. In addition, two main groups of composite materials were prepared depending on the type of reinforced materials, the first group included composite material reinforced by (ZrO_2) particles of Particles size (25μm>p.size≥0.05μm), while the second group included composite material reinforced by(Al_2O_3) particles of particles size (30μm>p.size≥0.1μm).

The study focused on the effect of solution heat treatment at (495)C° and the following forming process. Results of fatigue and hardness tests revealed an increase in fatigue resistance and hardness by addition of reinforced particles.

The effect of type of reinforced particles on the mechanical properties was clearly noted. An increase in fatigue resistance and hardness of composite material reinforced by (Al_2O_3) particles was higher compared to the reinforced by (ZrO_2) particles. Their values were more than in the reference alloy.

Keywords : Aluminum alloys matrix composite, (ZrO_2) and (Al_2O_3) particles, Fatigue strength, hardness.