

## دراسة خواص الشد عند درجات الحرارة المرتفعة للمواد المترابكة من سبائك الألمنيوم - كربيد السليكون

د. نوال عزت، \* د. فلك أسامة \*\* وعمار جبار \*

تاريخ التسلم: 2004/4/26

تاريخ القبول: 2005/4/17

### الخلاصة

يهدف البحث الى دراسة سلوك التشوه في الدرجات الحرارية المرتفعة لسبيكة (AL-Mg-Si) المقواة بكربيد السليكون ومقارنته مع سلوك سبيكة الأساس تحت تأثير أحمال الشد، تم تحضير كل من سبيكة الأساس والمادة المترابكة، إذ استخدمت طريقة السباكة بالمزج (Stir-Casting) لتحضير المادة المترابكة، بعدها تم إجراء عملية التشكيل بالدرفلة والمعالجة الحرارية على العينات المنتجة. أجريت اختبارات الشد عند درجات حرارية (110, 240, 320 °C) ثم أجري فحص البنية المجهرية باستخدام المجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني الماسح علوة على فحص الصلادة وتحليل حيود الأشعة السينية لمعرفة تأثير إضافة دقائق كربيد السليكون على سلوك المادة المترابكة. لوحظ من نتائج فحص البنية المجهرية بأن المادة المترابكة تمتلك بنية مجهرية أنعم مقارنة بالسبيكة الأساس كما ظهر إن توزيع دقائق كربيد السليكون كان أفضل في بنية المادة المترابكة بعد إجراء عملية الدرفلة. أثبتت نتائج فحص الصلادة إن الزمن اللازم للوصول إلى أعلى صلادة بعد إجراء عملية المعالجة الحرارية كان أقل للمادة المترابكة مقارنة بالسبيكة الأساس. كما أظهرت نتائج اختبار الشد إن المادة المترابكة تمتلك قيم مقاومة قصوى أعلى مقارنة بالسبيكة الأساس حتى عند درجات الحرارة المرتفعة لكن بالمقابل لوحظ انخفاضاً واضحاً في قيم المطيلية وعند الفحص باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح لوحظ إن مقطع الكسر يكون مطيبي.

الكلمات المرشدة: خواص الشد، مترابكات ألمنيوم، كربيد السليكون.

### Study The Tensile Properties At High Temperature For Composite Material Of Aluminum-Silicon Carbide

#### Abstract

The aim of the present research is to study the deformation behavior of (AL-Mg-Si) Alloy reinforced with (SiC) particles at elevated temperature under active load of tension.

The stir-casting technique was used to fabricate both matrix alloy and the composite material rolling process was used as forming method as well as heat treatment was done before testing. Tension test were done at temperature (110, 240, 320) °C then microstructure, hardness test were also done.

The result shows that the composite materials show fine microstructure with matrix alloy, as well as the distribution of SiC was uniform in the structure after rolling process.

Also, the result show that the ultimate tensile strength was higher for composite material than reference alloy, but ductility was less and the SEM result of fracture sections showed that the fracture behavior of composite material was ductile.

\* قسم هندسة الإنتاج والمعادن / الجامعة التكنولوجية

\*\* مركز بحوث البنية / الجامعة التكنولوجية

**المقدمة:**

أدى التقدم في إنتاج المواد المترابكة ذات الأساس المعدني والتقوية غير المستمرة إلى العديد من الاستخدامات في التطبيقات الصناعية كصناعة السيارات والأجزاء الخارجية للمكائن [1، 2].

تميز المترابكات ذات التقوية غير المستمرة بإمكانية تشكيلها باستخدام طرائق التصنيع التقليدية وتتراوح حجم دقائق التقوية التي تكون بشكل كاربيدات أو أكاسيد ما بين (100 - 1) micron) كما إن الكسر الحجمي لها لا يتجاوز 30 % ويمكن الدمج في هذه المترابكات ما بين المقاومة العالية والجساءة مع الكثافة الواطئة ومقاومة البلى [1-5].

اتجه بعض الباحثين إلى دراسة تأثير مواد التقوية على الخواص الميكانيكية كما اتجه البعض الآخر إلى دراسة تأثير إضافة مواد التقوية على سلوك التعطيق [6، 7].

ونظرا لأهمية دراسة خواص المواد المترابكة خاصة ذات الأساس من الألمنيوم وسبائكها والمقاومة بدقائق سيراميكية فقد تركزت بعض التجارب والاختبارات حول تأثير إضافة دقائق التقوية على خواص المواد المترابكة، المعاملات الحرارية والتشكيل بطرائق التصنيع المختلفة كما اتجه بعض الباحثين إلى دراسة تأثير إضافة دقائق التقوية على الخواص الميكانيكية وسلوك الغسل عند درجات الحرارة المختلفة [8-13]. يعتبر البحث الحالي محاولة لدراسة سلوك وخواص الشد للمواد المترابكة ذات الأساس المعدني المنتجة بطريقة السباكة عند الاستخدام أو التعرض إلى درجات حرارية مرتفعة.

**الجزء العملي:****1. تحضير سبيكة الأساس:**

استخدمت في هذا البحث سبيكة الأساس (Al-Mg-Si) (Master Alloy) التي تم تحضيرها بإضافة قطع من سبيكة (Al-Mg) إلى منصهر الألمنيوم النقي تجارياً ثم أجريت عملية التخليق لغرض

الحصول على النسب المطلوبة والجدول (1) يوضح نتائج التحليل الكيميائي للسبيكة المستخدمة في البحث.

**2. تحضير المادة المترابكة بطريقة السباكة:**

تم صهر (450 gm) من سبيكة الأساس باستخدام فرن الصهر المزود بخلاط والمبين بالشكل (1)، إذ تم استخدام بودقة من الألومينا لغرض الصهر وتم رفع درجة الحرارة بحدود (750 °C) وبعد اكتمال الانصهار تم إجراء الخلط عند سرعة (648 r.p.m) لمنصهر السبيكة مع خفض درجة الحرارة إلى أن تصل إلى (650 °C) والتي تكون فيها السبيكة بالحالة شبه الصلبة (Mushy State)، بعدها تمت إضافة دقائق كربييد السليكون بقطر أقل من (9.86 μm) بصورة تدريجية إلى مركز الدوامة بعد أن تم تسخين الدقائق السيراميكية إلى درجة حرارة (250 °C)، واستمرت عملية الخلط بعد الانتهاء من الإضافة داخل الفرن لمدة (10 min). بعدها تم إعادة التسخين للخليط إلى درجة حرارة (700 °C) ثم أجريت عمليات الصب في قوالب معدنية تم تسخينها مسبقاً لدرجة حرارة (200 °C) وبذلك تم الحصول على صببات من المادة المترابكة بأبعاد (45×30×20) ملم، كما تم الحصول على صببات من سبيكة الأساس بنفس الأبعاد. أجريت عمليات التشغيل لهذه الصببات باستخدام ماكينة التفريز للحصول على نماذج بأبعاد (45×8×20) ملم وذلك لغرض تهيئتها لإجراء عملية الدرفلة.

**3. عملية التشكيل:**

بعد تقطيع العصبوبات تم تسخينها إلى درجة حرارة (420°C) وتم أبقاها العينات داخل الفرن عند هذه الدرجة الحرارية لمدة ساعة وذلك لضمان حصول التجانس الحراري وبعد أخراج العينات من الفرن أجريت عملية الدرفلة وبتخصر مقداره (0.1 mm) لكل تمريرة وبعد ثمان تمريرات تم إعادة العينات إلى الفرن لغرض إعادة

السبيكة الأساس و(20% wt) كارييد  
السليكون والتي تم تحضيرها في البحث  
ونائج الفحص المجهرية موضحه في  
الشكلين (2) و (3) على التوالي. أما  
الشكلان (4) و (5) فيوضحان البنية  
المجهرية لكل من سبيكة الأساس والمادة  
المتراكبة بعد إجراء عملية الدرفلة والمعاملة  
الحرارية ويلاحظ من الأشكال حدوث  
الترسيب لدقائق الطور الثاني ( $Mg_2Si$ )  
وبشكل واضح في كل من سبيكة الأساس  
والمادة المتراكبة الذي تم تشخيصه من خلال  
فحص حيود الأشعة السينية للسبيكة الأساس  
والمادة المتراكبة بعد إجراء المعاملات  
الحرارية والموضحة في الجداول (4,5)  
كما يلاحظ إن توزيع الأطوار الثانوية ومادة  
التقوية للمادة المتراكبة الدرفلة على الساخن  
(Hot Rolled) يكونان أكثر انتظاماً.

حسبت قيم الصلادة بعد ان إجريت المعاملة  
الحرارية لكل من السبيكة الأساس والمادة  
المتراكبة التي تشمل إجراء المعاملة  
المحلولية المتبوعة بعملية التعتيق باستخدام  
أزمان تعتيق مختلفة لغرض الوصول إلى  
الزمن الذي يعطي أعلى قيمة صلادة للمادة  
المتراكبة والسبيكة الأساس. والشكل (6)  
يوضح نتائج فحص الصلادة.

ولوحظ من النتائج إن أعلى قيمة للصلادة  
يتم الحصول عليها عند زمن تعتيق (11)  
ساعة للمادة المتراكبة، أما السبيكة الأساس  
فأعلى قيمة صلادة لها عند زمن تعتيق (18)  
ساعة.

تم إجراء اختبار الشد لكل من المادة  
المتراكبة وسبيكة الأساس وبمعدل انفعال  
ثابت وباتجاه موازي لاتجاه الدرفلة.

يوضح الجدول (3) نتائج اختبار الشد وقد  
تم استخراج قيم الجدول من العلاقة بين  
الإجهاد والانفعال للسبيكة الأساس والمادة  
المتراكبة عند إجراء اختبار الشد عند  
درجات حرارية مختلفة.

يلاحظ من الجدول ارتفاع قيم مقاومه الشد  
القصى للمادة المتراكبة مقارنة مع سبيكة  
الأساس حتى عند إجراء الفحص عند  
درجات حرارة ( $320^{\circ}C$ ) كما يلاحظ

التسخين ولمدة (15) دقيقة ثم إجراء عملية  
الدرفلة مرة أخرى إلى أن تم الحصول على  
نسبة التخصر المطلوبة وبحدود (50%)  
لغرض الحصول على سمك مقداره  
(4mm).

#### 4. المعاملة الحرارية:

أجريت المعاملة الحرارية للمادة  
المركبة وسبيكة الأساس وذلك بتسخينها إلى  
درجة حرارة  
( $550^{\circ}C$ ) باستخدام فرن كهربائي من نوع  
(Carbolite) والتثبيت لمدة ساعة ثم إجراء  
عملية التبريد أو الإخماد في الماء وفيما بعد  
إجراء عملية التعتيق الصناعي عند درجة  
حرارة ( $178^{\circ}C$ ) ولأزمان مختلفة هي  
(6, 10, 11, 12, 18) ساعة وذلك للحصول  
على الزمن الذي يعطي أقصى قيمة صلادة  
للمادة المركبة، وسبيكة الأساس وبعد أن تم  
تحديد زمن التعتيق المناسب تمت المعاملة  
الحرارية للمادة المتراكبة والسبيكة الأساس  
بتثبيت زمن التعتيق وكان (11) ساعة للمادة  
المتراكبة و (18) ساعة للسبيكة الأساس.

#### 5. فحص الشد:

بعد إجراء عمليات التشغيل للحصول على  
نماذج بإبعاد ملائمة لاختبار الشد وحسب  
المواصفات القياسية. أجريت عملية التشكيل  
بمعدل انفعال ثابت مقداره ( $1\text{mm/min}$ )  
وعند درجات حرارية مختلفة هي  
( $25, 110, 240, 320^{\circ}C$ ) لكل من سبيكة  
الأساس والمادة المتراكبة وأجري الاختبار  
باستخدام جهاز الشد بعد أن تم تركيب  
منظومة تسخين ملحقة وتم إبقاء العينات في  
الفرن والتثبيت عند درجة حرارة الاختبار  
لمدة نصف ساعة بعدها تم إجراء الاختبار  
على النماذج بالاتجاه الموازي لاتجاه عملية  
الدرفلة.

#### النتائج والمناقشة:

تم إجراء الفحص المجهرية لكل  
من السبيكة الأساس والمادة المتراكبة من

وعند ملاحظة منطقة الكسر للعينات لم يلاحظ حدوث تخرص واضح في العينات عند درجات الحرارة (25, 110, 240 °C)، كما إن مسار الكسر يكون بزواوية (45°) من أحد الجوانب ويستمر للمنصف بعدها يكون حبيبي (Granular)، أما عند درجة حرارة (320 °C) فيلاحظ حدوث تخرص واضح في المقطع العرضي، كما إن مسار الكسر يكون بزواوية (45°) من أحد الجوانب ويستمر للجانب الأخر (Single Shear lip).

#### الاستنتاجات:

1. الارتفاع في مقاومة الشد القصوى بالنسبة للمادة المتراكبة مقارنة مع السبيكة الأساس حتى عند درجات الحرارة المرتفعة، ولكن بالمقابل لوحظ انخفاض قيم المطيلية.
2. من ملاحظة منطقة الكسر للعينات لم يلاحظ حدوث تخرص واضح في العينات عند درجات الحرارة (25, 110, 240 °C)، كما إن مسار الكسر يكون بزواوية (45°) من أحد الجوانب ويستمر للمنصف، أما عند درجة الحرارة (320 °C) فيلاحظ حدوث تخرص في المقطع العرضي، كما إن مسار الكسر يكون بزواوية (45°) من أحد الجوانب ويستمر للجانب الأخر (Single Shear Lip).
3. من نتائج المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لمقاطع الكسر لعينات الشد يلاحظ وجود عدد كبير من النقر (Dimples) في المادة المتراكبة مما يشير إلى حدوث الكسر المطيلي وحدث تشوه لدن قبل الفشل، ويلاحظ إن شكل العكس يتغير مع تغير درجة الحرارة.

انخفاض قيم المطيلية للمادة المتراكبة مقارنة مع المادة الأساس. إن إضافة دقائق كربيد السليكون يؤدي إلى تحسين واضح في المقاومة كما يؤدي بالمقابل إلى نقصان قيم المطيلية (ductility) مقارنة مع سبائك الألمنيوم التقليدية غير المقواة. إذ إن للترابط الفعال بين SiC والسبيكة الأساس النتائج من المقاومة العالية للترابط البيني (interfacial bond) سيسمح بحصول انتقال للحمل بين السبيكة الأساس والكربيد مما يسمح بالاستفادة من المقاومة القصوى الناتجة من دمج دقائق SiC الصلبه وسبيكة الأساس المعدنية.

عند دراسة التشوه الناتج باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) على مقاطع الانكسار للنماذج التي أجري عليها فحص الشد وكما موضح في الشكلين (7) و (8) على التوالي لوحظ تكون الفجوات في السبيكة الأساس للمادة المتراكبة بالقرب من السطح البيني (الأساس/ الدقائق) إن هذه الفجوات تنشأ من التحام الفجوات المايكروية (Micro Void) في مادة الأساس ما بين دقائق SiC ومادة الأساس وعند زيادة الفجوات سيؤدي التحامها إلى نشوء الشق ومن ثم الفشل Fracture، كما يلاحظ في الشكل وجود عدد كبير من النقر (Dimples) في المادة المتراكبة مما يشير إلى حدوث الكسر المطيلي في المادة المتراكبة وحدث تشوه لدن قبل الفشل ويلاحظ أيضا إن شكل المكسر يتغير مع تغير درجة الحرارة حيث يظهر سطح الكسر بنية شبكية خشنة من النقر (Coarse Dimple Network Structure) عند الدرجات الحرارية الواطئة تتعم هذه الشبكة مع ازدياد درجة الحرارة.



الجدول (1) التحليل الكيميائي للسبيكة الأساس

Cu%	Mg%	Mn%	Fe%	Zn%	Si%	Al%
0.1337	11.45	0.4171	0.5959	0.7151	0.651	Rem.

الجدول (2) التحليل الكيميائي للسبيكة المستخدمة.

Cu%	Mg%	Mn%	Fe%	Zn%	Si%	Al%
0.018	0.919	0.022	0.472	0.097	0.718	Rem.

الجدول (3) نتائج اختبار الشد.

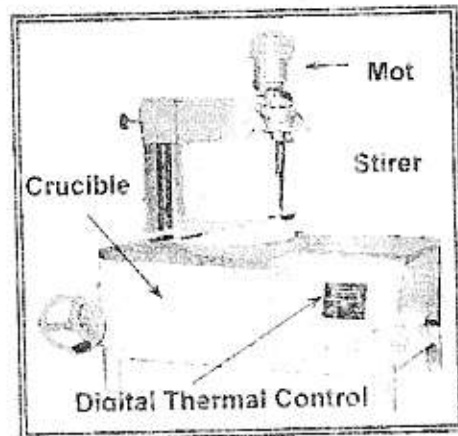
إجهاد الخضوع 0.2% Y.S (MPa)	مقاومة الشد القصوى (MPa)	المطيلية %	درجة حرارة الاختبار °C	المادة
388	557.94	1.13	25	المادة المتراكبة
220	304.1	1.36	110	
90.5	133.66	1.50	240	
89.1	107.91	1.90	320	
260	362.97	6.10	25	سبيكة الأساس
58	104.47	10.20	110	
52	70.305	27.80	240	
34	39.24	33.90	320	

الجدول (4) نتائج تحليل حيود الأشعة السينية للسبيكة الأساس بعد المعاملة الحرارية.

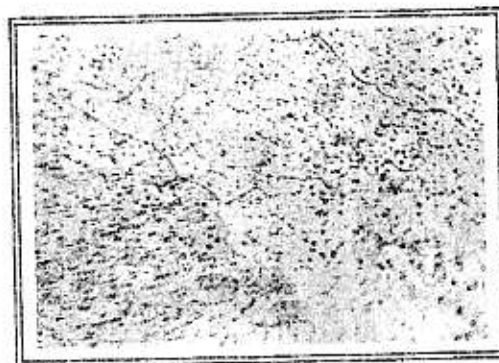
2θ	dm (Å)	ds (Å)	Phase	I/I <sub>o</sub>
38.6	2.332	2.338	Al	100
40.1	2.248	2.25	Mg <sub>2</sub> Si	100
42.2	2.141	2.13	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>	20
43.8	2.066	2.08	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>	60
44.9	2.018	2.02	Al	47
46.6	1.948	1.95	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>	30
47.7	1.906	1.92	Mg <sub>2</sub> Si	15
63.6	1.461	1.466	Mg <sub>2</sub> Si	6
65.1	1.432	1.43	Al	22
78.0	1.224	1.221	Al	24

الجدول (5) نتائج تحليل حيود الأشعة السينية للمادة المتراكبة بعد إجراء المعاملة الحرارية.

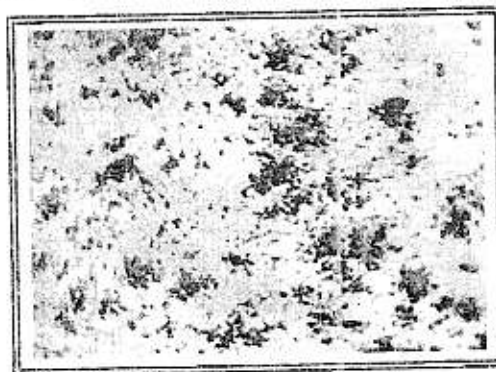
$2\theta$	$d_m$ (Å)	$d_s$ (Å)	Phase	I/I <sub>0</sub>
30.8	2.902	2.92	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>	10
33.8	2.651	2.63	$\alpha$ -SiC	50
34.7	2.585	2.57	$\alpha$ -SiC	20
36.8	2.442	2.42	$\alpha$ -SiC	10
35.7	2.511	2.51	$\alpha$ -SiC	100
38.6	2.332	2.338	Al	100
40.2	2.243	2.25	Mg <sub>2</sub> Si	100
42.3	2.136	2.12	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>	10
45.0	2.014	2.02	Al	47
46.1	1.968	1.98	$\alpha$ -SiC	10
47.2	1.925	1.92	Mg <sub>2</sub> Si	15
64.0	1.454	1.447	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>	30
64.9	1.436	1.43	Al	22
71.9	1.313	1.304	Mg <sub>2</sub> Si	40
75.1	1.264	1.252	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>	20
78.1	1.223	1.221	Al	24



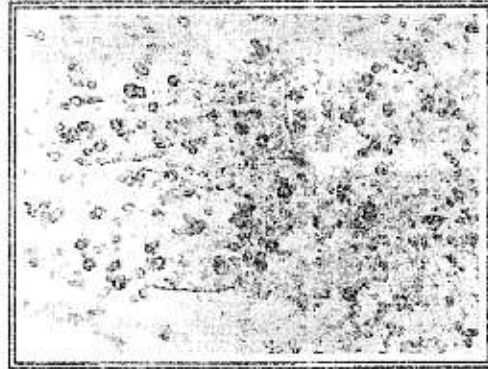
شكل (1) فرن الصهر.



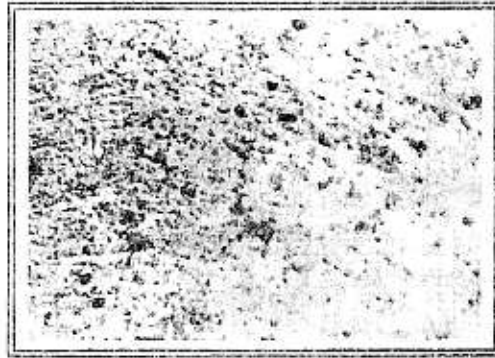
شكل (2) البنية المجهرية لسبيكة الأساس بعد عملية الصب بقوة تكبير (200X).



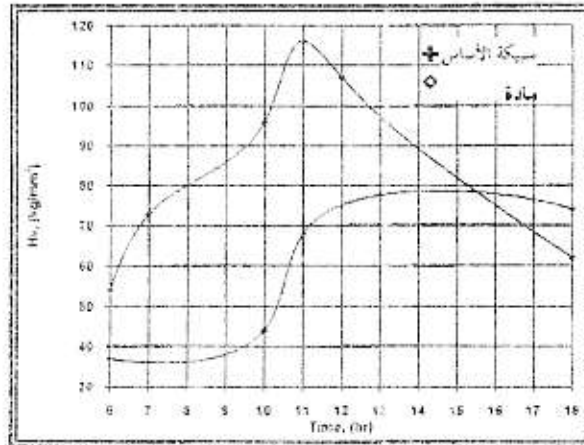
شكل (3) البنية المجهرية للمادة المترابطة بعد عملية الصب بقوة تكبير (200X).



شكل (4) البنية المجهرية لسبيكة الأساس بعد المعاملة الحرارية والدفلة بقوة تكبير (200x)

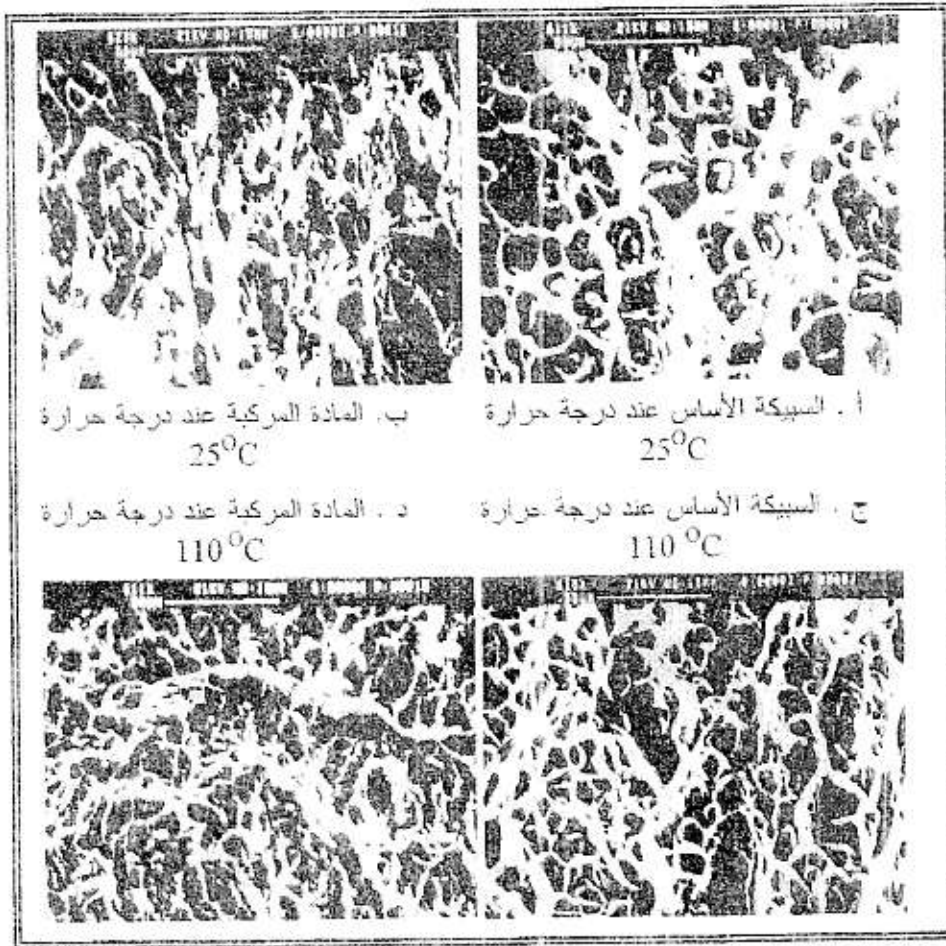


شكل (5) البنية المجهرية للمادة المترابكة بعد المعاملة الحرارية والدفلة بقوة تكبير (200X).

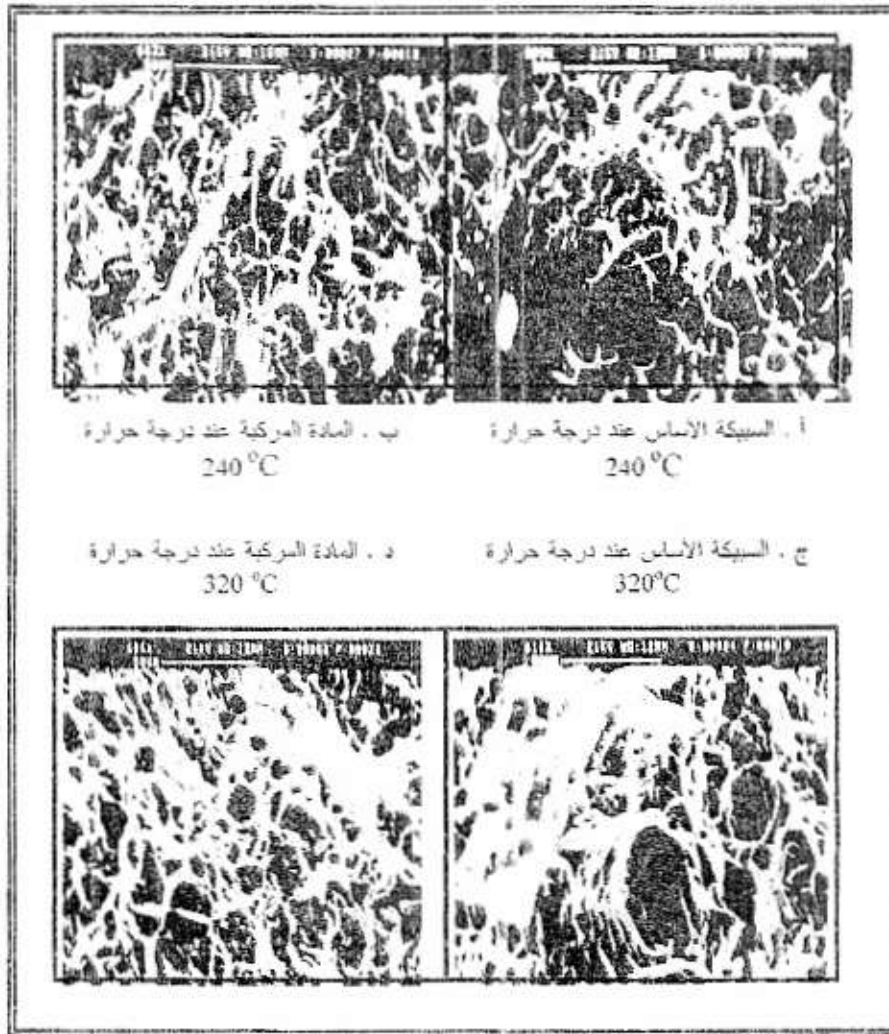


شكل (6) العلاقة بين الصلادة وزمن التفتيق عند درجة حرارة (178°C) لكل من السبيكة الأساس والمادة المترابكة.





شكل رقم (7) صور المجهر الإلكتروني الماسح لمقاطع كسر عينات الشد لسبيكة الأساس والمادة المتراكبة عند درجة حرارة (110، 25<sup>o</sup>C)



شكل (8) صور المجهر الإلكتروني الماسح لمقاطع كسر عينات الشد لسبكة الأساس والمادة المتراكبة عند درجة حرارة (240, 320) °C.

المصادر:

9. Hunt, E. et.al., J. Scripta metallurgica, Vol.24, No.5, PP.937-941, 1990.
10. Whitehouse, A.F. et.al., J.Mat.Sci. and Eng., A242, PP.57-69, 1998.
11. McQueen, H.J. et.al, J. Canadian Quarterly, Metallurgical Vol.37, No.2, PP.125-139, 1998.
12. Masanori Kiachi, Mamtimin Geni et.al., Metal Matrix composite, Annual Report, <http://KiKvanni.me.noda.sut.ac.jp>, 1999.
13. Smagorinski, M.E. et.al., J.Mat.Sci. and Eng., A224, PP.86-90, 1998.
14. Nieh, T.G. Karlak, R.F. J.Mat.Sci. Letters, PP.119-122, 1983.
15. Dutta, I. Bourell, D.L. J. Mat.Sci. and Eng., A112, PP.67-77, 1989.
16. Lilholt, H. J. of Composite Sci. and Tech., Vol.30, pp.277-294, 1985.
1. Godfrey Tanya M.T., et.al., Advanced Engineering Materials , Vol.2, No.3, , p.85, 2000.
2. Nishida Yoshinori, J. Advanced Engineering Materials, Vol.3, No.5, p.315, 2001.
3. Franck A.Girot, et.al., of Composite Sci. and Tech. 30, pp. 155-184, 1987.
4. Hasson, D.F. et.al., J. Mat.Sci., Vol.20, PP.4147- 4154, 1985.
5. Leflour, J.C., Locicero, R., J. Scripta Metallurgica, Vol.21, PP.1071-1076, 1987.
6. Nardone, V.C. and Prewo, K.M. J. Scripta Metallurgica, Vol.20, PP.43-48, 1986.
7. Nutt, S.R. and Duva, J.M. J. Scripta metallurgica, Vol.20, PP.1055-1058, 1986.
8. Abdul-Lattef, Nawal Izzat, Abdul Razzaq Ismail Khedar and S.K. Goel, J. Mat.Sci., Vol.22, PP.466-472, 1987.