

تأثير درجة حرارة التعتيق والمعالجة - الحرارية الميكانيكية في الخواص الميكانيكية لمواد مترابكة $(Al-Mg-Si) / Al_2O_3$

نوال عزت، وصاحب الصفار، ومنال حميد

الجامعة التكنولوجية - العراق

المستخلص. يهدف البحث إلى دراسة تأثير المعالجة الحرارية والمعالجات الحرارية - الميكانيكية في البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للمواد المترابكة ذات أساس من سبيكة $(Al-Mg-Si)$ المقواة بـ ١٠٪ من المواد المترابكة بحجم أقل من (٥٣) ميكرومتر، والتي تم تحضيرها باستخدام تقنية السباكة بالتحريك.

أظهرت قياسات فحص الصلادة أن الزمن الأفضل لإجراء عملية التعتيق للمادة المترابكة هو (٩) ساعات، وهو أعلى من الزمن الأفضل للمادة الأساس. بينما أظهرت نتائج الفحص المجهرية أن المعالجات الحرارية - الميكانيكية أدت إلى تعميم دقائق الألومينا وتوزيعها خلال البنية المجهرية للأساس .

أما نتائج فحص الشد، فقد بينت أن مقاومة الخضوع ومقاومة الشد للمادة المترابكة، التي تم إجراء المعالجات الحرارية الميكانيكية عليها، كانت أعلى مقارنة بالمادة الأساس ولجميع نسب التشكيل. إن تحسن الخواص الميكانيكية يعزى إلى تعميم دقائق الألومينا في البنية الأساس وعلى الحدود الحبيبية التي تؤدي إلى إعاقة النمو الحبيبي.

وعند التحليل الرياضي لنتائج اختبار الشد عند درجات الحرارة من ٢٥ - ٢٠٠ م° ظهرًا، وجد أن قيم مقاومة الشد القصوى للمادة المتراكبة المنتجة تقل مع زيادة درجة حرارة التشكيل، وأن العلاقة بينهما تتبع المعادلة التالية:

$$\sigma_u = 870 * T^{-0.299225(1 - 1.65(E))}$$

الكلمات المفتاحية: المعالجات الحرارية - الميكانيكية، المواد المتراكبة المعدنية، التعتيق

١. المقدمة

أدى الطلب المتزايد على تقليل الوزن في هياكل السيارات إلى زيادة الاهتمام في الصفائح المصنعة من سبائك (Al- Mg- Si) إذ تستخدم هذه السبيكة في تصنيع صفائح أبدان السيارات، وذلك لتقليل استهلاك الوقود وتقليل الانبعاثات الغازية. وتمتاز هذه السبائك بقابليتها على الإصلاح بالترسيب، ومقاومة تآكل جيدة تتحسن بشكل ملحوظ بعد الإصلاح بالترسيب، الأمر الذي حفز الكثير من الباحثين على تكثيف جهودهم لدراسة إمكانية استخدام هذه السبائك في إنتاج مواد متراكبة (Composite Materials) ذات أساس من الألمنيوم مقواة بدقائق سيراميكية، مثل: كاربيد البورون، وكاربيد السليكون، وكاربيد التيتانيوم، والألومينا، والسليكا، بهدف تحسين خواصها الميكانيكية بأكثر من آية ومنها الإصلاح بالنتشيت^[٤-١].

وقام الباحث (Schaefer)^[٥]، بدراسة تأثير المعالجات الحرارية- الميكانيكية على مادة متراكبة ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (٦٠٦١) ومقواة بنسبة (١٠)٪ من دقائق الألومينا (Al₂O₃) منتجة بطريقة السباكة. تضمنت المعالجات إجراء عملية الدرفلة على الساخن للمادة المتراكبة المبثوقة، واستنتج الباحث أن الدرفلة عند درجة حرارة (٥٠٠) م° تسبب زيادة في المقاومة لكن على حساب

واضح في قيمة المطيلية، لكن إجراء الدرفلة في درجة حرارة (٣٥٠) °م أدى إلى الاحتفاظ بمطيلية جيدة مع تحقق ارتفاع في المقاومة، وقام عدد من الباحثين بدراسة تأثير إضافة النحاس وزمن التعتيق المزدوج والمعالجة الحرارية - الميكانيكية على متانة سبائك (Al- Mg- Si)، استنتج الباحثون أن أعلى مقاومة تم الحصول عليها كانت عند إجراء التعتيق بدرجة حرارة (١٨٠) °م لمدة ساعتين، وكذلك عند درجة حرارة تعتيق (٢٠٠) °م لمدة ساعة واحدة وبنسبة تشكيل (٥٠)٪^[٦]. بينما توصل باحثون آخرون إلى أن التشكيل بدرجات حرارة منخفضة يحسن من الخواص الميكانيكية لهذه السبيكة، حيث يتسبب التشكيل بتحطيم وتفطيت الدقائق المترسبة أثناء عملية التعتيق^[٧].

وعند دراسة تأثير التشكيل على البارد والتعتيق على التركيب المجهري لسبيكة (Mg/Al-3) التجارية والمشكلة بنسب مختلفة من (٦٠-١٠)٪، استنتج الباحثون أن زمن التعتيق عند درجة حرارة (٢٠٠) °م يعتمد على نسبة التشكيل، فنتيجة لزيادة نسبة التشكيل ازداد معدل ترسيب الطور المستقر (β) من الطور شبه المستقر (β') مما أدى إلى انخفاض الصلادة في فترات زمنية مبكرة^[٨].

ولدراسة تحسين مطيلية سبيكة (Al-Mg) ذات السلسلة (٥٠٨٣)، التي تعاني من انخفاض في قيم المطيلية، استنتج الباحثون أنه يمكن الحصول على استطالة قصوى بحدود (٣٠٠)٪ عن طريق المعالجة الحرارية - الميكانيكية عند التعتيق بدرجة حرارة (٢٥٠) °م كما لوحظ أن انخفاض درجة حرارة التشكيل تؤدي إلى زيادة المطيلية والإبقاء عليها لفترة زمنية أطول^[٩].

قام الباحث محمد هادي علي^[١٠] بدراسة تأثير المعالجة الحرارية - الميكانيكية على خواص سبيكة (Al-Mg) تحتوى على مغنيسيوم بنسبة أقل من

(٧)٪ إذ أجرى الباحث معاملة محلولية للعينات، وتم تشكيلها بنسب تشكيل تتراوح بين (١٠ و ٣٠)٪ عند درجات حرارة مختلفة. لوحظ من نتائج الفحوصات ارتفاع قيم الصلادة بعد التعتيق بالإضافة إلى إمكانية زيادة فاعلية المعالجة الحرارية - الميكانيكية مع زيادة نسبة المغنسيوم.

يهدف البحث الحالي إلى دراسة إمكانية تحسين الخواص الميكانيكية والمتمثلة بمقاومة الشد ومقاومة الخضوع والمطيلية والصلادة للمادة المترابكة ذات أساس من سبيكة (Al-Mg-Si) والمقواة بدقائق من الألومينا (Al_2O_3)، المصنعة بتقنية السباكة بالتحريك (Stir-Casting) عن طريق المعالجات الحرارية - الميكانيكية.

٢. الجانب العملي

استخدمت سبيكة الأساس (Al - Mg - Si) الموضح تركيبها الكيميائي في الجدول رقم (١) لتحضير المواد المترابكة، وذلك بصهر السبيكة إلى درجة حرارة (٧٧٠) م°، ثم إضافة دقائق الألومينا (بحجم حبيبي أقل من ٥٣ ميكرومتر) إلى المنصهر.

جدول (١). التركيب الكيميائي للسبيكة المستخدمة في البحث.

Element	AL	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti
%wt	97.52	1.20	0.54	0.11	0.13	0.02	0.017	0.007

استخدمت طريقة السباكة بالتحريك (stir casting) وتقنية الدوامة (Vortex Technique) في خلط الدقائق مع المنصهر لضمان حصول عملية الترتيب ما بين الدقائق ومنصهر السبيكة الأساس. وبعد اكتمال الخلط تم صب المنصهر في قالب معدني مسخن إلى درجة حرارة (٣٠٠) م°. أجريت المعالجة الحرارية لغرض تحديد زمن التعتيق الأفضل وذلك بتسخين العينات إلى درجة حرارة

(٤٨٠) °م لمدة ساعتين ثم التبريد السريع بالماء، تركت العينات بعدها لمدة يومين في درجة حرارة الغرفة، ثم اجريت عملية التعتيق عند درجة حرارة (١٦٠) °م لأزمان مختلفة تتراوح بين (٢ - ١١) ساعة.

اعتمدت قيم الصلادة لتحديد زمن التعتيق الأفضل وهو الوصول إلى أعلى صلادة. ثم أجريت المعالجات الحرارية - الميكانيكية على عينات من المواد المترابطة المنتجة وفقاً للمسالك التالية:

المسلك الأول: تسخين العينات إلى درجة (٤٨٠ °م) و لمدة (٢) ساعة + تبريد سريع بالماء + تعتيق طبيعي لمدة (٢) يوم + تعتيق اصطناعي عند (١٦٠ °م) ولمدة زمنية (٦) ساعة + تبريد بطئ بالهواء).

المسلك الثاني: مشابه للمسلك الأول وبزمن تعتيق (٩) ساعات.

المسلك الثالث: مشابه للمسلك الثاني مضافا اليه تشكيل بالدرفلة عند (٢٠٠ °م) وبنسب تشكيل (٢٠)٪ + تبريد بطئ بالهواء.

المسلك الرابع: مشابه للمسلك الثالث ولكن بنسبة تشكيل (٣٠)٪.

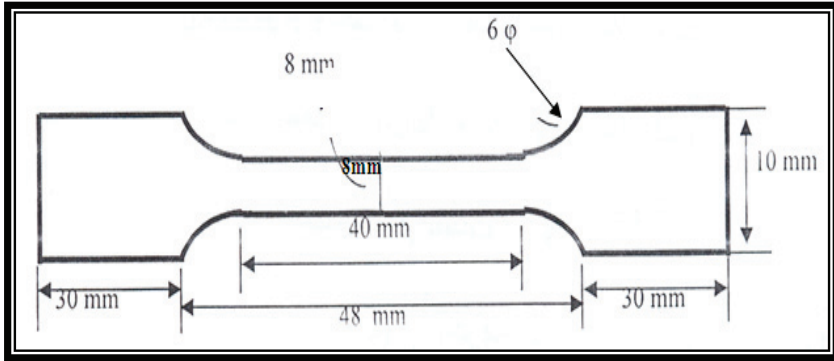
المسلك الخامس: مشابه للمسلك الرابع ولكن بنسبة تشكيل (٤٠)٪.

٢-١ الفحوصات المختبرية

بعد تحضير المواد المترابطة وإجراء المعالجة الحرارية - الميكانيكية تم تحضيرها للفحص المجهرى، وذلك بإجراء عمليات التتعيم والصلقل والإظهار.

اجري الفحص المجهرى باستخدام المجهر الضوئى نوع (Carl ziss) كما تم إجراء فحص الصلادة باستخدام طريقة برينل، وذلك بتسليط حمل مقداره (٥,٠) كيلوجرام ولمدة (٣٠) ثانية.

أجري اختبار الشد على عينات تم تشغيلها بأبعاد قياسيها تبعاً للمواصفة (ISO/ TTA₂). وكما موضح في الشكل (١). تم ربط فرن كهربائي على جهاز الشد (Instron) لغرض إجراء فحص الشد عند درجات حرارية مختلفة هي: (٢٥، ١٠٠، ١٥٠، ٢٠٠، ٢٨٠) م°، وذلك لحساب قيم مقاومة الخضوع والشد إضافة إلى المطيلية ومعرفة تأثير نسب التشكيل (٢٠، ٣٠، ٤٠)٪ في هذه الخواص.



الشكل (١). أبعاد عينة الشد القياسية.

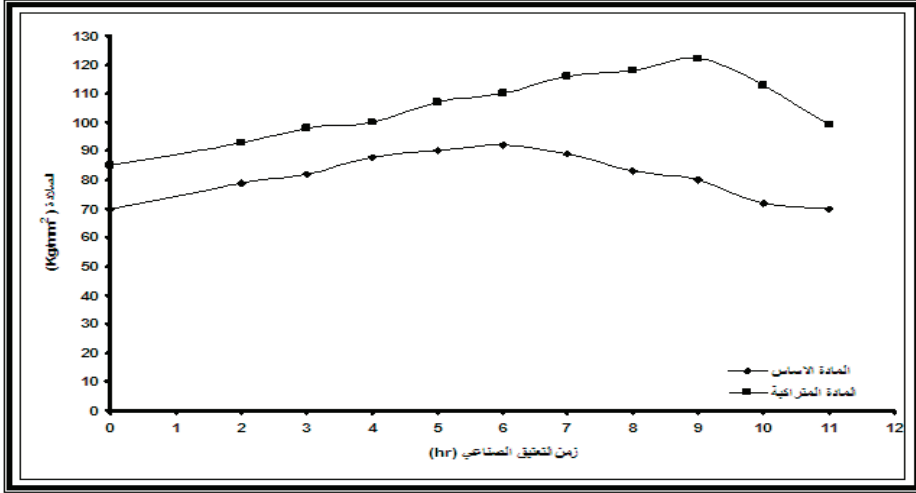
تم إجراء فحص حيود الأشعة السينية باستخدام جهاز من نوع (Philips 1840)، وعلى عينات بأبعاد (١×١×٥) سم، وذلك لمعرفة الأطوار المتكونة في المادة المترابطة بعد إجراء المعالجات الحرارية - الميكانيكية عليها في درجة حرارة الغرفة .

٣. النتائج والمناقشة

٣-١ نتائج فحص الصلادة والبنية المجهرية

يوضح الشكل (٢) تأثير زمن التعتيق على قيم الصلادة لكل من المادة الأساس والمادة المترابطة. يلاحظ من الشكل أن قيم صلادة السبيكة الأساس

تزداد مع زيادة زمن التعتيق إلى أن تصل إلى أعلى قيمة لها عند زمن تعتيق مقداره (٦) ساعات، ثم تقل بعد ذلك مع زيادة زمن التعتيق.



شكل (٢). العلاقة بين الصلادة وزمن التعتيق لكل من المادة الأساس والمادة المترابطة.

وأن زيادة الصلادة يرجع إلى تكوين دقائق الطور الثاني (Mg_2Si) التي تترسب على المناطق ذات الطاقة العالية كالحُدود الحبيبية والانخلاعات في الشبكة البلورية للسبيكة الأساس، وهذه الدقائق المترسبة ستعمل كعوائق لمرور الانخلاعات من خلالها، ولكن بزيادة زمن التعتيق أكثر من (٦) ساعات يلاحظ انخفاض واضح في قيم الصلادة للمادة الأساس، وذلك بسبب حدوث نمو وكبر حجم الدقائق المترسبة مما يؤدي إلى فقدان التطابق (Coherence) بين الدقائق المترسبة والمادة الأساس، والذي يعني فقدان انفعالات التطابق (Coherence strains) بين الأرضية والدقائق المترسبة بسبب الإفراط في التعتيق (Over-aging) وبالتالي انخفاض قيم الصلادة^[١١،١٢]. إن تأثير زمن التعتيق على قيم الصلادة للمادة المترابطة يلاحظ في الشكل (٢)، إذ تزداد قيم صلادة المادة

المتراكبة مع زيادة زمن التعتيق إلى إن تصل إلى أعلى قيمة لها عند زمن تعتيق مقداره (٩) ساعات.

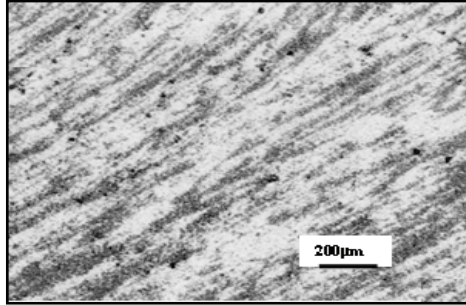
إن السبب في زيادة صلادة المادة المتراكبة مع زيادة زمن التعتيق يعود لوجود دقائق الطور الثاني المترسب خلال المعالجة المحلولية، بالإضافة إلى تواجد دقائق التقوية السيراميكية (Al_2O_3)، ولكن بعد أن تبلغ قيمة الصلادة أعلى قيمة لها عند زمن التعتيق الأفضل لوحظ انخفاض في قيم الصلادة مع زيادة زمن التعتيق، وذلك بسبب الإفراط في نمو دقائق الطور المترسب من جهة وحدث فقدان في التطابق بين الأرضية والدقائق المترسبة من جهة أخرى.

عند مقارنة النتائج لوحظ حدوث تأخير في الزمن اللازم للوصول إلى أعلى قيمة لصلادة المادة المتراكبة عن المادة الأساس بمقدار (٣) ساعات، ويمكن أن يعزى السبب في ذلك إلى حدوث تفاعل ما بين دقائق الألومينا وبين المغنيسيوم وتكوين طور ($MgAl_2O_4$) بدلا من دقائق الترسيب (Mg_2Si)، إذ أظهرت نتائج الفحص بالأشعة السينية (X-Ray) وجود هذا الطور كما في الأشكال (١٣-١٥)، وعليه فإن وجود دقائق الألومينا سيعمل على تأخير تخليق دقائق الطور الثاني، وبالتالي زيادة الزمن اللازم للوصول إلى أعلى صلادة.

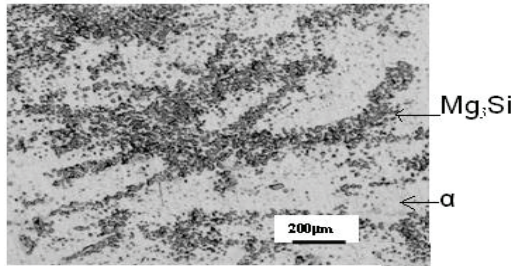
يوضح الشكلان (٣) و(٤) نتائج الفحص المجهرى للسبيكة الأساس والمادة المتراكبة، قبل إجراء المعالجة الحرارية، إذ يوضح الشكل (٤) بنية المادة المتراكبة بعد الصب مباشرة، حيث يلاحظ وجود دقائق التقوية السيراميكية (الألومينا) موزعة بشكل متجانس في بنية السبيكة الأساس.

ويوضح الشكل (٥) البنية المجهرية للمادة الأساس بعد إجراء المعالجة الحرارية (المسلك الأول)، يلاحظ من هذا الشكل حدوث ترسيب لدقائق الطور

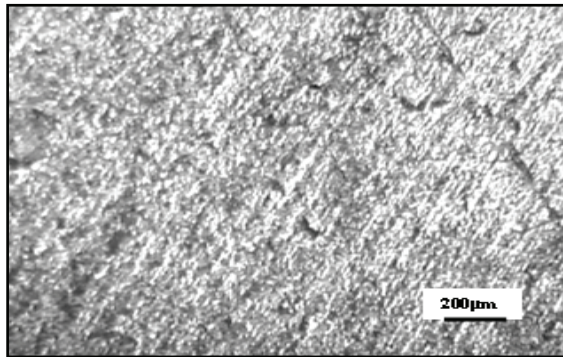
الثاني (Mg_2Si) على الحدود البلورية إضافة إلى نسبة ترسيب في داخل الحبيبات.



الشكل (٣). البنية المجهرية للسبيكة الأساس ظهور الطور α .

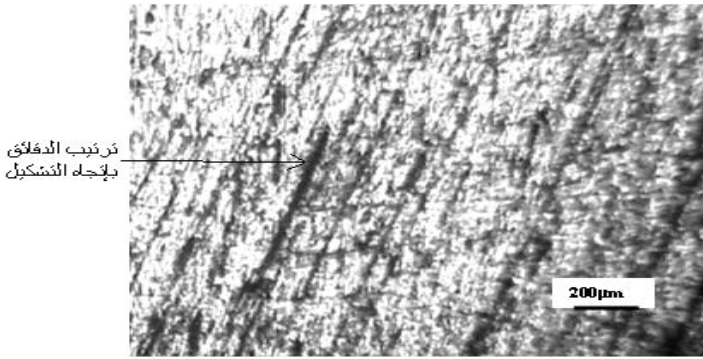


الشكل (٤). البنية المجهرية للمادة المتراكبة بعد الصب والمعالجة الحرارية، ظهور الأطوار α و Mg_3Al_2 , Mg_2Si .

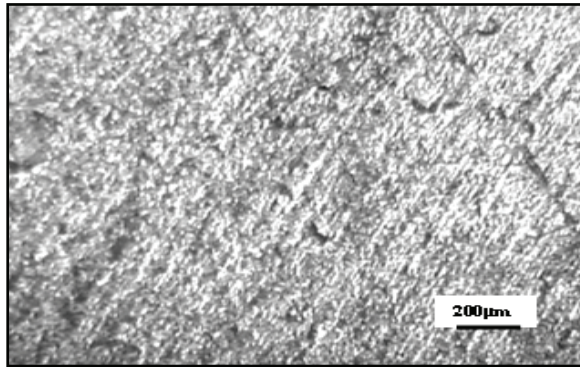


شكل (٥). البنية المجهرية للمادة الأساس بعد إجراء المعالجة الحرارية (المسلك الأول) ظهور الطور (Mg_2Si) على الحدود الحبيبية.

يوضح الشكل (٦- أ) ، البنية المجهرية للمادة المترابكة بعد استخدام المعالجات الحرارية - الميكانيكية، (المسلك الثالث) إذ يلاحظ أن البنية المجهرية للمادة المترابكة لم تتأثر تأثيرا كبيرا عند إجراء التشكيل بنسبة (٢٠)٪، إذ لا يوجد هناك تغير كبير في البنية، أما عند زيادة نسبة التشكيل إلى (٣٠)٪ (المسلك الرابع) يلاحظ حدوث تكسر لدقائق الألومينا التي تصبح أكثر نعومة وتتوزع بشكل أكثر تجانسا على البنية المجهرية، كما يظهر في الشكل (٦- ب).

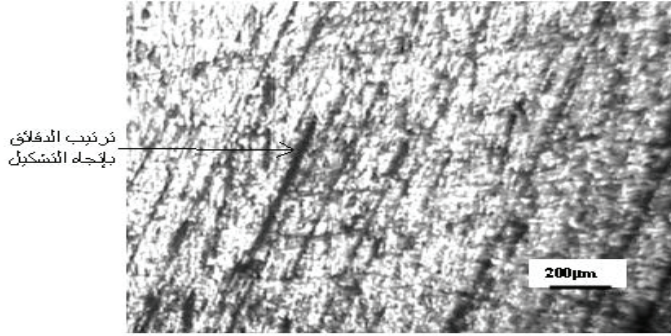


شكل (٦- أ). تأثير التشكيل في البنية المجهرية للمادة المترابكة بعد استخدام المعالجة الحرارية- الميكانيكية، (المسلك الثالث) نسبة التشكيل ٢٠٪.



شكل (٦- ب). تأثير التشكيل في البنية المجهرية للمادة المترابكة بعد استخدام المعالجة الحرارية- الميكانيكية، (المسلك الرابع) نسبة التشكيل ٣٠٪.

كما يلاحظ ظهور آثار التشكيل على البنية المجهرية، إذ يحدث ترتيب للدقائق المتكسرة باتجاه التشكيل ويظهر ذلك على شكل خطوط أو ذيول (Tails) مرتبطة مع الدقائق. وعند زيادة نسبة التشكيل إلى (٤٠)٪ (المسلك الخامس) لوحظ حدوث تنعيم وانتظام للدقائق السيراميكية الناعمة، وكذلك في البنية الأساس مقارنة بالبنية التي تم الحصول عليها عند التشكيل بنسبة (٣٠)٪ وهذا واضح في الشكل (٦- ج) .

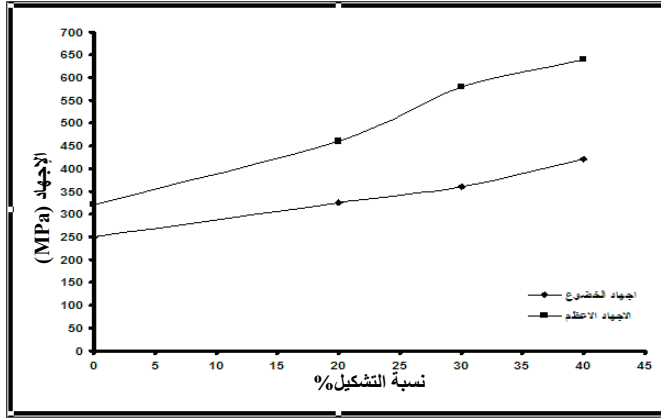


الشكل (٦- ج). تأثير التشكيل في البنية المجهرية للمادة المترابطة بعد استخدام المعالجة الحرارية الميكانيكية، (المسلك الخامس) نسبة التشكيل ٤٠٪.

٣-٢ نتائج فحص الشد

نتائج فحص الشد عند درجات حرارة مختلفة للمادة المترابطة المنتجة، بعد إجراء كل من المعالجات الحرارية والمعالجات الحرارية - الميكانيكية، موضحة في الشكل (٧)، الذي يبين تأثير نسبة التشكيل على قيم مقاومة الخضوع ومقاومة الشد، عند درجة حرارة الغرفة، إذ يلاحظ من الشكل ان قيم اجهاد الخضوع و مقاومة الشد (σ_y, σ_u) تزداد مع زيادة نسبة التشكيل ، إن السبب في ذلك يعود إلى حدوث التقوية نتيجة لوجود دقائق الالومينا (Al_2O_3) ذات الصلادة العالية وإلى معامل المرونة العالي، إضافة إلى حدوث الإصلاح الانفعالي للمادة الأساس نتيجة التشكيل الذي أدى إلى زيادة كثافة الانخلاعات. إن وجود دقائق التقوية يؤدي إلى زيادة الإجهاد المطلوب لحني الانخلاعة الذي يتناسب عكسياً

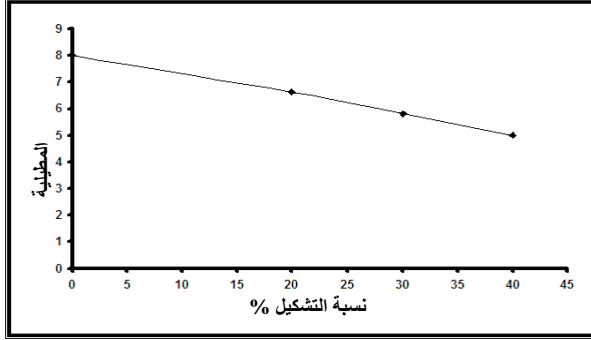
مع المسافة بين الدقائق، لذلك تزداد الممانعة لحركة الانخلاعات مع تقليل حجوم دقائق التقوية وتقليل المسافات فيما بينها، وبالتالي زيادة مقاومة الخضوع ومقاومة الشد [١٣، ١٤].



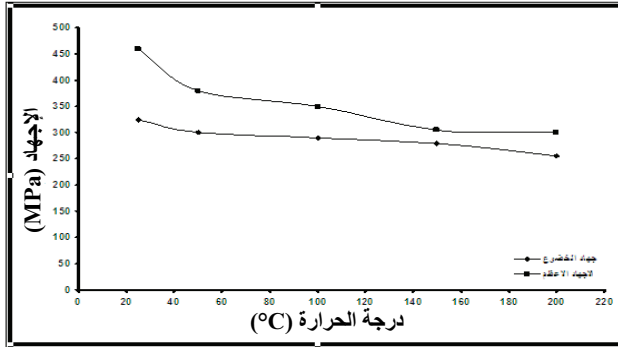
شكل (٧). يبين العلاقة بين الإجهاد ونسبة التشكيل للمادة المترابكة بعد إجراء المعاملات الحرارية الميكانيكية.

ويوضح الشكل (٨) تغير المطيلية للمادة المترابكة مع تغير نسبة التشكيل بالشد عند درجة حرارة الغرفة للمادة المترابكة بعد إجراء المعالجات الحرارية - الميكانيكية، إذ يلاحظ أن زيادة نسبة التشكيل يؤدي إلى نقصان قيم المطيلية للمادة المترابكة، وهذا ناتج عن الإعاقة لحركة الانخلاعات نتيجة لوجود دقائق الألومينا ودقائق الطور الثاني المترسب، التي تمتلك صلادة عالية التي تعمل على إعاقة عمليات الانزلاق والتشويه وبالتالي تقليل قيم المطيلية.

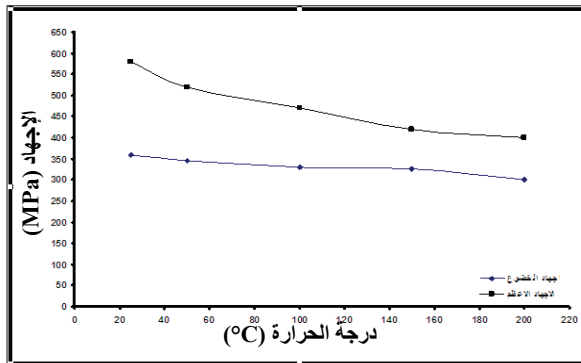
تم إجراء فحص الشد للمادة المترابكة (بعد إجراء المعالجات الحرارية - الميكانيكية) عند درجات حرارة تعتيق مختلفة هي (٢٥، ٥٠، ١٠٠، ١٥٠، ٢٠٠)°م، وذلك لمعرفة تأثير نسب التشكيل في خواص المواد المترابكة، ونتائج الفحص موضحة بالأشكال (٩-١١).



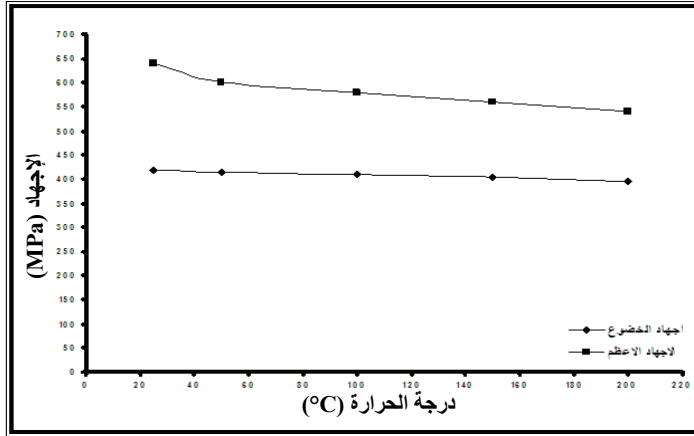
شكل (٨). العلاقة بين المطيلية ونسبة التشكيل لعينات المادة المتراكبة بعد إجراء المعاملات الحرارية الميكانيكية.



شكل (٩). العلاقة بين الإجهاد ودرجة الحرارة للمادة المتراكبة بعد إجراء المعاملات الحرارية الميكانيكية.



شكل (١٠). العلاقة بين الإجهاد ودرجة حرارة تعتيق المادة المتراكبة لعينة شكلت بنسبة ٣٠٪.



شكل (١١). العلاقة بين الإجهاد و درجة حرارة تعتيق المادة المترابطة لعينة شكلت بنسبة ٤٠٪.

ويلاحظ من هذه الأشكال أن قيم مقاومة الخضوع للمادة المترابطة التي أجريت عليها خطوات المعالجة الحرارية و المعالجات الحرارية -الميكانيكية تقل بزيادة درجة حرارة التعتيق، وعند مقارنة الانخفاض في مقاومة الخضوع ومقاومة الشد القصوى، لوحظ أن المادة المترابطة التي أجريت لها المعالجة الحرارية فقط تكون قيمة الانخفاض في مقاومة الخضوع كبيرة بينما يكون الانخفاض في الخواص أقل للمواد المترابطة التي أجريت عليها عمليات المعالجة الحرارية - الميكانيكية، ولوحظ من النتائج أيضا أن مقدار الانخفاض في المقاومة يتغير مع تغير نسبة التشكيل. ويرجع السبب في ذلك إلى إن التشكيل أدى إلى تنعيم دقائق الألومينا وكذلك دقائق الطور الثاني المترسبة خلال عملية التعتيق بالإضافة إلى توزيعها بشكل متجانس في بنية الشبكة الأساس، وبسبب ارتفاع درجة انصهار دقائق الألومينا واختلاف معامل التمدد الحراري (CTE) ما بين دقائق الألومينا والأرضية [١٦،١٥] فإن ذلك يعمل على زيادة كثافة الانخلاعات في المادة المترابطة مما يؤدي إلى عرقلة عملية الانزلاق، ولغرض

تسهيل عملية الانزلاق يتطلب إزالة حقول الإجهادات حول الانخلاعات وتقليل كثافة الانخلاعات.

ومن القيم المستحصلة من الأشكال (٩-١١) يمكن رسم مخطط بياني بين القيم اللوغارتمية الطبيعية لكل من مقاومة الشد ($\text{Ln}\sigma_{\text{u}}$) ودرجات الحرارة (T) ، ليتم الحصول على الشكل (١٢) الذي يبين أن العلاقة بينهما هي علاقة خطية ولجميع نسب التشكيل (٠، ٢٠، ٣٠، ٤٠)٪، إذ يلاحظ أن قيمة ميل المستقيم (n) تكون عالية عند نسب التشكيل الواطئة جداً، وتقل هذه القيمة مع زيادة نسب التشكيل، أي إن العلاقة بين مقاومة الشد ودرجة حرارة التعتيق هي علاقة عكسية ويمكن كتابتها بالشكل التالي:

$$(١) \quad \sigma_{\text{u}} = A * T^{-n}$$

وبأخذ اللوغارتمات الطبيعية لطرفي المعادلة نحصل على:

$$(٢) \quad \text{Ln}\sigma_{\text{u}} = -n \text{Ln}(T) + \text{Ln} A$$

إذ إن $k = \text{Ln}A$ تمثل أعلى قراءة على المحور الصادي وتمثل أعلى قيمة لمقاومة الشد (Mpa) عندما تكون قيمة $\text{Ln}(T)$ مساوية للصفر.
 $\text{Ln}(T) =$ للوغارتم درجة الحرارة (م°).
 $n =$ ميل الخطوط المستقيمة.

من الشكل (١٢) يلاحظ أن قيمة (n) تتغير تبعاً للنسبة المئوية للتشكيل وهذا التغير يمكن كتابته بالمعادلة

$$(٣) \quad n = n_0 \% \{1 - 1.6(E\%)\}$$

$n_0 =$ ميل المستقيم بدون تشكيل.

وعند تطبيق هذه المعادلة على نسب التشكيل (٠، ٢٠، ٣٠، ٤٠)٪ نحصل على قيم (n) النظرية التالية:

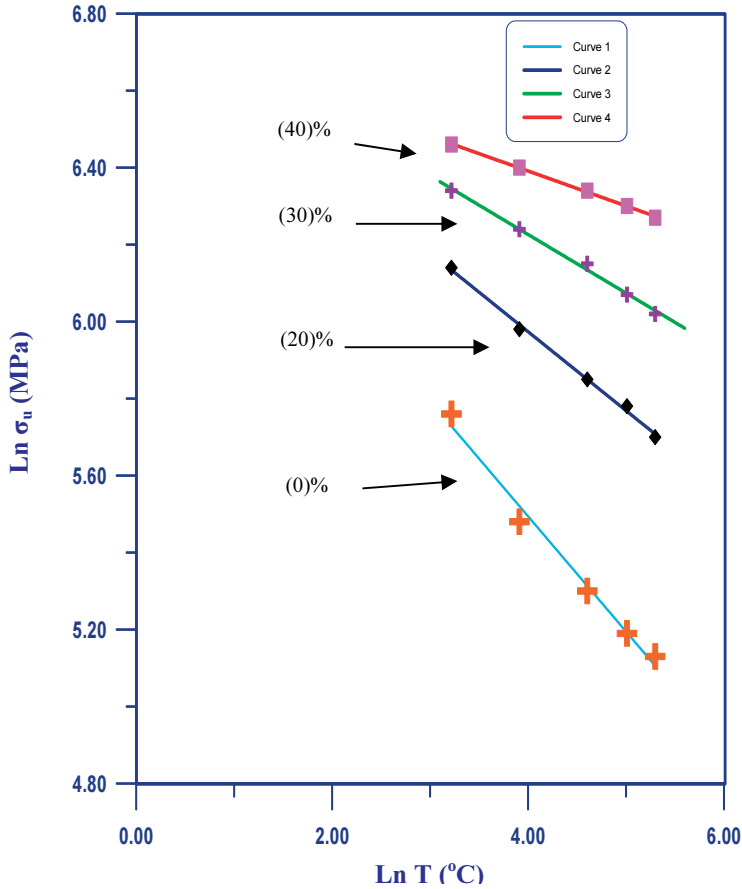
$$n_{0\%} = 0.299225$$

$$n_{20\%} = 0.200480$$

$$n_{30\%} = 0.151108$$

$$n_{40\%} = 0.101736$$

وعند مقارنة هذه القيم بالقيم العملية التي تم الحصول عليها في الشكل (١٢) نجد أنها متقاربة جدا.



$$Y = -0.299225 * X + 6.69116 \text{ (curve 1) (0\%)}$$

$$Y = -0.204992 * X + 6.79373 \text{ (curve 2) (20\%)}$$

$$Y = -0.152216 * X + 6.83506 \text{ (curve 3) (30\%)}$$

$$Y = -0.090681 * X + 6.75385 \text{ (curve 4) (40\%)}$$

شكل (١٢). العلاقة اللوغاريتمية بين مقاومة الشد ودرجات حرارة التعتيق.

كما يلاحظ من الشكل أن تقاطع جميع الخطوط المستقيمة مع المحور الصادي $\ln\sigma_{II}$ في نقطة واحدة تقريبا وتساوي (6.76845) تقريبا وهذه القيمة تمثل القيمة (k) والتي تمثل أعلى قيمة لمقاومة الشد، عندما تكون درجة الحرارة قريبة من الصفر المئوي (صفر $\ln(T) =$).

ومن قيمة (k) يمكن إيجاد قيمة (A) والمساوية إلى (٨٧٠) MPa وبناءً على ذلك يمكن كتابة المعادلة (١) بالصيغة التالية:

$$\sigma_{II} = 870 * T^{-0.299225} \{1 - 1.65(E\%)\} \quad (٤)$$

من هذه المعادلة يمكن الاستنتاج أن أعلى قيمة للتشكيل يجب أن لا تتجاوز (٦٠,٦)٪ إذ يصبح الميل (n) مساوياً للصفر (المعادلة (٣) مساوية إلى صفر)، وهذا يعني عدم تأثر مقاومة الشد بدرجات حرارة التعتيق بعد هذه النسبة من التشكيل بسبب ظهور أطوار جديدة، كما سيتم توضيحها لاحقاً.

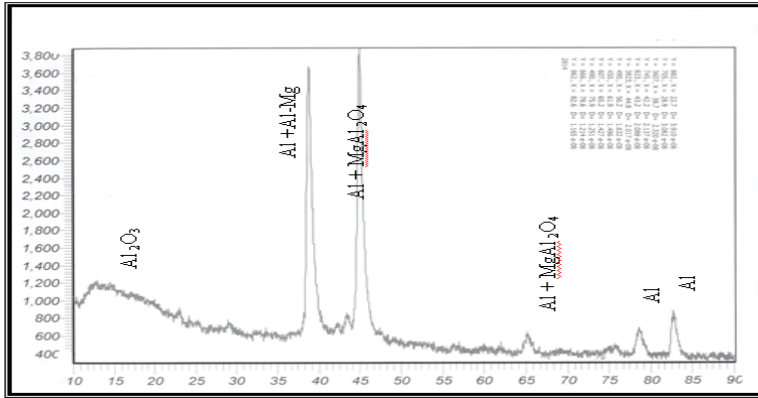
٣-٣ نتائج فحص حيود الأشعة السينية

نتائج فحوصات الأشعة السينية التي أجريت على نماذج من المواد المترابطة والتي تم معالجتها حرارياً وميكانيكياً موضحة في الشكل (١٣)، إذ يظهر ترسيب دقائق الألومينا ودقائق الطور الثاني (Mg_2Si) بعد إجراء المعالجة الحرارية للمادة المترابطة، أما بالنسبة للعينات التي أجري لها المعالجة الحرارية والتشكيل بنسب مختلفة فموضحة في الشكلين (١٤) و (١٥).

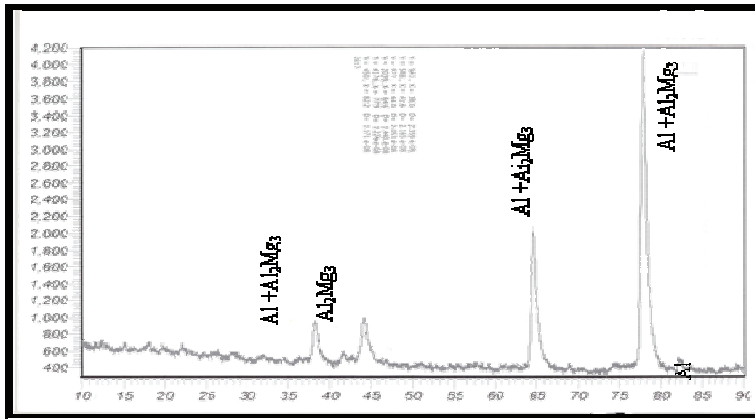
إذ يلاحظ أن النسب المنخفضة للتشكيل لم تؤثر تأثيراً واضحاً في الأطوار الناتجة بعد المعالجة، ولكن بارتفاع نسبة التشكيل إلى (٣٠)٪ لوحظ ظهور أطوار جديدة بشكل واضح مثل (Al_2Mg_3) بالإضافة إلى وجود دقائق التقوية السيراميكية (Al_2O_3)، وهذا أدى إلى تحسين الخواص الميكانيكية، وخاصة

تحسين مقاومة الخضوع ومقاومة الشد. إن زيادة نسبة التشكيل إلى (٤٠)٪ قد أدى إلى حدوث تشويه كبير في البنية، وهذا يظهر واضحا في الشكل (١٥)، حيث تظهر أطوار مثل:

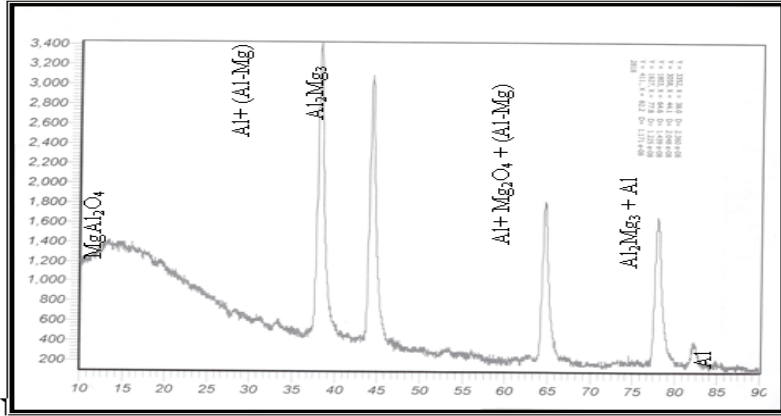
($MgO \cdot Al_2O_3$), ($Mg \cdot Al_2O_4$), (Al_2Mg_3)، إن ظهور هذه الأطوار تعزز أسباب حدوث التقوية وزيادة الإجهاد عند إجراء المعاملات الحرارية الميكانيكية.



شكل (١٣). نتائج فحص الأشعة السينية للمادة المترابكة بعد المعاملة الحرارية فقط.



شكل (١٤). نتائج فحص الأشعة السينية للمادة المترابكة بعد المعاملة الحرارية و تشكيل



شكل (١٥). نتائج فحص الأشعة السينية للمادة المترابطة بعد المعاملة الحرارية و تشكيل ٤٠٪.

٤. الاستنتاجات

من نتائج الفحوصات يمكن تلخيص أهم الاستنتاجات التي تم التوصل لها كما يأتي :

١- أدت المعالجة الحرارية والتعتيق لكل من المادة الأساس والمادة المترابطة عند درجة حرارة (١٦٠)°م إلى زيادة قيم الصلادة للوصول إلى أعلى قيمة لها عند زمن التعتيق (٦) ساعات للمادة الأساس و(٩) ساعات للمادة المترابطة، كما أن صلادة المادة المترابطة كانت أعلى من صلادة المادة الأساس بسبب وجود دقائق التقوية السيراميكي (Al_2O_3).

٢- أدت الزيادة في نسب التشكيل إلى حصول تكسر لدقائق الألومينا (Al_2O_3) وبالتالي تعميم البنية وحصول انتظام في بنية المادة المترابطة، فضلا عن ظهور آثار التشكيل على البنية المجهرية بشكل واضح، كما لوحظ ترتيب هذه الدقائق باتجاه التشكيل .

٣- أدت زيادة نسبة التشكيل إلى زيادة قيم إجهاد الخضوع وإجهاد الشد الأقصى ونقصان في المطيلية بالنسبة للمادة المترابكة والمادة الأساس على حد سواء، إلا أن قيم هذه الخواص للمادة المترابكة كانت أعلى من قيمها بالنسبة للمادة الأساس، وذلك بسبب وجود دقائق التقوية السيراميكية (Al_2O_3)، وكانت أفضل خواص عند إجراء التشكيل بنسبة تشكيل (٣٠)٪.

٤- لم تؤثر نسب التشكيل المنخفضة تأثيراً واضحاً على الأطوار الناتجة بعد المعالجة الحرارية الميكانيكية، إلا أن ارتفاع نسبة التشكيل إلى (٣٠)٪ أدى إلى تحسين في الخواص الميكانيكية وذلك بسبب ظهور الطور الثاني (Mg_2Si) بالإضافة إلى وجود دقائق الألومينا (Al_2O_3).

٥- أظهرت نتائج فحص الشد عند درجات حرارة مرتفعة انخفاضاً في قيم إجهاد الخضوع وإجهاد الشد الأقصى وارتفاع في قيم المطيلية لكل من المادة الأساس والمادة المترابكة.

٦- تم إيجاد علاقة رياضية بين مقاومة الشد عند درجات حرارة تعتيق مختلفة للمادة المترابكة المنتجة وهي:

$$\sigma_u = 870 * T^{-0.299225} \{1 - 1.65 (E\%)\}$$

المراجع

- [١] King, K., "Aluminum and Its Alloys", Ellis Horwood Ltd. London, (1987).
- [٢] Kelly, A., "Composite material", *Journal of Ceramic Processing Research*, 2(4) (2001).
- [٣] الدليمي، علي منذر مصطفى، "دراسة الأطوار الناتجة لمترابك الألمنيوم - كاربيد بعد تليده بالحالة الصلبة والسائل"، رسالة ماجستير، قسم هندسة الإنتاج والمعادن في الجامعة التكنولوجية (٢٠٠٢).
- [٤] Lemieux, S., "Thermal Expansion Study of Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composite Materials", *M.Sc. Thesis*, Department of Mechanical Engineering, Mc Gill University, Montreal (1997).

- [٥] **Schaefer, T.A.**, "Thermo Mechanical Processing and Ambient Temperature Properties of 6061 Aluminum", *M. Sc. Thesis*, Navel Post Graduate School Monterey, CA(USA).
- [٦] **Glogorijevic, R.**, "The effect of thermo mechanical treatment and copper addition on precipitation strengthening of AL- Mg-Si alloys", *Journal of Materials Science*, **10**: 735 (1979).
- [٧] **Garadner, P.R.**, "Strength Metals and Alloys", *Journal of Materials Science*, **91**: 270 (1987).
- [٨] **الصفار، صاحب مهدي، والمنذري، محمد حسن، واللامي، شروق عبد الله،** "تأثير التشكيل على البارد والتعتيق على التراكب المجهرية لسبيكة Al-3Mg"، *مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد الحادي عشر، العدد الرابع: ٢٣ (١٩٩٢)*.
- [٩] **Suan, C.**, "Mechanical Aging of Al-Mg Alloys", on the internet website: www.keyMetals.com, Aluminum-society, (1999).
- [١٠] **علي، محمد هادي،** "دراسة تأثير المعاملات الميكانيكية - الحرارية على خواص سبائك الألمنيوم - مغنيسيوم"، *رسالة ماجستير، قسم هندسة الإنتاج والمعادن، الجامعة التكنولوجية، (٢٠٠٣)*.
- [١١] **Ashby, M.F. and Jones, D.R.H.**, "Engineering Material", 1st Edition Pregmon Press, U.K (1986).
- [١٢] **Moon, J., Wooshin, D. and Kim, K.H.**, "Orowan strengthening effect on the hardness of the ferrite matrix in microalloyed steel", *Materials Science & Eng., A*, **484**(1-2): 552-557 (2008).
- [١٣] **Ceschim, L., Minak, G. and Morri, A.**, "Forging of the AA6061/Al2O3 composite, Effect on microstructure and tensil properties", *Materials Science & Eng.*, **513-514**: 176-185 (2009).
- [١٤] **Wang, X., Lin, Y.C., Wil, C. and Gao, H.X.**, " Strengthening mechanism of SiC particulate reinforced Sn-Zn solder", *Journal of Alloy and Compounds*, **480**(2): 662-665(2009).
- [١٥] **Panigrahi, S.K. and Jayaganthan, R.**, "Effect of plastic deformation condition on microstructural characteristic and mechanical properties of Al-alloy", *Material Design*, **30**(6): 1894-1901 (2009).
- [١٦] **Hansen, N., Huang, X. and Winther, G.**, "Grain orientation deformation microstructure and flow stress", *Materials Science & Eng., A*, **494**(1-2): 61-67(2008).

Effect of Aging and Thermomechanical Process on Mechanical Properties of Composite Materials (Al –Mg –Si) /Al₂O₃

Nawal Ezat, Sahib Al-Saffar and Menal Hameed
University of Technology/ Iraq

Abstract. This work is focusing on studying the effect of heat treatment and thermo mechanical process on microstructure and mechanical properties of metal matrix composite , based on (AL-Mg-Si) alloy reinforced by 10% of Al₂O₃ of particle size (< 53 um) , and the system was prepared by stir-casting technique .

Microhardness measurement had revealed that the best aging time for the prepared composite system is about (9) hours which are higher than the needed time for the reference cast alloy. Microstructure examination had shown that thermomechanical treatment had led to the refinement of Al₂O₃ Particles and their redistribution in the matrix.

Tensile test had shown that the yield stress and maximum strength of the thermomechanical treated composite system were higher as compared to the reference cast alloy composite at all deformation ratios percentages . This improvement in mechanical properties was attributed to the refinement of Al₂O₃ particles in the matrix and grain boundaries, which behave as obstacles against the grain growth.

The mathematical analysis of tensile test results, showed that the ultimate tensile strength value was decreased as deformation temperature increased, and it followed the relationship.

$$\sigma_u = 870 * T^{-0.299225} \{1 - 1.65(E\%)\}$$

Keyword: Thermomechanical treatment, Metal matrix composite, Aging.