

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة والشد والضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg-Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

الباحث الدكتور المهندس: معز الحصريه-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة

حمص

الملخص

حديثاً زاد الطلب على المواد المركبة المعدنية (MMCs) في عديد القطاعات الصناعية لأن الاعتماد عليها يفتح آفاقاً واسعة لاستخدامها في مجالات تتطلب خفة الوزن مع خواص ميكانيكية مميزة بتكاليف منخفضة، ونظراً للمكانة الصناعية للألمنيوم وسبائكه يتم حالياً تقويته بمواد تدعيم مختلفة بتقنيات تصنيع متنوعة والحصول على الألمنيوم المدعم (AMCs) مع اتباع التدعيم بعمليات لاحقة من عمليات التشكيل والمعالجة الحرارية بهدف تحسين خواصه الميكانيكية الأمر الذي من شأنه توسيع مساحة الاستخدام الصناعي له.

في هذا البحث تم تدعيم سبيكة الألمنيوم (AA6061) بدقائق قاسية ميكروية من الغرافيت (Gr) بنسبة وزنية ثابتة (4wt%) و من أكسيد التيتانيوم (TiO₂) بنسب وزنية متغيرة (3, 6, 9 and 12 wt%) بطريقة السباكة بالتحريك (SCT).

ثم قُمناً بعد التدعيم لزيادة الكفاءة الميكانيكية بعملية الدرفلة على البارد (CR) بنسبتي تشكيل مختلفتين (R=14%&R=28.5%) و أُلحقت بالدرفلة المعالجة الحرارية (T6) للعينات المدعمة المحضرة، وقد أوضحت نتائج الفحص المجهرى توزيع الدقائق الداعمة الهجينة بشكل شبه منتظم وبالتالي نجاح عملية التدعيم و الحصول على الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCs) وفعالية تقنية السباكة بالتحريك (SCT).

وقد بينت نتائج الاختبارات الميكانيكية أن القساوة ومقاومة الشد والضغط تحسنت مع إضافة دقائق التدعيم المُشتركة وزيادة نسبتها وأن المعالجة الميكانيكية الحرارية عند نسبتي التشكيل حسنت من السلوك الميكانيكي بالمقارنة مع (AA6061) المفرد وأن أفضل الخواص تم الحصول عليها بعد المعالجة الميكانيكية الحرارية عند نسبة تدعيم (Gr + 4 % TiO₂ 9 %) وعند نسبة تشكيل (R=28.5%) بالمقارنة مع باقي العينات بنسبة تحسن بالخواص المدروسة تجاوزت الـ (50%).

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم
" (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

الكلمات المفتاحية: السلوك الميكانيكي، الألمنيوم المدعم، تقنية السباكة بالتحريك، المعالجة الميكانيكية الحرارية ، الخواص الميكانيكية.

Processes on Mechanical Study The Effect of Subsequent Treatment Tensile and Compressive of Aluminum Behavior on Harshness , Alloy(AL-Mg- Si) Reinforced Different Particles By Stir Casting Technique(SCT)

ABSTRACT

Recently, the demand for MMCs has increased in many industrial sectors because relying on it opens wide horizons to use in areas that require light weight with mechanical properties distinctive at low costs, and given the industrial status of aluminum and its hibernation, it is currently strengthened with different support materials with various manufacturing technologies and obtaining (AMCs) With the follow -up of subsequent operations of formation and heat treatment in order to improve its mechanical properties, which would expand the space of industrial use for it.

In This research an aluminum alloy (6061) was reinforced with hard particles having size of micron of Graphite with a fixed weight percentage (4wt%) and Titanium oxide particles are added in variable weight percentages (X= 3 , 6 , 9 ,and 12 wt%) by stir casting technique (SCT).

Then, after the reinforcement, we increased the mechanical efficiency with the cold rolling process (CR) with two different formation rates (R = 14% & R = 28.5%) and was attached (CR) to the heat treatment (T6) on all reinforcement samples.

The results of microscope have shown uniform distribution, hybrid reinforced Aluminum alloy successfully prepared and effectiveness of stir casting method.

The results of tests have show The Hardness, Compressive strength, and Tensile strength were determined, with the addition of hybrid reinforcement particles and the increase in its percentage and thermal mechanical treatment at the two formation rates improved from mechanical behavior compared to (AA 6061) alone. and that the best mechanical properties were obtained after mechanical heat treatment at reinforcement ratios (9% Tio₂ + 4% Gr)with formation rate (R = 28.5%) compared to the rest of the samples with an improvement rate of studying properties exceeding (50%) .

Keywords: Mechanical behavior, Aluminum Matrix Composites (AMCs), Stir Casting Technique (STC) , Mechanical heat-treatment, Mechanical properties.

1. مقدمة:

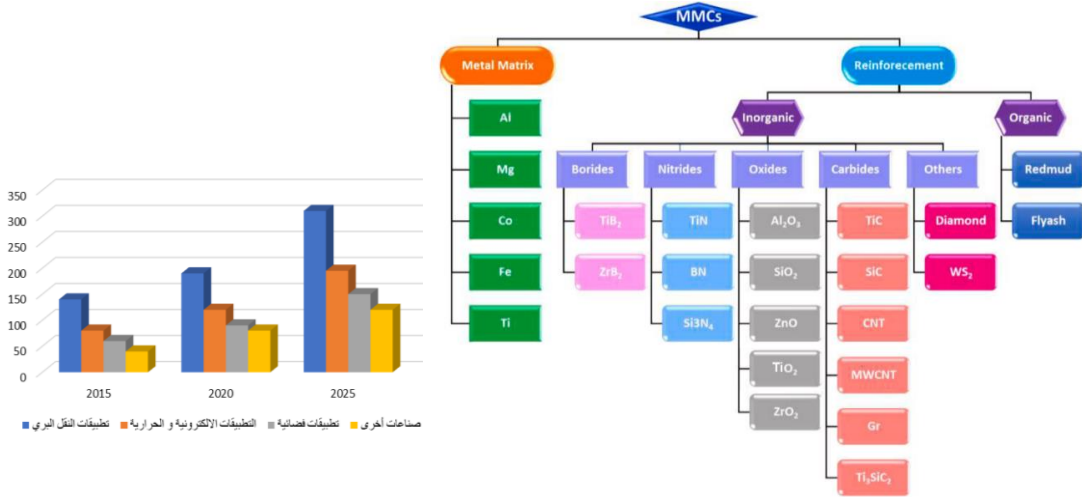
إن التطور التكنولوجي والثورة الصناعية الرابعة تفرض الحاجة الدائمة إلى ابتكار مواد هندسية حديثة وتطوير المواد الهندسية التقليدية لتوسيع ساحة الاستخدام الصناعي لها، تتمتع سبائك الألمنيوم بخواص مميزة بالفعل تلبي المتطلبات التصميمية والتكنولوجية للتطبيقات الهندسية المختلفة إلا أن خواصها الميكانيكية كمقاومتها على الشد والضغط وقساوتها منخفضة مقارنةً بمواد هندسية أخرى، حيث لا تزال بعض التطبيقات مُقتصرة على استخدام معادن محددة مرتفعة الوزن غالية الثمن ، ولن تتمكن من استخدام سبائك الألمنيوم - بهدف الاستفادة من خواصها المميزة - كمواد بديلة عن المعادن الأخرى مثلاً في تطبيق ما، إلا في حال تمكنا من تحسين خواصها الميكانيكية بنسب تحسن مميزة [2].

لذلك لا يزال العمل البحثي مستمراً من قبل الدارسين في هذا المجال من أجل اقتراح واعتماد طرق جديدة لتحقيق التطوير والتحسين في الخواص الميكانيكية لسبائك الألمنيوم سواء بالتسبيك (إضافة العناصر السبائكية) أو عمليات التشكيل المتنوعة أو المعالجات الحرارية أو طرائق التدعيم العديدة ومن هنا يبرز دور البحث الحالي في اعتماد ونشر وتوطين تقنية التدعيم الهجين مع إلحاقها بمعالجة ميكانيكية وحرارية لاحقة (أصبحت العمليات اللاحقة جزءاً أساسياً من دورة حياة تصنيع المواد المركبة المعدنية (MMCs) بما يحقق إمكانية التوسع في استخدام سبائك الألمنيوم بعد التحسين في سلوكها الميكانيكي. يوضح الشكل (1) تزايد الطلب على المواد المركبة ذات الأساس المعدني (MMCs) ما بين عامي (2015-2025) لأجل عديد التطبيقات الصناعية [3].

في التطبيقات الهندسية المعاصرة، تكتسب سبائك الألومنيوم أهمية متزايدة (موضوع بحثنا) كبديل فعالة للمواد الهندسية التقليدية، ويُعزى هذا التحول إلى المزايا العديدة التي يوفرها الألومنيوم وسبائكه، علاوة على ذلك، تتميز سبائك الألومنيوم بوزن نوعي أقل، بالإضافة إلى فعالية من حيث التكلفة، مما يجعلها خياراً جذاباً لمختلف الصناعات [2] [3] وهو ما جعله أهم وأول سبائك المعادن الملونة الجاري تدعيمها في الوقت الحالي ثم يليه المغنيزيوم أما السبائك الأخرى الجاري

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

تدعيمها بالإضافة لسبائك الألمنيوم و المغنيزيوم مع أهم أنواع دقائق التدعيم بأنواعها المختلفة فهي موضحة بالشكل(2)[1] [2] .

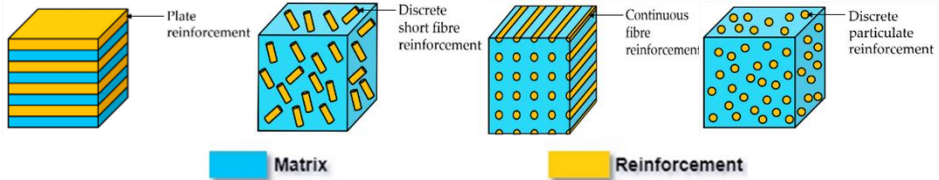


الشكل (1) تزايد الطلب على (MMCs) في
عديد التطبيقات الصناعية [3]

الشكل (2) أهم أنواع المعادن الجاري تدعيمها [2]

يجري تدعيم سبائك الألمنيوم (التدعيم التي تعتبر أحدث وأهم آليات تقوية السبائك) بطرائق تدعيم قديمة نسبياً وطرائق متطورة للحصول على المواد المركبة ذات الأساس المعدني من الألمنيوم (AMCs).

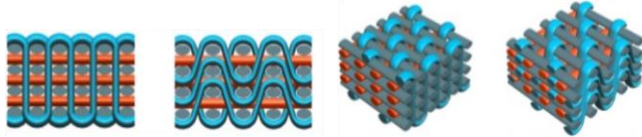
حيث إن الطرائق التقليدية القديمة للتدعيم تقوم على استخدام مادة تدعيم وحيدة بمقياس من مرتبة الميكرون و بتموضع بسيط لمادة التدعيم لنحصل على : الألمنيوم المدعم بالدقائق (PAMCs) -الألمنيوم المدعم بألياف قصيرة أو شعيرات (SFAMCs) -الألمنيوم المدعم بألياف طويلة مستمرة (CFAMCs) - الألمنيوم المدعم بالطبقات (PLAMCs). [1] . وهي موضحة كالتالي بالشكل (3):



الشكل (3) طرائق التدعيم التقليدية للألمنيوم

أما الطرائق المتطورة لتدعيم سبائك الألمنيوم : تعتمد على مواكبة التقنيات الحديثة والمتقدمة في التدعيم والتصنيع للحصول على ألمنيوم بخواص مميزة وتلافي العيوب والسلبيات في الطرائق التقليدية القديمة، ومن أهم الطرائق الحديثة لتدعيم سبائك الألمنيوم [13]:

(a) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام شبكة -نسيج- ثنائية أو ثلاثية (Structural or Woven reinforced) الشكل (4).



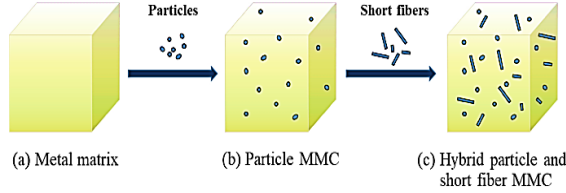
الشكل (4) التدعيم باستخدام شبكة -نسيج- (2D-3D)

(b) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام ألياف أو دقائق أو طبقات نانوية Nano composites (AMNCs).

(c) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام تقنية الساندويش تتم عن طريق ربط طبقات صفائحية من الألياف مع طبقات معدنية لتقويتها وتدعيمها (Sandwich Structure composites)

(d) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام تقنية التدعيم الهجين (التدعيم المشترك Hybrid composites) الطريقة (المعتمدة في بحثنا) والتي تعتبر تقنية هامة ومتقدمة وقد بدأ هذا النوع من الألمنيوم المدعم الهجين بالانتشار والتطور بعد عام (2010) بسرعة فائقة والدخول في تطبيقات كثيرة ، يتم فيه تدعيم الألمنيوم هنا بخليط من أكثر من نوع من مواد التدعيم المذكورة سابقاً على سبيل المثال الجمع بين التدعيم بالدقائق والتدعيم بالألياف القصيرة والدمج بين التدعيم بالألياف والتدعيم بالدقائق والخلط بين نوعين مختلفين من

الدقائق أو الألياف أو أكثر (دقائق نانوية-دقائق ميكروية) (ألياف كربون-ألياف زجاج) (دقائق أكسيد-دقائق كربيد). وكيفية التدعيم الهجين موضح بالشكل (5) [13] [5] [14] :



الشكل (5) طريقة التدعيم الهجين -المشترك-

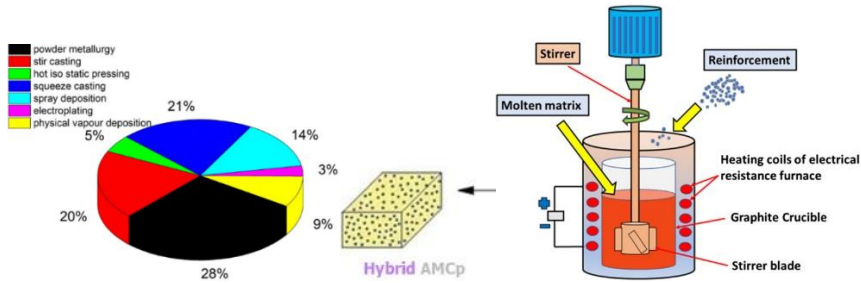
التدعيم الهجين للألمنيوم يمكن تحقيقه بطرائق وتقنيات متعددة أغلبها حديثة ومتطورة، وقد تم تعديل العديد من تقنيات التصنيع التقليدية لتناسب مع متطلبات تصنيع المعادن المدعمة ويعتمد اختيار الطريقة الهندسية الأفضل وفق كمية وتوزيع وشكل المواد الداعمة ونوع المعدن الأساس وطبيعة التطبيق الذي سوف تدخل المادة المركبة المصنعة فيه.

إن اختيار الطريقة الصحيحة لتصنيع (MMCs) يمثل أحد العوامل الأساسية لضمان نجاح المواد المركبة المعدنية، فالخصائص النهائية التي تتمتع بها المادة تعتمد بشكل مباشر على تقنية التصنيع المُختارة، وبارامترات هذه التقنية (درجة الحرارة، الضغط، زمن المعالجة)، إلى جانب نوعي المعدن الأساس والمادة الداعمة، بشكل عام تمر تقنيات تصنيع MMCs بما يلي:

- المعالجات الأساسية (Primary Processing): وتشمل إنتاج المادة المركبة وتشكيلها الأولي، وغالباً ما لا تؤدي هذه المرحلة إلى الشكل أو البنية النهائية للمنتج.
- المعالجات الثانوية أو اللاحقة (Secondary Processing): تلي المعالجات الأساسية، وتهدف إلى تحسين خواص المادة أو تعديل شكلها النهائي، وتشمل عمليات مثل: التطريق، البثق، الدرفلة، المعالجة الحرارية، والتشغيل الميكانيكي.
- وفي بعض الحالات، تسبق هذه المراحل عمليات تمهيدية أو تحضيرية (Preparing Processing): مثل المعالجة السطحية للمكونات أو تصنيع النموذج الأولي، والتي تلعب دوراً حيوياً في تحسين الالتصاق والارتباط بين المعدن والمادة الداعمة.

شهدت تقنيات تصنيع المواد المركبة تطوراً ملحوظاً على مر السنين، بهدف تحسين البنية المجهرية (الميكروية) والخواص الميكانيكية لـ (MMCs)، ويُعد التحدي الرئيسي في اختيار طريقة التصنيع المناسبة هو ضمان توزيع متجانس لأطوار التدعيم (سواء كانت دقائق أو ألياف أو خليط منهم)

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "



الشكل (7) تقنية السباكة بالتحريك (SCT) -تصنيف طرائق تصنيع من حيث الاستخدام [8]

تبرز مبررات وأهمية البحث كما ذكرنا سابقاً نظراً للمكانة الاقتصادية العالية لسبائك الألمنيوم كونه يأتي بالمرتبة الثانية بعد الفولاذ ونظراً لتوافره وما يتمتع به من ميزات عديدة وخواص ميكانيكية جيدة مقارنة بالسبائك التقليدية أتت الحاجة إلى تدعيمه لتحقيق متطلبات الأداء والموثوقية والتحكم بخواصه الميكانيكية من خلال طريقة التدعيم ونسبته والعمليات اللاحقة المطبقة لزيادة مساحة الاستفادة منه صناعياً في مجال السيارات والطائرات والتطبيقات الفضائية والتجهيزات الرياضية مع تحقيق تخفيض في التكلفة [3] [1].

إن تدعيم سبائك الألمنيوم بالطرائق التقليدية تقيد محدودية التطبيق وعدم تلبية متطلبات العمل والتكاليف الباهظة لمواد التقوية ولتصنيع الألمنيوم المدعم وصعوبة الوصول إلى الخواص المرجوة في كثير من الحالات بالإضافة إلى عدم مواكبة التطورات التكنولوجية الحديثة. كل هذا دفع إلى تدعيم الألمنيوم بالطرائق المتطورة من مواد نانوية أو شبكات تدعيم ولكن ما يُعيب ذلك أنها ذات تكاليف تصنيعية مرتفعة وبالتالي ارتفاع تكلفة الألمنيوم المدعم عدا عن الحاجة إلى تجهيزات وتقنيات معقدة للتصنيع والإنتاج بالأخص في حال الألياف المستمرة (CF).

أما بالاعتماد على التدعيم الهجين (Hybrid Reinforcement) أو ما يسمى التدعيم المزوج (Daul Reinforcement) باستخدام مواد تدعيم رخيصة وذات قابلية عالية للاندماج مع الأساس المعدني كالدقائق المتنوعة (مقارنة بمواد التدعيم الأخرى) كطريقة تدعيم حديثة لسبائك الألمنيوم فإنها تحقق الجدوى الاقتصادية بالإضافة إلى الوصول إلى الخواص المطلوبة من

خلال الاستفادة من جمع ومزج خواص دقائق التدعيم المُضافة معاً عدا عن سهولة تصنيع الألمنيوم الهجين المدعم بالدقائق وتعدد تطبيقاته وإمكانية التحكم بخواصه من خلال نسب ومواد التدعيم ومن خلال إجراء عمليات لاحقة على المنتجات وقابلية إعادة التدوير من خلال الصهر وإعادة تشكيل مرات كثيرة [8] [14].

وأن ما يحقق فعالية عملية تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCs) اختيار طريقة ملائمة للتصنيع مثل تقنية السباكة بالتحريك (SCT) الي تتفوق على باقي تقنيات التصنيع من حيث انخفاض التكلفة والبساطة والمرونة وسهولة التطبيق وهي معتمدة تجارياً [8] .

استخدام عملية المعالجة اللاحقة المناسبة بعد تصنيع (HAMCs) (الدرفلة على البارد والمعالجة الحرارية في بحثنا) من شأنه تحسين الخواص والتشكيل إلى الأجزاء النهائية بدقة عالية وتقليل العيوب الناتجة عن السباكة وتصحيح عيوب البنية وتحسين التجانس وهذا ما يُعزز من الأداء والسلوك الميكانيكي ويمكن أن نكتفي بالمعالجة الحرارية فقط كعملية لاحقة في حال أردنا تعديل خواص HAMCs الميكانيكية دون تغيير شكلها [3].

لذا تم في هذا البحث تسليط الضوء على تحضير مادة مركبة معدنية ذات أساس من سبائك الألمنيوم AA6061 مدعمة تدعيماً هجيناً أو مزدوجاً باستخدام دقائق مختلفة (Tio₂-Gr) بتقنية (السباكة بالمزج SCT) ودراسة تأثير زيادة نسبة الأوكسيد عند ثبات نسبة الطور الأخر (Gr) على السلوك الميكانيكي: (القساوة - خواص شد والضغط) ومن ثم دراسة تأثير الدرفلة على البارد (CR) بنسبتي تشكيل مختلفتين (R=14% & R=28.5%) وتحديد الأفضل مع المعالجة الحرارية (T6) معاً كعمليات لاحقة على الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم المدعم الهجين المحضر.

نستعرض فيما يلي بعض الأوراق البحثية الحديثة التي تمحورت حول تقوية سبائك الألمنيوم بالدقائق المختلفة ودراسة تأثير عمليات التشكيل والمعالجة الحرارية اللاحقة على خواصها الميكانيكية:

في عام (2018) قام الباحثان (Saravanakumar) (Sasikumar) بتدعيم سبيكة من الألمنيوم AA 6063 باستخدام مواد تدعيم مشتركة من الألومينا ودقائق الغرافيت الثابتة النسبة (1%) باستعمال تقنية السباكة بالتحريك الميكانيكي (SCT) ومن ثم إجراء المعالجة الحرارية وفق إجراءاتي الأولى برفع درجة الحرارة إلى 500C° لمدة ساعة مع السقاية بالماء أما الإجراء الثاني فهو

التقسية بالتعتيق لمدة ست ساعات عند درجة الحرارة $170C^{\circ}$ وقد أظهرت النتائج نجاح إنتاج الألمنيوم الهجين مع توزيع جيد لدقائق التدعيم من خلال صور المجهر وقد بينت النتائج أيضاً تحسن في مقاومة الانحناء وانخفاض التدلي مع زيادة نسب الألومينا حتى حد معين (6%) وانخفاضها فيما بعد وبعد إجراء المعالجة الحرارية تحسنت ولكن افضل النتائج كانت بعد إجراء عملية التعتيق [5].

قام الباحث (Wakeel) وآخرون في عام (2019) بدراسة تأثير التدعيم الهجين بدقائق من كربيد السيلكون وأوكسيد الألمنيوم ودقائق من حديد الصب Grey cast iron على السبيكة AA 2218 المصنعة بطريقة السباكة بالتحريك (SCT) بنسب مختلفة و تأثير عملية المعالجة الحرارية اللاحقة بالتخمير عند درجة حرارة $410C^{\circ}$ لمدة ساعتين على العينات المدعمة والتي طبقها للمجانسة وإزالة الاجهادات الداخلية وقد بينت النتائج تحسن القساوة وخواص الشد (YS-UTS) والمتانة الصدمية مع انخفاض الاستطالة عند تطبيق المعالجة المذكورة وزيادة نسبة التدعيم وانخفاض نسبة دقائق الحديد [6].

في دراسة نُشرت عام (2020) قام الباحثان (Safiulla) (Nazeer) بدراسة تأثير البثق على البارد Cold Extrusion فقط على السبيكة AA6063 المصنعة بطريقة (SCT) والمدعمة بدقائق مختلفة وبشكل إفرادي من كربيد السيلكون وأوكسيد الألمنيوم وأوكسيد السيريوم CeO_2 بنسب (X = 0, 2, 4, 6, 8%) وقد بينت النتائج أن إجراء التشكيل بالبثق على البارد أدى إلى تحسين القساوة وخواص الشد مع انخفاض المتانة الصدمية وانخفاض معدل الاهتراء وازدياد نسبة التدعيم حسن من السلوك الميكانيكي و أعطى التدعيم بكربيد السيلكون أفضل النتائج ثم أوكسيد السيلكون ثم أوكسيد السيريوم [7].

في (2022) قام الباحث (Haripriya) وآخرون بمقارنة بعض خواص الألمنيوم النقي المدعم بدقائق من أوكسيد التيتانيوم بشكل إفرادي بنسب متزايدة وصلت حتى (9%) والمصنعة بطريقة (SCT) مع خواص الفولاذ متوسط الكربون MCS وقد أظهر البحث تفوق الفولاذ بالخواص بالرغم من ارتفاع مقاومة الشد الأعظمية ومقاومة الضغط ومقاومة الانحناء والقساوة مع انخفاض في الاستطالة لمعظم عينات الألمنيوم المدعم وذلك مع ازدياد نسبة التدعيم بالأوكسيد [10].

في دراسة (2023) للباحث (Khosroshahi) وآخرون تم تصنيع الألمنيوم المدعم بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) حيث تم تقوية سبيكة الألمنيوم A356 بشكل إفرادي بكل من دقائق أوكسيد

الألمنيوم وكربيد السيليكون المطبقة بالنحاس ومن ثم تدعيم هجين مشترك بكليهما مع اتباع التدعيم بالتشكيل على البارد بالدرفلة ومقارنة النتائج حيث ساعد التدعيم الهجين والدرفلة على تحسين خواص الشد والقساوة أكثر من التدعيم الإفرادي [11].

في (2024) قام الباحث (Kirman) وآخرون بتدعيم سبيكة الألمنيوم (ALZrCe) بدقائق نانوية من الألومينا بشكل إفرادي بنسب متزايدة بتقنية السباكة بالمزج مع إلحاق التدعيم بمعالجة ميكانيكية بالدرفلة على البارد بنسب تشكيل ثلاثة مختلفة ومعالجة حرارية بالتسخين حتى $500C^{\circ}$ لمدة ساعة وقد لاحظ الباحثون أن مقاومة الشد الأعظمية والقساوة ترتفع للعينات مع ازدياد نسبة التشكيل وأن المعالجة الحرارية قد ساهمت بشكل بسيط بتحسين الخواص المذكور وأفضل العينات من حيث التدعيم كانت عند نسبة تدعيم وسطية من دقائق الألومينا النانوية [12].

في أحدث الدراسات عام (2025) قام كل من (Bakrey) (Yakoub) بتدعيم سبيكة AA 6061 باستخدام مواد تدعيم مزدوجة من دقائق ميكروية من أكسيد التيتانيوم و كربيد السيلكون باستعمال تقنية السباكة بالتحريك الميكانيكي (SCT) ومن ثم مقارنة التدعيم الإفرادي بكل منها على حدا مع التدعيم الهجين بكلا النوعين للوصول للخواص الميكانيكية الأمثل من خلال دراسة ثنائي حالات للتدعيم وقد أظهرت النتائج نجاح إنتاج الألمنيوم الهجين وتحسن في مقاومة الانحناء والقساوة ومقاومة الشد الأعظمية مع زيادة نسب دقائق التدعيم لكل نوع حتى حد معين (8%) ولكن أفضل النتائج للسلوك الميكانيكي على الشد والانحناء والقساوة كانت بعد عملية التدعيم الهجين بالأكسيد والكربيد بنسبة (8%) وأكسيد ونسبة (6%) كربيد العينة S8. [14].

مما تقدم في الدراسات السابقة والمسح المرجعي نلاحظ أن اختيار طريقة تدعيم سبيكة الألمنيوم ونوع مواد التدعيم ونسبتها وطريقة التصنيع والعمليات اللاحقة وضبط شروط كل ما سبق يمثل تحدياً مهماً وأمر ضرورياً لتحسين وضبط السلوك الميكانيكي للألمنيوم وبالتالي رفع الأداء وزيادة الكفاءة الميكانيكية.

2. هدف البحث:

1. تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCs) بتقنية (SCT) ودراسة السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد والضغط لسبيكة AA6061 عند زيادة نسبة دقائق التدعيم من (TiO₂) حتى

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

- (12%) وعند تثبيت نسبة الغرافيت(4%) وتحديد النسب المثالية من كلا الدقائق المُضافة والتي تُعطي أفضل تحسن في السلوك الميكانيكي.
2. دراسة تأثير عمليتي الدرفلة على البارد (CR) بنسبتي تشكيل مختلفتين (R=14%&R=28.5%) والمعالجة الحرارية (T6) معاً على القساوة وخواص الشد والضغط للعينات المُدعمة الهجينة.
3. الوصول إلى تصور أوضح حول ربط نوع ونسبة الدقائق الداعمة وطبيعة العمليات اللاحقة بتغير خواص الألمنيوم المُدعم الهجين الناتج بما يتلاءم مع التطبيق المطلوب وبالتالي توقع مجال الاستخدام صناعياً.

3. مواد وطرق البحث :

1.3. المواد الاولية المستعملة لتحضير (HAMCs):

1.3.1 المعدن الأساس (Metal Matrix):

تم استلام إحدى سبائك الألمنيوم (AL-Mg- Si) وهي سبيكة الألمنيوم AA6061 موضوع البحث وكانت على شكل بيليت بقطر (12cm) تركيبها الكيميائي التجريبي (من جهاز التحليل الطيفي Spectrometer) والمعياري حسب ASTM كما في الجدول (1).

الجدول (1) التركيب الكيميائي لسبيكة AA6061

العنصر	التركيب التجريبي	التركيب المعياري
Si	0.75	0.8-0.4
Mg	0.95	1.2-0.8
Fe	0.6	0.7>
Cu	0.3	0.4-0.15
Mn	0.13	0.15>
Zn	0.23	0.25>
Cr	0.29	0.35-0.04
Ti	0.17	0.25>
AL	Bal.	Bal.

1.3.2. مواد التدعيم (Reinforcement Materials):

هي عبارة عن مساحيق ناعمة قاسية ميكروية من أوكسيد التيتانيوم (TiO_2) والغرافيت (Gr) حيث تم استخدام دقائق بحجم وسطي ($50\mu m \rightarrow 20$) بعد نخلها على جهاز المناخل الآلي نوع من Rids dale & Co LTD, England .

1.3.3. مواد مساعدة (Added Materials) :

بودرة مغنزيوم ناعمة تُضاف لتحسين التبلل والترطيب بين المعدن والدقائق المُضافة بالإضافة لبودرة من الألمنيوم النقي وأقراص طاردة للخبث.

2.3. التجهيزات المُستعملة لتحضير (HAMCs) بطريقة السباكة بالمزج (SCT) وإجراء

المعالجة الميكانيكية (CR) والمعالجة الحرارية (T6):

2.3.1. آلة السباكة بالمزج Stir Casting Machine:

تم تصنيع آلة السباكة بالمزج محلياً في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية والتي تضم الأجزاء التالية الموضحة بالشكل (8) [4] [8] :

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "



الشكل (9) القالب والعينات بعد الصب



الشكل (8) القالب والعينات بعد الصب

2.3.2. قالب الصب المعدني Metal Mold :

وهو عبارة عن قطعتين من الفولاذ تم تشغيل أربع فتحات عليهما بطول 150mm (تمثل العينات) الشكل(9).

2.3.3. ميزان حساس Weighing Machine :

استخدمنا ميزان إلكتروني نوع (LS1000) صنع شركة (Sartrious) له قابلية المعايرة والتصفير يقيس (0→1000gr) بدقة عالية من مرتبة أجزاء الغرام لوزن قطع الألمنيوم والدقائق الداعمة بنوعها للحصول على نسبة التدعيم الصحيحة والمطلوبة.

2.3.4. ماكينة التشكيل على البارد (ماكينة الدرفلة):

بعد إجراء الحسابات التصميمية تم تصنيع ماكينة الدرفلة المستخدمة في بحثنا في مخبر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية وهي مخصصة لدرفلة عينات الألمنيوم الدائرية وموضحة بالشكل [9](10) :



الشكل (10) ماكينة الدرفلة المصنعة محلياً ومبدأ درفلة العينات الدائرية

2.3.5. فرن المعالجة الحرارية :

استخدمنا فرن المعالجة النوع (CurboLite, Hope watt :3100 w) تصل درجة حرارته العظمى (1200°C : Max temp) والزمن اللازم للتسخين الكامل (45) دقيقة .

3.3.3. طريقة تنفيذ البحث:

3.3.1. تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين [8] [12] [13] [14]:

يتم تقطيع بيليت الأساس AA6063 إلى قطع صغيرة ووزنها وتحديد أوزان الدقائق المُضافة بنوعيتها حسب النسب المطلوبة (wt%) في العينات المدروسة ثم وضع قطع الألمنيوم في البوتقة الغرافيتية داخل الفرن ورفع درجة حرارته إلى 850°C لضمان انصهار السبيكة التام وبعد التأكد من انصهار الألمنيوم يتم خفض درجة الحرارة ضمن الفرن إلى درجة حرارة 750°C ليتم إضافة الدقائق الداعمة الهجينة ($\text{Gr}-\text{TiO}_2$) المخلوطة بشكل متجانس و المعلومة الحجم والوزن والنسبة والمُسَخنة مسبقاً إلى درجة الحرارة حوالي 200°C لخمس دقائق وذلك لإزالة الرطوبة والغازات الممتصة وتنظيف السطح من طبقة الأكاسيد وتحسين توزيع الدقائق داخل المصهور ويتم معها إضافة كمية قليلة من المغنزيوم (لا تتجاوز 1%) لتحسين التبلل أيضاً ولتعويض الفقد نتيجة الاحتراق والتأكسد مع تنفيذ الخلط يدوياً بقضيب مزج لضمان تجاس التوزع، بعد ذلك يتم إدخال الخلاط الميكانيكي في المصهور ضمن البوتقة الموجودة داخل الفرن وتدويره بسرعة (350r.p.m) ولمدة (20min) للحصول على دوامة ضمن المصهور Vortex (تم اختيار هذه الشروط اعتماداً على مجموعة تجارب تحضيرية قمنا بها وعلى الدراسات المرجعية) ونتيجة لفعل الدوامة يتم سحب خليط الدقائق الهجينة الى داخل المصهور وتوزيعه خلاله وأثناء عملية الخلط يتم إعادة تسخين الخليط إلى درجة

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

الحرارة $850C^{\circ}$ لتحسين انتشار وتوزيع الدقائق الداعمة الهجينة ضمن المصهور وبعد انتهاء الخلط وعند درجة الحرارة $850C^{\circ}$ تتم عملية صب المادة المركبة الهجينة في القالب المعدني المسخن لدرجة حرارة $300C^{\circ}$ لتلافي التجمد المسبق للمصهور وللتقليل من عيوب السباكة في المسبوكات وأخيراً يتم إخراج العينات من داخل القالب بعد تبريده الشكل (9) وتكرر العملية عدة مرات وفقاً للنسب المطلوب إضافتها من الدقائق الداعمة الهجينة الأساس لنحصل على خمس عشر عينة لكل اختبار (A1, A2, A3, B1, B2.....) والجدول (2) يوضح بارامترات (SCT) المستخدمة أثناء التصنيع [8]:

الجدول (2) بارامترات (SCT) المستخدمة أثناء التصنيع

البارامتر / المتغير) المعتمد	القيمة
Preheating temperatures of reinforcements	($200C^{\circ}$)
Preheating temperatures of die	($300C^{\circ}$)
Spindle speed	($350r.p.m$)
Stirring time	(20 min)
Stirring temperature	($750C^{\circ}$)

3.3.2. عملية المعالجة الميكانيكية (الدرفلة على البارد CR):

المعالجة الميكانيكية المتضمنة التشكيل بالدرفلة على البارد (CR) (التصليد الانفعالي Strain Hardening) وكان الغرض الرئيسي منها هو تحقيق الاهداف الاتية:

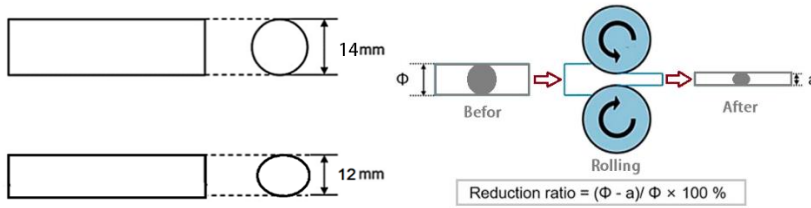
- تحسين الخواص الميكانيكية للمسبوكة المدعمة وتعزيز الاداء.
- تقوية المسبوكات المدعمة وذلك من خلال إحداث شبكة انخلاعات جديدة Dislocations في المادة والتي تتداخل مع استمرار حركة الانخلاعات .
- التخلص من المسامية الناتجة عن عملية السباكة وتحسين الترابط بين المكونات.

عُرّضت العينات المسبوكة المُدعمة بالمجموعتين الثانية والثالثة (عشرة عينات لكل اختبار) حسب شروط العمل (A2, A3, B2, B3, C2.....E3) لعملية التشكيل (المعالجة الميكانيكية) الشكل (10) بنسبتي تخفيض مختلفتين باستخدام ماكينة الدرفلة المُصنعة محلياً على مرحلتين $mm(10 \rightarrow 12 \rightarrow 14)$ بنسبة تشكيل (تخفيض) تعطى كما يلي [9] [12]:

$$Reduction\ rate\ (\%) = \left(\frac{\phi - a}{\phi} \right) \times 100\%$$

وكانت نسبة التخفيض (درجة التشكيل) في كل مرحلة تحسب كالتالي الشكل(11):

$$R\ (\%) = \left(\frac{14 - 12}{14} \right) \times 100\% \approx 14\% \ \& \ R\ (\%) = \left(\frac{14 - 10}{14} \right) \times 100\% = 28.5\%$$



الشكل (11) حساب نسبة التشكيل

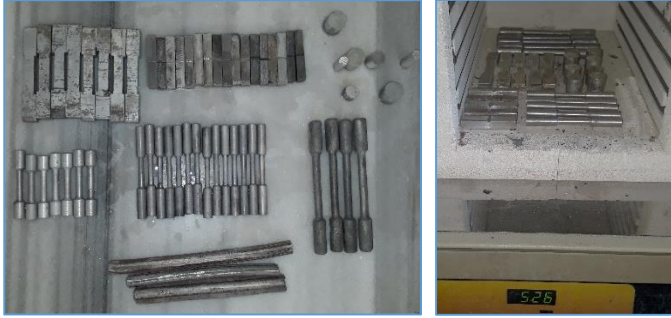
3.3.3. المعالجة الحرارية المحلولية T6 :

أُجريت المعالجة الحرارية المحلولية في درجة $530C^\circ$ ولمدة (1hour) يعقبها التبريد السريع بالماء ثم التعتيق الصناعي في درجة $185C^\circ$ ولفترة زمنية (6hour) على جميع عينات الألمنيوم في المجموعتين الثانية والثالثة (A2, A3, B2, B3, C2.....E3) المدعمة تدعيماً مشتركاً والمُدرفلة بنسبتي تشكيل مختلفتين الشكل (12). وكان الغرض الرئيسي من المعالجة المحلولية (تحقيق التصليد بالترسيب Precipitation Hardening) هو تحقيق الاهداف الاتية:

- الحصول على محلول جامد متجانس وبعد التبريد في الماء نحصل على محلول جامد فوق الاشباع.

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

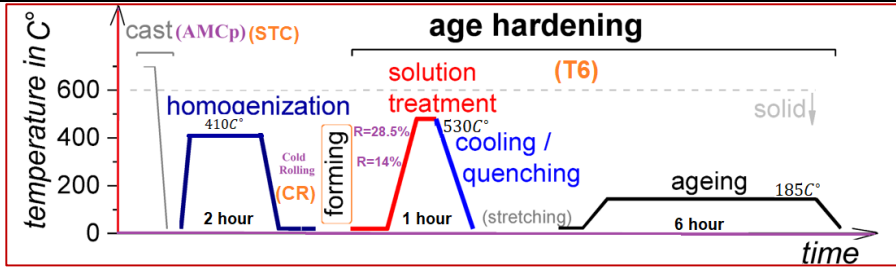
- وبعد عملية التعتيق تترسب دقائق ناعمة جداً من الطور الثاني Mg₂Si (وبالتالي التخلص من ظاهرة العزل المجهرى Micro Segregation للسيلكون والمغنزيوم) تعمل هذه الرواسب على إعاقة الانخلاعات مما تؤدي الى تحسين الخواص الميكانيكية للسبيكة.
- تغير المعالجة بنية جزيئات AlFeSi وهي عبارة عن طور غير منحل في هذه السبائك.
- التخلص من بعض عيوب السباكة وضمان توزيع الاطوار بشكل متجانس في الصبة للحصول على بنية منتظمة متجانسة خلال المسبوكة و إزالة الاجهادات الداخلية الناشئة من الظروف الحرارية أو التقلص أثناء التجمد [13] [5] [6] [12].



الشكل (12) عينات الاختبارات المدعمة والمشكلة في فرن المعالجة الحرارية

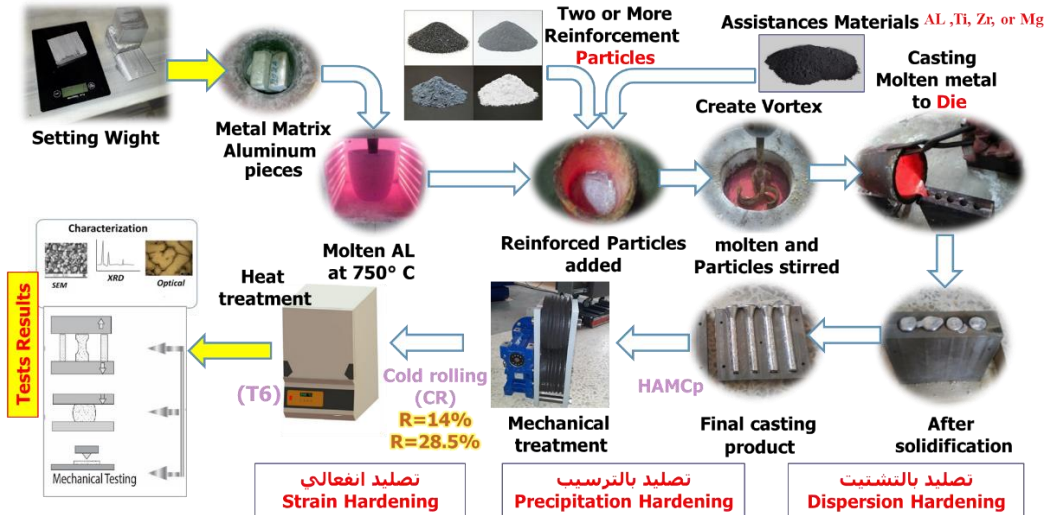
بعد عملية التدعيم الهجين ستكون المسبوكات مُجهدة نتيجة عملية التجمد لذا تم إجراء عملية المُجانسة (Homogenization) (إحدى عمليات التخمير) لجميع مسبوكات الألمنيوم المُدعمة لتحقيق التجانس وإزالة الإجهادات الداخلية قبل أي معالجة لاحقة بالتسخين لدرجة 410C° وإبقاء لزمناً 2^{hour} ثم تبريد بطيء بجو الفرن [6].

بعد الانتهاء من المُجانسة ومن المعالجة الميكانيكية CR (التشكيل بالنسبتين) تم تعريض العينات المدعمة والمشكلة لعملية معالجة حرارية لاحقة T6 وفق البرنامج كما في الشكل التالي (13) :



الشكل (13) برنامج العمل بعد تحقيق التدعيم الهجين (درفلة على البارد لاحقة- معالجة حرارية لاحقة)

وبالتالي يمكن تلخيص خطوات تنفيذ البحث كما في المخطط التالي الشكل (14):



الشكل (14) مخطط تنفيذ البحث الذي أنجز في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

4.3. التجهيزات المستعملة لإجراء الفحوصات والاختبارات الميكانيكية:

وهي موضحة بالشكل (15):

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "



الشكل (14) أجهزة الفحص والاختبارات : (السيكرومتر - المجهر الضوئي -جهاز الشد- جهاز القساوة) في مخبر علم المواد والمعالجات الحرارية بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.

قبل إجراء الاختبارات على العينات المدعمة الهجينة تم تقسيمها إلى خمس مجموعات (A,B,C,D,E) وفقاً لنسب المواد المضافة (نسب التدعيم) وضمن كل مجموعة يوجد ثلاث عينات حسب شروط العمل (A1, A2, A3, B1, B2.....) وبعد ذلك تم تجهيز خمسة عشرة عينة (مع عينات إضافية عند نفس الشروط لتحقيق من النتائج) بعمليات التشغيل للاختبارات الميكانيكية الثلاثة وفق (ASTM standards) كما في الجدول (3) الذي يوضح أنواع وتسميات العينات حسب نسب التدعيم الهجين وشروط العمل المختلفة (عمليات المعالجة الميكانيكية والحرارية اللاحقة):

الجدول(3) أنواع العينات المدعمة الهجينة

نسبة التدعيم المنغفرة (4)%Gr+ (X) %TiO2	Different Temper Conditions		
	المدعمة	المدعمة والمدرفلة %14 R=والمعالجة حرارياً	المدعمة والمدرفلة R=%28.5 والمعالجة حرارياً
PureAL6061	A1	A2	A3
X=3% TiO2	B1	B2	B3
X=6% TiO2	C1	C2	C3

X=9% TiO2	D1	D2	D3
X=12% TiO2	E1	E2	E3

والشكل (16) يوضح عمليات تحضير عينات الاختبارات الميكانيكية والفحص المجهرى:



الشكل (16) عينات الاختبارات الميكانيكية والفحص المجهرى

4. النتائج ومناقشتها (Results and Discussion):

النتائج:

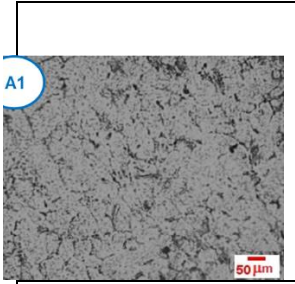
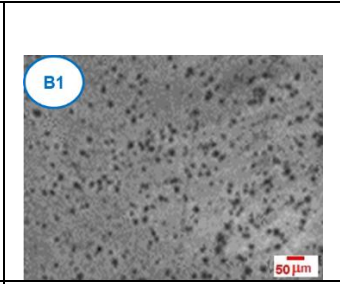
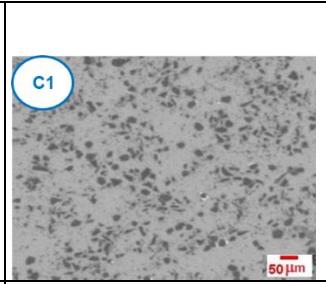
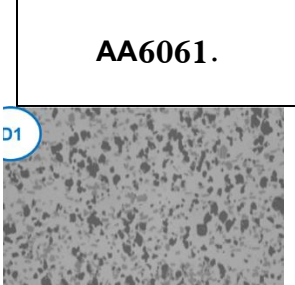
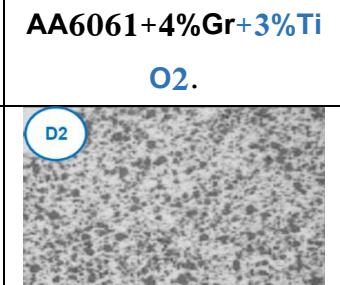
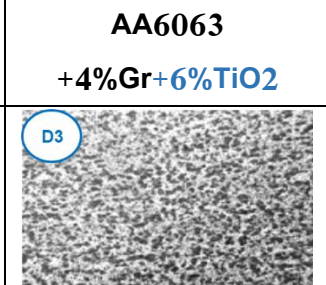
1) نتائج الفحص المجهرى Results of optical Microscope:

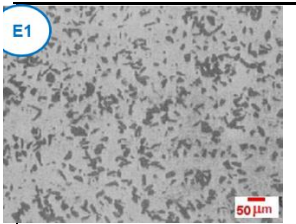
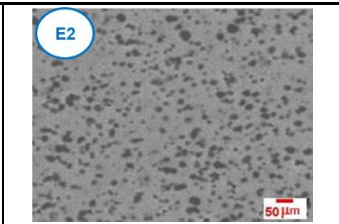
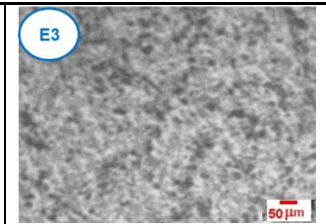
تم شحذ عينات الألمنيوم المدعم الهجين بأوراق صنفرة بدرجات نعومة مختلفة (600, 800, 1200, 1500, 2000) على جهاز الشحذ نصف الآلي بوجود تيار مائي ثم عملية التلميع باستعمال معجون الألماس الصناعي بحجم (0.25 μ m) ثم أجريت عملية غسل للعينات بالماء والكحول ثم التجفيف بالهواء أما إظهار البنية - التخریش - فتتمت بالغمس لمدة حوالي (30sec) على الأقل بمحلول كيلر (Keller) ذو التركيب (ml H2O, 5ml HNO3,) (1903ml HCL & 2ml HF) ثم تم فحصها على المجهر الضوئي وبمقدار تكبير قدره 200X وفق المواصفة ASTM-E3.

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (17) حيث توزعت الدقائق الداعمة من الأكسيد والغرافيت بنوعها والعديد من الرواسب ضمن الألمنيوم الأساس بشكل شبه منتظم تقريباً وكان تظهر ضمن البنية بشكل أغزر وأكثر كثافة حيث تزداد المساحة المشغولة فيها على الصور المجهرية -المناطق العاتمة- مع زيادة نسبتها لحد معين [5] [12].

تم استخدام المجهر الضوئي نوع (MEIJI) المجهر بكاميرا رقمية نوع (DCE-2) مُنصبة ببرنامج خاص على جهاز الحاسوب لدراسة البنية المجهرية للعينات (مع برنامج لمعالجة الصور المجهرية Image J).

		
AA6061.	AA6061+4%Gr+3%TiO₂.	AA6063+4%Gr+6%TiO₂
		
AA6061+4%Gr+9%TiO₂	(AA6061+4%Gr+9%TiO₂) +14% cold rolled and solution heat treated	(AA6061+4%Gr+9%TiO₂) +28.5% cold rolled and solution heat treated

		
<p>AA6061+4%Gr +12%TiO2</p>	<p>(AA6061+4%Gr+12% TiO2) +14%cold rolled and solution heat treated</p>	<p>(AA6061+4%Gr +12%TiO2) +28.5%cold rolled and solution heat treated</p>

الشكل (17) صور المجهر الضوئي توضح توزيع دقائق التدعيم الهجينة ضمن الألمنيوم AA6061 وتأثير المعالجات الميكانيكية والحرارية . نسبة تكبير 200X

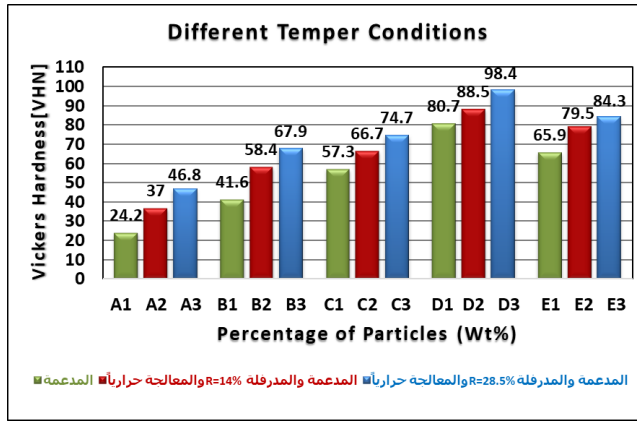
(2) نتائج اختبار القساوة Hardness test Results :

تم إجراء الاختبار على جهاز نوع (HARTEPRÜFER GNEHM:230) جهاز قساوة (Vickers) وفق المواصفة ASTM-E92 حيث طبقت حمولة (4Kg_f) عن طريق هرم رباعي وجوه منتظم بزاوية رأس (136°) لزمن تحميل (Dwell Time= 10sec) وسُجّلت لضمان موثوقية القياس أربعة قراءات بشكل عشوائي للقساوة من مناطق مختلفة من كلّ عينة لتحديد القيمة المتوسطة لقساوة العينات المدروسة.

الهدف من إجراء القساوة مراقبة نجاح التدعيم والمعالجة اللاحقة وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (18) حيث إن ازدادت قساوة الألمنيوم إلى حد معين مع ارتفاع نسبة إحدى الدقائق الداعمة الهجينة القاسية الموزعة ضمنه .

أما المعالجة الميكانيكية (CR) والحرارية (T6) عند نسبة تشكيل (R=14%) فقد ساعدت على الحصول على قيم عالية للقساوة لعينات الألمنيوم المدعم الهجين وزاد التحسن في القساوة مع ارتفاع نسبة التشكيل إلى (R=28.5%) حيث ارتفعت القساوة وبلغت أعلى قيمة (98.4HV) العينة -D3 .

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

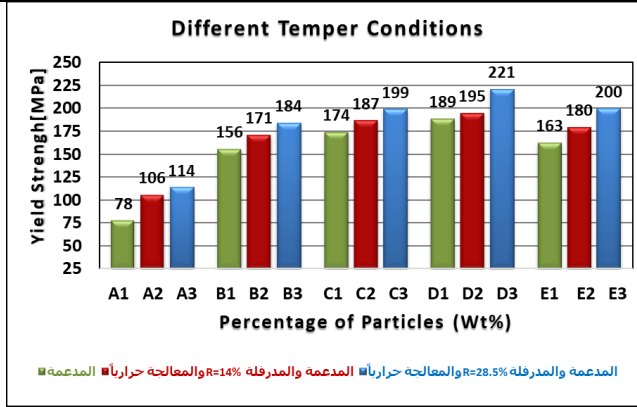


الشكل (18) تأثير التددعيم الهجين و المعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم القساوة

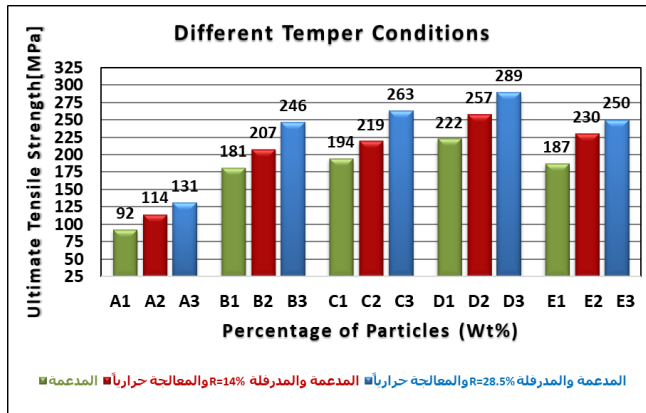
(3) نتائج اختبار الشد Tensile Test Results :

تم إجراء اختبار الشد والضغط على جهاز الشد (TINIUS OLSEN H25KS) المزود براسم بياني إلكتروني لمنحني الشد وبأخذ عينتين لكل قراءة ومن ثم المعدل الوسطي بعد أن تم تحضير جميع العينات حسب المواصفة القياسية (ASTM- B557) بطول قياس (75mm) وقطر (8mm) وبعد الحصول على مخططات الشد للعينات تم التركيز على تحديد قيم (مقاومة الخضوع YS- مقاومة الشد الأعظمية UTS- الاستطالة).

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (19) (20) (21) حيث إن قيم إجهاد الخضوع ومقاومة الشد العظمى للألمنيوم الأساس زادت مع ازدياد ارتفاع نسبة دقائق الأوكسيد القاسية وبالتالي ارتفاع كمية الدقائق الهجينة الموزعة ضمنه إلى حد معين 13% , وبعدها بدأت قيم خواص الشد بالانخفاض، كما يمكن ملاحظة أن المعالجة الميكانيكية (CR) المتبوعة بالحرارية (T6) عند درجتي التشكيل فقد أدت إلى تحسين قيم إجهاد الخضوع ومقاومة الشد للألمنيوم المدعم الهجين بشكل ملحوظ ودرجة التشكيل الأعلى أعطت خواص أفضل . أما بالنسبة للاستطالة فإنها انخفضت مع ازدياد نسبة الدقائق الداعمة الهجينة وتحسنت قيمتها عند المعالجة الميكانيكية الحرارية ، وكانت قد بلغت أفضل خواص للشد القيم التالية (YS=221MPa&UTS=289MPa) عند نسبة تشكيل (R=28.5%) ونسبة تدعيم (Wt=9%Tio2+4%Gr) العينة -D3- .

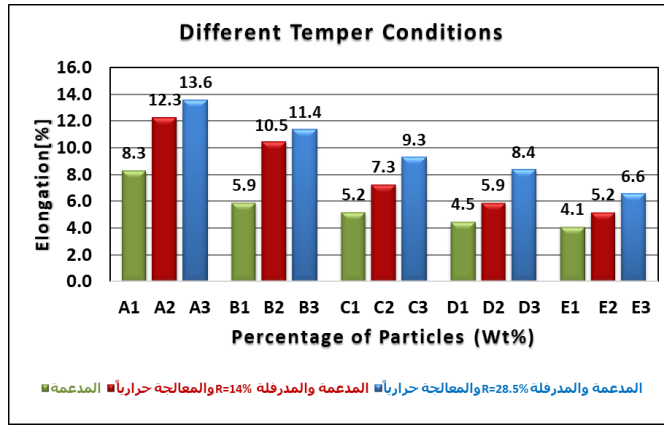


الشكل (19) تأثير التدعيم الهجين و المعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم إجهاد الخضوع



الشكل (20) تأثير التدعيم الهجين والمعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم مقاومة الشد
الأعظمية

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

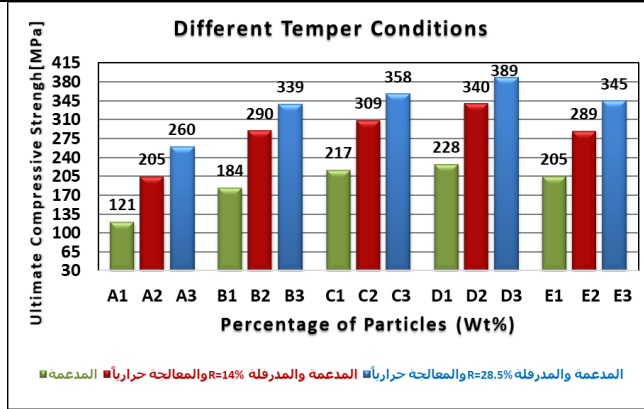


الشكل (21) تأثير التدعيم الهجين و المعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم الاستطالة

يمكننا القول أن المعالجة الميكانيكية (CR) والحرارية (T6) ساهمت وأعطت خواص شد أفضل مقارنة بالتدعيم الهجين فقط وحالة عدم التدعيم مع تراجع وانخفاض في المطيلية (معبراً عنها بالاستطالة كنسبة مئوية).

4) نتائج اختبار الضغط Compressive Test Results :

إن اختبار تحديد مقاومة الانضغاط للمعادن المدعمة غاية في الأهمية بالأخص إنه لا يتأثر بمسامية العينات المدروسة مثل اختبار الشد وقد تم إجراء اختبار الضغط على نفس جهاز اختبار الشد (TINIUS OLSEN H25KS) تحت حمولة ضغط تدريجية مطبقة من الجهاز وبعد الحصول على منحنى الضغط وبأخذ عينتين لكل قراءة ومن ثم المعدل الوسطي بعد أن تم تحضير جميع العينات بسطوح مصقولة جيداً لضمان انتظام التحميل وبمقاطع دائرية متناسبة مع ارتفاع العينة حتى لا يحصل التواء أو انبعاج أثناء إجراء الاختبار حسب المواصفة القياسية (ASTME9-95) بطول ($L_0=25mm$) وقطر قيمته ($D_0=15mm$) وبعد الحصول على المخططات للعينات تم التركيز على تحديد قيمة: (مقاومة الانضغاط الأعظمية Ultimate UCS Compressive Strength) الشكل (22).



الشكل (22) تأثير التدعيم الهجين و المعالجة الحرارية الميكانيكية على مقاومة الضغط العظمى

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (22) حيث إن مقاومة الضغط العظمى (UCS) للألمنيوم الأساس زادت مع ازدياد ارتفاع نسبة دقائق الأوكسيد القاسية وبالتالي ارتفاع كمية الدقائق الهجينة الموزعة ضمنه إلى حد معين 13%. كما يمكن ملاحظة أن المعالجة الميكانيكية (CR) والحرارية (T6) عند درجتي التشكيل فقد أدت إلى تحسن قيمتها لتبلغ (UCS=389MPa) وذلك للعيونة D3- عند نسبة تشكيل (R=28.5%) ونسبة تدعيم (Wt=9%TiO₂+4%Gr).

مناقشة وتفسير النتائج:

المناقشة والتقييم:

توضح الأشكال (23) (24) (25) (26) مقدار التحسن بالخواص الميكانيكية المدروسة للعينات الخمسة عشرة مقدر كنسبة مئوية بعد التدعيم الهجين والمعالجة الميكانيكية الحرارية والذي يُحسب من العلاقة:

على اعتبار: P_0 : قيمة الخاصية لعينة الألمنيوم غير المدعمة في كل مجموعة . P_{New} : قيمة الخاصية لعينة الألمنيوم المدعمة تدعيم هجين والمعالجة ميكانيكياً وحرارياً.

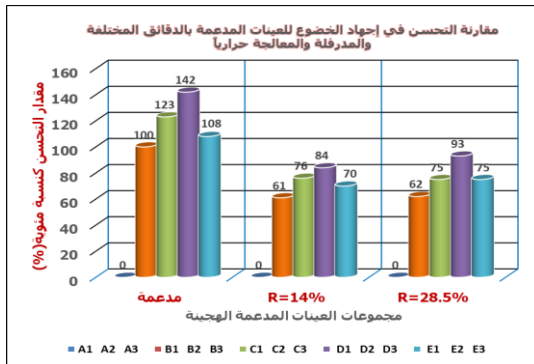
$$(\%) \text{Improving Percentage} = \left[\left(\frac{P_{New} - P_0}{P_0} \right) \times 100 \right] \%$$

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

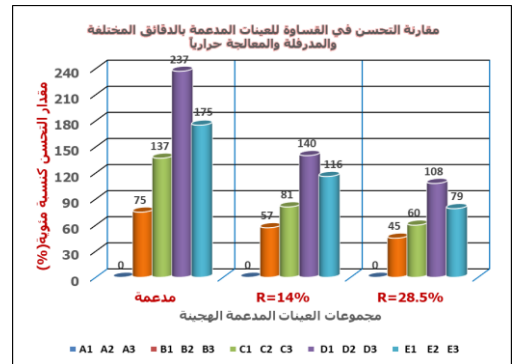
نلاحظ أن حققنا مقدار تحسن في الخواص تراوح بين (30%-237%) حسب شروط العمل في بحثنا وأنه عند نسبة التدعيم (Gr + 4% Tio2 9 %) العينة (D3) عندها كانت أعلى قيم للخواص الميكانيكية وبالتالي أصبح لدينا طيف واسع من العينات بخواص مختلفة تحقق (الكفاءة العالية والتكلفة المخفضة) بما يتلاءم مع التطبيق المطلوب .

وأن التحسن الحاصل في السلوك الميكانيكي عند الخواص المدروسة عند زيادة نسب التدعيم الهجين إلى نسبة معينة وبعد إجراء المعالجة الميكانيكية (CR) و الحرارية (T6) معاً والذي توصلنا له في بحثنا الحالي يتوافق مع ما توصل له العديد من الباحثين بالأبحاث الحديثة ذات الصلة بموضوعنا مع اختلاف نوع دقائق التدعيم ونسبتها وسبائك الألمنيوم الجاري تدعيمها والخواص الميكانيكية المدروسة وطريقة التصنيع ونوع المعالجة اللاحقة المطبقة ومُتغيرتها [10]

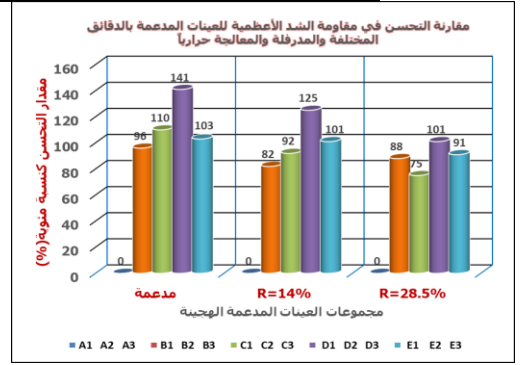
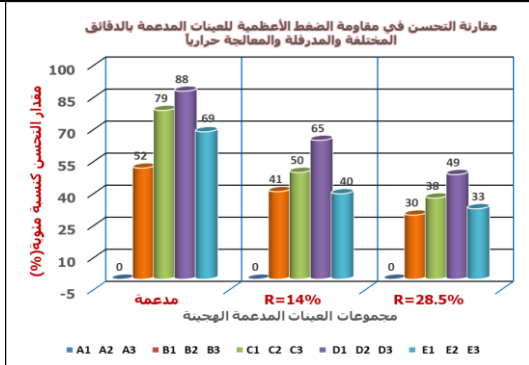
[11] [12] [14].



الشكل (24) مقدار التحسن في (YS)



الشكل (23) مقدار التحسن في (HV)



الشكل (26) مقدار التحسن في (UCS)

الشكل (25) مقدار التحسن في (UTS)

تفسير النتائج:

يتعلق الميكانيزم المسؤول عن تحسن الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم المدعم الهجين بانتظام وحسن توزيع الدقائق الداعمة ضمن الأساس بشكل شبه متجانس بالإضافة لتفاعلها معه وارتباطها والتصاقها به ويمكن تلخيص هذا الميكانيزم في نقاط رئيسية توضح آليات التقوية وتحسن الخواص في (MMCs): [13] [14] :

*وفقاً لنظرية أوران بالتقوية (Orowan Strengthening Mechanism) أو التقسية بالتشتيت للدقائق والتي تعتبر المسؤولة عن زيادة قساوة ومقاومة المعادن والسبائك للتشوه اللدن حيث تعتمد هذه النظرية على مبدأ إعاقة حركة الانخلاعات داخل المعدن الأساس فعندما تتحرك الانخلاعات تحت تأثير إجهاد تصطم بالدقائق القاسية والمشتتة بشكل متجانس ضمن الألمنيوم وفي هذه الحالة بدلاً من أن تقطع الدقائق تضطر الانخلاعات إلى الالتفاف حولها مما يؤدي إلى توليد حلقات من الانخلاعات حول كل جسيم من الدقائق المشتتة، هذه الحلقات تعمل كعوائق إضافية لحركة الانخلاعات اللاحقة وصعوبة مرورها خلال أو حول الدقائق المترسبة مما يزيد بشكل كبير من مقاومة المعدن للتشوه اللدن وكلما كانت الدقائق أصغر وأكثر تباعداً وتوزعاً (تشتتاً) زادت كثافة الانخلاعات (Dislocation density) الناتجة الجديدة (منبع فرانك-ريد) وبالتالي زادت فعالية تقوية أوران في تحسين مقاومة وقساوة المعدن.

*نقل الحمل (Load Transfer): هو المبدأ الأساسي في عمل المواد المركبة فعندما تتعرض لقوة خارجية (قوة شد أو ضغط مثلاً) تقوم مادة الأساس الأضعف بنقل جزء كبير من الحمل إلى الدقائق الداعمة الأكثر قساوة ومقاومة ويتم هذا النقل عبر سطوح التماس البينية بين المكونات مما

يؤدي إلى توزيع الحمل المطبق على هذه السطوح للتغلب على قوة الربط القوية بينها وتحقيق التشوه اللدن وكلما كان الترابط أقوى بين المعدن والدقائق كان نقل الحمل أكثر كفاءة مما يزيد بشكل كبير من مقاومة المعدن المدعم.

*تثبيت حركة الانخلاعات (Dislocations Pinning): حركة هذه الانخلاعات هي المسؤولة عن التشوه اللدن للمعدن إضافة الدقائق الداعمة يؤدي إلى إعاقة أو تثبيت حركة الانخلاعات داخل المعدن فعندما تصطدم هذه الانخلاعات بالدقائق الداعمة فإنها تتوقف أو تغير مسارها مما يزيد من مقاومة المعدن للتشوه اللدن وهذا من شأنه تحقيق زيادة كبيرة في مقاومة و قساوة المعدن المدعم.

* تعميم البنية المجهرية (Microstructural Refinement): تساعد الدقائق الداعمة على تحسين البنية المجهرية للمعدن الأساس بعدة طرق منها:

1. تصغير الحجم الحبيبي: تعمل الدقائق الداعمة المقدمة للمصهور كعوامل وبذور وأنوية تبلور (Nucleating agents) أثناء تصلب المادة و تسهم في تصغير الحجم الحبيبي (decreasing the grain size) مما يؤدي إلى تكوين عدد أكبر من الحبيبات الدقيقة وفقاً لقانون (هول- بيتش Hall-Petch) فإن مقاومة المادة تزداد مع تناقص حجم حبيباتها. تساهم الدقائق في تقليل العيوب الداخلية والمسامية مما يزيد من كثافة المادة وخواصها الميكانيكية.

2. تأثير التصلب بالترسيب Precipitation Hardening: من الممكن أن تتفاعل دقائق التذعيم مع المعدن الأساس لتكوين أطوار مترسبة دقيقة جداً عند حدود الدقائق وداخل المعدن وبالتالي تعمل هذه الرواسب الدقيقة بنفس طريقة الدقائق الداعمة حيث تعيق وتعرقل حركة الانخلاعات و تزيد مقاومة المعدن.

عدا عن الاختلافات الكبيرة بمعامل التمدد الحراري بين الألمنيوم الأساس ودقائق التذعيم الهجينة بنوعيتها وهذا يؤدي إلى عدم تطابق الانفعال الناتج عن الاختلافات بالنقل الحراري عند السطح البيني بين الأرضية ودقائق التقوية، والمحصلة فقدان التطابق بالإجهاد والذي يولد انخلاعات إضافية .

بينما انخفاض قيم الاستطالة للألمنيوم AA6061 يُعزى إلى وجود الدقائق الداعمة التي تسبب مناطق تركيز للإجهادات الموضعية عند أسطح التماس بين الدقائق والمعدن عدا على أن إضافة

هذه الدقائق يولد مناطق انزلاق (Slip regions) في المعدن أو نتيجة اختلافات كبيرة في السلوك المرن بين المعدن الأساس والدقائق المبعثرة وكون إضافة الدقائق له تأثير مشابه للتشحييم حيث يسهل حركة الدقائق على طول مستويات الانزلاق.

تأثير المعالجة الميكانيكية بالدرفلة على البارد (التصليد الانفعالي): [7] [9] [12] : تحقق تقوية المسبوكات المدعمة وتجعلها أقوى وذات مقاومة أعلى وذلك من خلال إدخال شبكة انخلاعات جديدة في المادة والتي تتداخل مع استمرار حركة الانخلاعات الأساسية وتكديسها وتكون عوائق لحركة بعضها البعض عدا على أنها تساعد على التخلص من المسامية والفراغات الميكروبية الموجودة ضمن البنية وتساعد في تحسين الاستطالة (المطيلية).

تأثير المعالجة الحرارية (التقسية بالترسيب): [5] [6] [12] [13] :

تؤدي إلى تحسين الخواص الميكانيكية السابقة: حيث تؤدي إلى تشكيل رواسب من دقائق -الطور الثاني- المحلول الجامد فوق المشبع Mg_2Si وتوزعها في البنية (وترسب أطوار وسطية أخرى مثل AL_3Ti و AL_4C_3 وهي أطوار قاسية ناتجة عن العمليات الانتشارية لعناصر السبك (Mg, Si) بعد المعالجة الحرارية المحلولة والتعتيق) وحصول تفاعلات مع الانخلاعات مما يؤدي إلى مقاومة حركة الانخلاعات المتحركة وفرملتها وبالتالي زيادة مقاومة السبيكة المدعمة وقساوتها.

من الجدير ذكره أن انخفاض الخواص الميكانيكية لبعض العينات المدروسة حتى مع ازدياد نسبة الدقائق الداعمة يعود بشكل رئيسي إلى انخفاض كفاءة عملية المزج والخلط Difficult to Stir and Mix وبالتالي ضعف توزع هذه الدقائق ضمن المعدن الأساس وميلها للتأكسد وللكتل والتجمع والطفو على سطح المصهور.

5. الاستنتاجات والتوصيات للأعمال المستقبلية:

الاستنتاجات:

1. توصلت الدراسة إلى تحديد الشروط العملية لتحضير مادة مركبة معدنية (HAMCP) من أساس سبيكة الألمنيوم (AA6061) مدعمة تدعيماً هجيناً بنوعين مختلفين من الدقائق القاسية بتقنية السباكة بالتحريك (SCT).

2. تحسن وارتفاع الخواص الميكانيكية له صلة وثيقة بضبط نسب التدعيم وبالاختيار المناسب للعمليات اللاحقة وشروطها (عمليات التشكيل والمعالجة الحرارية) بما يتلاءم مع الاستخدام المطلوب.
3. حسنت الدرفلة على البارد (CR) المتبوعة بالمعالجة الحرارية (T6) وفق الشروط المحددة الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم AA6061 المدعم الهجين عند نسبي التشكيل المختلفتين وكانت النتائج أفضل عند نسبة التشكيل الأعلى (R=28.5%) ممثلة بالعينة - العينة (D3)-.
4. في ضوء الدراسة الحالية أدت زيادة نسبة دقائق أوكسيد التيتانيوم (TiO₂) المُضافة حتى (9 wt%) مع ثبات نسبة الغرافيت (Gr) إلى زيادة القساوة للألمنيوم الأساس (AA6061) بالمقارنة مع المعدن الأساس (AA6061) غير المدعم .
5. تحسنت خواص الشد والضغط (إجهاد الخضوع - مقاومة الشد العظمى-مقاومة الضغط) للألمنيوم الأساس AA6061 مع انخفاض في المطيلية (ممثلة بالنسبة المئوية للاستطالة) بالمقارنة مع (AA6061) غير المدعم مع ازدياد نسبة دقائق الأوكسيد المُضافة حتى (9 wt%) مع ثبات نسبة الغرافيت المُضافة.
6. أفضل قيم للخواص الميكانيكية للألمنيوم المدعم الهجين تم الحصول عليها عند نسب تدعيم (9 wt% TiO₂ + 4% Gr) - العينة (D1)- وإن زيادة نسبة دقائق الأوكسيد فوق (9 wt%) مع ثبات نسبة الغرافيت المُضافة أدى إلى انخفاض في الخواص.

التوصيات للأعمال المستقبلية:

1. في مجال توصيف سلوك هذا النوع من المواد نوصي بتوسيع النتائج لتشمل دراسة خواص ميكانيكية أخرى للألمنيوم بعد التدعيم والمعالجة الميكانيكية الحرارية اللاحقة المُتبعة بالدراسة (مقاومة التعب والزحف.....) بالإضافة إلى دراسة خواص الاهتراء والاحتكاك والصمود الحراري عند درجات حرارة مرتفعة .
2. دراسة تأثير عمليات معالجة لاحقة أخرى سواء ميكانيكية أو حرارية أو كليهما ودراسة تأثير تغيير بارامتراتنا وشروطها على خواص المعدن المدعم الهجين المحضر.

3. العمل على تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين بطرق وتقنية تصنيع حديثة أخرى (تكنولوجيا المساحيق أو السباكة بالضغط).
4. من الممكن استخدام دقائق داعمة نانوية في تحقيق التدعيم الهجين للألمنيوم واستخدام ومقارنة سبائك أخرى من الألمنيوم مع ما تناولناه في دراستنا الحالية.

6. المراجع:

- [1] SURAPPA, M 2003- **Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities**. Vol. 28, Parts 1 & 2, Printed in S⁻adhan⁻a, First Edition, India, 319–334 p.
- [2] Chawla, N and Chawla, K, 2013, **Metal Matrix Composites**. Springer Science +Business Media New York Journal of Metals Vol. 2, Second Edition USA, 1-381p.
- [3] Stojanović, B and Ivanović ,L 2015-**APPLICATION OF ALUMINIUM HYBRID COMPOSITES IN AUTOMOTIVE INDUSTRY**. Vol.22, Issue 3 Ver, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME) Tehnički vjesnik, Serbia, 247-251 p.
- [4] Saho,M. Rout, Naveed ,I, and Patra,D 2015-**Design and Fabrication of a Stir Casting Furnace Set-Up**. Vol. 5, Issue 7, (Part - 3) July, Manabhanjan Sahoo et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), India, 80-88p.
- [5] Saravanakumar, A and Sasikumar ,P, 2018-**Flexural behavior and Microstructure of hybrid Metal Matrix Composites**. Vol.9, Issue 10, Journal of Materials and Environmental Sciences (JMES), India, 2951-2955p.
- [6] Wakeel, A and Pasha, R.A, 2019-**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ALUMINUM AL METAL MATRIX COMPOSITE REINFORCED WITH SiC /Al₂O₃ AND METAL PARTICLES USING STIR CASTING PROCESS**. Vol. 71, Pakistan Journal of Science (APICEE), Pakistan, 266-272 p.
- [7] Nazeer, A and Safiulla ,M, 2020-**Mechanical and Wear Properties of Cold Extruded Al6063 Metal Matrix Alloy Reinforced with Silicon Carbide, Alumina and Cerium Oxide**. Vol.9, Issue 3, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), India, 4091-4097p.

[8] Qudeiri, A. Abdudeen,A and Ziout, A, 2021- **A Review on AA 6061 Metal Matrix Composites Produced by Stir Casting.** Journal of Materials MDPI Vol. 14, 175, January , Switzerland,1-22p.

[9] Jun-Ren Zhao, Fei-Yi Hung, Bo-Jou Chen, 2021- **Effects of heat treatment on a novel continuous casting direct rolling 6056 aluminum alloy: cold rolling characteristics and tensile fracture properties.** journal of materials research and technology Vol. 11, Taiwan,535-547p.

[10] Haripriya ,M and Rao ,N, 2022-**Fabrication and Tensile, Compressive, Flexural Mechanical Testing of Aluminium Metal Matrix Composites Reinforcement with TiO₂.** Vol.7, No 1, International Journal of Mechanical Engineering Kalahari Journals, India, 2523-2531p.

[11] Khosroshahi,N, Mousavian, R., and Brabazon, D., 2023 - **Mechanical properties of rolled A356 based composites reinforced by Cu-coated bimodal ceramic particles,** Vol (10) , Journal of School of Mechanical & Manufacturing Engineering, Dublin City University, Ireland, 110-122p.

[12] Kirman, K., Suhartono, H., vano , O., and Irawadi, Y., 2024 - **Enhancing Aluminum Alloys for High-Strength Electrical Conductor with Nanoparticle Reinforcement,** Vol (11) (03), Issue 03, Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy, Indonesia, 2720-2727p.

[13] Liang-Yu Chen , Peng, Q Lina Zhang and Lai- Zhang,C 2024-**An overview of additively manufactured metal matrix composites: preparation, performance, and challenge.** Vol.6, International Journal of Extreme Manufacturing (IJEM), China, 1-45p.

[14] Yakoub ,G and Bakrey ,M, 2025-**Optimizing Mechanical Properties of Al-6061 Alloy with Varied Nanoparticle Reinforcements: A Study Using Titanium Dioxide and Silicon Carbide Nanoparticles.** Vol.6, Issue 1, International Journal of Engineering Sciences and Applications (SVU), Egypt, 39-45p.