

دراسة السلوك الميكانيكي لسبيكة الألمنيوم (AA7075) المدعمة بالدقائق تدعياً هجيناً والمُصنعة بتقنية السباكة بالمزج (SCT) بعد تطبيق الدرفلة على البارد والمعالجة الحرارية معاً

معتز الحصريه * (1)

mootaz86@gmail.com

الملخص

تم في هذا البحث تدعيم سبيكة الألمنيوم (AA7075) بدقائق قاسية ميكروية من أوكسيد التيتانيوم (TiO_2) بنسبة وزنية ثابتة (6 wt%) ومن كربيد السيلكون (SiC) بنسب وزنية متغيرة (X= 3, 6, 9 and 12 wt%) بطريقة السباكة بالمزج (SCT)، ثم قُمناً بعد التدعيم لزيادة الكفاءة الميكانيكية بعملية الدرفلة على البارد (CR) بنسبة تشكيل ($R=25\%$) وأُتبعَت الدرفلة بالمعالجة الحرارية المحلولية (T6) للعينات المدعمة.

ولقد أوضحت نتائج الفحص المجهرى توزيع الدقائق الداعمة الهجينة بشكل شبه منتظم وبالتالي نجاح عملية التدعيم والحصول على الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCS) وفعالية تقنية السباكة بالمزج (SCT).

لقد بينت نتائج الاختبارات الميكانيكية أن قيم القساوة ومقاومة الضغط و الشد تحسنت مع إضافة دقائق التدعيم المشتركة وزيادة نسبتها وأن المعالجة الميكانيكية الحرارية حسنت من السلوك الميكانيكي بالمقارنة مع (AA7075) المفرد وأن أفضل الخواص تم الحصول عليها بعد المعالجة الميكانيكية الحرارية عند نسبة تدعيم هي (TiO_2 9 % SiC + 6 % العينة -D2 - بالمقارنة مع باقي العينات بنسبة تحسن بالخواص تجاوزت الـ (80%) حيث وصلت قيمة القساوة في العينة المذكورة إلى (165.5 Hv) وقيمة مقاومة الضغط إلى (389Mpa) وقيمة مقاومة الشد العظمى (334Mpa).

الكلمات المفتاحية: سبيكة الألمنيوم (AA7075)، السلوك الميكانيكي، التدعيم الهجين، تقنية السباكة بالمزج (SCT)، الدرفلة على البارد، المعالجة الحرارية المحلولية، مقاومة الضغط.

(1). دكتور عضو هيئة تدريسية في قسم هندسة التصميم والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة حمص، حمص، سوريا.

ورد للنشر بتاريخ : 2025/12/21

قبل للنشر بتاريخ : 2026/3/4

Study The Mechanical Behavior of the Aluminum Alloy (AA7075) Reinforced with Hybrid Particles manufactured By Stir Casting Technique (SCT) after applying Cold Rolling and Heat Treatment together

*Mootaz Al husaria** (1)

(1) Teacher in the Design and Production Engineering Department, Faculty of Electrical and Mechanical Engineering, Homs University, Homs, Syria

Abstract

In This research an Aluminum alloy (AA7075) was reinforced with hard particles having size of micron of Titanium Oxide with a fixed weight percentage (6wt%) and Silicon Carbide 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 forming rate ($R = 25\%$) and the rolling was followed by a solution 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 technique.

The results of tests have shown The Hardness, Compressive and Tensile strength were determined, with the addition of hybrid reinforcement particles and the increase in its percentage and thermal mechanical treatment improved from mechanical behavior compared to (AA7075) alone. and that the best mechanical properties were obtained after mechanical heat treatment at reinforcement ratios (6% TiO_2 + 9 % SiC) compared to the rest of the samples with an improvement rate of properties exceeding (80%)-Sample D2- as the hardness value in the mentioned sample reached (165.5 Hv), Compressive strength value (389 MPa) and the Ultimate tensile strength value (334 MPa).

Keywords: Aluminum alloy (AA7075), Mechanical behavior ,Hybrid reinforcement, Stir Casting Technique (SCT), Cold rolling, Solution heat-treatment, Compressive strength.

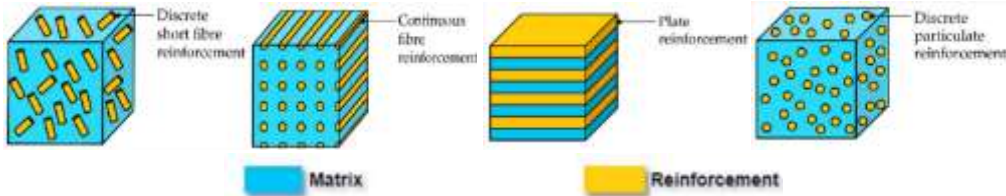
1. المقدمة:

إن التطور التكنولوجي والثورة الصناعية الرابعة تفرض الحاجة الدائمة إلى ابتكار مواد هندسية حديثة وتطوير المواد الهندسية التقليدية لتوسيع مجال الاستخدام الصناعي لها ومن هنا ظهرت فكرة المواد المركبة المعدنية (MMCs) أو ما يُسمى "المعادن المدعمة"، فمثلاً لن نتمكن من استخدام سبائك الألمنيوم - بهدف الاستفادة من خواصها المميزة - كمواد بديلة عن المعادن الأخرى غالية الثمن مرتفعة الوزن في تطبيق ما إلا في حال تمكنا من تحسين سلوكها الميكانيكي بنسب تحسن مميزة حيث لاتزال بعض التطبيقات مُقتصرة على استخدام معادن محددة. لذلك لا يزال العمل البحثي مستمراً من قبل الدارسين في هذا المجال من أجل اقتراح واعتماد طرائق 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.

ولقد تزايد الطلب على المواد المركبة ذات الأساس المعدني ما بين عامي (2015-2025) لأجل عديد التطبيقات الصناعية (تطبيقات النقل والفضاء والتطبيقات الإلكترونية والحرارية) كما ذكر (Chawla, 2013). تكتسب سبائك الألومنيوم في التطبيقات الهندسية المعاصرة أهمية متزايدة كبديل فعّالة 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 وهو ما جعله أهم وأول سبائك المعادن الملونة الجاري تدعيمها في الوقت الحالي ثم يليه المغنزيوم حسب (Surappa, 2003) و (Chawla, 2013) و (Stojanovic and Ivanovic, 2015).

يجري تدعيم سبائك الألومنيوم بطرائق تدعيم قديمة نسبياً وطرائق متطورة للحصول على المواد المركبة ذات الأساس المعدني من الألومنيوم (AMCs).

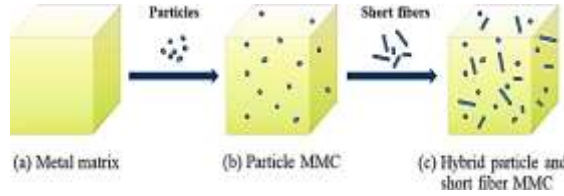
تعتمد الطرائق التقليدية للتدعيم على استخدام مادة تدعيم وحيدة بمقياس من مرتبة الميكرن وتتموضع بسيط لمادة التدعيم لنحصل على: الألومنيوم المدعم بالدقائق (PAMCs) - الألومنيوم المدعم بألياف قصيرة أو شعيرات (SFAMCs) - الألومنيوم المدعم بألياف طويلة مستمرة (CFAMCs) - الألومنيوم المدعم بالطبقات (PLAMCs) وفق (Surappa, 2003) و (Chawla, 2013). وهي موضحة كالتالي بالشكل (1):



الشكل (1) طرائق التدعيم التقليدية للألمنيوم

أما الطرائق الحديثة المتطورة لتدعيم سبائك الألمنيوم: فتعتمد على مواكبة التقنيات الحديثة والمتقدمة في التدعيم والتصنيع للحصول على ألمنيوم بخواص مميزة ولتلافي العيوب والسلبيات في الطرق التقليدية القديمة، ومن أهم الطرائق الحديثة لتدعيم سبائك الألمنيوم وفق (Pande et al., 2025) و (Chen et al., 2024):

(a) تدعيم سبائك الألمنيوم بشبكة -نسيج- ثنائي أو ثلاثي (Structural or Woven reinforced).
 (b) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام ألياف أو دقائق نانوية (Nano composites AMNCs).
 (c) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام تقنية التدعيم الهجين (التدعيم المشترك (Hybrid composites (HAMCs) 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). (Saravanakumar, and Sasikumar, 2018) وكيفية التدعيم الهجين موضح بالشكل (2):
 كما ذكر (Pande et al., 2025) و (Chen et al., 2024)



الشكل (2) طريقة التدعيم الهجين -المشترك-

يمكن تحقيق التدعيم الهجين للألمنيوم بطرائق وتقنيات متعددة 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 وإن الخصائص النهائية التي تتمتع بها المادة تعتمد بشكل مباشر على تقنية التصنيع المختارة، 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 المعدنية وتشكيلها الأولي، وغالباً ما لا تؤدي هذه المرحلة إلى الشكل أو البنية النهائية للمنتج.
- المعالجات اللاحقة (Secondary Processing): تلي المعالجات الأساسية، وتهدف إلى تحسين خواص المادة أو تعديل شكلها النهائي، وتشمل: التشكيل، المعالجة الحرارية، والتشغيل الميكانيكي.
- لا بد أن تسبق هذه المراحل عمليات تمهيدية أو تحضيرية (Preparing Processing): للمعدن وجسيمات التقوية قبل الدمج، والتي تلعب دوراً حيوياً في تحسين الالتصاق والارتباط بين المعدن والمادة الداعمة كما وضح (Chen et al., 2024).

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 داخل المعدن الأساس، لتحقيق بنية خالية من العيوب المجهرية وضمان أداء عالي في التطبيقات النهائية. وبشكل عام تصنف أساليب التصنيع المستخدمة في صناعة (MMCs) تبعاً لدرجة حرارة

في مقالة (Nazeer and Safiulla, 2020) تناول الباحثان تأثير البثق على البارد فقط باستخدام مكبس 800ton على السبيكة AA6063 المنتجة بطريقة (SCT) والمدعمة بدقائق مختلفة وبشكل إفرادي من كربيد السيلكون وأوكسيد الألمنيوم وأوكسيد السيريوم CeO₂ 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.

في دراسة (Mukesh et al., 2021) صنّع الباحثون سبائك الألمنيوم المدعم بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) حيث تم تقوية سبيكة الألمنيوم (AA6061) بدقائق مختلفة من نتريد البورون BN بنسب متغيرة ثم تطبيق البثق على الساخن عند درجة حرارة 500°C على عينات الألمنيوم المدعم ثم بعد ذلك المعالجة الحرارية بالتخمير والتقسية لدرجة 530°C والإبقاء لمدة 2hour والتبريد السريع بالثلج والتعتيق عند درجة حرارة 175°C باستخدام أربعة أزمنة تعتيق مختلفة وقد أظهرت نتائج الدراسة إنتاج الألمنيوم الهجين بنجاح بهذه الطريقة بالإضافة إلى أن تطبيق عملية البثق والمعالجة الحرارية أدت إلى تحسن في السلوك الميكانيكي على الشد والقساوة وانخفاض المطيلية مع ازدياد نسبة دقائق نتريد البورون المضافة.

في دراسة (Albusairi and Alhajiri, 2023) تطرق الباحثون لدراسة تأثير كل من أقطار ونسبة الألياف القصيرة من أكسيد الألمنيوم (Whiskers) على سبائك الألمنيوم المدعم بألياف قصيرة من أوكسيد الألمنيوم بنسبة متغيرة وأقطار مختلفة ودقائق نانوية من كربيد التيتانيوم معاً تدعيماً مزدوجاً ثم قام الباحثون بدراسة تأثير المعالجة الحرارية اللاحقة والتي كانت على نوعين التخمير بالتسخين لدرجة 500°C والإبقاء لمدة 7hour والتبريد البطيء بجو الفرن أما الإجراء الآخر فهو التقسية بالتسخين لدرجة حرارة 500°C والتبريد السريع بالماء وقد أظهرت النتائج ازدياد مقاومة الشد العظمى والقساوة ومقاومة الانضغاط عند استخدام المعالجة الحرارية بالتقسية مقارنة بالتخمير فقط وأن هذه الخواص تحسنت مع ازدياد نسبة وأقطار ألياف أوكسيد الألمنيوم باستثناء القساوة التي انخفضت مع ازدياد أقطار Particle Sizes .

في ورقة بحثية (Seshappa et al., 2024) صنّع الباحثون سبائك الألمنيوم المدعم الهجين بتقنية مطورة من السباكة بالتحريك تُدعى (Squeeze Casting) السباكة بالضغط حيث تم تقوية سبيكة الألمنيوم (AA7075) بدقائق مختلفة من أوكسيد الألمنيوم بنسبة ثابتة ودقائق قاسية (Rice Husk Ash) بنسب متغيرة معاً تدعيماً مشتركاً ثم تطبيق ضغط على الألمنيوم المدعم يصل إلى (60Mpa) وقد أظهرت النتائج نجاح إنتاج الألمنيوم الهجين من خلال الصور المجهرية وتحليل XRD وتحسن في السلوك الميكانيكي على الشد والقساوة وتفاوت في المتانة الصدمية مع ازدياد نسبة دقائق التدعيم المضافة وتطبيق الضغط.

في أحدث الدراسات (Pande et al., 2025) قام الباحثون بتدعيم سبيكة (AA 6063) باستخدام مواد تدعيم ثلاثية معاً من دقائق ميكروية من أكسيد الألمنيوم و كربيد السيلكون وسولفيد الكاديوم CdS باستعمال تقنية السباكة بالتحريك (SCT) بنسب تدعيم هجينة متنوعة للوصول للخواص الميكانيكية الأمثل من خلال دراسة خمس حالات للتدعيم وقد أظهرت النتائج نجاح إنتاج الألمنيوم الهجين وتحسن في مقاومة الضغط والقساوة ومقاومة الشد الأعظمية ومقاومة الاهتراء وانخفاض المتانة الصدمية مع زيادة نسب دقائق التدعيم لكل نوع حتى (22%) معاً من الأنواع الثلاثة و أفضل النتائج للخواص الميكانيكية على الشد والضغط والقساوة كانت بعد عملية التدعيم الهجين بالأوكسيد والكربيد بنسبة (10%) وأكسيد ونسبة (2%) من سولفيد العينة A5.

3. مبررات البحث:

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 (Chen et al., 2024).

إن تدعيم سبائك الألمنيوم بالطرائق التقليدية تقيدته محدودية التطبيق وعدم تلبية متطلبات العمل والتكاليف الباهظة لمواد التقوية ولتصنيع الألمنيوم المدعم وصعوبة الوصول إلى الخواص المرجوة في كثير من الحالات، كل هذا دفع إلى تدعيم الألمنيوم بالطرائق المتطورة من مواد نانوية أو شبكات تدعيم ولكن من سلبياتها أنها ذات تكاليف تصنيع مرتفعة وبالتالي ارتفاع تكلفة الألمنيوم المدعم عدا عن الحاجة إلى تجهيزات معقدة للتصنيع والإنتاج بالأخص في حال الألياف المستمرة وبالاعتماد على التدعيم الهجين 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 المضافة معاً عدا عن سهولة تصنيع الألمنيوم الهجين المدعم بالدقائق وتعدد تطبيقاته وإمكانية التحكم بخواصه من خلال نسب ونوع مواد التدعيم بالإضافة لإمكانية إجراء عمليات لاحقة على المنتجات وقابلية إعادة التدوير من خلال الصهر وإعادة تشكيل مرات كثيرة كما ذكر (Qudeiri et al., 2021).

وأن ما يحقق فعالية عملية تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCS) اختيار طريقة ملائمة للتصنيع مثل السباكة بالمزج (SCT) التي تتفوق على باقي تقنيات التصنيع كما ذكرنا مسبقاً وهي معتمدة تجارياً. ومع استخدام عملية المعالجة اللاحقة المناسبة بعد تصنيع (HAMCS) (الدرفلة على البارد والمعالجة الحرارية في بحثنا) من شأنه تحسين ورفع الخواص والتشكيل إلى الأجزاء النهائية بدقة عالية وتقليل العيوب الناتجة عن السباكة وتصحيح عيوب البنية وتحسين التجانس وهذا ما يعزز من الأداء والسلوك الميكانيكي ويمكن أن نكتفي

بالمعالجة الحرارية فقط كعملية لاحقة في حال أردنا تعديل خواص (HAMCs) الميكانيكية دون تغيير شكلها (Seshappa et al., 2024) (Chen et al., 2024) (Chawla, 2013) (Surappa, 2003). لذا تم في هذا البحث تسليط الضوء على تحضير مادة مركبة معدنية ذات أساس من سبائك الألمنيوم (AA7075) مدعمة تدعيماً هجيناً باستخدام دقائق مختلفة (SiC-TiO₂) بطريقة (السباكة بالمزج SCT) ودراسة تأثير زيادة نسبة الكريبد عند ثبات نسبة الطور الأخر الأوكسيد على السلوك الميكانيكي: (القساوة - خواص الضغط والشد) ومن ثم دراسة تأثير الدرفلة على البارد (CR) بنسبة تشكيل (R=25%) مع المعالجة الحرارية (T6) كعمليات لاحقة على الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم المدعم الهجين المحضر.

4. أهمية البحث وأهدافه:

مما تقدم في الدراسات السابقة 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 في بيئة العمل. 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.

لذا فإن أهداف البحث تتمثل فيما يلي:

1. تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCs) بتقنية (SCT) ودراسة السلوك الميكانيكي لسبيكة (AA7075) عند زيادة نسبة الدقائق التدعيم من (SiC) حتى (12%) وعند تثبيت نسبة أوكسيد التيتانيوم (6%) وتحديد النسب المثالية من كلا الدقائق المضافة والتي تُعطي أفضل تحسن في السلوك الميكانيكي.
2. دراسة تأثير عمليتي الدرفلة على البارد (CR) بنسبة التشكيل المُطبقة (R=25%) والمعالجة الحرارية (T6) معاً كعمليات لاحقة على القساوة وخواص الضغط والشد للعينات المدعمة الهجينة.
3. الوصول إلى تصور أوضح حول ربط نوع ونسبة الدقائق الداعمة وطبيعة العمليات اللاحقة بتغير خواص الألمنيوم المدعم الهجين الناتج بما يتلاءم مع التطبيق المطلوب.

5. مواد وطرائق البحث:

المواد الأولية المستعملة لتحضير (HAMCs):

- المعدن الأساس (Metal Matrix): تم استلام سبيكة (AA7075) موضوع البحث وكانت على شكل بيليت بقطر (12cm) تركيبها الكيميائي التجريبي والقياسي حسب ASTM كما في الجدول (1).

الجدول (1) التركيب الكيميائي لسبيكة AA7075

العنصر	Cr	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Si	Ti	AL
--------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

التركيب القياسي	(0.18-0.28)	(2.1-2.9)	< 0.5	(1.2-2)	< 0.3	(5.1-6.1)	< 0.4	<0.2	Bal.
التركيب التجريبي	0.18	2.35	0.17	1.8	0.01	5.8	0.085	0.05	Bal.

- مواد التدعيم (Reinforcement Particles): هي عبارة عن مساحيق ناعمة قاسية ميكروية من كربيد السيلكون (SiC) وأوكسيد التيتانيوم (TiO₂) بحجم وسطي (20 → 50µm) بعد نخلها على جهاز المناخل الآلي نوع من (Rids dale & Co LTD, England).
- مواد مساعدة (Added Materials) : بودرة مغنيزيوم ناعمة تُضاف لتحسين التبلل والترطيب بين المعدن والدقائق المُضافة بالإضافة لبودرة من الألمنيوم النقي وأقراص طاردة للخبث.

التجهيزات المُستعملة لتحضير (HAMCs) بطريقة السباكة بالمزج (SCT) ولإجراء المعالجة الميكانيكية (CR) والمعالجة الحرارية (T6):

❖ آلة السباكة بالمزج: Stir Casting Machine

تم تصنيع آلة السباكة بالمزج محلياً بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة حمص والتي تضم الأجزاء التالية الموضحة بالشكل (5) كما ذكر كل من (Saho et al., 2015) (Qudeiri et al., 2021):



الشكل (5) آلة السباكة بالمزج المصنعة محلياً

الشكل (6) آلة الدرفلة المصنعة محلياً للعينات الدائرية

❖ قالب الصب المعدني: Metal Mold

❖ ميزان حساس: Weighing Machine

❖ آلة التشكيل على البارد (آلة الدرفلة):

بعد إجراء الحسابات التصميمية تم تصنيع آلة الدرفلة المستخدمة في بحثنا في المخبر الجامعي للتشغيل المبرمج التابع لقسم التصميم والإنتاج بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة حمص وهي مخصصة لدرفلة عينات الألمنيوم الدائرية وموضحة بالشكل (6) حسب ما ذكر (Zhao et al., 2021).

❖ فرن المعالجة الحرارية (Heat treatment Furnans) :

استخدمنا فرن معالجة حرارية الشكل (9) من النوع (CurboLite, Hope watt :3100 w) تصل درجة حرارته العظمى (Max temp :1200° C).

طرائق العمل:

▪ تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين (Qudeiri et al., 2021) . (Pande et al., 2025)

تم تقطيع بيليت الألمنيوم الأساس (AA7075) إلى قطع صغيرة ووزنها وتحديد أوزان الدقائق المضافة بنوعيتها حسب النسب المطلوبة (wt%) في العينات المدروسة ثم وضع قطع الألمنيوم في البوتقة الغرافيتية داخل الفرن ورفع درجة حرارته 850°C إلى 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 ($\text{SiC}-\text{TiO}_2$) 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 المغنيزيوم (لا تتجاوز 1%) لتحسين التبلل أيضاً ولتعويض الفقد نتيجة الاحتراق والتأكسد مع تنفيذ الخلط يدوياً بقضيب مزج لضمان تجانس التوزيع، بعد ذلك يتم إدخال الخلاط الميكانيكي في المصهور ضمن البوتقة الموجودة داخل الفرن وتدويره بسرعة (350r.p.m) ولمدة (15min) للحصول على دوامة ضمن المصهور Vortex (تم اختيار هذه الشروط اعتماداً على مجموعة تجارب وعلى الدراسات المرجعية موضحة بالجدول رقم (2) وفق دراسة (Mukesh et al., 2021)) ونتيجة لفعل الدوامة يتم سحب خليط الدقائق الهجينة الى داخل المصهور وتوزيعه خلاله وأثناء عملية الخلط يتم إعادة تسخين الخليط إلى درجة الحرارة 850°C لتحسين انتشار وتوزيع الدقائق الداعمة الهجينة ضمن المصهور وبعد انتهاء الخلط تتم عملية صب المادة المركبة الهجينة في القالب المعدني المسخن لدرجة حرارة 300°C لتلافي التجمد المسبق للمصهور وللتقليل من عيوب السباكة في المسبوكات وأخيراً يتم إخراج العينات من داخل القالب بعد تبريده وتكرار العملية عدة مرات وفقاً للنسب المطلوب إضافتها من الدقائق الداعمة الهجينة للسبيكة الأساس لنحصل على عشرة عينات لكل اختبار (A1, A2, B1, B2.....) والجدول (2) يوضح بارامترات (SCT) المستخدمة أثناء التصنيع حسب ما ذكر (Qudeiri et al., 2021):

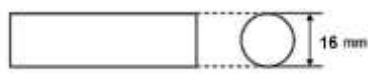
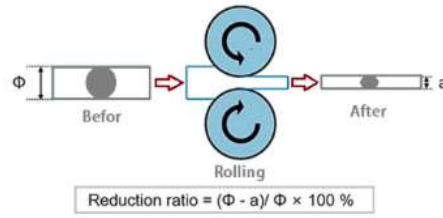
الجدول (2) بارامترات SCT المستخدمة أثناء التصنيع

المتغير	درجة حرارة المادة الدقائق الداعمة	درجة حرارة القالب	سرعة الخلط	زمن المزج	درجة حرارة الخلط
القيمة	(200°C)	(300°C)	(350r.p.m)	(15 min)	(750°C)

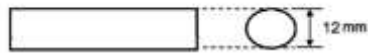
▪ عملية المعالجة الميكانيكية (الدفلة على البارد CR):

أُجريت المعالجة الميكانيكية المتضمنة التشكيل بالدفلة على البارد (CR) (تحقيق التصليد الانفعالي Strain Hardening) على العينات المدعمة الهجينة وكان الغرض الرئيسي منها هو تحقيق الاهداف الآتية:

- تحسين الخواص الميكانيكية للمسبوك 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.
- عُرِضت كل العينات المسبوكة المدعمة بالمجموعة الثانية (خمس عينات لكل اختبار) حسب شروط العمل (A2, B2 , C2.....E2) لعملية التشكيل (المعالجة الميكانيكية) الشكل (7) بنسبة تشكيل (تخفيض) $mm(16 \rightarrow 12)$ أو تسمى درجة التشكيل والتي تحسب كما يلي كما أوضح (Zhao et al., 2021):



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



$$R (\%) = \left(\frac{16 - 12}{16} \right) \times 100\% = \boxed{25\%}$$

الشكل (7) حساب نسبة التشكيل

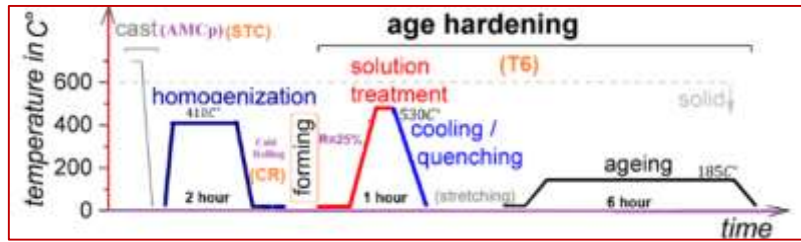
▪ المعالجة الحرارية المحلولية T6:

أُجريت المعالجة الحرارية المحلولية في درجة 530°C ولمدة (1hour) يعقبها التبريد بالماء ثم التعتيق الصناعي في درجة 185°C ولفترة زمنية (6hour) على جميع عينات الألمنيوم المدعمة في المجموعة الثانية (A2, B2 , C2.....E2) المدعمة تدعيماً مشتركاً والمُدرفلة. وكان الغرض الرئيسي من المعالجة المحلولية (تحقيق التصليد بالترسيب Precipitation Hardening) هو تحقيق الأهداف الآتية:

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

وبعد عملية التعتيق تترسب دقائق ناعمة جداً من الطور الثاني Mg_2Si وبالتالي التخلص من ظاهرة العزل المجهري (Micro Segregation للسيلكون والمغنيزيوم) تعمل هذه الرواسب على إعاقة الانخلاعات مما تؤدي الى تحسين الخواص الميكانيكية للسبيكة.

- تغيير المعالجة بنية جزيئات (AlFeSi) وهي عبارة عن طور غير منحل في هذه السبائك.
 - التخلص من بعض عيوب السباكة وضمان توزيع الاطوار بشكل متجانس للحصول على بنية منتظمة متجانسة خلال المسبوكة و إزالة الاجهادات الداخلية الناشئة من الظروف الحرارية أو التقلص اثناء التجمد وفق ما ذكر (Saravanakumar and Sasikumar, 2018)(Mukesh et al., 2021)
- بعد عملية التدعيم الهجين ستكون القطع مُجهدة نتيجة عملية التجمد لذا تم إجراء المُجانسة (Homogenization) (إحدى عمليات التخمر) لجميع مسبوكات الألمنيوم لتحقيق التجانس وإزالة الإجهادات الداخلية قبل أي معالجة لاحقة بالتسخين لدرجة $410^{\circ}C$ وإبقاء لزم $2hr$ ثم تبريد بطيء بجو الفرن حسب ما ذكر (Albusairi and Alhajiri, 2023) وبعد الانتهاء من المعالجة الميكانيكية (التشكيل) تم تعريض العينات المدعمة والمُشكلة لعملية معالجة حرارية لاحقة كما في دورة العمل الموضحة بالشكل (8):



الشكل (8) دورة العمل بعد تحقيق التدعيم الهجين (درفلة على البارد لاحقة+ معالجة حرارية لاحقة) قبل إجراء الاختبارات على العينات المدعمة الهجينة تم تقسيمها إلى خمس فئات (A,B,C,D,E) وفقاً لنسب المواد المُضافة (نسب التدعيم) وضمن كل فئة يوجد مجموعتان حسب شروط العمل (تدعيم فقط-تدعيم ومعالجات لاحقة) وبعد ذلك تم تجهيز عشر عينات (مع عينات إضافية عند نفس الشروط لتحقيق من النتائج) بعمليات التشغيل للفحص المجهري وللاختبارات الميكانيكية وفق (ASTM) 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

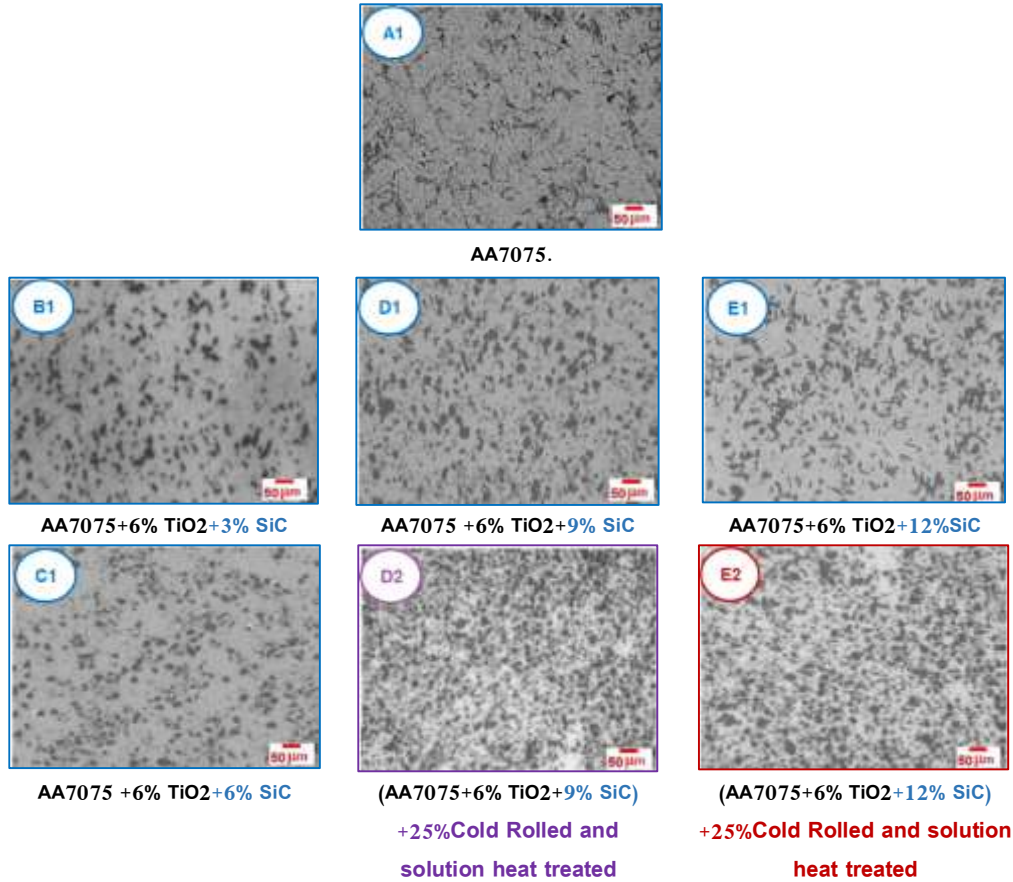
نسبة التدعيم المتغيرة (6)% TiO ₂ + (X) %SiC	Different Temper Conditions /Sample ID/	
	المدعمة الهجينة	المدعمة والمدرفلة (R= 25% والمعالجة حرارياً
PureAA7075	A1	A2
(X=3% SiC)	B1	B2
(X=6% SiC)	C1	C2
(X=9% SiC)	D1	D2
(X=12% SiC)	E1	E2

أنجز هذا البحث في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية (مخبر التشغيل المبرمج ومخبر علم المواد ومخبر المعالجات الحرارية) في جامعة حمص.

6. النتائج والمناقشة:

1) نتائج الفحص المجهرى :Results of Optical Microscope

تم شحذ عينات الألمنيوم المدعم الهجين بأوراق صنفرة بدرجات نعومة مختلفة (2000 → 600) على جهاز الشحذ بوجود تيار مائي ثم عملية التلميع باستعمال معجون الألماس الصناعي بحجم (0.25µm) ثم أجريت عملية غسل للعينات بالماء والكحول ثم التجفيف بالهواء أما إظهار البنية فتمت بالغمس حوالي (30sec) على الأقل بمحلول كيلر (Keller) ذو التركيب (190ml H₂O, 5ml HNO₃, 3ml HCL & 2ml HF) تم فحصها على المجهر الضوئي وبمقدار تكبير قدره X200 وفق المواصفة ASTM-E3. وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (9) حيث توزعت الدقائق الداعمة من الأكسيد والكربيد بنوعيتها والعديد من الرواسب ضمن الألمنيوم الأساس بشكل شبه منتظم تقريباً وكان تظهر ضمن البنية بشكل أغزر وأكثر حيث تزداد المساحة المشغولة فيها على الصور المجهرية -المناطق العاتمة- مع زيادة نسبتها لحد معين كما ذكر كل من (Seshappa et al., 2024)(Saravanakumar and Sasikumar, 2018).



الشكل (9) صور المجهر الضوئي توضح توزيع دقائق التدعيم الهجينة ضمن الألمنيوم الأساس AA7075 وتأثير المعالجة الميكانيكية والحرارية.

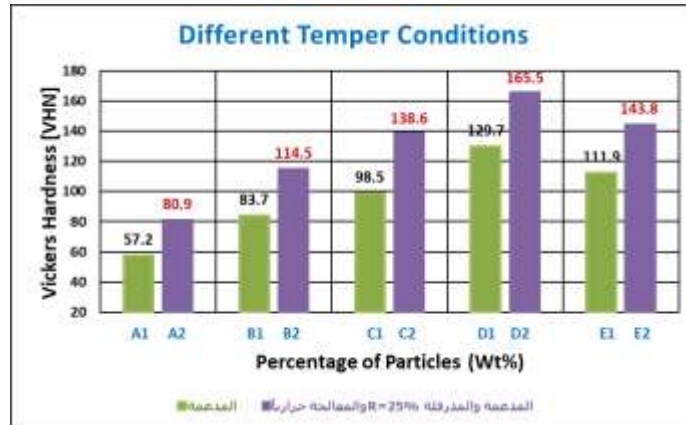
تم استخدام المجهر الضوئي نوع (MEIJI) المجهز بكاميرا رقمية نوع(DCE-2) مُنصبة ببرنامج خاص على جهاز الحاسوب لدراسة البنية المجهرية للعينات (مع برنامج لمعالجة الصور المجهرية Image J).

(2) نتائج اختبار القساوة: Hardness test Results

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

الهدف من إجراء القساوة مراقبة نجاح التدعيم والمعالجات اللاحقة وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (10) حيث إنه ازدادت قساوة الألمنيوم إلى حد معين مع ارتفاع نسبة إحدى الدقائق الداعمة الهجينة القاسية الموزعة ضمنه.

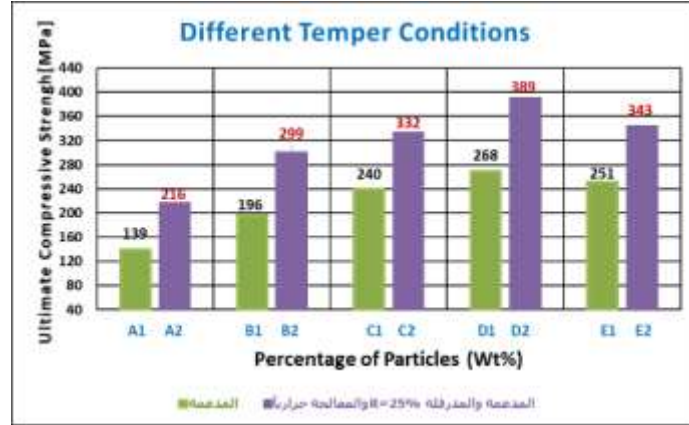
أما المعالجة الميكانيكية (CR) عند نسبة تشكيل (R=25%) والحرارية (T6) فقد ساعدت على الحصول على قيم عالية للقساوة لعينات الألمنيوم المدعم الهجين بلغت أعلى قيمة (165.5HV) العينة D2-.



الشكل (10) تأثير التدعيم الهجين والمعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم القساوة

(3) 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 تم إجراء اختبار الضغط على نفس جهاز الشد (TINIUS OLSEN H25KS) تحت حمولة ضغط تدريجية مُطبقة 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 UCS) الشكل (11).



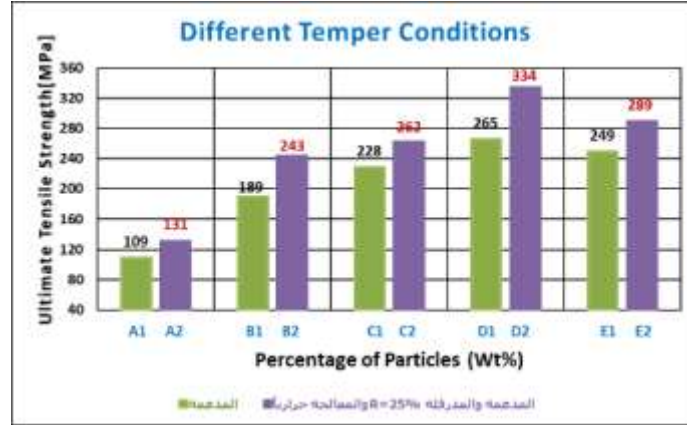
الشكل (11) تأثير التدعيم الهجين والمعالجة الحرارية الميكانيكية على مقاومة الضغط العظمى

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (16) حيث إن مقاومة الضغط العظمى UCS للألمنيوم الأساس زادت مع ازدياد نسبة دقائق الكريبد القاسية وبالتالي ارتفاع كمية الدقائق الهجينة الموزعة ضمنه إلى حد معين 15%. كما يمكن ملاحظة أن المعالجة الميكانيكية (CR) المُتبعَة بالحرارية (T6) فقد أدت إلى تحسن قيمتها لتبلغ (UCS=389MPa) وذلك للعينة -D2- عند نسبة تدعيم هجين (Wt=6%TiO₂+9%SiC).

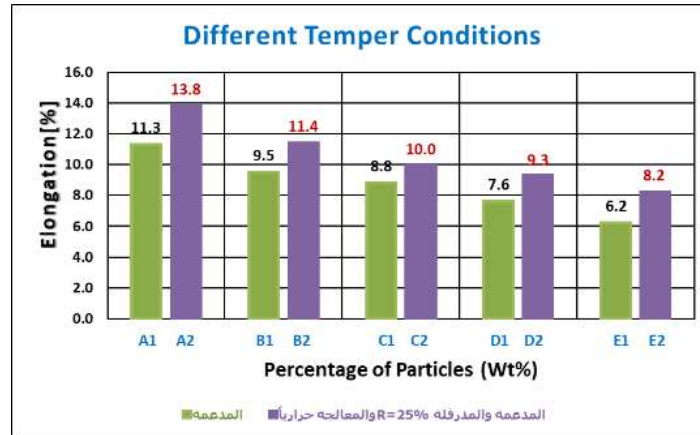
(4) نتائج اختبار الشد: Tensile Test Results

تم إجراء اختبار الشد 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 الشد الأعظمية UTS- الاستطالة النسبية).

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (12) (13) حيث إن مقاومة الشد العظمى للألمنيوم الأساس زادت مع ازدياد نسبة دقائق كربيد السيلكون وبالتالي ارتفاع كمية الدقائق الهجينة الموزعة ضمنه إلى حد معين 15%، وبعدها بدأت قيم خواص الشد بالانخفاض، وبالنسبة للاستطالة فإنها انخفضت مع ازدياد نسبة الدقائق الداعمة الهجينة. كما أن تطبيق المعالجة الميكانيكية (CR) والحرارية (T6) فقد أدت إلى تحسين قيم مقاومة الشد للألمنيوم المدعم الهجين بشكل ملحوظ حيث بلغت (UTS=334MPa) ونسبة تدعيم (Wt=6%TiO₂+9%SiC) العينة -D2-. أما بالنسبة للاستطالة فإنها انخفضت مع ازدياد نسبة الدقائق الداعمة الهجينة وتحسنت قيمتها عند المعالجة الميكانيكية الحرارية.



الشكل (12) تأثير التدعيم الهجين والمعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم مقاومة الشد الأعظمية



الشكل (13) تأثير التدعيم الهجين والمعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم الاستطالة

يمكننا القول أن المعالجة الميكانيكية (CR) ومن ثم الحرارية (T6) معاً ساهمت وأعطت خواص شد وضغط وقساوة أفضل مقارنة بالتدعيم الهجين فقط وحالة عدم التدعيم مع تراجع في المطيلية (معبراً عنها بالاستطالة).

مناقشة وتفسير النتائج:

المناقشة والتقييم:

توضح الأشكال (14) (15) (16) مقدار التحسن بالخواص الميكانيكية المدروسة للعينات العشر مقدرة كنسبة مئوية بعد التدعيم الهجين فقط و**بعد** التدعيم والدرفلة والمعالجة الحرارية معاً والذي يُحسب من العلاقة:

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

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

نلاحظ أن حققنا مقدار تحسن في الخواص تراوح بين (38%-155%) حسب شروط العمل في بحثنا وأنه عند نسبة التدعيم (6%TiO₂+9%SiC) العينة (D2) عندها كانت أعلى قيم للخواص الميكانيكية (سلوك ميكانيكي مميز) وبالتالي أصبح لدينا طيف واسع من العينات بخواص مختلفة تحقق (الكفاءة العالية والتكلفة المخفضة) بما

يتلاءم مع التطبيق المطلوب وأن التحسن الحاصل في الخواص الميكانيكية المدروسة عند زيادة نسب التدعيم الهجين إلى نسبة معينة وبعد إجراء المعالجة الميكانيكية (CR) و الحرارية (T6) معاً الذي توصلنا له يتوافق مع ما توصل له العديد من الباحثين بالأبحاث ذات الصلة بموضوعنا مع اختلاف نوع دقائق التدعيم المستخدمة ونسبتها وسبائك الألمنيوم الجاري تدعيمها والخواص الميكانيكية المدروسة وطريقة التصنيع ونوع المعالجة اللاحقة المطبقة ومُتغيرتها وفق ما درس وتناول كل من الدراسين (Mukesh et al., 2021) (Albusairi and Seshappa et al., 2024) (Alhajiri, 2023).



الشكل (14) مقدار التحسن في (HV)



الشكل (15) مقدار التحسن في (UCS)



الشكل (16) مقدار التحسن في (UTS)

وفي دراسة (Mukesh et al., 2021) وصلت أعلى قيمة للقساوة ($Hv=120$) وأعلى قيمة لمقاومة الشد العظمى ($190MPa$) وذلك بعد التدعيم والبتق على الساخن والمعالجة الحرارية بأزمنة تعتيق مختلفة لكن التحسن في الخواص الميكانيكية بقي أقل في هذه الدراسة من دراستنا الحالية بالأخص العينة D2- .

في دراسة (Albusairi and Alhajiri, 2023) توصلت لقيمة للقساوة كانت ($Hv=67$) وهي أخفض مما توصلنا له وكانت أعلى قيمة لمقاومة الشد العظمى ($350MPa$) وأعلى قيمة لمقاومة الانضغاط ($450MPa$) عند نسبة تدعيم ($10\% TiC+20\% Al_2O_3$) (بعد المعالجة الحرارية اللاحقة المذكورة في الأعلى) ويعود سبب ارتفاع هذه القيمة عما توصلنا له بدراستنا استخدام دقائق نانوية من كربيد التيتانيوم وألياف قصيرة من أكسيد الألمنيوم مع نسبة تدعيم مشترك مرتفعة جداً وصلت لـ 30% .

ففي دراسة حديثة (Seshappa et al., 2024) توصلت الدراسة لقيمة عليا للقساوة كانت ($Hv=150$) عند نسبة ($15\% Rice Husk Ash+ 3\% Al_2O_3$) مع التصنيع بتقنية SQUEEZE CASTING (أي اتباع التدعيم بمعالجة لاحقة بالتشكيل الضغط) وأعلى قيمة لمقاومة الشد العظمى ($270MPa$) ألا أن قيمة مقاومة الشد والقساوة في دراستنا كانت أعلى.

تفسير النتائج: حسب ما ذكر (Chawla,2013) (Pande et al.,2025) (Chen et al., 2024)

يتعلق الميكانيزم المسؤول عن تحسن الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم المدعم الهجين بانتظام وحسن توزع 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):

*وفقاً لنظرية أروان 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 و 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 الناتجة الجديدة (منبع فرانك-ريد) وبالتالي زادت فعالية تقوية أروان 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 تصطم هذه الانخلاعات بالدقائق الداعمة فإنها تتوقف أو تغير مسارها مما يزيد من مقاومة المعدن للتشوه اللدن وهذا من شأنه تحقيق زيادة كبيرة في مقاومة وقساوة المعدن المدعم.

* تنعيم 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 أثناء تصلب المادة وتسهم في تصغير الحجم الحبيبي مما يؤدي إلى تكوين عدد أكبر من الحبيبات الدقيقة وفقاً لقانون (هول-بيتش Hall-Petch) فإن مقاومة المادة تزداد مع تناقص حجم حبيباتها و 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 التدعيم مع المعدن الأساس لتكوين أطوار مترسبة دقيقة جداً عند حدود الدقائق وداخل المعدن وبالتالي تعمل هذه الرواسب الدقيقة بنفس طريقة الدقائق الداعمة حيث تعيق وتعزل حركة الانخلاعات وتزيد مقاومة المعدن.

تأثير المعالجة الميكانيكية بالدرفلة على البارد (التصليد الانفعالي): تحقق تقوية المسبوكات المدعمة وتجعلها أقوى وذات مقاومة أعلى وذلك من خلال إدخال شبكة انخلاعات جديدة في المادة عدا أنها تساعد على التخلص من المسامية والفراغات الميكروية ضمن البنية وتساعد في تحسين الاستطالة (المطيلية) وفق ما تناول كل من (Zhao et al., 2021) (Mukesh et al., 2021).

تأثير المعالجة الحرارية T6 (التقسية بالترسيب): حيث تؤدي إلى تشكيل رواسب من دقائق -الطور الثاني- المحلول الجامد فوق المشبع Mg₂Si وتوزعها في البنية (وترسب أطوار وسطية أخرى مثل AL₃Ti و AL₄C₃ وهي أطوار قاسية ناتجة عن العمليات الانتشارية لعناصر السبك (Mg, Si) بعد المعالجة الحرارية المحلولية والتعتيق) وحصول تفاعلات مع الانخلاعات مما يؤدي إلى مقاومة حركة الانخلاعات المتحركة وفرملتها وبالتالي زيادة مقاومة السبيكة المدعمة وقساوتها. (Saravanakumar and Sasikumar, 2018)

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

7. الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. توصلت الدراسة إلى تحديد الشروط العملية لتصنيع مادة مركبة معدنية (HAMCP) من أساس سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة تدعيماً هجيناً بنوعين مختلفين من الدقائق القاسية بتقنية (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 السلوك الميكانيكي لسبيكة الألمنيوم AA7075 المدعم الهجين وكانت أفضل النتائج من حيث الخواص الميكانيكية المدروسة ممثلة بالعينة - العينة (D2) - .
4. في ضوء الدراسة الحالية أدت زيادة نسبة دقائق كربيد السيلكون المُضافة (3 wt% → 9 wt%) مع ثبات نسبة أكسيد التيتانيوم (6 wt%) إلى زيادة القساوة للألمنيوم الأساس (AA7075) بالمقارنة مع المعدن الأساس (AA7075) غير المدعم (العينة العيارية) .
5. تحسنت خواص الشد والضغط (مقاومة الضغط -مقاومة الشد العظمى) للألمنيوم الأساس AA7075 مع انخفاض في المطيلية (ممثلة بالاستطالة النسبية) بالمقارنة مع (AA7075) غير المدعم مع ازدياد نسبة دقائق الكربيد المُضافة حتى (9 wt%) مع ثبات نسبة الأوكسيد المُضافة (6 wt%) .
6. أفضل قيم للخواص الميكانيكية للألمنيوم المدعم الهجين تم الحصول عليها عند نسب تدعيم (SiC 9% + 6%TiO2) - العينة (D2) - وإن زيادة نسبة دقائق الكربيد فوق (9 wt%) مع ثبات نسبة الأوكسيد المُضافة أدى إلى انخفاض في الخواص الميكانيكية المدروسة.

التوصيات والمقترحات 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 المُتبعه بالدراسة (مقاومة التعب والزحف.....)
2. بالإضافة إلى دراسة خواص الاهتراء والاحتكاك والصمود الحراري عند درجات حرارة مرتفعة.
3. دراسة تأثير عمليات معالجة لاحقة أخرى سواء ميكانيكية او حرارية أو كليهما ودراسة تأثير تغيير بارامتراتهما وشروطها على خواص المعدن المدعم الهجين.
3. العمل على تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين بطرق وتقنية تصنيع حديثة أخرى (تكنولوجيا المساحيق أو السباكة بالضغط) وكما نوصي باستخدام دقائق داعمة نانومترية في تحقيق التدعيم الهجين للألمنيوم واستخدام ومقارنة سبائك أخرى من الألمنيوم مع ما تناولناه في دراستنا الحالية.

4. استخدام طرق التحليل الاحصائي وحساب الارتياح وأخطاء القياس وطرق رياضية وتحليلية لتحديد واستقراء النتائج والبارامترات الأمثل مثل: -Artificial Intelligence -Artificial Neural Network -Fuzzy Logic-ANOVA.

8. المراجع:

- Albusairi, H., and Alhajiri ,F., 2023- "**Studying the Effect of Aluminum Oxides Composition and Particle Size on the Mechanical Properties of Metal-TiC Composit for Different Heat Treatment Process** ", *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Egypt ,(08)(11), 386-392p.
- Chawla, N., and Chawla, K., 2013- "**Metal Matrix Composites**", *Springer Science Business Media New York Journal of Metals* , Second Edition, USA, (02)(12), 1-381p.
- Chen , L., Peng, Q., Zhang,L., and Lai- Zhang,C 2024- "**An overview of additively manufactured metal matrix composites: preparation, performance, and challenge**", *International Journal of Extreme Manufacturing (IJEM)*,(06), China, 1-45p.
- Mukesh, Y., Kumar,P., and Rao ,R., 2021- "**Impact of heat treatment on the mechanical performance of hot extruded Al6061-BN reinforced metal matrix composites**", *Journal of MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGY (PAN)*, Vietnam ,(69)(3), 101-106p.
- 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**", *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, India,(09)(03), 4091-4097p.

- Pande, S., Tikotkar,R., Balaji,J and Hussain ,S., 2025-" **Synergistic Reinforcing Influence of SiC, Al₂O₃, and CdS on Advanced Tribomechanical Properties of Aluminum Composites** ", *Journal of Tribology in Industry*, India ,(47)(01), 64-76 p.
- Qudeiri, A., Abdudeen,A., and Ziout, A., 2021- " **A Review on AA 6061 Metal Matrix Composites Produced by Stir Casting**", *Journal of Materials MDPI* , Switzerland,(14)(175),1-22p.
- Surappa, M., 2003- "**Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities**"., *Printed in S-adhan-a, First Edition*, India, (28), (Parts 1 & 2) ,319–334 p.
- Stojanović, B., and Ivanović ,L., 2015-"**APPLICATION OF ALUMINIUM HYBRID COMPOSITES IN AUTOMOTIVE INDUSTRY**", *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)*, Serbia, (22)(03),247-251 p.
- Saho,M., Naveed ,I., and Patra,D., 2015-"**Design and Fabrication of a Stir Casting Furnace Set-Up**" (Part - 3) July, Manabhanjan Sahoo et al. *Int. Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, India,(05)(07), 80-88p.
- "**Flexural behavior and Microstructure of 8Saravanakumar, A., and Sasikumar ,P., 201 hybrid Metal Matrix Composites**", Vol.9, Issue 10, *Journal of Materials and Environmental Sciences (JMES)*, India, (09)(10),2951-2955p.
- Seshappa, A., Ra,K., Pranavi,U., and Chhabra ,S., 2024-" **Manufacturing while Investigations of Al-7075/RHA/Al₂O₃ Composite by Squeeze Casting**", *Journal of MATEC Web of Conferences EDP Sciences (ICMED)*, India,(04)(392), 1-12p.
- Zhao,J., Hung,F., and Chen,B., 2021-" **Effects of heat treatment on a novel continuous casting direct rolling 6056 aluminum cold rolling characteristics and tensile fracture properties**", *Journal of materials research a n d technology* , Taiwan,(11),535-547p.