"مقارنة تأثير بعض بارامترات التصنيع على القساوة ومقاومة الشد لسبيكة الألمنيوم (AA7075) المُدعمة بالدقائق والمُحضرة بتقنيتي السباكة بالمزج (SCT)والسباكة بالعصر (SQT) باستخدام طريقة تاغوشي(Taguchi) "

الباحث: الدكتور المهندس: معتز الحصريه

الملخص

في ظل التطور المتسارع للقطاعات الصناعية أصبح البحث عن مواد هندسية متقدمة قادرة على تلبية المتطلبات الصارمة للتطبيقات الحديثة من خفة في الوزن مع سلوك ميكانيكي مميز بتكاليف منخفضة ضرورة حتمية لذا تُعتبر المواد المركبة المعدنية MMCs إحدى أبرز هذه الحلول ونظراً للمكانة الصناعية للألمنيوم وسبائكه يتم حالياً تقويته بمواد تدعيم مختلفة بتقنيات تصنيع منوعة للحصول على الألمنيوم المدعم (AMCs) بهدف تحسين خواصه الميكانيكية الأمر الذي من شأنه توسيع مساحة الاستخدام الصناعي له.

في هذا البحث تم تدعيم سبيكة (AA7075) بدقائق قاسية ميكروية من كربيد السليكون (SiC) بنسب وزنية متغيرة (X= 5,10 and 15 wt%) و من كربيد البورون (B4C) بنسبة ثابتة (5 wt%) بشكل هجين بتقنيتي السباكة بالمزج (SCT) والسباكة بالعصر (SQT) وقد تم الحصول على تسع عينات بتغير بارامترات تقنية التصنيع التالية : (سرعة الخلط $SP = 350 \rightarrow 550r.p.m$ وزمن الخلط $ST = 10 \rightarrow 20min$ ونسبة التدعيم $RE = 5 \rightarrow 15\%$) مع تطبيق ضغط أثناء عملية السباكة بالعصر $(P = 50Mpa)$.

وبعد إنجاز عملية التدعيم و الحصول على الألمنيوم المُدعم الهجين (HAMCs) بكلا التقنيتين(SCT&SQT) ، تم إجراء الاختبارات الميكانيكية وتحديد قيم القساوة (VHN) ومقاومة الشد العظمى(UTS) ، وقد بينت النتائج أن أفضل الخواص تم الحصول باستخدام تقنية السباكة بالعصر أما فيما يخص البارامترات المُستخدمة بعد تطبيق طريقة تاغوشي (Taguchi Method) كانت– العينة (S3) – ذات خواص أعلى بالمقارنة مع باقي العينات حيث وصلت قيمة القساوة في العينة المذكورة إلى (101HV) عند السباكة بالعصر وصلت عند السباكة بالمزج إلى (90HV) أما قيمة مقاومة الشد العظمى(213MPa) عند السباكة بالعصر ووصلت إلى عند السباكة بالمزج

إلى (197MPa) وأما فيما يخص البارامترات فإن نسبة التدعيم(RE) كانت أكثر العوامل تأثيراً ومن ثم زمن الخلط (ST) وأخيراً سرعة الخلط(SP) .

الكلمات المفتاحية: سبائك الألمنيوم(AA7075)، القساوة ، مقاومة الشد العظمى، السباكة بالمزج ، تقنية السباكة بالعصر، طريقة تاغوشي.

"Comparison of The Effect of Some Manufacturing Parameters on The Hardness and Tensile Strength of Aluminum (AA7075) Reinforced with Particles and Prepared using the Stir Casting (SCT) and Squeezing Casting (SQT) Techniques using the Taguchi Method."

ABSTRACT

With the rapid development of industrial sectors, the search for advanced engineering materials capable of meeting the stringent requirements of modern applications, including light weight, excellent mechanical behavior, and low costs, has become an imperative. Metallic composite materials (MMCs) are one of the most prominent solutions. Given the industrial status of aluminum and its alloys, it is currently being reinforced with variable materials by various manufacturing technologies and obtaining (AMCs) to improve its mechanical properties, which would expand the space of industrial use for it.

In This research an aluminum alloy (AA7075) was reinforced with hard particles having size of micron of Silicon Carbide with a weight percentage (X= 5, 10 and 15 wt%) and Boron Carbide particles are added in fixed weight percentages (5 wt%) hybrid reinforced in both types of carbide by Stir and Squeeze casting technique (SCT&SQT).

Nine samples were obtained by changing the manufacturing technology parameters (Stir speed $SP = 350 \rightarrow 550 r.p.m$ Stir time $ST = 10 \rightarrow 20 min$ Reinforcement percentage $RE = 5 \rightarrow 15\%$) with pressure applied during the squeezing casting process $(P = 50 Mpa)$.

After completing the reinforcement process and obtaining hybrid reinforced aluminum (HAMCs) using both techniques (SQT & SCT), mechanical tests were conducted and determining the values of hardness (VHN) and Ultimate tensile strength (UTS). The results showed that the best properties were obtained using the squeeze casting technique. As for the parameters used after applying the Taguchi Method, the sample (S3) had higher properties compared to the rest of the samples, as the hardness value in the aforementioned sample reached (101HV) at (SQT) and (90HV) at (SCT) As

for the value of the Ultimate tensile strength(213MPa) when cast by(SQT) it reached (197MPa) when cast by (SCT) As for the parameters Reinforcement percentage RE was the most influential factor then the Stir time ST and finally the Stir speed SP.

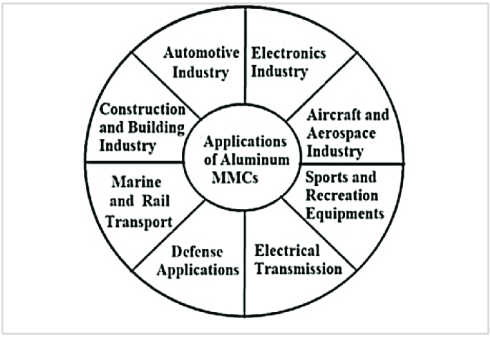
Keywords: AL-7075 alloys, Carbide, Hardness, Ultimate tensile strength, Stir Casting , Squeeze Casting , Taguchi Method.

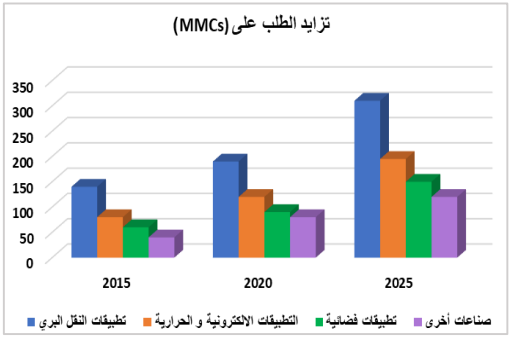
1. مقدمة:

تُعدُّ المواد المركبة المعدنية (**M**etal **M**atrix **C**omposite**s**) مواد مُرشّحة لتطبيقات هندسية واستخدامات صناعية عديدة في مجال هندسة الطيران والسيارات والصناعات العسكرية، وبديلة لمواد هندسية أخرى عالية التكلفة وغير مستقرة الخواص، ومواكبة لمتطلبات الثورة الصناعية الرابعة من مواد ذات خواص خاصة مميزة حيث تقدم كفاءة أداة ميكانيكية بموثوقية أعلى من المعادن التقليدية المُفردة نتيجة لخواصها المُحسنة وخفة وزنها.

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 كونه أهم المعادن الجاري تدعيمها وذلك سواء بإضافة العناصر السبائكية أو عمليات التشكيل المتنوعة أو المعالجات الحرارية أو طرائق التدعيم المختلفة. ومن هنا تبرز أهمية وقيمة البحث الحالي في اعتماد ونشر وتوطين تقنية التدعيم الهجين كوسيلة في تحسين السلوك الميكانيكي لسبائك الألمنيوم بما يحقق إمكانية التوسع في استخدامها الصناعي.

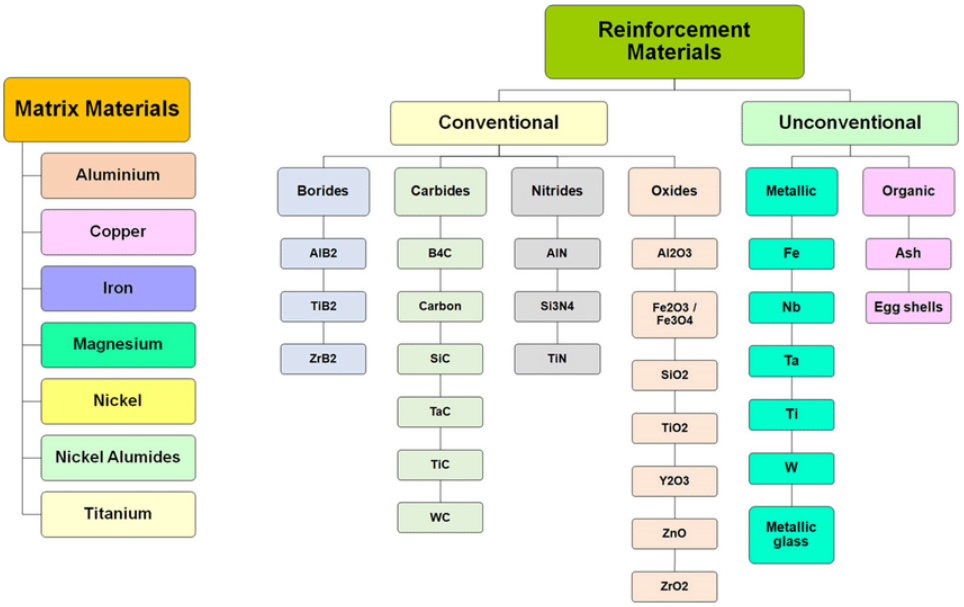
يوضح الشكل (1) تزايد الطلب على المواد المركبة ذات الأساس المعدني(MMCs) ما بين عامي (2015–2025) لأجل عديد التطبيقات الصناعية مع أمثلة على هذه التطبيقات من مختلف القطاعات الصناعية**[2] [3] [10].**





الشكل (1) تزايد الطلب على (MMCs) وأمثلة على تطبيقاتها الصناعية **[3]**

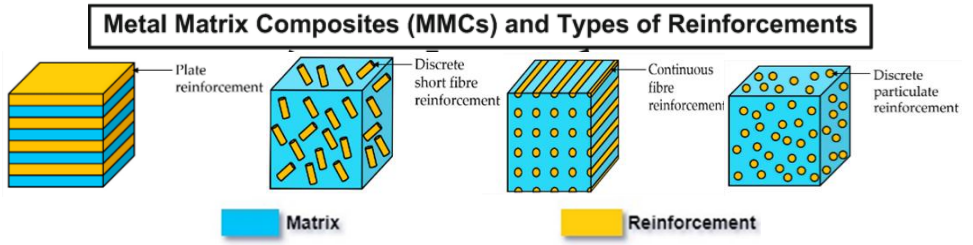
تكتسب سبائك الألومنيوم أهمية متزايدة**(موضوع البحث)** في التطبيقات الهندسية المُعاصرة كبدائل فعّالة للمواد الهندسية التقليدية، ويُعزى هذا التحول إلى المزايا العديدة التي يوفرها الألومنيوم وسبائكه، علاوة على ذلك، تتميز سبائك الألومنيوم بوزن نوعي أقل، بالإضافة إلى فعالية من حيث التكلفة، مما يجعلها خياراً جذاباً لمختلف الصناعات**[2] [3]** ، وهو ما جعله أهم وأول سبائك المعادن الملونة الجاري تدعيمها في الوقت الحالي ثم يليه النحاس وأخرهم التيتانيوم أما السبائك الأخرى الجاري تدعيمها بالإضافة لسبائك الألمنيوم والنحاس مع مختلف عائلات دقائق التدعيم المستخدمة فهي موضحة بالشكل(2) **[1][2] [8] [9]** .



الشكل (2) أهم أنواع سبائك المعادن الجاري تدعيمها ودقائق التدعيم المختلفة**[2]**

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

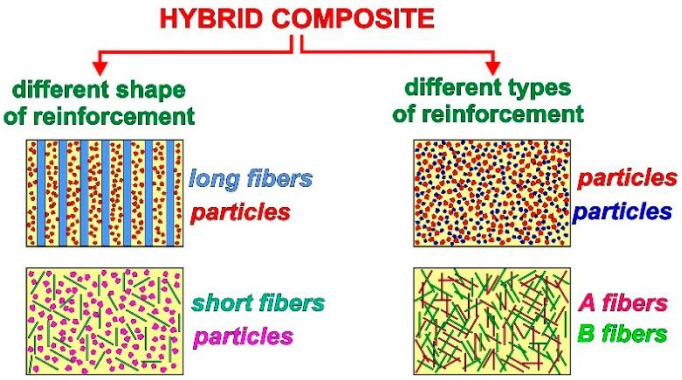
حيث إن الطرائق التقليدية للتدعيم تقوم على استخدام مادة تدعيم وحيدة (Single) بمقياس من مرتبة الميكرون (Micro scale) وبتموضع بسيط لمادة التدعيم ذات الطبيعية المعدنية أو السيراميكية أو الزجاجية لنحصل على : الألمنيوم المدعم بالدقائق (PAMCs) –الألمنيوم المدعم بألياف قصيرة أو شعيرات (SFAMCs) بشكل منظم أو عشوائي–الألمنيوم المدعم بألياف طويلة مستمرة (CFAMCs) – الألمنيوم المدعم بالطبقات(PLAMCs) **[1] [8]** . وهي موضحة كالتالي بالشكل (3):



الشكل (3) طرائق التدعيم التقليدية للألمنيوم

أما الطرائق المتطورة لتدعيم سبائك الألمنيوم : تعتمد على مواكبة التقنيات الحديثة والمُتقدمة في التدعيم والتصنيع للحصول على ألمنيوم بخواص مميزة ولتلافي العيوب والسلبيات في الطرائق التقليدية القديمة، ومن أهم الطرائق الحديثة لتدعيم سبائك الألمنيوم**[8] [10]**:التدعيم باستخدام تقنية التدعيم الهجين (Hybrid composites) (HAMCs) (التدعيم المُشترك) الطريقة (**المعتمدة في بحثنا**) والتي تعتبر تقنية هامة ومُتقدمة وقد بدأ الألمنيوم المُدعم 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 وله نوعين:

- النوع الأول: مواد تدعيم مختلفة بالشكل: الجمع بين التدعيم بالدقائق والتدعيم بالألياف الطويلة والدمج بين التدعيم بالألياف والقصيرة والتدعيم بالدقائق .



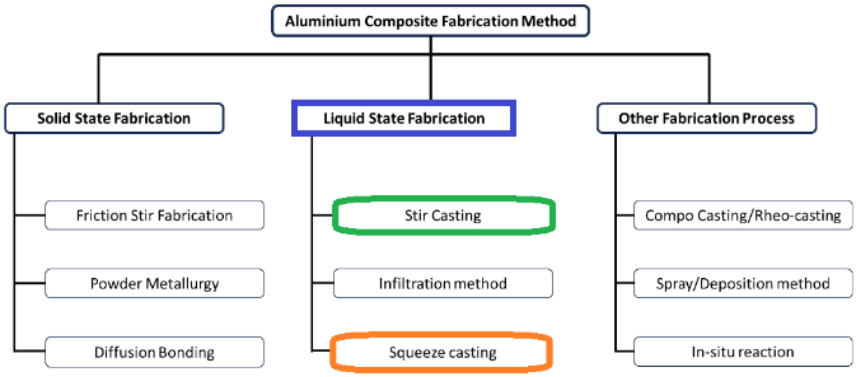
الشكل (4) طريقة التدعيم الهجين –المشترك–

- أما النوع الأخر مواد تدعيم مختلفة بالنوع: التدعيم بنوعين مختلفين من الدقائق أو الألياف أو أكثر(دقائق نانوية–دقائق ميكروية) (ألياف كربون–ألياف زجاج) (دقائق أكسيد–دقائق كربيد). وكيفية التدعيم الهجين موضح بالشكل (4)**[8] [10]** .

يتم تنفيذ التدعيم لسبائك الألمنيوم بتقنيات تصنيع متعددة أغلبها حديثة و متطورة، وقد تم تعديل العديد من تقنيات التصنيع التقليدية لتتناسب مع متطلبات تصنيع المعادن المُدعمة 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 (نوع ونسبة دقائق التدعيم، درجة الحرارة، الضغط المطبق، زمن المعالجة) إلى جانب نوعي المعدن الأساس والمادة الداعمة**[8]**.

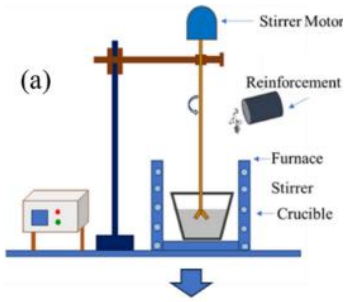
شهدت تقنيات تصنيع المواد المركبة تطوراً ملحوظاً على مر السنين، بهدف تحسين البنية المجهرية (الميكروية) والخواص الميكانيكية لـ (MMCs)، ويُعد التحدي الرئيسي في اختيار طريقة التصنيع المناسبة هو ضمان توزيع متجانس لأطوار التدعيم (سواء كانت دقائق أو ألياف أو خليط منهم) داخل المعدن الأساس، لتحقيق بنية خالية من العيوب المجهرية وضمان أداء عالي في التطبيقات النهائية. وبشكل عام تصنف أساليب التصنيع المستخدمة في صناعة (MMCs) تبعاً لدرجة حرارة المعدن الأساس أثناء عملية تصنيع (MMCs) كما في الشكل (5) الذي يُظهر بعض طرائق تصنيع (MMCs) **[1] [2] [8]**.



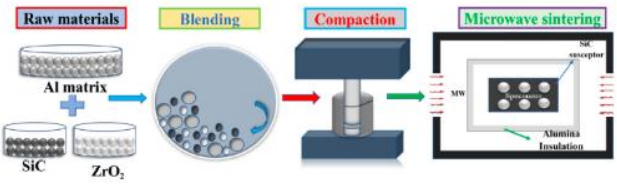
الشكل (5) طرائق تصنيع المواد المركبة المعدنية ذات أساس من الألمنيوم (AMCs) **[8]**

تقنية السباكة بالمزج(SCT= **S**tir **C**asting **T**echnique) بالإضافة لطريقة السباكة بالعصر أو بالضغط (SQT= **S**queeze **C**asting **T**echnique) تعتبران أهم طرائق تصنيع المعادن المدعمة وأكثرها استخداماً وانتشاراً في الحالة السائلة (تحتلان المرتبة الثانية من حيث تقنيات التصنيع عامةً بعد تقنية المساحيق PM) وفيهما تكون المواد الداعمة دقائق(P) أو ألياف قصيرة (SF) بنسبة وزنية محددة لا تتجاوز الـ (30%) تخلط مع مصهور المعدن الأساس بطرق التحريك الميكانيكية كما في الشكل (6) (7) يتم بعد ذلك يتم

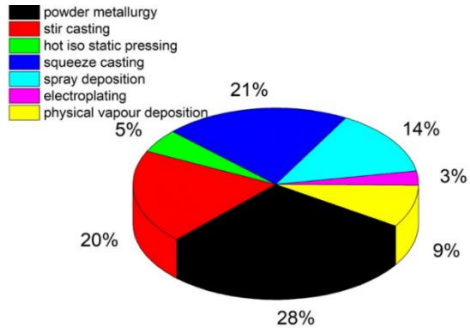
صب المواد المركبة المصهورة في قوالب الصب وتترك للتصلب وبالتالي نحصل على المعدن المدعم مباشرة وذلك في حال السباكة بالمزجSCT **أما عند السباكة بالعصرSQT** يتم صب خليط مصهور المعدن الأساس مع المواد الداعمة في قوالب مُجهزة تحت مكبس وتعريضها لضغط قبل التجمد وتعتمد التقنية على تجميد المعدن تحت الضغط أحادي الاتجاه عادة $(50 \rightarrow 150) MPa$ (في بعض الأحيان تُصنع المادة الداعمة على شكل وسادة Perform ويصب عليها المعدن المصهور ثم يطبق ضغط العصر) و قد يتم معالجة المسبوكات فيما بعد بتقنيات تشغيل والمعالجة الحرارية المعروفة التي غالباً ما تكون قليلة وأحياناً نحصل على منتجات مُشكلة نهائية .



Stir and Squeeze Casting (21&20%)



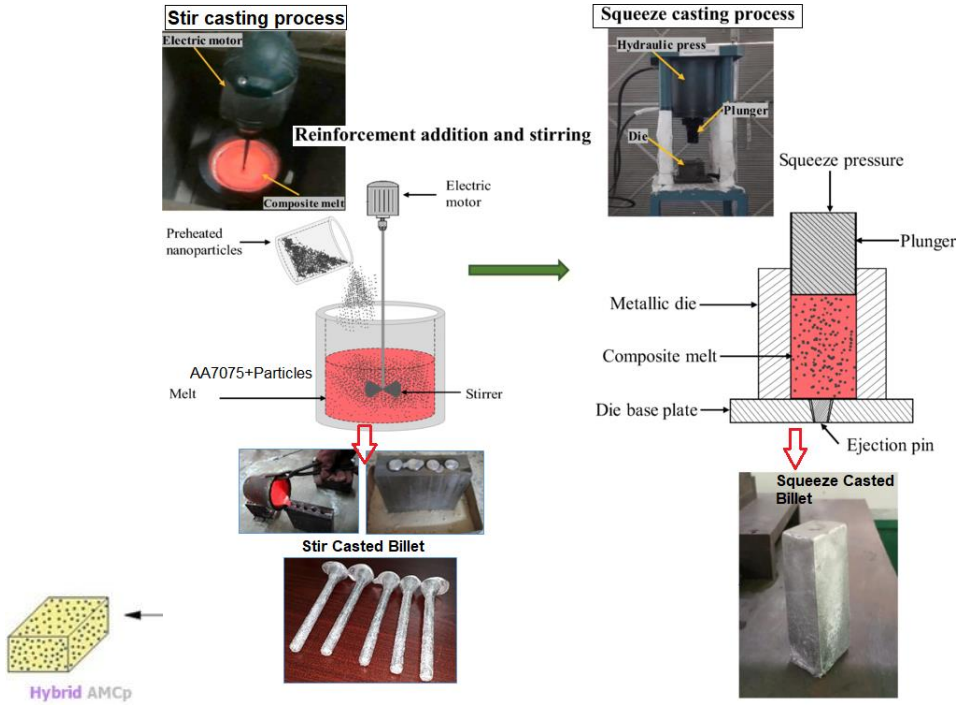
Powder metallurgy (28%)



الشكل (6) تصنيف طرائق تصنيع من حيث الاستخدام**[7] [8]**

و تتميز كلا الطريقتين (SQT&SCT) بالبساطة والسهولة والفعالية والحصول على بنية ناعمة دقيقة نتيجة سرعة التبريد والتغلب على مشكلة قابلية التبلل والتقليل من المسامية والغازات والحصول على إنهاء جيد للسطح وخواص ميكانيكية جيدة وانخفاض تكلفتها من خلال انخفاض الهدر في المعدن مقارنة بالطرائق الأخرى مما جعلهما من الأكثر انتشاراً وتطبيقاً بين باقي الطرق من أهم سلبيات هاتان الطريقتان كثرة المتغيرات والشروط وبالأخص

عند السباكة بالعصر (بحاجة إلى مكبس هيدروليكي مع إمكانية لضبط الضغط وقالب معدني حصراً مع آلية لفظ للمنتج) وإن ضبط والتحكم بهذه البارامترات سواء في (SQT&SCT) يعدّ مفتاحاً لنجاح العملية وتحقيق البنية والخواص المطلوبة **[8] [11]** .



الشكل (7) تقنية السباكة بالمزج (SCT) والسباكة بالعصر (SQT) **[8]**.

تبرز **مبررات وأهمية البحث** كما ذكرنا سابقاً نظراً للمكانة الاقتصادية العالية لسبائك الألمنيوم كونه يأتي بالمرتبة الثانية بعد الفولاذ من حيث الاستخدام ونظراً لتوافره وانخفاض سعره وخفة الوزن–مقاومة نوعية عالية – High Specific strength 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 ومتغيرات تقنية التصنيع لزيادة فعاليته ومساحة الاستفادة منه صناعياً –رفع الكفاءة ومستوى الأداء الكلي– بما يتوافق مع الحاجات في مجال السيارات والطائرات والتطبيقات الفضائية والتجهيزات الرياضية مع تحقيق التخفيض في التكلفة والوزن **[1] [3] [8]**.

إن تدعيم سبائك الألمنيوم بالصفائح والألياف بأنواعها المختلفة تقيده التكاليف الباهظة لمواد التقوية ولتصنيع الألمنيوم المدعم وصعوبة الوصول إلى الخواص المرجوة في كثير من الحالات وصعوبة التطبيق والحاجة إلى تجهيزات تصنيع خاصة و بالإضافة إلى تأخر في مواكبة التطورات التكنولوجية الحديثة نظراً لاستخدام تقنيات تصنيع محدودة كل ما سبق دفع إلى الاهتمام بتدعيم الألمنيوم بالدقائق المتنوعة من بين الطرائق التقليدية لانخفاض تكاليفه وسهولة تحقيق التدعيم باستخدامها وتعدد تقنيات تصنيع الـــ HAMCs المُتاحة سواء عند التدعيم بالدقائق سواء بشكل إفرادي(Single) أو هجين(Hybrid) **[8] [10].**

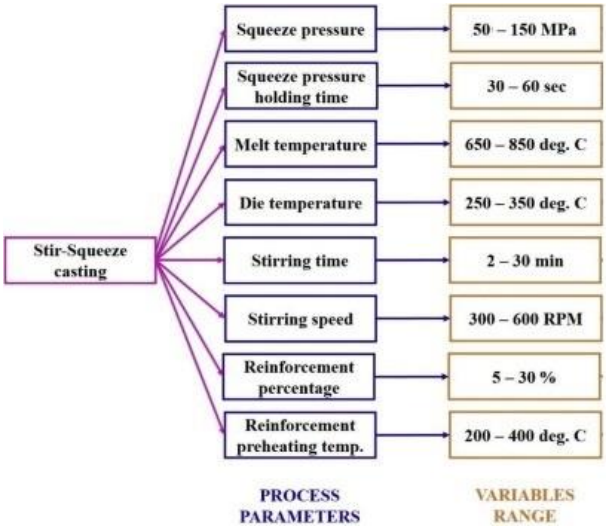
إن استخدام مواد تدعيم رخيصة وذات قابلية عالية للاندماج مع الأساس المعدني كالدقائق المتنوعة (مقارنة بمواد التدعيم الأخرى كالمواد النانوية NAMCs وشبكات التدعيم Woven والألياف المستمرةCF) عند التدعيم الهجين(Hybrid Reinforcement) أو ما يسمى التدعيم المزدوج(Daul Reinforcement) كطريقة تدعيم حديثة لسبائك الألمنيوم 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 وقابلية إعادة التدوير من خلال الصهر وإعادة تشكيل مرات كثيرة**[8]** .

وأن ما يحقق فعالية عملية تصنيع الألمنيوم المدعم بالدقائق (HAMCp) عند التدعيم الهجين اختيار طريقة ملائمة ومجدية للتصنيع مثل تقنية السباك بالمزج (SCT) أو السباكة بالعصر – بالضغط(SQT) وتتفوق طريقتي (SQT&SCT) على باقي تقنيات التصنيع بالحالة السائلة كما ذكرنا من حيث انخفاض التكلفة والبساطة والمرونة وسهولة التطبيق وتميّز خواص المنتج المُصنع بهما وهما معتمدتين تجارياً بسوق العمل **[7] [9] [11].**

تتميز منتجات(SQT&SCT) بإنها شبه نهائية يمكن أن نكتفي بالمعالجة الحرارية فقط كعملية لاحقة في حال أردنا تعديل خواص(AMCs) الميكانيكية دون تغيير شكلها.

إن استخدام الضغط خلال عملية تصنيع (HAMCs) بطريقة السباكة بالعصر يميزه عن طريقة السباكة بالمزج وهومن من شأنه تحسين الخواص الميكانيكية والتشكيل إلى الأجزاء

النهائية بدقة عالية وتقليل العيوب الناتجة عن السباكة وتصحيح عيوب البنية وتحسين التجانس وهذا ما يُعّزز من الأداء والسلوك الميكانيكي لمنتجات السباكة بالعصر **[3] [7]**.
وإن لطريقتي السباكة بالمزج والسباكة بالعصر عديد البارامترات التي يجب ضبطها والتحكم فيها لضمان نجاح عملية التدعيم وهي موضحة بالشكل (8) مع المجالات المحددة لها نذكر منها:(ضغط العصر– زمن تطبيق الضغط– درجة حرارة المصهور عند الخلط– درجة حرارة التسخين المسبق للقالب– زمن الخلط –سرعة الخلط –نسبة التدعيم– درجة حرارة تسخين دقائق التدعيم) **[7] [9]**.



الشكل (8) بارامترات تقنيتي (SCT) و (SQT) **[9]**

لذا في هذا البحث تم تصنيع مادة مركبة معدنية ذات أساس من سبائك الألمنيوم (AA7075) مدعمة تدعيماً هجيناً باستخدام دقائق كربيدية مختلفة من(SiC) بنسبة متغيرة ومن (B4C) بنسبة ثابتة بتقنيتي (السباكة بالمزج والسباكة بالعصر) وإجراء مقارنة ببعض الخواص الميكانيكية (مقاومة الشد الأعظمية–القساوة) للألمنيوم المدعم الهجين المُصنع عند استخدام كلا التقنيتين مع تغير ثلاث بارامترات للتصنيع (سرعة الخلط $SP = 350 \rightarrow 550 r.p.m$ وزمن الخلط $ST = 10 \rightarrow 20 min$ ونسبة التدعيم $RE = 5 \rightarrow 15\%$)مع تطبيق ضغط أثناء عملية السباكة بالعصر $(P = 50 Mpa)$.

بالعودة إلى بعض الأوراق البحثية الحديثة التي تمحورت حول تقوية مختلف سبائك الألمنيوم بالدقائق المتنوعة بتقنيات التصنيع العديدة ودراسة تأثير التدعيم الإفرادي والهجين وتغيير بارامترات طرائق التصنيع بطرق رياضية وتحليلية مختلفة على خواصها الميكانيكية نجد ما يلي:

في دراسة نُشرت في (2012) قام الباحثان (Vijaya and Venkataramaiah) باستخدام (Fuzzy Logic) في بيئة الماتلاب بدراسة تأثير عديد البارامترات (نوع المعدن الأساس– نوع الدقائق الداعمة–نسبة الدقائق الداعمة– حجم الدقائق) على مقاومة الشد ومتانة الصدم والقساوة والكثافة فوجدا أن نسبة الدقائق الداعمة ونوع المعدن الأساس أكثر البارامترات تأثيراً على الخواص المدروسة**[4]** .

في ورقة بحثية عام(2015) صنّع (Philip) وزملائه نموذج (ANN model) باستخدام الشبكات العصبونية (Artificial Neural Network) بهدف تقليل الوقت والتكلفة وذلك لعملية تصنيع ألمنيوم مدعم بكربيد السيلكون باستخدام طريقة(SCT) مع تغيير نسبة وحجم دقائق الكربيد وقد وجدا أن زيادة نسبة الدقائق%wt يؤثر بشكل أكثر من حجم الدقائقParticle size وأن زيادة هذه النسبة%wt يزيد من القساوة ومقاومة الشد وإجهاد الخضوع بينما حجم الدقائق لها تأثير مختلف**[5]**.

في مقالة عام (2017) تناول الباحثان (Ashok and Shanmugh) دراسة السبيكة الألمنيوم AA8011 المصنعة بطريقة (SCT) والمدعمة بدقائق مختلفة من كربيد السيلكون بثلاث نسب مختلفة (X =2, 4, 6%) مع استخدام ثلاث حجوم ميكروية مختلفة للدقائق وقد بينت النتائج بعد تطبيق التحليل الرياضي باستخدام (Taguchi, ANOVA) أن ازدياد نسبة التدعيم تحسن القساوة ومقاومة الشد العظمى مع انخفاض في الاستطالة والمتانة الصدمية وأن ازدياد حجم الدقائق يخفض من قيم القساوة ومقاومة الشد والاستطالة والمتانة الصدمية**[6]**.

في دراسة نُشرت في (2022) تطرق الدارس (Vijayakumar) وفريقه البحثي إلى دراسة تأثير أربع بارامترات على خواص سبيكة الألمنيوم6082 AA والمصنعة بطريقة السباكة بالمزج والضغط (SQT&SCT) مستخدمين طريقة (Taguchi) والتحليل باستخدام (ANOVA=Analysis of Variance) من خلال ست عشرة عينة(L16) وقد توصل البحث أن سرعة الخلط ثم ضغط العصر ثم زمن الخلط ونسبة الدقائق أكثر العوامل تأثيراً على مقاومة الشد الأعظمية والقساوة والمسامية**[7]**.

في (2024) قام الباحث(Mohammed) وآخرون بتدعيم الألمنيوم AA6105 بدقائق من كربيد السيلكون بنسبة ثابتة وكربيد التيتانيوم بنسبة متغيرة بشكل هجين بتقنيي (السباكة بالمزج SCT والسباكة بالعصر SQT) وإجراء المقارنة بين تأثير الطريقتين على مقاومة الشد والقساوة للعينات المدعمة عدا عن ذلك عمل الباحثون على دراسة تأثير مجموعة من متغيرات التصنيع على الخواص في كلا الطريقتين وقد وجد الباحثون أن تقنية (Squeeze Casting) مع تطبيق ضغط $(P = 60Mpa)$ أعطت نتائج أفضل من (Stir Casting) من حيث الخواص المدروسة وأن تأثير المتغيرات على الخواص اختلف من حيث الأهمية حسب تقنية التصنيع المتبعة**[9]**.

في أحدث الدراسات (2025) قام كل من (Imanze) (Omotehinse) بدراسة تأثير بارامترات السباكة بالعصر (Squeeze Casting) حيث بحثا في تأثير ضغط العصر ودرجة حرارة الصب ودرجة حرارة تسخين القالب على قساوة ومقاومة الشد العظمى للألمنيوم المصبوب المُصنع بطريقة (SQT) مستخدمين طريقة (Taguchi) لتحليل النتائج وبينت النتائج أن هذه الخواص تتأثر بشكل كبير بتغير هذه البارامترات وبالأخص مقاومة الشد وأن أكثر البارامترات تأثيراً هي ضغط العصر ثم درجة حرارة الصب وأخيراً درجة حرارة التسخين المسبق للقالب**[11]**.

مما تقدم في الدراسات الحديثة السابقة والمسح المرجعي نلاحظ أن اختيار طريقة تدعيم سبيكة الألمنيوم ونوع مواد التدعيم ونسبتها وطريقة التصنيع وضبط شروط كل ما سبق بالشكل

الأمثل يمثل تحدياً مهماً وأمر ضرورياً لتحسين وضبط السلوك الميكانيكي للألمنيوم وبالتالي رفع الأداء وزيادة الكفاءة الميكانيكية.

2. هدف البحث:

1. تصنيع الألمنيوم المُدعم الهجين بدقائق الكربيدات المختلفة (HAMCs) بتقنية السباكة بالمزج (SCT) وتقنية السباكة بالعصر(SQT) انطلاقاً من السبيكة الأساس (AA7075) ودراسة الخواص الميكانيكية –القساوة ومقاومة الشد العظمى– وإجراء المقارنة بينهم.
2. دراسة تأثير تغيير البارامترات (سرعة الخلط وزمن الخلط ونسبة دقائق التدعيم) باستخدام طريقة تاغوشي (Taguchi method) على الخواص الميكانيكية المدروسة لسبيكة (AA7075) ومقارنته مع بعضها عند التصنيع وتحديد الأكثر تأثيراً منها.
3. التوصل إلى مواد هندسية حديثة (ألمنيوم مدعم هجينHAMCp) بأساس من سبائك الألمنيوم(AA7075) والحصول على تصور أوضح حول ربط البارامترات من زمن الخلط وسرعة الخلط ونسبة الدقائق الداعمة وطريقة التصنيع (SQT– SCT) بتغير خواص الألمنيوم المُدعم الناتج وتحديد الأفضل والأمثل بما يتلاءم مع التطبيق المطلوب وبالتالي توقع مجال الاستخدام صناعياً.

3. مواد وطرق البحث :

1.3. المواد الأولية المُستعملة لتصنيع الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCs):

1.3.1. المعدن الأساس (Metal Matrix):

تم استلام سبيكة (AA7075) موضوع البحث وكانت على شكل بيليت بقطر (20cm) تركيبها الكيميائي التجريبي (من جهاز التحليل الطيفي Spectrometer) والقياسي حسب ASTM كما في الجدول (1).

الجدول(1) التركيب الكيميائي لسبيكة (AA7075)

العنصر	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr	Ti	AL
التركيب القياسي	< 0.4	(2.1–2.9)	< 0.5	(1.2–2)	< 0.3	(5.1–6.1)	(0.18–0.28)	<0.2	Bal.
التركيب التجريبي	0.085	2.35	0.17	1.8	0.01	5.8	0.18	0.05	Bal.

1.3.2. مواد التدعيم (Reinforcement Materials):

هي عبارة عن بودرة ناعمة قاسية ميكروية من كربيد السيلكون (SiC) ومن كربيد البورون (B4C) حيث تم استخدام دقائق بحجم وسطي($20 \rightarrow 35\mu m$) بعد نخلها على جهاز المناخل الآلي نوع من (Rids dale & Co LTD, England) .

1.3.3. مواد مساعدة(Added Materials) :

هي 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) :

2.3.1. تجهيزات السباكة Stir–Squeeze Casting Set up:

تضم الأجزاء التالية الموضحة بالشكل(9) (10) **[7] [9] [11]:**

***آلية الخلط:** يتألف من محرك الخلط وهو محرك كهربائي باستطاعة $0.25Hp$ ومحور الخلط وشفرات الخلط التي تم تصنيعها من الستانلس ستيل لإنجاز عملية الخلط بعد إضافة دقائق إلى منصهر السبيكة AA7075.

***وحدة ضبط السرعة:** تم توصيله مع محرك الخلط للتحكم بسرعة الخلط مع إمكانية تغير سرعة الخلط $(0 \rightarrow 1200) r.p.m$.

***فرن الصهر:** النوع (CurboLite,Hope watt :3100 w) فرن كهربائي استطاعته $3Kw$ بحرارة قصوى $1200C^{\circ}$ لصهر الألمنيوم (AA7075) وضمنه تتم عملية الخلط وقد تم

تركيب قاعدة حاملة لآلية الخلط أعلى الفرن وتم تجهيز الفرن بمنظم حساس لضبط درجة الحرارة.

***البوتقة:** استخدمنا بوتقة مخروطية الشكل مصنوعة من الغرافيت المقاوم للحرارة تستوعب حوالي $3kg$ من الألمنيوم المراد صهره.

***المكبس:** مكبس هيدروليكي باستطاعة 20ton لتطبيق الضغط على مصهور الألمنيوم المخلوط مع دقائق الكربيد بعد صبه بالقالب المعدني.

2.3.1. قالب الصب المعدني Metal Mold :

2.3.2. ميزان إلكتروني حساس Weighing Machine :

الشكل (9) فرن الصهر – ميكانيزم الخلط– بوتقة الصهر –منظم الحرارة–وحدة ضبط السرعة–عبوات دقائق الكربيد

الشكل (10) مكبس الضغط –قالب الصب المعدني-حامل البوتقة– تطبيق ضغط العصر (50 MPa)

3.3. طريقة تنفيذ البحث:

3.3.1. تصنيع الألمنيوم المدعم [7] [8] [9] [11]:

يتم تقطيع بيليت الأساس(AA7075) إلى قطع صغيرة ووزنها وتحديد أوزان دقائق الكربيدات المُضافة بنوعيها حسب النسب الوزنية المطلوبة(wt%) في العينات المدروسة ثم وضع قطع الألمنيوم في البوتقة الغرافيتية داخل الفرن ورفع درجة حرارته إلى $850C^\circ$ لضمان انصهار السبيكة التام وبعد التأكد من انصهار الألمنيوم يتم خفض درجة الحرارة ضمن الفرن إلى درجة حرارة $750C^\circ$ليتم إضافة الدقائق الداعمة (B4C– SiC) المعلومة الحجم والوزن والنسبة (RE)المتغيرة والمُسخنة مسبقاً إلى درجة الحرارة حوالي $200C^\circ$ لخمس دقائق وذلك لإزالة الرطوبة والغازات الممتصة وتنظيف السطح من طبقة الأكاسيد وتحسين توزيع الدقائق داخل المصهور تتم الإضافة بشكل مشترك ويتم معها إضافة كمية قليلة من المغنزيوم (لا تتجاوز1%) 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 $(350 \to 450 r.pm)$ ولمدة-10) (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 الى داخل المصهور وتوزيعه خلاله وأثناء عملية الخلط يتم إعادة تسخين الخليط إلى درجة الحرارة $800C^\circ$ لتحسين انتشار وتوزيع الدقائق الداعمة ضمن المصهور وبعد انتهاء الخلط وعند درجة الحرارة $800C^\circ$ تتم عملية صب قسم من خليط الألمنيوم والدقائق الهجينة في القالب المعدني المُسخن مسبقاً لدرجة حرارة $200C^\circ$لتلافي التجمد المسبق للمصهور وللتقليل من عيوب السباكة عند السباكة بالمزج (**SCT**) والقسم الأخر من خليط الألمنيوم والدقائق الهجينة لأجل السباكة بالعصر (**SQT**) يصب في قالب معدني مُسخن مسبقاً وموضوع تحت المكبس وعند الانتهاء من الصب وامتلاء القالب بالخليط يتم تطبيق ضغط Squeeze Pressure مقداره (50MPa) لزمن Pressure time مقداره حوالي (50 sec) وأخيراً بعد التجمد (Solidification) يتم لفظ العينات من داخل القالب بعد تبريده الشكل(9) (10) وتكرر العملية عدة مرات وفقاً للنسب المطلوب إضافتها من الدقائق الداعمة

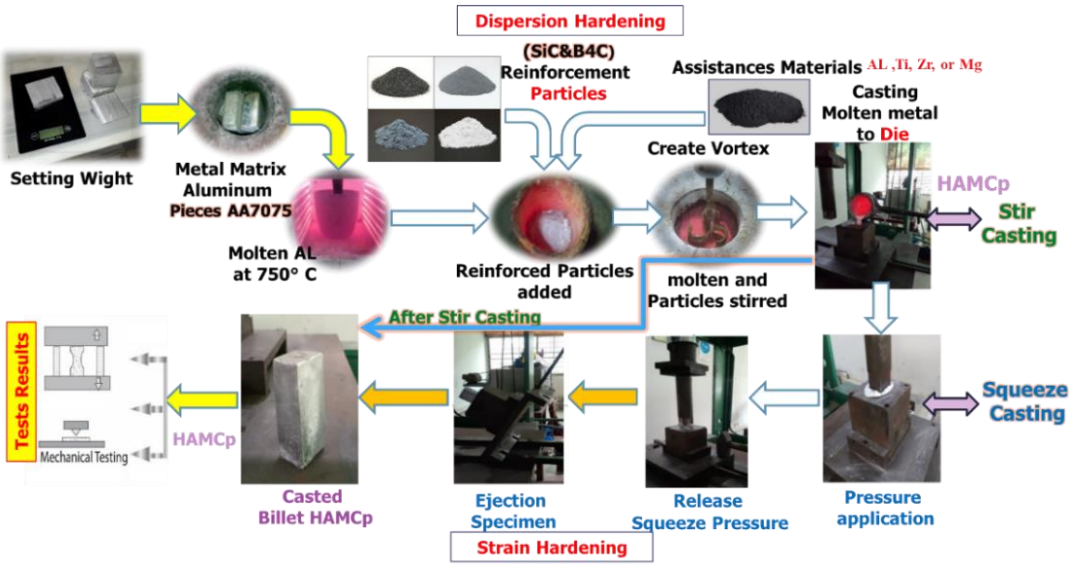
الأساس لنحصل على تسع عينات لكل اختبار (S1, S2, S3,... S9) والجدول (2) يوضح بارامترات (SCT&SQT) المُستخدمة أثناء التصنيع ومستويات تغيير البارامترات الثلاثة المعتمدة **[7] [9]**.

بعد عملية التدعيم ستكون المسبوكات مُجهدة نتيجة عملية التجمد لذا تم إجراء عملية المُجانسة (Homogenization) (إحدى عمليات التخمير) لجميع مسبوكات الألمنيوم المُدعمة لتحقيق التجانس وإزالة الإجهادات الداخلية بالتسخين لدرجة $410C^{\circ}$ وإبقاء لزمن $2 our$ ثم تبريد بطيء بجو الفرن لتكون العينات جاهزة للاختبارات**[8] [10]**.

الجدول (2) بارامترات (SCT&SQT) المطبقة أثناء التصنيع مع توضيح مستويات تغيير البارامترات الثلاثة المعتمدة

Stir–Squeeze Casting Parameters	
Squeeze Pressure	$(50MPa)$
Pressure time	$(60sec)$
Stirring temperature	$(750C^{\circ})$
Preheating temperatures of die	$(200C^{\circ})$
Level (1) Spindle speed	$(350-400-450r.p.m)$
Level (2) Stirring Time	$(10-15-20\min)$
Level (3) Reinforcement Percentage	$(5\%B_4C)\&(5-10-15\%SiC)$
Preheating temperatures of reinforcements	$(200C^{\circ})$

وبالتالي يمكن تلخيص خطوات تنفيذ البحث كما في المخطط التالي الشكل (11):



الشكل (11) مخطط تنفيذ البحث الذي أُنجز في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

4.3. التجهيزات المستعملة لإجراء الفحوصات والاختبارات الميكانيكية:

وهي موضحة بالشكل(12):

الشكل (12) أجهزة الفحص والاختبارات : (جهاز الشد –جهاز القساوة) في مخبر علم المواد والمعالجات الحرارية بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة حمص.

قبل إجراء الاختبارات على العينات المدعمة تم تقسيمها إل ثلاث مستويات الجدول (3) (3Levels) $[3^{rd}\&2^{nd}\&1^{st}]$ حسب البارامترات المتغيرة وفق طريقة تاغوشي(Taguchi method) مع الحساب وفق الخيار "larger the better " وبالتالي

الحصول على تسع عينات مختلفة (3 مستويات*3 بارامترات) وفقاً لما سبق كما يلي (S1, S2, S3.... S8, S9)وبعد ذلك تم تجهيز العينات (مع عينات إضافية عند نفس الشروط لتحقق من النتائج) بعمليات التشغيل للاختبارات وفق(ASTM standards) كما في الجدول (3) الذي يوضح تصنيف العينات ومستوياتها وفق Taguchi Method:

الجدول(3) تصنيف العينات ومستوياتها وفق Taguchi Method[7] [9] [11]

Control Parameters	Levels			Observed Values
	1	2	3	
Stirrer speed (SP)	350	450	550	1)Hardnes in VHN 2) Tensile strength in UTS
Stir Time (ST)	10	15	20	
SiC Wt. %(RE)	5%	10%	15%	

بعد ذلك تم تشكيل مصفوفة تاغوشيTaguchi L9 orthogonal array للعينات التسعة **[9] [11]** وفق الجدول (4):

الجدول(4)Taguchi L9 orthogonal array

Sample(ID)	(SP)	(ST)	(RE)
S1	1	1	1
S2	1	2	2
S3	1	3	3
S4	2	1	2
S5	2	2	3
S6	2	3	1
S7	3	1	3
S8	3	2	1
S9	3	3	2

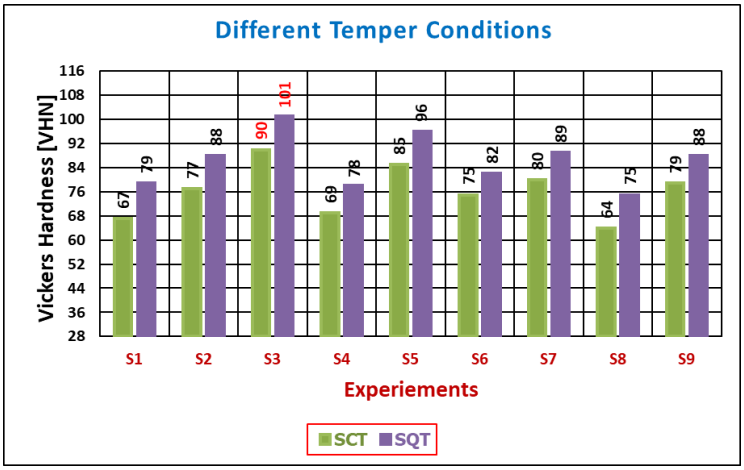
4. النتائج ومناقشتها (Results and Discussion):

النتائج:

1) 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) وسُجلت لضمان موثوقية القياس أربعة قراءات بشكل عشوائي للقساوة من مناطق مختلفة من كلّ عينة من العينات التسعة لتحديد القيمة المتوسطة لقساوة العينات المدروسة.

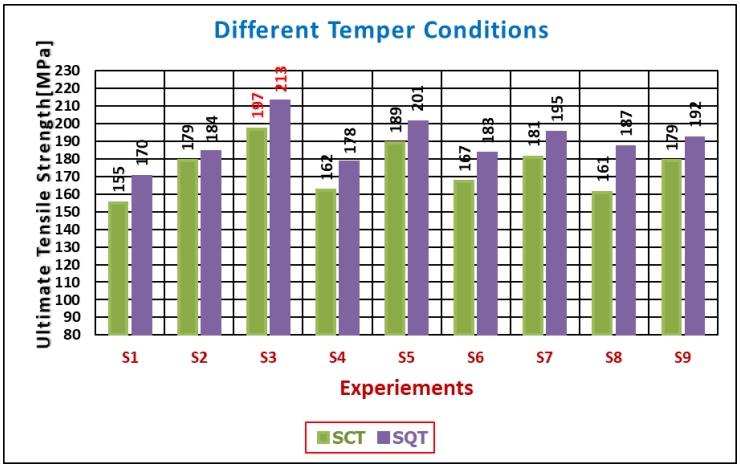
الهدف من إجراء القساوة مراقبة نجاح التدعيم بطريقتي(**SCT&SQT**) مع دراسة تأثير تغير البارامترات الثلاثة المدروسة (**SP&ST&RE**) وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (13) حيث أن أعلى قيمة للقساوة لعينات الألمنيوم المدعم كانت عند استخدام السباكة بالعصر(**SQT**) حيث ارتفعت القساوة وبلغت أعلى قيمة لها (101HV)العينة –S3 – أما عند السباكة بالمزج (**SCT**) كانت قيمها(90HV) وذلك عند استخدام البارامترات التالية عند التحضير :(**SP=350r.p.m&ST=20min&RE=15%SiC**).



الشكل (13) قيم القساوة لسبيكة الألمنيوم AA7075 عند تغيير البارامترات(**SP&ST&RE**)

2) 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 التسعة حسب المواصفة القياسية(ASTM– B557) وبمقاطع مسطحة (10X15mm) بطول قياس (36mm) وبعد الحصول على مخططات الشد للعينات تم تحديد قيم مقاومة الشد الأعظمية UTS كما هو موضح بالشكل (14).



الشكل (14) قيم مقاومة الشد الأعظمية لسبيكة الألمنيوم AA7075 عند تغيير البارامترات(**SP&ST&RE**)

وكانت قد بلغت أفضل قيمة لمقاومة الشد الأعظمية: (UTS=213MPa) عند التدعيم الهجين بتقنية السباكة بالعصر بنسبة تدعيم (Wt=15%SiC+5%B4C) العينة –S3– عند البارامترات التالية:(**SP=350r.p.m&ST=20min&RE=15%SiC**).

مناقشة وتفسير النتائج:

المناقشة والتقييم:

يوضح الجدول (5) العينات التسعة ومختلف مستويات البارامترات المدروسة (**SP&ST&RE**) مع قيم القساوة ومقاومة الشد العظمى التي حصلنا عليها لأجل طريقتي التصنيع بالسباكة بالعصر وبالسباكة بالمزج(**SCT&SQT**).

الجدول(5) العينات ومختلف البارامترات المدروسة مع قيم القساوة ومقاومة الشد

Sample Name(ID)	Process parameters			Stir Casting (SCT)		Squeeze Casting (SQT) at (50 Mpa)	
	Stirrer speed (SP)	Stir Time (ST)	Reinforcement (RE)	(UTS)	(VHN)	(UTS)	(VHN)
S1	350	10	5	155	67	170	79
S2	350	15	10	179	77	184	88
S3	350	20	15	197	90	213	101
S4	450	10	10	162	69	178	78
S5	450	15	15	189	85	201	96
S6	450	20	5	167	75	183	82
S7	550	10	15	181	80	195	89
S8	550	15	5	161	64	187	75
S9	550	20	10	179	79	192	88

A. تحديد بارامتر التصنيع الأمثل على قيم القساوة باستخدام طريقة تاغوشي:

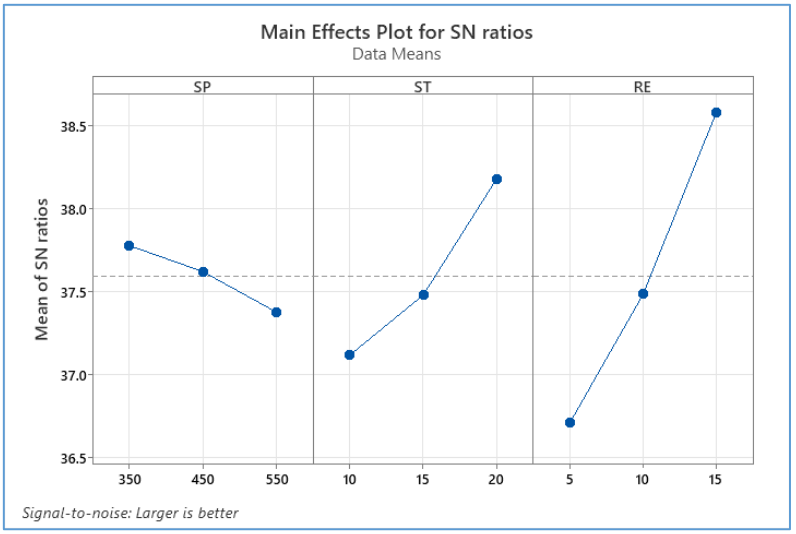
من الجدول (6) والشكل (15) بعد تحديد النسبة (S/N) من خلال برنامج (Minitab) وباستخدام طريقة تاغوشي(Taguchi method) وفق الخيار " larger the better " وجدنا (الحقلRank) أن تأثير المعاملات الأكثر على القساوة هي : نسبة التدعيم**(RE)** ثم زمن الخلط **(ST)** وأخيراً سرعة الخلط **(SP)**.

الجدول(6) قيم النسبة (S/N) بالديسبل (dB)لأجل قيم القساوة المدخلة عند تغيير البارامترات

Table (6) for Signal to Noise Ratios(S/N) for Hardness (Larger is better)

Level	SP	ST	RE
1	37.78	37.12	36.72

2	37.62	37.48	37.49
3	37.38	38.18	38.58
Delta	0.40	1.06	1.86
Rank	3	2	1



الشكل (15) دراسة تأثير تغيير البارامترات(**SP&ST&RE**) على قيم القساوة لسبيكة AA7075 **باستخدام النسبة** (S/N)**بواحدة** (dB)

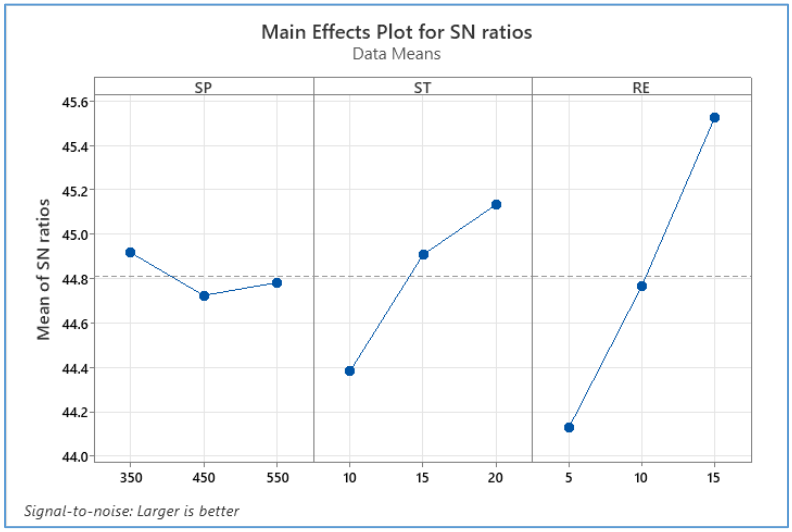
B. تحدد بارامتر التصنيع الأمثل على قيم مقاومة الشد باستخدام طريقة تاغوشي:

من الجدول (7) والشكل (16) بعد تحديد النسبة (S/N) من خلال برنامج (Minitab) وباستخدام طريقة تاغوشي(Taguchi method) وفق الخيار "larger the better" وجدنا (الحقلRank) أن تأثير المعاملات الأكثر على قيمة مقاومة الشد العظمى هي : نسبة التدعيم**(RE)** ثم زمن الخلط **(ST)** وأخيراً سرعة الخلط **(SP).**

الجدول(8) قيم النسبة (S/N) **بالديسبل** (dB)**لأجل قيم مقاومة الشد المدخلة عند تغيير البارامترات**

Table (7) for Signal to Noise Ratios(S/N) **for UTS Larger is better**

Level	SP	ST	RE
1	44.92	44.38	44.13
2	44.72	44.91	44.77
3	44.78	45.13	45.52
Delta	0.19	0.75	1.39
Rank	3	2	1



الشكل (16) دراسة تأثير تغيير البارامترات(**SP&ST&RE**) على قيم مقاومة الشد العظمى لسبيكة AA7075 **باستخدام النسبة** (S/N)**بواحدة** (dB)

نلاحظ بعد تطبيق Taguchi Method عند نسبة التدعيم الهجين (**15%SiC**+5%B4C) العينة (S3) كانت أعلى قيم للخواص الميكانيكية(القساوة ومقاومة الشد العظمى) عند البارامترات الأمثل التالية:(**SP=350r.p.m&ST=20min&RE=15%SiC**). وأن السباكة بالعصر أعطت قيم أعلى للقساوة ومقاومة الشد العظمى من السباكة بالمزج وبالتالي أصبح لدينا طيف واسع من العينات بخواص مختلفة تحقق(الكفاءة العالية والتكلفة المخفضة بالتصنيع) بما يتلاءم مع التطبيق الصناعي المفروض .

يجدر بنا الإشارة إلى أن النتائج والتي 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 ومُتغيرتها واختلاف الطرق الرياضية لدراسة تأثير هذه المتغيرات **[7] [9] [10] [11].**

تفسير النتائج:

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)**:[8] [10]** :

*وفقاً لنظرية أوروان 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 تصطدم 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 وبالتالي زادت فعالية تقوية أوروان في تحسين مقاومة وقساوة المعدن.

*نقل الحمل (Load Transfer): 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 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(Nucleating agents) أثناء تصلب المادة وتُسهم 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 التدعيم مع المعدن الأساس لتكوين أطوار مترسبة دقيقة جداً عند حدود الدقائق وداخل المعدن وبالتالي تعمل هذه الرواسب الدقيقى بنفس طريقة الدقائق الداعمة حيث تعيق وتعرقل حركة الانخلاعات وتزيد مقاومة المعدن.

من الجدير ذكره أن تطبيق الضغط أثناء عملية السباكة بالعصر يحقق تقوية المسبوكات المدعمة وتجعلها أقسى وذات مقاومة أعلى وذلك من خلال إدخال شبكة انخلاعات جديدة في المادة والتي تتداخل مع استمرار حركة الانخلاعات الأساسية وتكديسها وتكّون عوائق لحركة بعضها البعض عدا على أنها تساعد على التخلص من المسامية والفراغات الميكروية الموجودة ضمن البنية **وهذا ما جعل قيم الخواص عندها أعلى من السباكة بالمزج [11] [7] [8] [9].**

5. الاستنتاجات والتوصيات للأعمال المستقبلية:

<u>الاستنتاجات:</u>

1. من خلال هذه الدراسة توصلنا لتصنيع مادة مركبة معدنية (HAMCp) من أساس سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة تدعيماً هجيناً بنوعين مختلفين من الدقائق الكربيدية القاسية بشكل ناجح بتقنيتي (SQT) و(SCT) .
2. تحسن وارتفاع الخواص الميكانيكية للمادة المركبة المعدنية له صلة وثيقة بتقنية التصنيع (السباكة بالعصر كانت أفضل من حيث الخواص من السباكة بالمزج) وبالاختيار المناسب لبارامترات طريقة التصنيع بما يتلاءم مع الاستخدام المطلوب.
3. في ضوء الدراسة الحالية أدى تغير البارامترات المدروسة إلى تغير الخواص الميكانيكية للألمنيوم الأساس (AA7075) وهذا ظهر بشكل واضح من خلال تغير النسبة($\boldsymbol{S/N}$) Signal to Noise Ratio المحسوبة وفق طريقة تاغوشي وذلك عند كل مستوى من القساوة ومقاومة الشد العظمى .
4. من خلال التحليل الرياضي والدراسة وفق طريقة تاغوشي تبين ان أكثر البارامترات تأثيراً على قيمة القساوة ومقاومة الشد العظمى هي : نسبة التدعيم**(RE)** ثم زمن الخلط **(ST)** وأخيراً سرعة الخلط **(SP).**
5. حصول التحسن في الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم الأساس (AA7075) مرتبط بزيادة نسبة التدعيم وزمن الخلط وخفض سرعة الخلط.
6. أفضل قيم للخواص الميكانيكية للألمنيوم المدعم (القساوة ومقاومة الشد الأعظمية) تم الحصول عليها عند نسب تدعيم هجين(5%B4C+**15%SiC**)– العينة(S3)– عند البارامترات التالية:(**SP=350r.p.m&ST=20min&RE=15%SiC**) عند التصيع بكلا التقنيتين.

<u>التوصيات للأعمال المستقبلية:</u>

1. مقارنة النتائج التي توصلت لها الدراسة مع طرق وتقنيات تصنيع أخرى(تكنولوجيا المساحيق أو السباكة بالطرد المركزي) كما نوصي باستخدام دقائق داعمة نانوية في تحقيق التدعيم للألمنيوم واستخدام ومقارنة سبائك أخرى من الألمنيوم مع ما تناولناه في دراستنا الحالية.

2. التوسع بدراسة تأثير متغيرات وبارامترات تصنيع أخرى (درجة حرارة الخلط –ضغط العصر –تصميم مروحة الخلاط– نوع الدقائق–نوع المعدن الأساس.....) على الخواص الميكانيكية للألمنيوم المُدعم المُصنع.
3. نوصي في مجال توصيف سلوك هذا النوع من المواد بتوسيع النتائج لتشمل دراسة خواص ميكانيكية أخرى للألمنيوم بعد التدعيم(مقاومة الضغط والانحناء والتعب والزحف والاهتراء.....).
4. استخدام طرق رياضية وتحليلية أخرى لتحديد واستقراء البارامترات الأمثل مثل: –ANOVA analysis –Artificial Neural Network – Artificial Intelligence (AI) .Fuzzy Logic

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] Vijaya, G and Venkataramaiah , P, **2012-Development of Aluminum metal matrix composite through selection of influential factors by using fuzzy logic**. Vol.9, Issue 53, Elixir International Journal (Elixir), India, 11905-11909p.

[5] Philip, O., Bolu, A., and Anthony, O., **2015 - Artificial Neural Network Prediction of Aluminium Metal Matrix Composite with Silicon Carbide Particles Developed Using Stir Casting Method,** Vol (15), No:02 International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS, Nigeria, 1- 9p.

[6] Ashok ,N and Shanmugh ,P, **2017**- **Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Al8011-SIC Composites-Taguchi Approach**. Vol.10, No 5, International Journal of Chem Tech Research, USA, 293-300p.

[7] Vijayakumar, S., Kumar ,P., Pappula,S., and Pydi ,H., **2022**-**The Effect of Stir-Squeeze Casting Process Parameters on Mechanical Property and Density of Aluminum Matrix Composite**, Vol ,(22), Issue 04, Journal of Advances in Materials Science and Engineering (Hindawi), India&Ethiopia, 1-10p.

[8] Gaurav ,M,Kafaltiya,S and Chauhan ,S, **2024**-**Fabrication and Mechanical Strengthening of Aluminium Composite Material**. Volume 15, Issue 11,Journal of Materials and Environmental Science, India, 1526-1548p.

[9] Habelalmateen,M, R. Srinivasan, Ruby ,P and SHERIL,S **2024**-**Mechanical Property Evaluation of Stir-Squeeze Cast Al-Based Nano SiC Composites**. Vol.26, 491 International Journal of Web of Conferences (EDP Sciences), Iraq, China, 19-28p.

[10] 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.

[11] Imanze ,K and Omotehinse ,S, **2025**-**Effect of Squeeze Casting Parameters on Tensile Strength and Hardness of Aluminum Cast Part**. Vol.1, Issue 1, International Journal of Tropical Engineering and Computing, , Nigeria, 9-17p.