



SiC_p/A356 Kompozitinin Aşınma Direncine Ultrasonik Dövme İşleminin ve Yaşlandırma Sertleşmesinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Gökçe Mehmet Genç^{1*}, Coşkun Yolcu², Fatih Kahraman³, Melih Belevi⁴

ÖZ

Çalışmada, karıştırırmalı döküm yöntemiyle üretilmiş ağırlıkça %10 SiC partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit plakalara 2 ve 5 saat olmak üzere iki farklı yaşlandırma süresi kullanılarak T6 ısıtım işlemi uygulanmıştır. Buna ilaveten, döküm sonrası elde edilen bir diğer kompozit plakaya ise ultrasonik dövme yöntemi uygulanmıştır. Matris malzemesi olarak A356 alaşımı kullanılan kompozit plakaların, uygulanan işlemler sonrasında iç yapılarındaki ve sertlik değerlerindeki değişimler ve bulamaç (çamur) ortamındaki abrasif aşınma davranışları incelenmiştir. Sonuçlara göre, uygulanan ısıtım işlemi ve ultrasonik dövme yönteminin SiC partikül takviyeli A356 kompozitin bulamaç ortamındaki abrasif aşınma direncini arttırdıkları ancak imalat sırasında takviyeler nedeniyle mikro hataların oluşması halinde, seramik takviyelerin sağladığı aşınma direncini yine kendilerinin negatif etkileyebileceği de gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silisyum karbür, ultrasonik dövme yöntemi, karıştırırmalı döküm, T6 ısıtım işlemi

Comparison Of The Effects Of Ultrasonic Impact Treatment And Age Hardening On Wear Resistance Of SiC_p/A356 Composite

ABSTRACT

In the study, 10 wt.% SiC reinforced aluminum matrix composite plates fabricated by stir casting method were T6 heat treated by using two different artificial aging times as 2 and 5 hours. Furthermore, post-casting ultrasonic impact treatment was applied to the other obtained composite plate. The changes in the microstructures and hardness values and slurry wear behaviors of the composite plates which A356 alloy was used as matrix material were investigated. According to the results, the applied heat treatment and ultrasonic impact treatment improved the slurry abrasive wear resistances of the SiC reinforced A356 composite. However, during the composite fabrication process, in the condition of micro discontinuity formation due to the reinforcements; it was observed that the wear resistance ensured by ceramic reinforcements can be adversely affected again by reinforcements

Keywords: Silicon carbide, ultrasonic impact treatment, stir casting, T6 heat treatment

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 17.07.2021

Kabul/Accepted : 18.08.2021

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
mehmet.gencer@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1084-7240

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
coskun.yolcu@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7335-3091

³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
fatih.kahraman@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1075-9171

⁴ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
melih.belevi@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0862-4657



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

A356 is a hypoeutectic alloy composed of coarse α -Al dendrites and acicular eutectic Si phase. By applying heat treatment, spheroidization of the eutectic Si phase and thus, obtaining a more homogeneous microstructure is one of the frequently used modification methods in order to enhance the material properties [13, 14]. Even though the properties of monolithic materials can be improved via these kinds of methods, they often cannot meet the requirements of today's technology alone. Therefore, the necessity of enhancing multifunctional metal matrix composite materials has arisen in order to cope with the latest industrial needs and to obtain materials beyond the limits of conventional alloys [15, 16].

Liquid-state methods are widely used in the fabrication of metal matrix composites with their advantages such as being simple, and efficient, having a suitable potential for mass production, and having the ability of near-net-shape manufacturing. In the fabrication of the particle reinforced A356 alloy by stir casting method, the stirring process has a significant effect on the modification of the microstructure by crumbling the needle-shaped silicon [19, 20], however, it is not sufficient. Heat treatment is an important solution that is still frequently used to modify the eutectic phase in the whole microstructure of ceramic particle reinforced A356 composites obtained by the casting method.

In order to improve wear resistance, it is highly demanded that the composite surface has a fine-grained and favorable microstructure with the increased hardness [25-27]. Impact treatment is an environmentally friendly, economical, multi-purpose, and easy-to-apply method used to enhance the microstructure and increase the hardness in the material surface [28]. Another feature that makes this method come into prominence is, within the range of high-frequency, performing severe plastic deformation in the material surface without any thermal effect, [29, 30].

Slurry abrasive wear causes most of the engineering materials that are used in hydroelectric and thermal power plants, mining operations, petroleum and chemical industries, and slurry transmission (transport) lines to become out of order after a certain period of time [4]. In this study, the effects of heat treatment using different aging times and ultrasonic impact treatment on the microstructure and slurry abrasive wear resistance of the obtained composite were investigated comparatively.

Experimental Study

A356 alloy was used as a metal matrix in the study. The average size of the SiC particles used as reinforcement was 45 μ m. Stir casting method was used to obtain A356+SiCp composite. In order to increase the wettability of SiC particles, the particles were kept at 550 $^{\circ}$ C for 3 hours and, 2 wt % Mg was added into the liquid matrix. After the pouring, the cooling process was carried out at room temperature.

T6 heat treatment using two different aging times was applied to the A356+SiCp composite plates obtained by stir casting. T6 heat treatment was carried out according to the ASTM B917 standard. After the plates were subjected to the solution heat treatment at 540 $^{\circ}$ C for 4 hours, the quenching was carried out in the water at ambient temperature conditions. The aging processes were carried out at 155 $^{\circ}$ C for 2 and 5 hours.

Ultrasonic impact treatment was carried out with a hemispherical pin having a 5 mm diameter on the surface of plates obtained by stir casting. The used frequency and impact amplitude during the process were 24.8 kHz and 17.5 μ m, respectively.

Slurry abrasive wear tests were carried out according to the ASTM G105-20 standard. In order to obtain the slurry environment with abrasive particles, the mixture of quartz sand and pure water was arranged in the ratio of 1.5:1.

Results and Discussion

It was observed that the microstructure of the plate obtained via the casting process consists of coarse α -Al



dendrites and interdendritic acicular eutectic Si phase. Second phase SiC particles in the MMC structure showed a highly homogeneous distribution without any macro-clusters. This situation indicates that the particles were properly wetted by the matrix. However, it was also determined that the matrix could not completely surround the particles due to micro-clustering of the particles in some zones of the obtained MMC plate, and therefore, porosity formation occurred.

After T6 heat treatment, it was observed that most of the eutectic phase in the matrix material became spherical and dispersed more homogeneously in the structure [5]. In addition, α -Al dendrites in the matrix material also became more spherical after heat treatment. When the microstructures of the T6 heat-treated samples were compared, it was determined that the eutectic phase formed through an increase in the aging time increased and coarsened relatively.

While the grains were oriented by deformation on the ultrasonic impact treated surface, fractures occurred in the intergranular eutectic Al-Si phase that presented in the structure and this phase was fragmented. It has been observed that the orientation resulting from the plastic deformation gradually decreases from the surface of the sample towards the inner part and does not occur after approximately 40 μ m.

Ultrasonic impact treatment increased the hardness of the base material (61.3 \pm 1.4 HV) to an average of 87.23 \pm 1.5 HV throughout the 300 μ m depth from the surface and thus resulted in a significant increase in hardness of 42.3%. While the hardness decreases rapidly from the surface towards the inner part, a hardness increment has been obtained up to a depth exceeding approximately 2 mm with the method. The hardness values of the samples aged for 2 and 5 hours were measured as 83.5 \pm 2.2 HV and 74.2 \pm 1.5 HV, respectively.

According to the slurry abrasive wear test results, the highest weight loss (~940 mg) was measured in the base material. Improving the surface hardness via ultrasonic impact treatment and obtaining a dense layer on the surface by deformation enhanced the wear resistance by 14.6 % compared to the base material. Total weight losses in samples aged for 2 and 5 hours were measured as 673.7 and 910 mg, respectively. The specimen aged for 5 hours, although its hardness is higher than the base material, wore less than the base material in the first two rubber wheels used in the tests, while it was worn more than the base material in the wear test with 70 durometer rubber wheel. It has been observed that this situation occurred due to an increase in the wear rate of the 5 hours aged sample caused by the porosities formed in the MMC plate during fabrication and the microscale clustering of SiC particles. Particularly, the detachments that occurred in the regions where the particles were clustered, increased both the weight loss and the 3-body abrasive wear on the surface with the detachment of the matrix and SiC particles from the structure.

Conclusion

In order to improve the microstructure and to improve the slurry abrasive wear behavior of the obtained composite, heat treatment, which is a traditional method, and ultrasonic impact treatment, which is a modern application, were used.

Ultrasonic impact treatment increased the hardness value of the composite to 87.23 HV by ensuring to form cold deformation on the surface. It has been found that the method increases the hardness of the composite from the surface to a depth exceeding 2 mm.

The slurry abrasive wear resistances of the samples were higher than the untreated composite structure. It was observed that the fabrication-induced micro discontinuities in the 5 hours aged sample can prevent the advantage of having high hardness by increasing the amount of wear rate in this sample.



1. GİRİŞ

Yakıt tasarrufu sağlamak, karbondioksit salınımını düşürmek ve çevre kirliliğini azaltmak için özellikle havacılık ve otomotiv sektörü başta olmak üzere endüstride hafif alaşımlara olan ihtiyaç çok yüksektir [1-3]. Düşük yoğunlukları, yüksek özgül dayanımları, iyi dökülebilme-kaynaklanabilme özellikleri, üstün korozyon ve uygun aşınma dirençleri ile A356 alaşımları; uçak bağlantı parçaları, vites kutusu gövdeleri, su soğutmalı silindir blokları, yağ karterleri, pompa gövdeleri gibi çeşitli makine parçalarının/elemanlarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [4-7]. A356, iri α -Al dendritlerinden ve iğne-şekilli ötektik Si fazından oluşan ötektik altı (hipoötektik) bir alaşımdır. Alaşımın yapısında bulunan gevrek ve iğne-şekilli ötektik Si fazının alaşımın mekanik özelliklerini zayıflatması gibi önemli bir dezavantajı vardır [8-12]. Isıl işlem ile yapıdaki ötektik Si fazının küreselleştirilmesi ve daha homojen iç yapı elde edilmesi, malzeme özelliklerinin geliştirilmesi için sıklıkla kullanılan modifikasyon yöntemlerindedir [13, 14]. Ancak sahip oldukları özellikler bu gibi çeşitli modifikasyon işlemleriyle geliştirilmiş olsalar dahi, monolitik malzemeler günümüz teknolojisinin gereksinimlerini çoğu zaman tek başlarına karşılayamamaktadırlar. Bu nedenle, son endüstriyel ihtiyaçlarla başa çıkmak ve geleneksel alaşımların sınırlarının üzerinde malzemeler elde edebilmek için çok işlevli metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin geliştirilme gereksinimi ortaya çıkmıştır [15, 16].

Birçok farklı yöntem ile imal edilebilen MMK parçaların/makine elemanlarının üretimi için kullanılacak yöntem belirlenirken; parçaların geometrileri, parçadan beklenen özellikler, kullanılacak matris malzemesi ve takviye elemanının cinsi, şekli ve boyutu dikkate alınır [17, 18]. Sıvı-hal yöntemleri basit, verimli, seri imalat için uygun bir potansiyele sahip olmaları ve son şekle yakın parça imal edilebilmesi gibi avantajlarıyla metal matrisli kompozit üretiminde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Partikül destekli A356 alaşımının karıştırmalı döküm yöntemiyle üretiminde, karıştırma işlemi iğne-şekilli silisyumu parçalayarak iç yapının düzenlenmesinde belirgin bir etkiye sahiptir [19, 20]. Bunun yanında, yöntemle imal edilen seramik takviyeli A356 alaşımlarında ötektik fazın büyümesini engelleyici bir diğer mekanizma da partikül itme prensibidir. Karıştırma işlemiyle yapıya homojen dağıtılan ikinci faz seramik partiküller, katılma süresince dendritler tarafından itilerek taneler arası bölgelere hapsolürler ve buralarda ötektik fazın büyümesini engellerler/yavaşlatırlar [21-23]. Bu avantajlara rağmen iğne-şekilli ötektik silisyum fazı döküm yapı içinde belirli bölgelerde gelişebilmektedir. Döküm yöntemiyle elde edilmiş seramik partikül destekli A356 kompozitlerde ötektik fazın tüm yapıda düzenlenebilmesi ve dolayısıyla kompozitin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için ısıl işlem uygulaması günümüzde hala sıklıkla kullanılan önemli bir çözüm yoludur.

Her ne kadar yapıya eklenen takviyeler sayesinde alaşımların mekanik ve kimyasal özellikleri geliştirilmiş olsa da söz konusu çeşitli aşınma ve korozyon şartları altında



çalışma olunca MMK malzemelerin sahip oldukları özelliklere ilaveten yüzey özellikleri ekstra önem kazanmaktadır. Aşınma sebebiyle malzeme kaybına ilgili yüzeydeki düşük sertlik değerinin ve uygun olmayan iç yapının etkili olduğu bilinmektedir [24]. Bu nedenle aşınma direncinin geliştirilmesi amacıyla kompozit yüzeyinin artırılmış sertlik ile birlikte ince taneli ve uygun bir iç yapıya sahip olması önemli derecede talep görmektedir [25-27]. Ultrasonik dövme yöntemi malzeme yüzeyinde iç yapıyı geliştirmek ve sertliği arttırmak için kullanılan çevreci, ekonomik, çok amaçlı ve kolay uygulanabilen bir yöntemdir [28]. Bu yöntemi öne çıkaran bir diğer özellik ise herhangi bir termal etki olmadan, yüksek frekans aralığında, malzeme yüzeyinde mikron ölçekte yoğun plastik deformasyon gerçekleştirmesidir [29, 30]. Yöntemde bir ultrasonik transdüzer ile üretilen yüksek frekanslı ultrasonik dalgalar, çelik pim(ler) vasıtasıyla yüzey özellikleri geliştirilecek parçaya darbeler şeklinde iletilir. Malzeme yüzeyine iletilen ultrasonik enerji, istenilen mekanik değerlerin elde edilebilmesi için malzemeye özel uygun frekans aralığında verilmektedir [31].

Çeşitli tribolojik ortamlarda çalışacak MMK malzemelerden elde edilen parçalar için bu malzemelerin farklı şartlar altındaki aşınma dirençlerinin belirlenmesi çok önemlidir [16]. Bulamaç (çamur) ortamında abrasif aşınma, bir sıvı ortamda askıda kalan katı partiküllerin malzeme yüzeyine çarpmasıyla oluşan mekanik etki ile yüzeyden sürekli malzeme kaybı olarak tanımlanır. Malzemede gerçekleşen kayıp; abrasif partikülün cinsine, yüzeye çarpma hızına ve sıvı ortamın kimyasına (korozyon etkisine) önemli ölçüde bağlıdır. Bu aşınma tipi özellikle; hidroelektrik ve termik santrallerde, maden işletmelerinde, petrol ve kimyasal endüstrilerde ve bulamaç iletim (taşım) hatlarında bulunan mühendislik malzemelerinin çoğunun belirli süre sonunda kullanım dışı kalmasına sebep olmaktadır [4]. Bu kapsamda, çalışmamızda, sahip olduğu özellikler sayesinde endüstrinin farklı alanlarında kullanım bulan SiC partikül takviyeli A356 kompozitine farklı yaşlandırma süreleri kullanılarak gerçekleştirilen ısı işleminin ve ultrasonik dövme yönteminin elde edilen kompozitin iç yapısına ve bulamaç (çamur) ortamındaki abrasif aşınma direncine olan etkileri kıyaslanarak araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmada metal matris olarak A356 alaşımı kullanılmıştır. Matris malzemesine ait kimyasal kompozisyon Tablo 1’de verilmiştir. Takviye için kullanılan SiC partiküllerin ortalama boyutu 45 μm ’dir. A356+SiC_p kompozitin elde edilmesi için karıştırmalı döküm yöntemi kullanılmıştır (Şekil 1a). Matris malzemesi asal gaz (argon) atmosferi altında elektrikli ergitme ocağında 800 °C’de ergitilmiştir. K-tipi termokupl kullanılarak sıvı matrisin sıcaklığı pota içinde düzenli olarak ölçülmüştür. SiC partiküllerinin ıslatılabilirliğini arttırmak için partiküller 550 °C’de 3 saat boyunca tutulmuş ve sıvı matris içine kütlece %2 Mg eklenmiştir. Ergiyiğe önce Mg ilavesi yapılmış ve 1 dk boyunca 1000 d/d ile karıştırılmıştır. Ardından kütlece %10 SiC partikülleri eklenerek

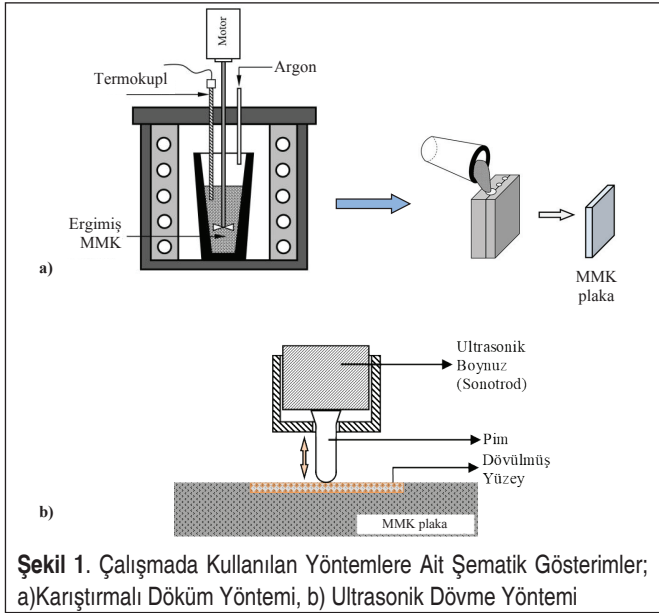
**Tablo 1.** A356 Matris Metalinin Kimyasal Kompozisyonu (% ağı.)

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
6,5-7,5	0,25-0,45	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	Balance

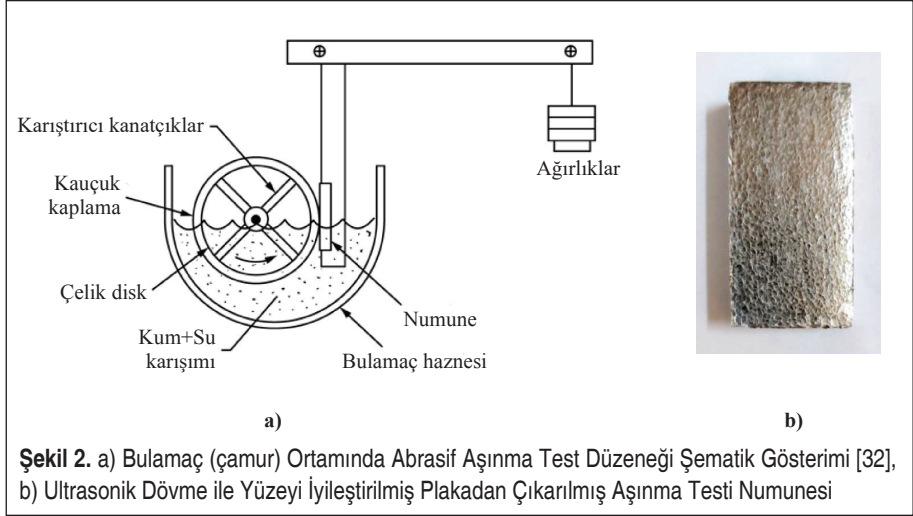
1000 d/d ile 3 dk boyunca karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, döküm hızlı katılaşma nedeniyle olası çatlak oluşumunu önlemek için daha önceden 550 °C'ye ısıtılmış çelik kalıba yapılmıştır. Döküm süresince ergimiş kompozitin ve çelik kalıbın sıcaklıkları sırasıyla 725±5 °C ve 500±10 °C olarak ölçülmüştür. Döküm sonrası soğuma işlemi oda sıcaklığında yapılmıştır.

Karıştırmalı döküm ile elde edilen A356+SiC_p kompozit plakalara iki farklı yaşlandırma süresi kullanılan T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. T6 ısıl işlemi (çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma) ASTM B917 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Plakalar 540 oC'de 4 saat boyunca çözeltiye alındıktan sonra oda sıcaklığındaki suda su verilmiştir. Yaşlandırma işlemleri ise 155 °C'de 2 ve 5 saat boyunca gerçekleştirilmiştir.

Ultrasonik dövme yöntemi 5 mm çapa sahip yarı küresel formda tek pimli başlık ile karıştırmalı döküm sonrası elde edilen plaka yüzeyinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1b). Dövme süresince kullanılan frekans ve darbe süresi değerleri sırasıyla 24,8 kHz ve 17,5 µm'dir. Dövme yöntemi kompozit yüzeyinde 1,5 sn/mm²'lik parametre ile düzenli olarak gerçekleştirilmiştir. Dövme işleminde yüzeyde oluşan pimin darbe kuvvetlerine ekstra bir karşı kuvvet uygulanmamış, sadece dövme cihazının kendi ağırlığı bu amaçla kullanılmıştır. İşlemden sonra kompozit yüzeyi parlak ve homojen dağılmış küçük girintilerden oluşan bir görünüme sahip olmuştur (Şekil 2b).



Şekil 1. Çalışmada Kullanılan Yöntemlere Ait Şematik Gösterimler; a) Karıştırmalı Döküm Yöntemi, b) Ultrasonik Dövme Yöntemi

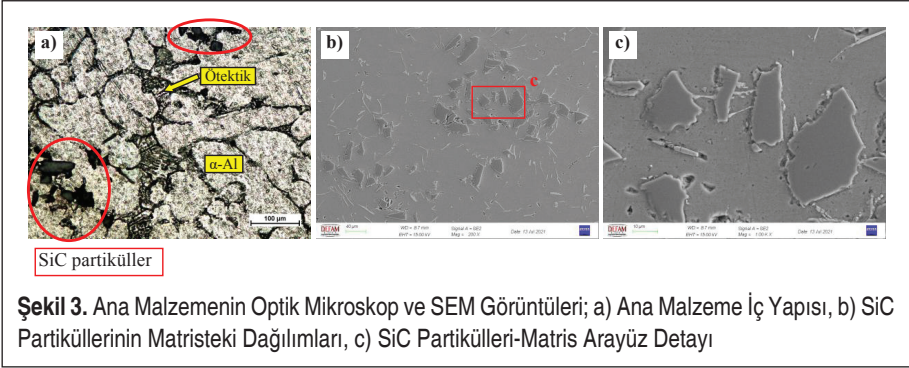


Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numunelerin yüzeyleri parlatıldıktan sonra % 0,5 HF çözeltisi içine daldırılarak kimyasal olarak dağlanmıştır. Numunelerin iç yapıları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Numunelere ait sertlik ölçümleri mikro Vickers sertlik cihazıyla 100 gr yük altında ve 15 sn bekleme süresi ile gerçekleştirilmiştir.

Bulamaç (çamur) ortamında abrasif aşınma testleri ASTM G105-20 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğine ait şematik görünüm Şekil 2a'da verilmiştir. Aşındırıcı partiküllerin bulunduğu bulamaçlı (çamurlu) ortamı oluşturmak için 1,5:1 oranında kuvars kumu ve saf su karışımı kullanılmıştır. Testlerde aşınma numuneleri 222 N'luk yük altında kauçuk diske temas ettirilmiştir. Testlerde her numune farklı sertlik değerlerine sahip (sırasıyla 50, 60, 70 Shore A) 3 kauçuk disk kullanılarak aşındırılmıştır. Her kauçuk disk 245 d/d ile 1000 devir boyunca kullanılmıştır. Tüm numunelerin aşınma testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

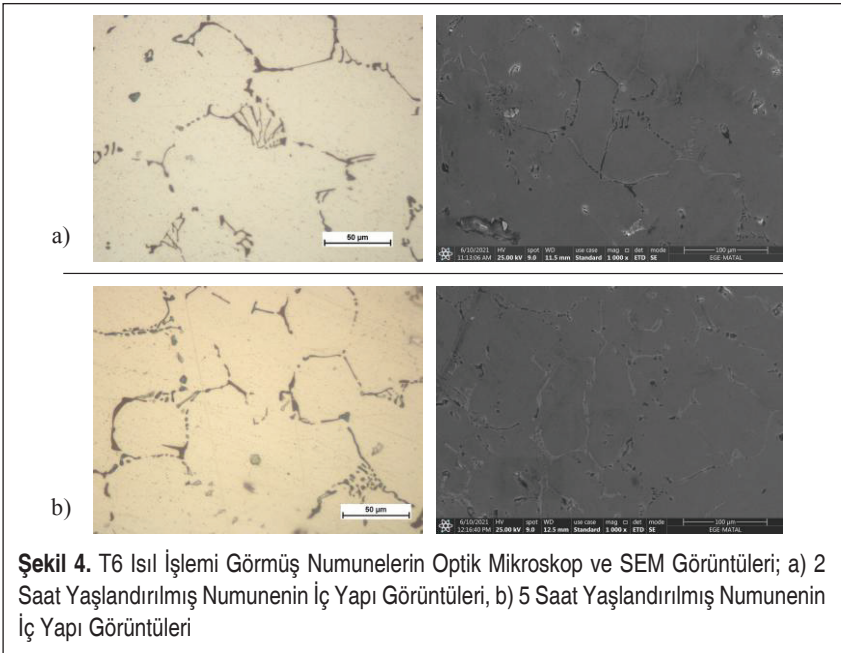
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

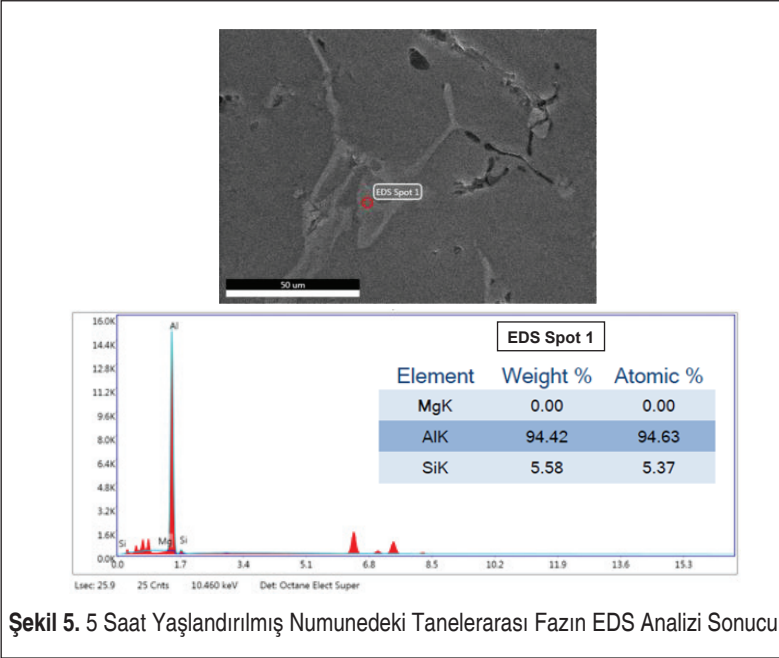
Döküm sonrası elde edilen plakanın iç yapısının iri α -Al dendritlerinden ve dendritlerarası iğne-şekilli Si ötektik fazından oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 3a). SiC partiküllerin matris metali tarafından iyi şekilde ıslatılabilmesinin ve matris-partikül arayüzünde oluşan bağ kuvvetinin, partiküllerin matris içindeki dağılımını etkilediği bilinmektedir [22, 33, 34]. Şekil 3b'de MMK yapı içinde ikinci faz SiC partikülleri makro kümelenmeler oluşturmadan yüksek oranda homojen dağıldığı görülmektedir. Bu durum, matrisin partikülleri uygun şekilde ıslatabildiğini göstermektedir. Elde edilen SiC takviyeli kompozitin matris-partikül arayüzü Şekil 3c'de gösterilmiştir. Arayüzün düzgün şekilde oluşması ve matrisin partikülleri tamamen sarması, matris-



partikül arasında uygun bağlanmanın da gerçekleştiğini göstermektedir. Ancak elde edilen MMK plakanın bazı bölgelerinde partiküllerin mikro ölçekte kümelenmeleri sebebiyle matrisin partikülleri tamamen saramadığı ve bu sebeple porozite oluşumunun gerçekleştiği de tespit edilmiştir.

Elde edilen kompozit plakaya, gevrek ve iri ötektik fazın küreselleşmesi, α -Al dendritlerinin homojenleşmesi ve çözünen atomların çöktürülerek kompozitinin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Lu ve ekb.'nin yaptığı çalışmaya benzer şekilde, T6 ısıl işlemi sonrası ana malzemedeki ötektik fazın büyük çoğunluğunun küreselleştiği ve yapı içinde daha homojen dağıldığı gözlemlenmiştir





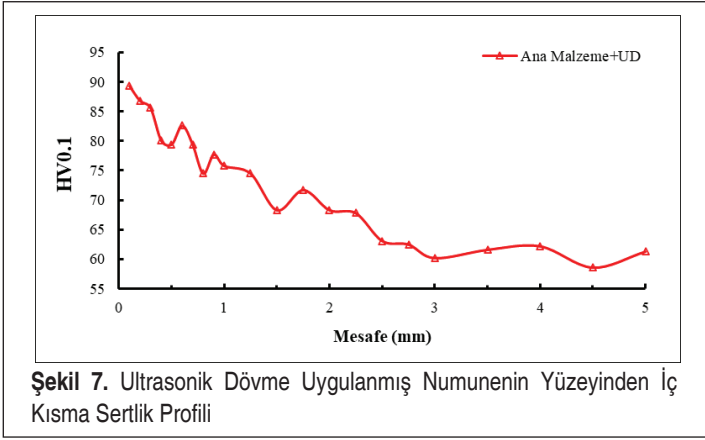
Şekil 5. 5 Saat Yaşlandırılmış Numunedeki Tanelerarası Fazın EDS Analizi Sonucu

(Şekil 4) [5]. Buna ilaveten, ana malzemede ki α -Al dendritleri de ısıl işlem sonrası daha küresel hale gelmiştir. T6 ısıl işlemi gören numunelerin iç yapıları kıyaslandığında, yaşlandırma süresinin artmasıyla oluşan ötetik fazın relatif olarak arttığı ve irileştiği tespit edilmiştir. 5 saat yaşlandırılmış numunenin SEM görüntüsündeki belirtilen noktada (açık gri) gerçekleştirilen EDS analizine göre; bu noktada Al ve Si'nin birlikte bulunuşu ötetik yapıya işaret etmektedir (Şekil 5). Ötetik yapının T6 ısıl işlemi gören numunelerdeki dağılımı Şekil 4'deki SEM görüntülerinden net şekilde görülebilmektedir.

Ultrasonik dövme işlemi görmüş ana malzemenin mikro ölçekte dalgalı yüzeye sahip olduğu Şekil 6'da görülmektedir. Çalışmada ana malzemenin yüzey mekanik özelliklerini geliştirmek ve dolayısıyla aşınma direncini arttırmak için uygulanan ultrasonik dövme işlemi, çelik pim darbelere şeklinde yüzeye uyguladığı basma gerilmeleri ile, malzemede darbe yönüyle belirgin derecede açı yapan (dik/dike yakın) doğrultu boyunca plastik deformasyon oluşturur ve tanelerin bu yönde kristalografik olarak yönlendirilerek deforme olmasına sebep olur [35]. Şekil 6a-c'den görüleceği üzere dövülmüş yüzeydeki deformasyon sonucu tanelerdeki yönlendirme, ötetik fazın dövme yönüne göre belirgin bir açı yaparak yönlendirilmesinden net bir şekilde görülebilmektedir. Bu bölgede ultrasonik dövmenin etkisiyle taneler deforme olarak yönlendirilirken, yapıdaki tanelerarası ötetik Al-Si fazında kırılmalar gerçekleşmiş ve bu faz küçük parçalara bölünmüştür. Numunenin yüzeyinden iç kısma doğru gidildikçe plastik deformasyon



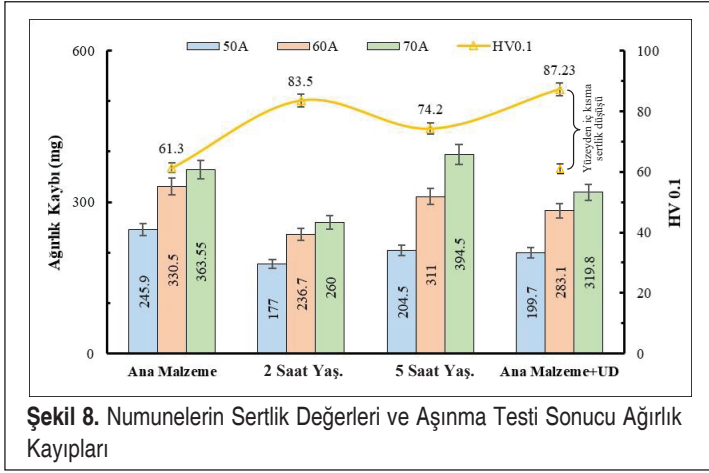
Şekil 6. Ultrasonik Dövme İşlemi Uygulanmış Numunenin Yüzey Kesiti; a) Optik Mikroskop Görüntüsü, b-c) SEM Görüntüleri



Şekil 7. Ultrasonik Dövme Uygulanmış Numunenin Yüzeyinden İç Kısma Sertlik Profili

sonucu gerçekleşen yönlendirme giderek azaldığı ve yaklaşık $40 \mu\text{m}$ 'den sonra oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu noktadan sonra soğuk deformasyonun bir sonucu olarak iç kısımlarda artık gerilmeler oluşur. Bu bölge, ana malzemeye kıyasla daha yüksek sertlik değerlerinden kolaylıkla anlaşılabilir [36]. Ultrasonik darbeler bu bölgede belirgin bir deformasyona ve dolayısıyla mikroyapısal değişikliklere neden olamaz, ancak önemli miktarda sıkıştırma artık gerilmeleri oluşturmaya neden olur [37].

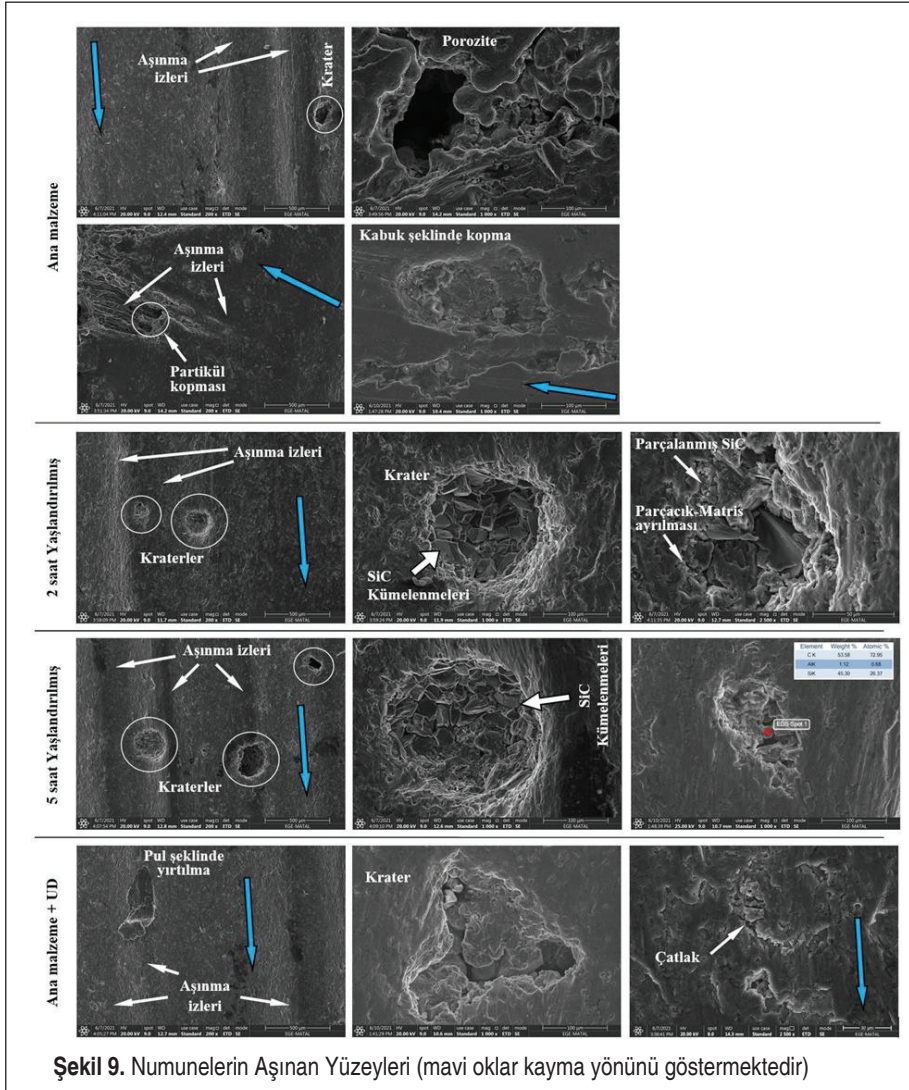
Şekil 7, ultrasonik dövme işlemi uygulanmış ana malzemenin yüzey kesitine ait sertlik profilini göstermektedir. Ultrasonik dövme işlemi ana malzeme sertliğini ($61,3 \pm 1,4 \text{ HV}$) yüzeyin ilk $300 \mu\text{m}$ 'lik bölgesinde ortalama $87,23 \pm 1,5 \text{ HV}$ 'ye getirecek, %42,3'lük belirgin bir sertlik artışına sebep olmuştur. Yüzeyden iç kısma doğru sertlik hızla düşerken, yöntem ile yaklaşık 2 mm 'yi aşan derinliğe kadar sertlik artışı gerçekleştirilmiştir. Ana malzemeye uygulanan T6 ısıtma işlemi ile 2 ve 5 saat yaşlandırılmış numunelerde sertlik değerlerinin sırasıyla $83,5 \pm 2,2 \text{ HV}$ ve $74,2 \pm 1,5 \text{ HV}$ olarak ölçülmüştür. Yaşlandırma süresindeki artış, 5 saat yaşlandırılan numunenin daha düşük sertliğe sahip olmasına sebep olmuştur. Ancak yine de farklı yaşlandırma süreleri kullanılarak uygulanan T6 ısıtma işleminin bu numunelerde ana malzemeye göre %36,2 ve %21 oranında sertlik artışı gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Şekil 8. Numunelerin Sertlik Değerleri ve Aşınma Testi Sonucu Ağırlık Kayırları

Numunelerin ASTM G105-20 standardına göre gerçekleştirilen bulamaç (çamur) ortamında aşınma testi sonuçları, aşınma direnci olarak kabul edilen ağırlık kaybı şeklinde Şekil 8’de verilmiştir. Testler sonunda en yüksek ağırlık kaybı (~940 mg) ana malzemede gerçekleşmiştir. Ultrasonik dövme işlemiyle yüzey sertliğinin artırılması ve deformasyon ile yüzeyde daha yoğun tabaka elde edilmesi aşınma direncini ana malzemeye göre %14,6 geliştirmiştir. Yüzeydeki sertlik diğer numunelere göre daha yüksek olmasına rağmen şiddetli aşınma şartları (222 N yük altında) bu sert tabakanın hızla aşınmasına sebep olarak numunenin aşınma direncini hızla düşürmüştür. Yüzeyde gerçekleşen şiddetli aşınma ile derinleşen oluklar/çizikler aşınma testi boyunca bu numunede yüzeye göre daha yumuşak tabakalara ulaşsa da, ultrasonik dövme işlemi ile 2 mm derinliği aşan bölgeye kadar gerçekleşen sertlik artışı aşınma direncinin ana malzemeden yüksek olmasını sağlamıştır.

T6 ısıtılmasıyla 2 ve 5 saat yaşlandırılmış numunelerdeki toplam ağırlık kayıpları sırasıyla 673,7 ve 910 mg olarak ölçülmüştür. Uygulanan ısıtılması bu numunelerde gerçekleştirdiği sertlik artışı ile aşınma dirençlerinde ana malzemeye göre 2 saat yaşlandırılmış numunede %28,3; 5 saat yaşlandırılmış numunede ise %3,2 ‘lik artış sağlamıştır. 5 saat yaşlandırılmış numune, her ne kadar sertliği ana malzemeye yüksek olsa da, testlerde kullanılan ilk iki diskte ana malzemeye göre daha az aşınırken, 70 Shore A sertliğe sahip son diskle yapılan aşınma testinde ana malzemeden daha fazla aşınmıştır. Son diskle yapılan aşınma testi sonunda 5 saat yaşlandırılmış numunede 394,5 mg’lık ağırlık kaybı yaşanırken, ana malzemede bu değer 363,55 mg olarak ölçülmüştür. Bu durumun, üretim sırasında MMK plakada oluşan prozitetlerin ve mikro ölçekte SiC partikülleri kümelenmesinin 5 saat yaşlandırılmış numunede aşınmayı domine ederek oluştuğu gözlemlenmiştir. Özellikle partiküllerin kümelenme bölgelerinde gerçekleşen kopmalar, matrisle birlikte SiC partiküllerinin de yapıdan



ayrılmasıyla hem ağırlık kaybını ve hem de yüzeyde gerçekleşen 3 cisimli abrasif aşınmayı daha da arttırmıştır. Bu durum, tüm numunelerde gözlemlenmiş olsa da aşınan yüzeyler incelendiğinde (Şekil 9) oluşan bu derin kraterlerin 5 saat yaşlandırılmış numunede relatif olarak daha fazla sayıda olduğu görülmüştür. Yük taşıma kapasitesi matris malzemesinden yüksek olan SiC partiküllerinin kompozit yapının sertliğini artırarak ve yüzeye gelen yükün büyük kısmını karşılayıp matris malzemesinin aşınmasını azaltarak kompozit aşınma direncini arttırdığı bilinmektedir [38]. Ancak bu seramik partiküllerin üretim sırasında kümelenmeleri ve özellikle şiddetli aşınma



koşulları altında yapıdan toplu olarak ayrılmaları halinde, kompozit yapıya kazandırdıkları aşınma direnci yine kendileri sebebiyle düşebilmektedir.

4. SONUÇ

Çalışmada SiC partikül takviyeli A356 kompoziti karıştırmalı döküm yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir. Elde edilen kompozitin iç yapısının iyileştirilmesi ve bulamaç (çamur) ortamındaki abrasif aşınma davranışının geliştirilmesi için geleneksel bir yöntem olan ısıtıl işlem ve modern bir uygulama olan ultrasonik dövme yöntemi kullanılmıştır. Kompozite uygulanan işlemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak kıyaslanmıştır. Buna göre;

1. Döküm yapıdaki mekanik özellikleri olumsuz etkileyen iğne-şekilli ötektik Al-Si fazı farklı yaşlandırma süreleriyle uygulanan T6 ısıtıl işlemi sonrasında küreselleştirilmiştir.
2. T6 ısıtıl işlemleri sonunda kompozit yapının sertliği 2 ve 5 saat yaşlandırılmış numunelerde sırasıyla %36,2 ve %21 oranında artmıştır.
3. Ultrasonik dövme yöntemi yüzeyde gerçekleştirdiği soğuk deformasyon ile kompozitin sertlik değerini 87,23 HV'ye çıkartmıştır. Yöntemin kompozitin sertliğini yüzeyden 2 mm'yi aşan derinliğe kadar arttırdığı tespit edilmiştir.
4. Ultrasonik dövme ile döküm yapıda bulunan iğne-şekilli ötektik faz yüzey bölgesinde kırılarak küçük parçalara bölünmüştür.
5. Numunelerin bulamaç ortamındaki abrasif aşınma dirençleri işlem görmemiş kompozit yapıya göre daha yüksek çıkmıştır. 5 saat yaşlandırılan numunedeki üretim kaynaklı mikro süreksizliklerin, bu numunede aşınma miktarını arttırarak sertliğin yüksek olması avantajının önüne geçebileceğini göstermiştir.

TEŞEKKÜR

Mak. Müh. Anıl Şeker ve Vansan Makina San. ve Tic. A.Ş.'ye çalışmamıza desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Gülcan, O., Tekkanat, K., Çetinkaya, B.** 2019. "Fiber Metal Laminatlar ve Uçak Sanyaiinde Kullanımı Üzerine Bir İnceleme," Mühendis ve Makina, vol. 60, no. 697, p. 262-288.
2. **Şenel, M. C., Gürbüz, M., Koç, E.** 2018. "Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen Al-Si₃N₄ Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," Mühendis ve Makina, vol. 59, no. 693, p. 33-46.
3. **Gecu, R., Acar, S., Kısasoz, A., Guler, K. A., Karaaslan, A.** 2018. "Influence of T6 Heat Treatment on A356 and A380 Aluminium Alloys Manufactured by Thixoforging



Combined with Low Superheat Casting,” Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 28, no. 3, p. 385–392. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64672-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64672-2)

4. **More, S. R., Bhatt, D. V., Menghani, J. V.** 2019. “Effect of Microstructure and Hardness on Slurry Erosion Behaviour of A356 Alloy Using Slurry Pot Test Rig,” Transactions of the Indian Institute of Metals, vol. 72, p. 3191–3199. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01784-z>
5. **Lu, S-p., Du, R., Liu, J-p., Chen, L-c., Wu, S-s.** 2018. “A New Fast Heat Treatment Process for Cast A356 Alloy Motorcycle Wheel Hubs,” China Foundry, vol. 15, no. 1, p. 11–16. <https://doi.org/10.1007/s41230-018-7058-x>
6. **Youn, S. W., Kang C. G.** 2006. “Characterization of Age-Hardening Behavior of Eutectic Region in Squeeze-Cast A356-T5 Alloy Using Nanoindenter and Atomic Force Microscope,” Materials Science & Engineering A, vol. 425, no. 1-2, p. 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.042>
7. **Zhang, L. Y., Jiang, Y. H., Ma, Z., Shan, S. F., Jia, Y. Z., Fan, C. Z., Wang, W. K.** 2008. “Effect of Cooling Rate on Solidified Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum A356 Alloy,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 207, no. 1-3, p. 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.059>
8. **Çetin, A.** 2015. “Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımlarına Genel Bir Bakış,” <https://dokumhane.net/kutuphane/aluminyum-silisyum-dokum-alasimlarina-genel-bir-bakis/> , 16.07.2021.
9. **Boschetto, A., Costanza, G., Quadrini, F., Tata, M. E.** 2007. “Cooling Rate Inference in Aluminum Alloy Squeeze Casting,” Materials Letters, vol. 61, no. 14-15, p. 2969-2972. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.10.048>
10. **Moller, H., Govender, G., Stumpf, W. E.** 2008. “The T6 Heat Treatment of Semi-Solid Metal Processed Alloy A356,” The Open Materials Science Journal, vol. 2, p. 6-10. <https://doi.org/10.2174/1874088X00802010006>
11. **Zhu, M., Jian, Z., Yang, G., Zhou, Y.** 2012. “Effects of T6 Heat Treatment on The Microstructure, Tensile Properties, and Fracture Behavior of The Modified A356 Alloys,” Materials & Design, vol. 36, p. 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.018>
12. **Jiang, W-m., Fan, Z-t., Liu, D-j.** 2012. “Microstructure, Tensile Properties and Fractography of A356 Alloy Under As-Cast and T6 Obtained with Expendable Pattern Shell Casting Process,” Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 22, supplement 1, p. 7-13. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61676-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61676-8)
13. **Qayyum, M. S.** 2015. “Production of a Permanent Mold Gravity Die Cast A356.0 Aluminum Alloy Motorbike Shock Absorber through Casting Simulation,” Key Engineering Materials, vol. 659, p. 676-680. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.659.676>
14. **Makhlouf, M. M., Guthy, H. V.** 2001. “The Aluminum-Silicon Eutectic Reaction: Mechanisms and Crystallography,” Journal of Light Metals, 2001, vol. 1, no. 4, p. 199-218. [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(02)00003-2)



15. **Gürbüz, M., Mutuk, T.** 2019. “Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler ve Grafen Üzerine Yeni Eğilimler,” *Mühendis ve Makina*, vol. 60, no. 695, p. 101-118.
16. **Thiyagesan, G., Vigneshwaran, S., Beer Mohammed, S., Srinivasan, S. A., Thirumaran, B., Kumaresh Babu, S. P.** 2020. “Investigation on The Erosive Wear Resistance of Squeeze Cast AA7150 Under Slurry Conditions,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, no. 3, p. 2529-2532. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.230>
17. **Sharifitabar, M., Sarani, A., Khorshahian, S., Afarani, M. S.** 2011. “Fabrication of 5052Al/Al₂O₃ Nanoceramic Particle Reinforced Composite via Friction Stir Processing Route,” *Materials and Design*, vol. 32, no. 8-9, p. 4164–4172. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.048>
18. **Kraiklang, R., Onwong, J., Santhaweesuk, C.** 2020. “Multi-Performance Characteristics of AA5052 + 10% SiC Surface Composite by Friction Stir Processing,” *Journal of Composites Science*, vol. 4, no. 2. <https://doi.org/10.3390/jcs4020036>
19. **Prabu, S. B., Karunamoorthy, L., Kathiresan, S., Mohan, B.** 2006. “Influence of Stirring Speed and Stirring Time on Distribution of Particles in Cast Metal Matrix Composite,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, no. 2, p. 268-273. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.071>
20. **Sukumaran, K., Pai, B. C., Chakraborty, M.** 2004. “The Effect of Isothermal Mechanical Stirring on an Al–Si Alloy in The Semisolid Condition,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 369, no. 1–2, p. 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.11.036>
21. **Lashgari, H. R., Zangeneh, Sh., Shahmir, H., Saghafi, M., Emamy, M.** 2010. “Heat Treatment Effect on The Microstructure, Tensile Properties and Dry Sliding Wear Behavior of A356–10%B4C Cast Composites,” *Materials & Design*, vol. 31, no. 9, p. 4414-4422. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.034>
22. **Ghandvar, H., Idris, M. H., Ahmad, N., Moslemi, N.** 2017. “Microstructure Development, Mechanical and Tribological Properties of a Semisolid A356/XSiCp Composite,” *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 15, no. 6, p. 533-544. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.06.002>
23. **Nagarajan, S., Dutta, B., Surappa, M. K.** 1999. “The Effect of SiC Particles on The Size and Morphology of Eutectic Silicon in Cast A356/SiCp Composites,” *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 6, p. 897-902. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00131-6)
24. **Shafiei-Zarghani, A., Kashani-Bozorg, S. F., Zarei-Hanzaki, A.** 2011. “Wear Assessment of Al/Al₂O₃ Nano-Composite Surface Layer Produced Using Friction Stir Processing,” *Wear*, vol. 270, no. 5–6, p. 403-412. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.002>
25. **Wang, C. T., Gao, N., Wood, R. J. K., Langdon, T. G.** 2011. “Wear Behavior of an Aluminum Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing,” *Journal of Materials Science*, vol. 46, no. 1, p.123–130. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4862-0>
26. **Thuong, N. V., Zuhailawati, H., Seman, A. A., Huy, T. D., Dhindaw, B. K.** 2015. “Microstructural Evolution and Wear Characteristics of Equal Channel Angular Pressing



Processed Semi-Solid-Cast Hypoeutectic Aluminum Alloys,” *Materials & Design*, vol. 67, p. 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.054>

27. **Palacios, M., Bagherifard, S., Guagliano, M., Pariente, I. F.** 2014. “Influence of Severe Shot Peening on Wear Behaviour of an Aluminium Alloy,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 37, no. 7, p. 821-829. <https://doi.org/10.1111/ffe.12210>
28. **Mao, X., Sun, J., Feng, Y., Zhou, X., Zhao, X.** 2019. “High-Temperature Wear Properties of Gradient Microstructure Induced by Ultrasonic Impact Treatment,” *Materials Letters*, vol. 246, p. 178-181. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.03.059>
29. **Vasylyev, M. A., Chenakin, S. P., Yatsenko, L. F.** 2016. “Ultrasonic Impact Treatment Induced Oxidation of Ti6Al4V Alloy,” *Acta Materialia*, vol. 103, p. 761-774. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.10.041>
30. **Liu, Y., Wang, D., Deng, C., Xia, L., Huo, L., Wang, L., Gong, B.** 2014. “Influence of Re-Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Behaviors of S690QL Welded Joints,” *International Journal of Fatigue*, vol. 66, p. 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.024>
31. **Yuan, K.L., Sumi Y.** 2015. “Modelling of Ultrasonic Impact Treatment (UIT) of Welded Joints and Its Effect on Fatigue Strength,” *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*, vol. 34, p. 476-486. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.34.53>
32. ASTM G105-20. “Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. <https://doi.org/10.1520/G0105-20>
33. **Ghandvar, H., Farahany, S., Idris, J.** 2015. “Wettability Enhancement of SiCp In Cast A356/SiCp Composite Using Semisolid Process,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 30, no. 12, p. 1442-1449. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1004687>
34. **Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M. S. J.** 2001. “The Wettability of SiC Particles by Molten Aluminium Alloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 119, no. 1-3, p. 324-328. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00975-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00975-X)
35. **Perlovich, Y. A., Gol'tsev, V. Y.** 1992. “Changes In The Texture of The Plastic Deformation Zone at The Tip of a Moving Crack,” *Materials Science*, vol. 27, p. 479-483. <https://doi.org/10.1007/BF00726460>
36. **Todaka, Y., Umemoto, M., Tsuchiya, K.** 2004. “Comparison of Nanocrystalline Surface Layer in Steels Formed by Air Blast and Ultrasonic Shot Peening,” *Materials Transactions*, vol. 45, no. 2, p. 376-379. <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.376>
37. **Kahraman, F.** 2018. “Surface Layer Properties of Ultrasonic Impact-Treated AA7075 Aluminum Alloy,” *The Journal of Engineering Manufacture*, vol. 232, no. 12, p. 2218-2225. <https://doi.org/10.1177/0954405416685386>
38. **Shabani, M. O., Mazahery, A.** 2012. “Application of Finite Element Model and Artificial Neural Network in Characterization of Al Matrix Nanocomposites Using Various Training Algorithms,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 43, p. 2158-2165. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-1040-1>