



---

**Makale / Research Paper**

---

**Vorteks Yöntemi İle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviye Edilen 7039 Al Alaşımı Levhanın Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesi, Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması**

Uğur AVCI<sup>a</sup>, Mehmet ERDEM<sup>b</sup> Mustafa KARABULUT<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine Bölümü, Karacasu Kampüsü, Türkiye

<sup>b</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, Malatya, Türkiye

<sup>c</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, Malatya, Türkiye

<sup>a</sup>uavci@ksu.edu.tr, <sup>b</sup>mehmet.erdem@inonu.edu.tr, <sup>c</sup>mkarabulut97@gmail.com

---

**Özet:** Bu çalışmada, ortalama boyutu 6 µm olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri Vorteks yöntemi ile 7039 Al alaşımı matrisine ağırlıkça %2, %5 ve %8 oranında takviye edilmiştir. Yaklaşık 650 g ağırlığındaki 7039 Al matris alaşımı 750°C'de eriyik hale getirilmiştir. Eriyik haldeki matris alaşımının oksitlenmesini önlemek amacı ile fırın atmosferine %99,99 saflıkta argon gazı 15lt/dak hızda gönderilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin matris tarafından ıslatılabilirliğini artırmak ve aglomerasyonlarını (topaklaşma) önlemek amacıyla bu partiküller 850°C'de yaklaşık 1 saat ön ısıtma işlemine tabi tutulmuşlardır. Ön ısıtma işlemine tabi tutulan partiküller eriyik matris alaşımı içine kademeli olarak ilave edildikten sonra grafit karıştırıcı vasıtasıyla kademeli olarak 1050 d/dak dönme hızında karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında 450°C'de ön ısıtma işlemi yapılmış 120x120x15 mm ebadındaki metal kalıba eriyik karışım dökülmüş ve katılma tamamlanana kadar metal kalıba 5 MPa basınç uygulanmıştır. 300°C'de 24 saat homojenleştirme ısıl işleminden sonra levhalara T6 ısıl işlemi ile yaşlandırma ısıl işlemi yapılmıştır. Yaşlandırma sonrası 120-123 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Bu levhalar 1800 d/dak dönme hızında ve 56 mm/dak ilerleme hızında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Birleştirme sonrası levhalardan alınan numunelere optik mikroskop, mikro sertlik ve çekme deneyleri yapılarak mikro yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** 7039Al alaşımı, Vorteks yöntemi, MMK, Sürtünme Karıştırma Kaynağı.

---

**Joining with Friction Stir Welding of 7039 Al Alloy Plate Reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Vortex Method, Investigation of Microstructure and Mechanical Properties**

---

**Abstract:** In this study, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles which are average size 6 µm were reinforced to 7039 Al alloy matrix percentage %2, %5 and %8 by weight by using Vortex method. 7039 Al alloy weighted approximate 650 g was melted at 750°C. Argon gas of pure % 99,99 was send with velocity 15lt/min. in order to prevent oxidation of matrix alloy in case of mold into atmosphere of furnace. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles were operationalized preheating 850 °C for about an hour in order to prevent to agglomeration and increase to wettability by matrix. After particles which are operationalize preheating were gradually added into the molten matrix alloy, it was gradually mixed about 10 min with rotation speed 1050 rev/min by graphite mixer. After stirring, molten mixture was poured into the metal chamber that it is dimension 120x120x15 mm and made preheating at 450°C and pressure is applied to metal chamber 5MPa until complete solidification. After homogenization heat treatment at 300°C for 24 h applied to plates, T6 heat treatment and aging heat treatment made to they. After aging was obtained from 120 to 123 HV hardness. This plates were welded by friction stir welding at rotation speed 1800 rev/min and feed of rate 56 mm/min. Performing optical microscope, micro hardness and tensile strength tests to samples taken from plates after combining, microstructure and mechanical property characterization made.

**Keywords:** 7039 Al alloy, Vortex process, MMC, Friction Stir Welding.

---

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Avcı, U., Erdem, M., Karabulut, M., "Vorteks Yöntemi İle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviye Edilen 7039 Al Alaşımı Levhanın Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesi, Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2017, 4(3); 560-567.

*How to cite this article*

Avcı, U., Erdem, M., Karabulut, M., "Joining with Friction Stir Welding of 7039 Al Alloy Plate Reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Vortex Method, Investigation of Microstructure and Mechanical Properties" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2017, 4(3); 560-567.

## 1. Giriş

Metal matrisli kompozitler (MMK) mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle son yıllarda birçok mühendislik alanında tercih edilmektedir [1]. Alüminyum esaslı kompozitler yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direncine sahip oldukları için otomobil endüstrisinde, uzay uygulamalarında ve elektrik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasındaki ara bağ, metal matrisli kompozitin özelliklerini belirlemede kritik rol oynamaktadır. Güçlendirme ve sertleştirme, ara bağ boyunca yük transferine bağlı olmaktadır [3]. Kompozit malzemelerin üretimi, farklı malzemelerin üstün özelliklerinin bileşimi ile ortaya çıkar.  $Al_2O_3$  ve SiC gibi seramik malzemelerin, alüminyum esaslı bir kompozit içerisine takviye edilmesi, tribolojik özelliklerin çok önemli olduğu farklı mühendislik malzemelerin üretim taleplerini karşılamada dikkat çekici bir üstünlük sağlamaktadır [4,5]. Takviye malzemesi olarak fiberlerin kullanılması, partiküllerle kıyaslandığında daha maliyetlidir. Bu nedenle de kompozit malzemelerin geliştirilmesinde  $Al_2O_3$  gibi seramik partiküllerin kullanımında artış görülmektedir [6,7].

Matris olarak hafif alüminyum alaşımlarının kullanılması, yüksek özellikte dayanımlı malzemelerin birçok uygulaması için gerekmektedir. Hafif zırhlı araçlar bu uygulamanın bir örneğidir. 7039 alüminyum alaşımı, benzer yoğunluktaki alaşımlara ve aynı karakteristikteki yapılara göre daha yüksek dayanıma sahip olduğundan dolayı, matris malzemesi olarak kullanımı tercih edilmektedir. Tablo 1’de genel itibariyle 7039 alüminyum alaşımının içeriği verilmektedir [9]. 7039, ısıl işlem yapılabilen bir alüminyum alaşımıdır ve  $Mg(Zn,Al,Cu)_2$  çökeltisinin çok iyi dağılımı sonucunda, alaşım dayanıklılığı arttırılmaktadır [10].

Tablo 1. 7039 alüminyum alaşımının içeriği [9].

Mg	Zn	Mn	Cr	Si	Fe	Cu	Ti	Al
2.3 - 3.3	3.5-4.5	0.10-0.40	0.15-0.25	0.30 max	0.40 max	0.10 max	0.10 max	Kalan

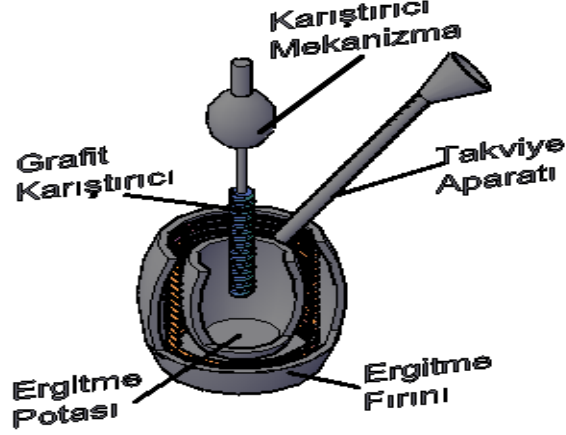
Yukarıda açıklanan özellikler göz önüne alındığında,  $Al_2O_3$  takviye edilmiş 7039 alüminyum alaşımını bir kompozit malzemenin üretilmesinin avantajları tahmin edilebilmektedir. Bu tür bir üretimin gerçekleştirilebilmesi için toz metalurjisi ve sıkıştırma döküm gibi teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerle birlikte Vorteks yöntemi de ticari açıdan uygulanabilir bir metot olarak kabul edilmiştir. Üretim şeklinin sadeliği, esnekliği ve geniş hacimli üretimler için uygulanabilirliği bu yöntemi daha avantajlı kılmaktadır [11-15]. Takviye malzemesi ile matris alaşımı arasındaki kimyasal reaksiyon ile ilgili zorluklar ve takviye partiküllerinin üniform olarak dağılımının sağlanamaması, bu yöntemin dezavantajlarını oluşturmaktadır [11-13].

Kompozit malzemelerin birleştirilmesi için uygulanmakta olan sürtünme karıştırma kaynağı, diğer geleneksel kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında mikroyapı ve mekanik özellikler yönü ile üstünlük göstermektedir [16]. Çoğu araştırmacı, başarılı endüstri uygulamalarında ve mühendislik alaşımlarının birleştirilmesinde bu kaynak yöntemine başvurmaktadır [17,18].

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 650 gr Al 7039 alaşımı grafit pota içerisine yerleştirilmiş ve Şekil 1’de verilen fırında  $750^{\circ}C$ ’de ergitilerek farklı oranlarda (%2, 5 ve 8)  $Al_2O_3$  partikülleri takviye edilmiştir. Eriyik haldeki matris alaşımının oksitlenmesini önlemek amacı ile fırın atmosferine %99,99 saflıkta argon

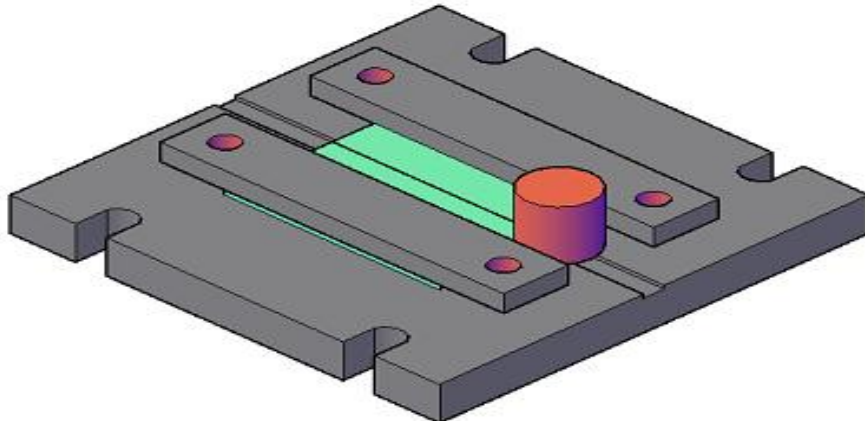
gazı 15 lt/dak hızda gönderilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin matris tarafından ıslatılabilirliğini artırmak ve aglomerasyonlarını (topaklaşma) önlemek amacıyla bu partiküller 850°C’de yaklaşık 1 saat ön ısıtma işlemine tabi tutulmuşlardır. Ön ısıtma işlemine tabi tutulan partiküller eriyik matris alaşımı içine kademeli olarak ilave edildikten sonra grafit karıştırıcılar vasıtasıyla kademeli olarak yukarı aşağı hareket ettirilerek 1050 d/dak dönme hızında karıştırılmıştır.



Şekil 1. Vorteks yöntemi bileşenlerinin kesit görünümü.

Karıştırma işlemi sonrasında 450°C’de ön ısıtma işlemi yapılmış 120x120x15 mm ebadındaki metal kalıba eriyik karışım dökülmüş ve katılaşma tamamlanana kadar metal kalıba 5 MPa basınç uygulanmıştır. Dökülmüş bu numunelere 300°C’de 24 saat homojenleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Takiben malzeme 460 °C’de 2 saat bekletilip su verme işlemi uygulandıktan sonra 120 °C’de 24 saat bekletilip fırın içinde soğutularak yaşlandırma ısıl işlemi yapılmıştır.

Farklı oranlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri takviye edilen kompozit levhalara, kendi aralarında dikey başlı üniversal freze tezgahında Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) yapılmıştır. Karıştırıcı uç olarak 3 mm çapında ters kılavuz uç, dönme hızı 1800 dev/dak ve ilerleme hızı ise 56 mm/dak kullanılmıştır. SKK şematik uygulaması Şekil 2’de verilmiştir. Numuneler zımparalama ve parlatma işleminden sonra Keller kimyasalında (1 ml HF, 1,5 ml HCl, 2,5ml HNO<sub>3</sub>, 95 ml H<sub>2</sub>O) dağlanmıştır. LEICA DM4000M cihazda optik mikroskop ve Shimadzu GMV-20 cihazında 100 gr yük kullanılarak mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Her bir bölge için üç adet sertlik ölçümü yapılmıştır. Çekme deney numuneleri ASTM E 8 M-04 standardının belirttiği ölçülerde malzeme yapısını değiştirmeden tel erozyon tezgahında istenilen ölçülere getirilmiştir. Çekme deneyleri ZwickZ100 marka çekme-basma cihazında yapılmıştır.

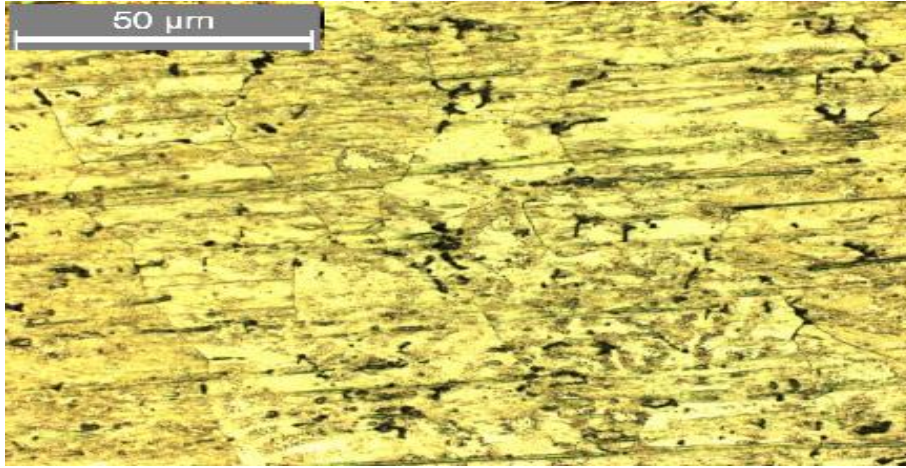


Şekil 2. SKK şematik uygulaması.

### 3.Bulgular ve Tartışma

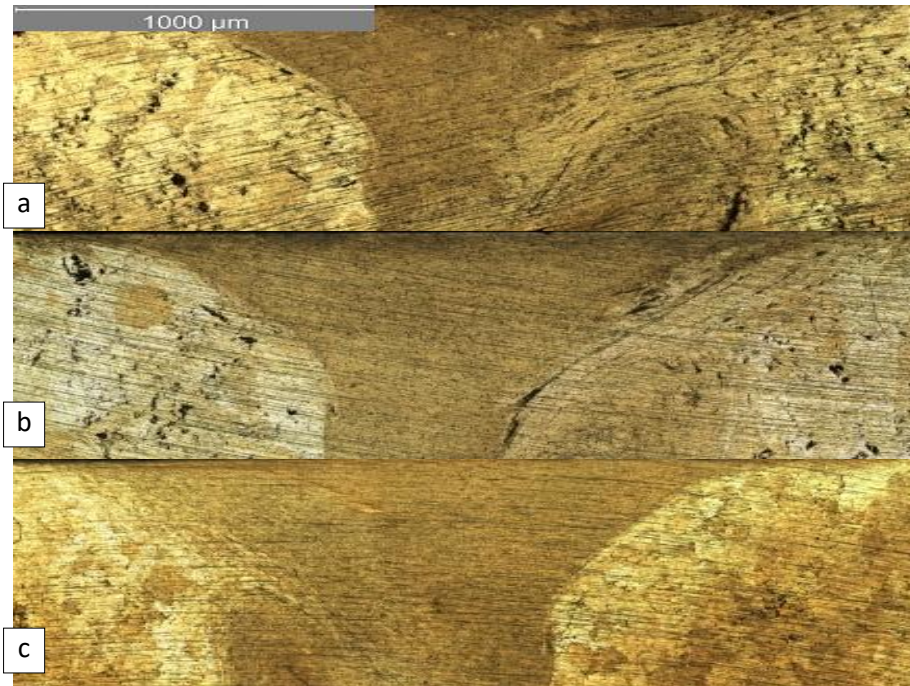
#### 3.1. Mikro yapı İncelemeleri

Şekil 3’de %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye edilmiş 7039 Al alaşımının ana metal mikro yapısı görülmektedir. Ana metal tane yapısının yaklaşık 50-80 µm boyutundaki tanelerden oluştuğu görülmüştür. Bu iri tane yapısı homojenleştirme ısıl işlemi sonucu oluşmuştur. Takviye edilen partiküllerin yapı içine dağıldıkları belirlenmiştir. Bu mikro yapı % 2 ve 5 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye edilmiş 7039 Al alaşımlarının ana metal mikro yapısı ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir (oksit dağılım miktarı hariç).



Şekil 3. %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye edilmiş numune ana metal mikro yapısı.

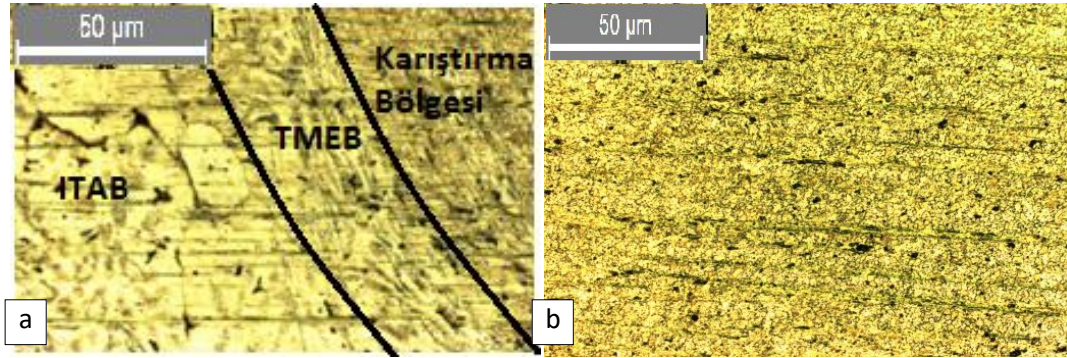
Şekil 4. a-c’ de sırası ile %2, 5 ve 8 ağırlık oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye edilmiş 7039 Al alaşımlarının SKK sonrasındaki kaynak kesit resimleri verilmiştir. Bu üç resimde de kaynak birleşim hataları görülmemiştir. Tüm numunelerin kaynak kesiti incelemelerinde ana metal, ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB), termo-mekanik etkilenen bölge (TMEB) ve karıştırma bölgesi olmak üzere dört farklı bölge tespit edilmiştir.



Şekil 4. a-%2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli, b-%5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli, c-%8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli 7039 MMK malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı sonrası mikro yapı resimleri.



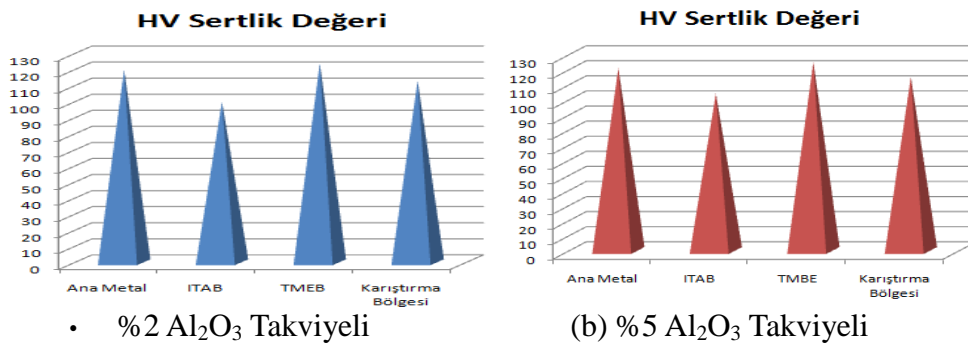
Şekil 5. a ve b'de %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye edilmiş 7039 Al alaşımının kaynak kesitindeki ITAB, TMEB ve karıştırma bölgelerine ait detay resimler verilmiştir. Şekil 5.a'da ITAB'ın tane boyutu ana metal tane boyutuna kıyasla daha iri olduğu tespit edilmiştir. SKK'ğı esnasında karıştırıcı ucun sürtünme ısı bu bölgedeki tanelerin boyutunu artırmıştır. TMEB'deki taneler karıştırıcı ucun dönme yönünde yönlendirilmiştir. Yönlendirilen bu taneler ince uzun ve tane/boy oranı yaklaşık 10-20 arasında oldukları tespit edilmiştir. Şekil 5.b'deki karıştırma bölgesinin tane yapısında, karıştırıcı uçun dinamik karıştırma etkisi nedeni ile tanelerin yeniden kristalleştiği görülmüştür. Bu tanelerin eş eksenli oldukları ve yaklaşık 2-5 µm arasında oldukları belirlenmiştir. Bu bölgede takviye partiküllerinin homojen dağılım gösterdikleri tespit edilmiştir.

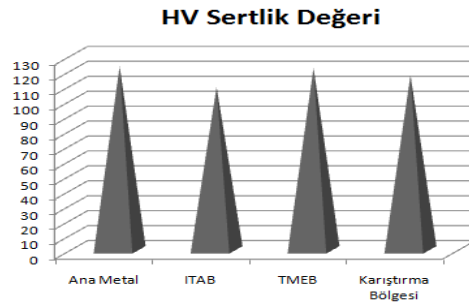


Şekil 5. a ve b'de %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye edilmiş 7039 Al alaşımının kaynak kesitindeki ITAB, TMEB ve karıştırma bölgelerine ait detay resimler

### 3.2. Mikro sertlik sonuçları

Şekil 6. a-c' de sırası ile %2, 5 ve 8 ağırlık oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye edilmiş 7039 Al alaşımlarının SKK sonrasında kaynak kesitinde oluşan bölgelerin sertlik değerleri grafik biçiminde verilmiştir. Şekil 6.a' da oluşturulan grafikte, %2 takviyeli malzemede ana metalin sertlik değeri 120 HV olarak tespit edilmiştir. ITAB'da ise sertlik değeri düşüş göstererek 100 HV ölçülmüştür. İlerleme kenarındaki TMEB'nin sertlik değeri 124 HV ile en yüksek değerdedir. Karıştırma bölgesinin sertlik değeri ise 113 HV olarak ölçülmüştür. Şekil 6.b' de oluşturulan grafikte, %5 takviyeli malzemede ana metalin sertlik değeri 121 HV, ITAB'da 104 HV, TMEB'nin sertlik değeri 125 HV ve karıştırma bölgesinin sertlik değeri 113 HV olarak ölçülmüştür. Şekil 6.c' de oluşturulan grafikte, %8 takviyeli malzemede ana metalin sertlik değeri 123 HV, ITAB'da 109 HV, TMEB'nin sertlik değeri 123 HV ve karıştırma bölgesinin sertlik değeri 117 HV olarak ölçülmüştür. Farklı oranlarda ki bu dört bölgenin sertlik değerlerinde arasında bir saçınım olduğu görülmüştür. Bu değerlerden de görüldüğü gibi ITAB'da sertlikte bir düşüş, TMEB ise az da olsa bir artış meydana gelmiştir. Bu artış termo-mekanik etki nedeni ile artan dislokasyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



(c) %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviyeli

Şekil 6. a-c Sırası ile %2, 5 ve 8 ağırlık oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye edilmiş 7039 Al alaşımlarının SKK sonrasında kaynak kesitinde oluşan bölgelerin sertlik değerleri.

### 3.3. Çekme deneyi sonuçları

%2 ,% 5 ve %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye oranlarında takviye edilen Al 7039 MMK malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı sonrasında ortalama çekme deneyi sonuçları Tablo 2’de, hazırlanan çekme numunesi de Şekil 7’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre en yüksek çekme mukavemeti değeri %8 takviyeli kaynaklı numunede (200,84 MPa) elde edilmiştir. Sonrasında sırasıyla %5 takviyeli numunede 185,01 MPa ve %2 takviyeli numunede 158,67 MPa olarak tespit edilmiştir. Böylelikle takviye malzemesi olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı arttıkça kaynaklı malzemenin çekme dayanımında belirgin bir artış olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 2: %2 ,% 5 ve %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye oranlarında takviye edilen Al 7039 MMK malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı sonrası ortalama çekme deneyi sonuçları.

Uygulanan kaynak işlemi	Partikül takviye %	R <sub>m</sub> (MPa)	% ε	R <sub>B</sub> (MPa)
Sürtünme Karıştırma Kaynağı	%2	158,67	1,8	143,42
	%5	185,01	2,1	168,50
	%8	200,84	2.3	194,26

*R<sub>m</sub>: Çekme dayanımı; % ε: Maksimum kuvvet altında uzama; R<sub>B</sub>: Kopma dayanımı*



Şekil 7: Çekme Numunesi Resmi

## 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, matris olarak Al 7039 malzemesine takviye elemanı olarak 6 µm boyutlarında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri Vorteks yöntemi kullanılarak ağırlıkça 2%, 5% ve 8% oranında takviye edilmiş olup sonrasında aynı oranlardaki numuneler birbirleri ile SKK yöntemi ile birleştirilmiştir.

1- Kaynak kesiti mikro yapı incelemeleri ana metal, ITAB, TMEB ve karıştırma bölgesi olmak üzere dört farklı bölgenin oluştuğunu göstermiştir. Karıştırma bölgesi tane yapılarının dinamik yeniden kristalleşen tanelerden oluştuğu tespit edilmiştir. TMEB’deki tanelerin karıştırıcı ucun dönme yönünde yönlendikleri belirlenmiştir. ITAB’daki tanelerde ise azda olsa irileşme görülmüştür.

2- Ana metal, ITAB, TMEB ve karıştırma bölgelerinin sertlik değerleri sırasıyla %2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli malzemede 120, 100, 124 ve 113 HV, %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli malzemede 121, 104, 125 ve 115 HV, %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli malzemede 123, 109, 122 ve 117 HV olarak ölçülmüştür. Beklenildiği gibi ITAB'da sertlikte bir düşüş, TMEB ise az da olsa bir artış meydana gelmiştir. ITAB'daki sertlik azalışının çökelti irileşmesinden, TMEB'deki sertlik artışının termo-mekanik etki nedeni ile artan dislokasyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

3- Kaynaklı numunelerin çekme mukavemet değerleri %2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli malzemede 158,67 MPa, %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli malzemede 185,01 MPa, %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli malzemede 200,84 MPa olarak ölçülmüştür. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye oranının artması ile MMK malzemelerin çekme mukavemetinde bir artış gözlemlenmiştir. Çekme mukavemetindeki bu artışın nedeninin, matris malzemesine gelen yükü, takviye malzemesine aktarabilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Suresh P, Marimuthu K, Ranganathan S. Determination of optimum parameters in turning of aluminium hybrid composites. *Int Rev Mech Eng* 2013;7:115–25.
- [2] Sahoo AK, Pradhan S. Modeling and optimization of Al/SiCp MMC machining using Taguchi approach. *Meas J Int Meas Confed* 2013;46:3064–72. doi:10.1016/j.measurement.2013.06.001.
- [3] Kumar S, Theerthan JA. Metal matrix composite production and characterisation of aluminium-fly ash composite using stir casting method. *Mater Eng* 2008:1–57.
- [4] Ibrahim IA, Mohamed FA, Lavernia EJ. Particulate reinforced metal matrix composites - a review. *J Mater Sci* 1991;26:1137–56. doi:10.1007/BF00544448.
- [5] Ünlü BS. Investigation of tribological and mechanical properties Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC reinforced Al composites manufactured by casting or P/M method. *Mater Des* 2008;29:2002–8. doi:10.1016/j.matdes.2008.04.014.
- [6] Sahin Y, Özdin K. A model for the abrasive wear behaviour of aluminium based composites. *Mater Des* 2008;29:728–33. doi:10.1016/j.matdes.2007.02.013.
- [7] Ozdin K. Production of metal matrix composites by the vortex method and investigation of the effect of changing casting temperature on particles ratio of product-composite. *Exp Tech* 2014;38:16–20. doi:10.1111/j.1747-1567.2012.00840.x.
- [8] Montgomery J.S, Chin E.S. (2004). *The AMPTIAC Quarterly*,8 (4), 16.
- [9] Pérez-Bergquist SJ, Gray GTR, Cerreta EK, Trujillo CP, Pérez-Bergquist A. The dynamic and quasi-static mechanical response of three aluminum armor alloys: 5059, 5083 and 7039. *Mater Sci Eng A* 2011;528:8733–41. doi:10.1016/j.msea.2011.08.046.
- [10] Trotten G.E., MacKenzie D.S. Al-Zn-Mg alloys, in: *Handbook of Aluminum*, Marcel Dekker Inc., NY (2003) 185-194.
- [11] Abdizadeh H, Baharvandi HR, Moghaddam KS. Comparing the effect of processing temperature on microstructure and mechanical behavior of (ZrSiO<sub>4</sub> or TiB<sub>2</sub>)/aluminum composites. *Mater Sci Eng A* 2008;498:53–8. doi:10.1016/j.msea.2008.07.009.
- [12] Hashim J, Looney L, Hashmi MSJ. Metal matrix composites: production by the stir casting method. *J Mater Process Technol* 1999;92–93:1–7. doi:10.1016/S0924-0136(99)00118-1.
- [13] Prabu SB, Karunamoorthy L, Kathiresan S, Mohan B. Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite. *J Mater Process Technol* 2006;171:268–73. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.06.071.
- [14] Mazahery A, Abdizadeh H, Baharvandi HR. Development of high-performance A356/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites. *Mater Sci Eng A* 2009;518:61–4. doi:10.1016/j.msea.2009.04.014.
- [15] Onat A, Akbulut H, Yilmaz F. Production and characterisation of silicon carbide particulate reinforced aluminium-copper alloy matrix composites by direct squeeze casting method. *J Alloys Compd* 2007;436:375–82. doi:10.1016/j.jallcom.2006.07.057.

- 
- [16] Lakshminarayanan AK, Ramachandran CS, Balasubramanian V. ScienceDirect Feasibility of surface-coated friction stir welding tools to join AISI 304 grade austenitic stainless steel. *Def Technol* 2014;10:360–70. doi:10.1016/j.dt.2014.07.003.
- [17] Zhang GF, Su W, Zhang J, Wei ZX, Zhang JX. Effects of shoulder on interfacial bonding during friction stir lap welding of aluminum thin sheets using tool without pin. *Trans Nonferrous Met Soc China (English Ed)* 2010;20:2223–8. doi:10.1016/S1003-6326(10)60632-2.
- [18] Lakshminarayanan AK, Malarvizhi S, Balasubramanian V. Developing friction stir welding window for AA2219 aluminium alloy. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2011;21:2339–47. doi:10.1016/S1003-6326(11)61018-2.