ISMSIT 2017
1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Proceedings
(November 2-4, 2017, Tokat, Turkey)
Symposium homepage: www.ismsitconf.org

Grafen Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Aşınma Davranışının İncelenmesi

Mahmut Can Şenel*, Mevlüt Gürbüz ve Erdem Koç

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye
**mahmutcan.senel@omu.edu.tr*

Özet **–** Alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler, sahip olduğu kolay şekillendirme, iyi ısı ve elektrik iletkenliği, düşük yoğunluk, yüksek dayanım ve tokluk gibi özelliklerinden dolayı otomotiv, uçak, uzay, taşıt, tarım ve yapı endüstrilerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kompozit yapılarda, grafen 2008 yılından itibaren takviye elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, toz metalürjisi metoduyla saf alüminyum ve ağırlıkça %0.1, %0.3, %0.5 oranında grafen nano tabaka (GNT) takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin Vickers sertliği, deneysel yoğunluğu ve aşınma davranışı incelenmiştir. En iyi yoğunluk ve sertlik değerine ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde ulaşılmıştır. Grafen katkısıyla birlikte kompozit-paslanmaz çelik arasındaki sürtünme katsayısının düştüğü belirlenmiş olup grafenin iyi bir katı yağlayıcı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler - Alüminyum, grafen, aşınma, toz metalürjisi, mikroyapı

Fabrication and Characterization of Ceramic Reinforced Aluminum Matrix Composites by Powder Metallurgy Method

Abstract **–** Aluminum based metal matrix composites are frequently used in automotive, aircraft, space, automotive, agricultural and building industries due to their easy shaping, good heat and electrical conductivity, low density, high strength and toughness. In these composite structures, graphene has begun to use as a reinforcement element since 2008. In this study, graphene reinforced aluminum composites with various graphene addition (0.1wt.%, 0.3wt.%, 0.5wt.%) were fabricated by powder metallurgy method. Vickers hardness, experimental density and wear behavior of fabricated composites were investigated. The best density and hardness value were obtained at 0.1wt.% graphene reinforcement. It was determined that the friction coefficient between the fabricated composites and stainless steel decreased with graphene addition. The results show that graphene is a good solid lubricant.

Key Words - Aluminum, graphene, wear, powder metallurgy, microstructure

I. GİRİŞ

Metal matrisli kompozitler (MMK), ana yapıyı metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak seramik veya organik bir malzemenin kullanıldığı kompozitlerdir. MMK malzemelerde Al, Ti, Mg, Cu, Fe, Co, Mo ve Ni gibi metaller ile bunların alaşımları matris (ana) malzeme olarak kullanılabilmektedir [1, 2]. Kompozit malzemelerin özeliklerinin geliştirilmesinde matris malzeme kadar takviye elemanı da etkilidir. Takviye elemanı, kompozit üzerine gelen yükün büyük bir bölümünü taşımakta olup metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan parçacık takviye elemanları Al_2O_3, SiC, B_4C, TiB_2, TiC, WC, W, C, MgO ve karbon esaslı (grafen, karbon nanotüp) malzemelerdir [3, 4].

Metal matris kompozitlerde matris malzeme olarak kullanılan alüminyum, demirden sonra dünyada en fazla tüketilen madendir. Bu madenin yoğun bir şekilde kullanılması, şekillendirilebilirliğinin yüksek olması, hafif olması, iyi bir ısı ve elektrik iletkeni olmasından kaynaklanmaktadır. Günümüzde alüminyum ve alaşımları, havacılık ve uzay sanayi, otomotiv sanayi ve inşaat sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Alüminyumun diğer metallere göre neredeyse %100 geri dönüşümünün sağlanabilmesi bu malzemeyi geleceğin metali olarak ön plana çıkartmaktadır. Birincil alüminyum üretimine harcanan enerjinin %5'i kadar bir enerji harcanarak alüminyumun geri dönüşümünün sağlanabilmesi alüminyumun çevre dostu bir malzeme olduğunu göstermektedir. Alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra yerkabuğunda en fazla bulunan üçüncü elementtir. Periyodik cetvelin IIIA gurubunda bulunan ve atom numarası 13, atom ağırlığı 26.98 g/mol olan "+3" değerlikli bir element olan alüminyumun 20°C'taki yoğunluğu 2.7 g/cm³, ergime noktası 660.2°C, ısı iletkenliği 237 W/(m°K) olup bu özellikler alaşım elementleri katılarak değiştirilebilmektedir [5-8].

Karbon esaslı takviye elemanlarından grafen ise, neredeyse bir atom kalınlığında, mekanik, elektrik, termal ve optik özellikleri yeni keşfedilmiş bir karbon allotropudur. Karbon elementinin bal peteği örgülü yapıları olan grafen, iki boyutlu sp^2 bağlı karbon atomlarının hegzagonal latiste bir araya

gelmesiyle oluşmuş tek tabakalı yapılardır. Bu iki boyutlu malzeme altı adet karbon halkalarının bir araya gelmesiyle oluşan nanokarbon tabakalarıdır. İdeal bir tek tabakalı grafenin tahmin edilen yüzey alanı 2600 m^2/gr, kalınlığı 1-2 nm, termal iletkenliği 4840-5300 W/(m°K), gerçek yoğunluğu 2.25 g/cm^3, elastisite modülü 1 TPa'dır [9-13].

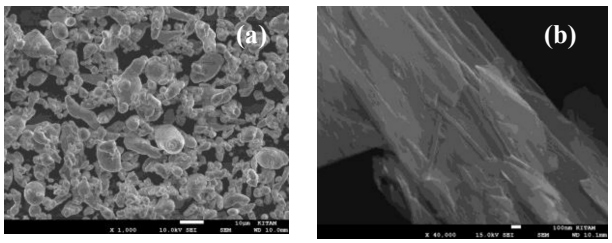
Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri ve aşınma davranışının belirlenmesine yönelik literatürde sınırlı çalışma bulunmaktadır. Wang vd. [14] yürüttüğü çalışmada, toz metalürjisi metoduyla grafen nano tabaka (GNT) katkılı alüminyum esaslı kompozitler üretmiştir. Saf alüminyuma, ağırlıkça %0.3 oranında grafen katkısıyla alüminyum kompozitin maksimum çekme dayanımı %62 oranında artmıştır. Li vd. [15] çalışmasında, nano yapılı Al/GNT kompozitlerin çekme dayanımını araştırmıştır. Ağırlıkça %1 oranına kadar yapılan GNT katkılarında çekme dayanımının arttığı, %1'in üzerindeki GNT takviyesinde ise GNT'nin topaklanması sebebiyle, Al/GNT kompozitin çekme dayanımının düştüğü belirlenmiştir. Aswin ve Varghese [16] çalışmasında, ağırlıkça %0.5, %1, %2, %5 grafen nanotabaka katkılı (GNT) alüminyum esaslı kompozitlerde GNT katkısının aşınma oranı ve sürtünme katsayısını azaltmadaki rolü incelenmiştir. En düşük sürtünme katsayısı (0.33), en düşük aşınma oranı (0.02 g) ve en yüksek sertliğin (62 HRB) Al-%0.5GNT kompozit yapıda oluştuğunu belirtmiştir. Tabandeh-Khorshid vd. [17] yürüttükleri çalışmada toz metalürjisi metoduyla üretilmiş saf alüminyum ve grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin Rockwell sertliği, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı incelenmiştir. Saf Al, Al-%0.1GNT, Al-%1GNT kompozitler toz metalürjisi metoduyla üretilmiş olup grafen katkısıyla sertliğin 111 HV'den 97 HV'ye düşmüştür. Aşınma testlerinde, uygulanan yükün artmasıyla sürtünme katsayısı düşmüş ve aşınma oranı artmıştır.

Bu çalışmada, toz metalürjisi metoduyla saf alüminyum ve ağırlıkça %0.1, %0.3, %0.5 oranında grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin Vickers sertliği, deneysel yoğunluğu ve aşınma davranışı incelenmiş olup karakterizasyon çalışmaları için taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD) cihazı ve lazer partikül boyut ölçüm cihazından faydalanılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

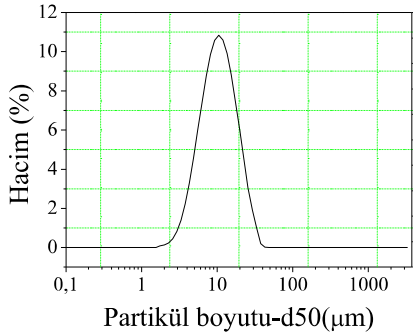
A. Materyal

Bu çalışmada, toz metalürjisi metoduyla grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerde matris malzeme olarak saf alüminyum tozu, takviye elemanı olarak grafen nanotabaka (GNT) tozu kullanılmıştır. Alüminyum ve GNT tozlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Alüminyum tozların x1000 büyütmeli görüntüsünden toz partiküllerinin 100 µm'nin altında bir boyutta ve küresel bir yapıda olduğu gözlenmiştir. GNT tozlarının x40000 büyütmeli görüntüsünden ise partiküllerin tabakalı ve plakamsı bir yapıda olduğu görülebilmektedir.



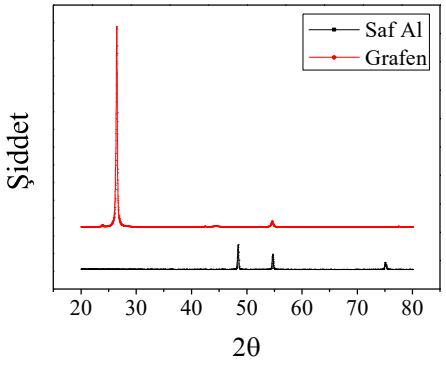
Şekil 1. Alüminyum (a) ve GNT (b) tozlarının SEM görüntüleri

Kompozit yapıda matris malzeme olarak kullanılan alüminyum tozlarının tane boyut dağılımı, Mastersizer 3000 lazer partikül tane boyut ölçüm cihazıyla ölçülmüştür (Şekil 2). Ölçüm sonuçlarına göre; alüminyum tozunun ortalama tane boyutunun 10 µm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2. Alüminyum partiküllerin tane boyut dağılımı

Kompozit malzemede matris malzeme ve takviye elemanı olarak kullanılan tozların ve üretilen kompozit malzemelerin faz analizi için model X-ışını kırınımı cihazı kullanılmıştır. Saf alüminyum ve grafen tozlarına ait XRD örgü desenleri Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Alüminyum ve GNT tozların XRD örgü desenleri

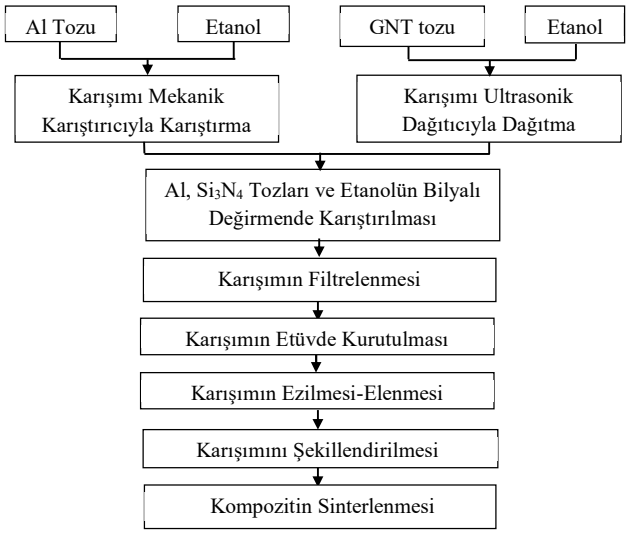
B. Materyal

Bu çalışmada, toz metalürjisi metoduyla Al-GNT kompozitler üretilmiş olup üretim aşamaları; ultrasonik dağıtma, mekanik karıştırma, bilyalı değirmende öğütme, filtreleme, kurutma, eleme, şekillendirme ve sinterleme şeklinde sıralanabilir (Şekil 4). Öncelikle alüminyum tozları, mekanik karıştırıcıyla etanol içerisinde karıştırılmıştır. Aynı anda farklı bir ortamda etanol içerisinde GNT tozları ultrasonik karıştırıcıyla ultrasonik dağıtma işlemi uygulanmıştır. Bu iki etanol çözeltisi birleştirilerek homojen bir karışım elde etmek amacıyla bilyalı değirmende öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Bilyalı değerimendeki öğütme işleminde, bilyalar merkezkaç kuvveti etkisiyle yapı içerisindeki alüminyum ve GNT topakların kırılmasını sağlamaktadır. Öğütme işlemi sonrası karışım içerisindeki etanolü uzaklaştırmak için filtreleme işlemi uygulanmıştır.

Filtrelenen toz partikülleri içerisindeki nemi uzaklaştırmak için karışım vakuma alınabilen bir etüvde kurutulmuştur. Kurutma sonrası oluşabilecek topaklanmaları önlemek amacıyla agat havanda ezme ve elekte eleme işlemi uygulanmıştır. Şekillendirme işlemi için toz karışımı, 13 mm çaplı paslanmaz çelik kalıp içerisine yerleştirilerek 600 MPa basınçta şekillendirilmiştir. Sinterleme işlemi, tek bir sıcaklık ve sürede (T_S=630 C ve t_S=180 dk) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sinterleme sonrası zımparalama-parlatma cihazı kullanılarak kaba ve ince zımparalama işlemi uygulanmıştır. Yüzey parlatma işlemi içinse elmas solüsyon ve elmas çuhadan faydalanılmıştır.

Sinterlenmiş numunelerin yüzeyindeki oksit tabakayı uzaklaştırmak amacıyla numunelere zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmaktadır. Kompozit malzemelerin yoğunluk ölçümü Arşimet terazisiyle, mikro Vickers sertlik ölçümleri ise HV-1000 Vickers sertlik ölçüm cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü için üretilen kompozitlere 1.961 N (0.2 kgf)'luk yük 15 s. süresince uygulanmış ve numune yüzeyinde oluşan iz çapları ölçülerek sertlik değeri belirlenmiştir.

Karakterizasyon çalışmaları için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) cihazından faydalanılmıştır. Kırık yüzey görüntüleri için Ondokuz Mayıs Üniversitesi Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi'nde bulunan Jeol marka JSM 7001F model taramalı elektron mikroskobu, XRD faz analizi içinse aynı merkezde yer alan Rikagu SmartLab model X-ışını kırınımı cihazından faydalanılmıştır.



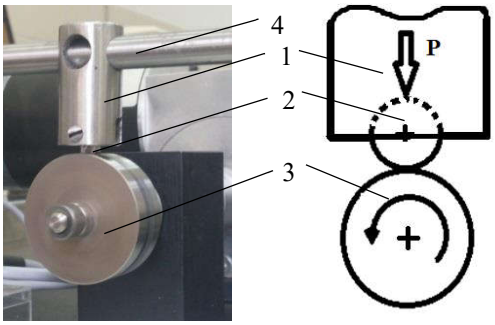
Şekil 4. Al-GNT kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretim aşamaları

Aşınma testleri, Makina Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Laboratuvarında yer alan GUNT TM260 Aşınma Deney Düzeneği'nde gerçekleştirilmiştir. Aşınma deney düzeneğinde Şekil 5'de verilmiş olup sistem genel olarak; kontrol ünitesi (1), yükleme tertibatı (2), veri kaydedicisi (3) ve bilgisayar yazılımından (4) oluşmaktadır.



Şekil 5. Aşınma deney düzeneği, veri kaydedicisi ve bilgisayar yazılımı

Aşınma deney düzeneğinde yük 0-40 N arasında değiştirilmiş olup n=200 dev/dk dönüş hızında, 20 dk süresince dört farklı malzemeler (saf alüminyum, Al-%0.1GNT, Al-%0.3GNT, Al-%0.5GNT) için kuru şartlarda aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deney düzeneğinde, teste başlamadan önce numune (2), hareket etmeyecek şekilde numune tutucuya (1) vidalı bağlantıyla sıkıştırılır. Numune tutucu (1) ise aşındırıcı diski (3) ortalayacak şekilde yükleme koluna (4) üst taraftan bir vidayla sabitlenir. Böylece aşınma testi öncesi numune test için hazırlanmış olur (Şekil 6).



Şekil 6. Aşınma testi deney düzeneğinde yükleme durumu

Aşınma testinde her bir numune için saniyede bir olmak üzere 1200 sürtünme kuvveti verisi alınarak eğriler oluşturulmuştur. Elde edilen sürtünme kuvveti (F_S) verileri Eşitlik (1)'deki gibi numuneye etkiyen toplam yüke (P=10, 20, 30, 40 N) bölünerek sürtünme katsayısı (μ) değerlerine ulaşılmıştır.

$$\mu = F_s/P \quad (1)$$

Malzemelerde aşınma testleri gerçekleştirilirken aşınma miktarlarını karşılaştırmak amacıyla bazı parametreler hesaplanmaktadır. Bu parametrelerden biri de kütle kaybıdır. Kütle kaybı (Δm) ile gösterilmiş olup malzemenin aşınmadan önceki ağırlığından (m_i) aşınmadan sonraki ağırlığı (m_s) çıkarılarak elde edilmektedir (Eşitlik 2).

$$\Delta m = m_i - m_s \quad (2)$$

Aşınma testlerinde diğer önemli parametre de kayma mesafesidir. L kayma mesafesi; aşındırıcı diskin yarıçapı (r), diskin dönüş hızı (n) ve aşınma test süresi (t) dikkate alınarak Eşitlik (3)'deki gibi hesaplanmaktadır.

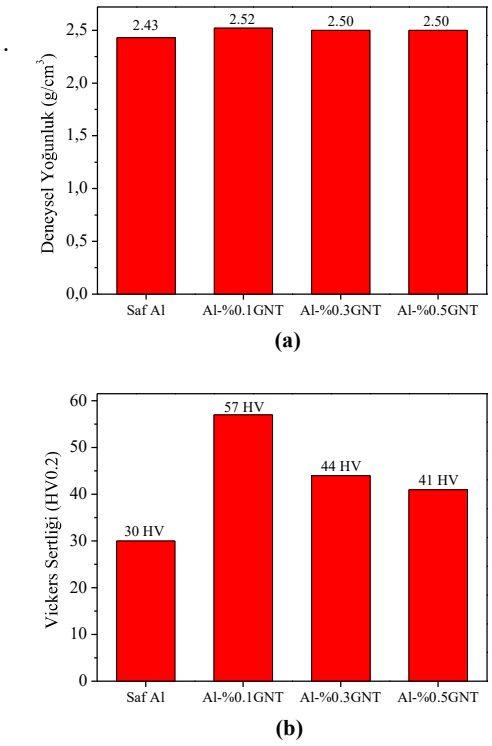
$$L = 2\pi r \times n \times t \quad (3)$$

Burada r aşındırıcı diskin yarıçapı (r) 20 mm, diskin dönüş hızı (n) 200 d/dk, aşınma test süresi (t) 20 dk olarak alındığında kayma mesafesi yaklaşık 0.5 km olmaktadır.

III. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

A. Yoğunluk ve Sertlik Ölçümü

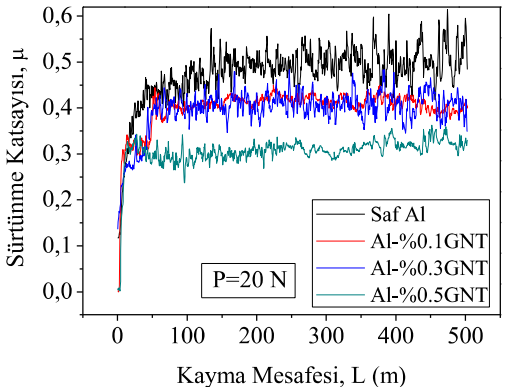
Toz metalürjisi metoduyla üretilen saf alüminyum ve Al-%0.1GNT, Al-%0.3GNT, Al-%0.5GNT kompozitlerin deneysel yoğunluk ve Vickers sertlik değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Yoğunluk ve sertlik verileri incelendiğinde; en iyi sertlik ve yoğunluk değerine sahip kompozisyonun Al-%0.1GNT olduğu görülmüştür. Matris yapı içerisine ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinden sonra grafenin topaklanma eğilimine girdiği ve bu sebeple de sertlik ve yoğunluğun düştüğü öngörülmektedir.



Şekil 7. Saf alüminyum ve Al-GNT kompozitlerin deneysel yoğunluk (a) ve Vickers sertlikleri (b)

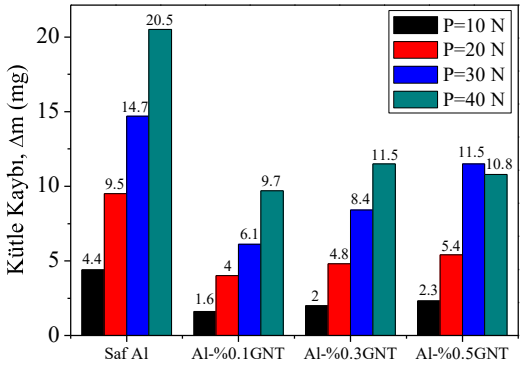
B. Aşınma Test Sonuçları

Saf Al, Al-%0.1GNT, Al-%0.3GNT, Al-%0.5GNT kompozit malzemeler ile paslanmaz çelik disk arasındaki kuru sürtünme katsayısı yürütülen aşınma testleriyle belirlenmiştir. Yürütülen testler neticesinde her bir saniyede bir veri olmak üzere 1200 sürtünme katsayısı verisi elde edilmiştir. Sürtünme verilerine karşılık kayma mesafesi (L) Eşitlik (3) kullanılarak yaklaşık 500 m (0.5 km) olarak hesaplanmıştır. P=20 N yük altında saf alüminyum-paslanmaz çelik arasındaki ortalama sürtünme katsayısı 0.53 iken; Al-%0.5GNT kompozit-paslanmaz çelik arasındaki ortalama sürtünme katsayısı 0.32'ye düşmüştür. Alüminyum matrise grafen katkısı yapıldığında sürtünme katsayısının düştüğü belirlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Saf Al ve Al-GNT kompozit yapılarda sürtünme katsayısı değişimi

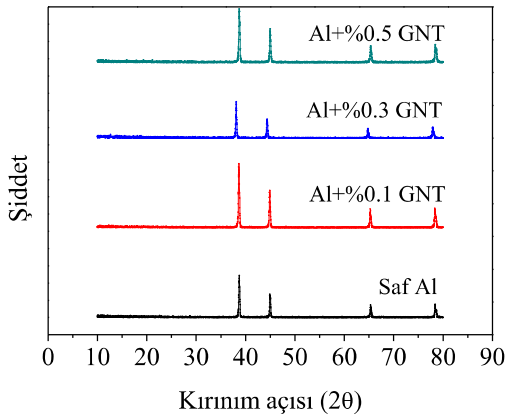
Kuru şartlarda gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda Saf Al ve Al-GNT kompozit yapılardaki yük-kütle kaybı değişimleri Şekil 9'da verilmiştir. Aşınma testlerinde, yükün artmasıyla kütle kaybının (Δm) arttığı belirlenmiştir. En fazla kütle kaybı (20.5 mg) saf alüminyum malzemede ve 40 N yük altında gerçekleşmiştir. Aynı yük altında alüminyum matrise grafen katkısıyla birlikte kütle kaybı azalmış olup en az kütle kaybı (1.6 mg) 10 N yük altında ve Al-%0.1GNT kompozit yapıda görülmüştür.



Şekil 9. Kuru şartlarda saf Al ve Al-GNT kompozit yapılarda yük-kütle kaybı değişimi

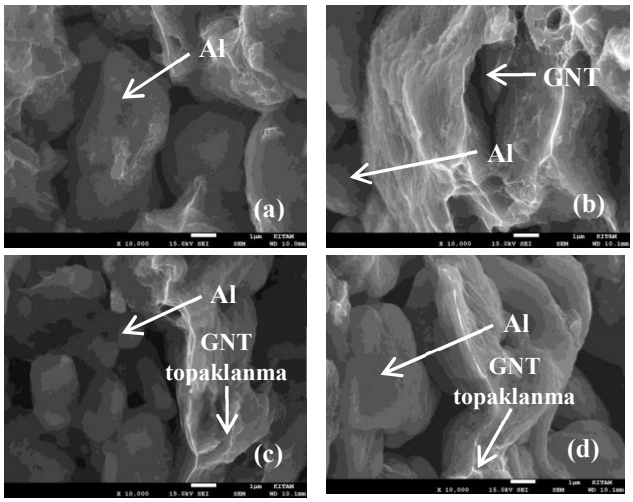
C. Karakterizasyon Çalışmaları

Üretilen kompozitlerde alüminyumun dışında Al_4C_3 gibi bir arafaz oluşup oluşmadığını belirlemek amacıyla saf alümnyum ve Al-GNT kompozit yapılarına ait XRD örgü desenleri elde edilmiştir (Şekil 10). XRD örgü desenine bakıldığında üretilen yapının tamamen alüminyum piklerine ait olduğu grafen kullanımı sebebiyle Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil fazların oluşmadığı görülmektedir. Burada grafenin oldukça düşük miktarlarda kullanılması ve cihazın düşük deteksiyon limitinden dolayı grafen piki görülmemektedir.



Şekil 10. Saf alüminyum ve Al-GNT kompozitlere ait XRD örgü deseni (T_S=630 °C ve t_S=180 dk)

Üretilen saf alüminyum ve Al-GNT kompozitlerin SEM analizinden mikro yapının oldukça yoğun olduğu görülmektedir (Şekil 11). Kırık yüzey iç yapı görüntüleri incelendiğinde, Al tanelerinin boyun vererek iyi bir şekilde sinterlendiği belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan plaka şeklindeki grafenin tane sınırlarında homojen olarak yer bulduğu görülmektedir. Vickers sertlik ölçümlerinde, en yüksek sertlik değerine ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde ulaşılmıştır. Ağırlıkça %0.1'den fazla grafen takviyesi ise grafen partiküllerin topaklanmasına sebep olmuş ve kompozitin sertliğini düşürmüştür.



Şekil 11. Saf alüminyum (a) ile %0.1 (b), %0.3 (c), %0.5 grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin kırık yüzey iç yapı görüntüleri

IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, toz metalürjisi metoduyla saf alüminyum, %0.1, %0.3, %0.5 grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üretilerek kompozitlerin mekanik özellikleri ve aşınma davranışı incelenmiştir. Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Kompozit yapılar içerisinde en iyi yoğunluk (2.52 g/cm^3) ve sertlik değerine (57 HV) ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde ulaşılmıştır. Ağırlıkça %0.1'in üzerindeki grafen takviyesinde ise Al-GNT kompozitlerin sertliğinin düştüğü belirlenmiştir. Üretilen kompozitlerin XRD örgü desenleri incelendiğinde, yapı içerisinde Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil fazların oluşmadığı tespit edilmiştir.

Aşınma testleri neticesinde; saf alüminyum-paslanmaz çelik disk arasındaki sürtünme katsayısı 0.53 iken; Al-%0.5GNT ile paslanmaz çelik disk arasındaki sürtünme katsayısı 0.32 olmaktadır. Bu durum, kompozit yapıda takviye elemanı olarak kullanılan grafenin iyi bir katı yağlayıcı olduğunu göstermektedir.

Aşınma testleri sonucunda uygulanan yükün artmasıyla birlikte kütle kaybının arttığı belirlenmiştir. Aynı yük altında en fazla kütle kaybı saf alüminyum malzemede gerçekleşirken; en az kütle kaybı Al-%0.1GNT kompozit yapıda gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %0.1'den fazla grafen katkısında ise kütle kaybın arttığı ve Vickers sertliğinin düştüğü belirlenmiştir. Bu durumun, grafenin topaklanma eğilimine girmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi PYO.MUH.1902.15.001 numaralı proje ile desteklenmiş olup katkılarından dolayı Ondokuz Mayıs Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

REFERENCES

[1] M.C. Şenel, M. Gürbüz, E. Koç, "Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler," *Mühendis ve Makina Dergisi*, cilt.56, sayı.669, s.36-47, Ekim 2015.

[2] M. Pul, "Al matrisli MgO takviyeli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi," Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.

[3] Y. Şahin, Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayınevi, 2. Baskı, Ankara, 2006.

[4] M. Erdoğan, "Çelik takviyeli alüminyum kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin deneysel incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2005.

[5] S. C. Tjong, "Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets," *Materials Science and Engineering*, vol.74, no.10, p.281–350. 2013.

[6] A. K. Geim, K. S. Novoselov, "The rise of graphene", *Nature Materials*, vol.6, p.183–191, 2007.

[7] (2013), TOBB web site. [Online]. Available: https://www.tobb.org.tr/Documents/yayinlar/2014/Demir%20ve%20Demir%20D%C4%B1%C5%9F%C4%B1%20Rapor%20web.pdf.

[8] (2015), Alcoa website. [Online]. Available: http://www.alcoa.com/sustainability/en/info_page/products_design_lifecycle.asp.

[9] E. P. Randviir, D. A. C. Brownson, C. E. Banks, "A decade of graphene research: production, applications and outlook," Materials Today, vol.17, no.9, pp.426-432, 2014.

[10] N. Savage, "Materials science:super carbon", Nature, vol. 482, pp.30-31, 2012.

[11] V. Singh, D. Joung, L. Zhai, S. Das, S. I. Khondaker, "Graphene based materials: past, present and future," *Progress in Materials Science*, vol. 56, no. 8, pp. 1178–1271, 2012.

[12] J. Adams, D. Pendlebury, Global Research Report Materials Science and Technology, *Thomsons Reuters*, 2011.

[13] H.G.P. Kumar, M. A. Xavior, "Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review", *Procedia Engineering*, vol. 97, pp.1033-1040, 2014.

[14] J. Wang, Z. Li, G. Fan, H. Pan, Z. Chen, D. Zhang, "Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites," *Scripta Materialia*, vol. 66, pp. 594–597, 2012.

[15] J. L. Li, Y. C. Xiong, X. D. Wang, S. J. Yan, C. Yang, W.W. He, J.Z. Chen, S. Q. Wang, "Microstructure and tensile properties of bulk nanostructured aluminum/graphene composites prepared via cryomilling," *Materials Science&Engineering A*, vol. 626, pp. 400-405, 2015.

[16] S. Aswin, S. Varghese, "Tribology study of graphene-aluminum nanocomposites," *Proceedings of 10th IRF International Conference*, 2014, p. 11-15.

[17] M. Tabandeh-Khorshid, E. Omrani, P. L. Menezes, P. K. Rohatgi, "Tribological performance of self-lubricating aluminum matrix nanocomposites: role of graphene nanoplatelets," *Engineering Science and Technology an International Journal*, vol.19, pp. 463-469, 2016.