



Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu

The fabrication and characterization of graphene reinforced aluminum composites

Mahmut Can ŞENEL^{1*}, Mevlüt GÜRBÜZ¹, Erdem KOÇ¹

¹Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye.
mahmutcan.senel@omu.edu.tr, mgurbuz@omu.edu.tr, erdemkoc@omu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 03.11.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 15.05.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.65902

Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler (AL-MMK); kompozit yapıda yüksek mukavemet, iyileştirilmiş rijitlik, daha düşük yoğunluk, iyileştirilmiş ısıl ve elektriksel özellikler elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. AL-MMK'larda SiC, Al₂O₃, WC, TiC'ün yanında son yıllarda grafen nano tabaka da takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, toz metalürjisi metoduyla saf alüminyum ve ağırlıkça %0.1, %0.3, %0.5 oranında grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin kristal yapı analizi için X-ışını kırınım cihazı (XRD), yüzey ve içyapı karakterizasyonu içinse taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bu çalışmayla, grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde, grafen katkı oranı, sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklığının kompozitlerin yoğunluğuna ve mikro Vickers sertliğine olan etkisi incelenmiştir. En iyi mikro Vickers sertlik değerine ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde, 180 dk sinterleme süresinde ve 630 °C'lik sinterleme sıcaklığında ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, Grafen, Toz metalürjisi, Karakterizasyon

Abstract

Aluminum based metal matrix composites (AL-MMC) can be used in order to obtain the high strength, good stiffness, low density, good thermal and electrical properties. In recent years, graphene nanoplates (GNPs) have been used as reinforcement element as well as SiC, Al₂O₃, WC, TiC in AL-MMC. In this study, pure aluminum and graphene reinforced aluminum composites (0.1wt.%, 0.3wt.%, 0.5wt.% GNPs) were fabricated with powder metallurgy method. The crystal structure and microstructure of fabricated composites were analyzed with X-Ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). With this study, the effects of GNPs content, sintering time and sintering temperature were investigated on density and micro Vickers hardness of composites. The maximum micro Vickers hardness was obtained at 0.1wt.% GNPs addition, t_s=180 min. sintering time and T_s=630 °C sintering temperature.

Keywords: Aluminum, Graphene, Powder metallurgy, Characterization

1 Giriş

Endüstriyel gelişmeyle beraber kompozit malzeme özelliklerinin geliştirilmesine yönelik yapılan araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri 1900'lü yılların ikinci yarısından itibaren başlamış ve artarak devam etmiştir. Özellikle savunma sanayi, havacılık ve otomotiv sektörlerinde hafif ve dayanıklı malzeme üretimine yönelik gereksinim, bu araştırmalar için itici bir güç oluşturmaktadır [1].

Günümüzde metal, seramik ve polimer esaslı malzemeler, matris malzeme olarak kullanılabilir. Metal matrisli kompozitler (MMK), genellikle makro ölçekli partikül formundaki malzemelerin karışımıyla elde edilmektedir. MMK malzemelerin üretiminde takviye elemanı olarak silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si₃N₄), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve zirkonya (ZrO₂) gibi karbon, nitrür ve oksit formundaki seramikler kullanılmaktadır. MMK üretiminde genellikle alüminyum (Al), magnezyum (Mg) gibi hafif metaller matris elemanı olarak tercih edilmektedir. Bunların yanında titanyum (Ti), bakır (Cu), çinko (Zn) gibi malzemeler de matris elemanı olarak kullanılabilir [2].

Alüminyum ve alaşımları sahip olduğu şekillendirilebilme, işlenebilirlik, geri dönüşümünün kolay olması, iyi ısı ve elektrik iletkenliği, düşük yoğunluk, mükemmel dayanım, yüksek tokluk ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı birçok mühendislik uygulamalarında yaygın olarak

kullanılmaktadır [3]-[5]. Grafen, ilk 2004 yılında sentezlenmiş bir malzeme olup 2010 yılından itibaren kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Grafen, yaklaşık bir atom kalınlığında ve üstün özelliklere (mekanik, termal ve optik) sahip bir karbon allotropudur. Bu malzeme, altıgen hücrelerden oluşmakta olup grafit yapısının tek katmanıdır [6]-[8].

Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine literatürde birtakım çalışmalar mevcuttur. Bastwros ve diğ. çalışmalarında alüminyum alaşımını (Al6061) ve %1 grafen katkılı alüminyum tozlarını farklı öğütme sürelerinde (10, 30, 60 ve 90 dk) öğütmüştür. Al6061 alaşımı ile ağırlıkça %1 grafen katkılı Al6061 kompozit karşılaştırıldığında 60 dk ve 90 dk öğütme sürelerinde sırasıyla %47 ve %34 oranında mukavemet artışı gerçekleşmiştir [9]. Rashad ve diğ. çalışmalarında, grafen takviye miktarının grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitin çekme, basma dayanımı ve sertliği üzerine olan etkisini araştırmıştır. Saf alüminyum ve ağırlıkça %0.3 grafen nanotabaka (GNT) katkılı alüminyum esaslı kompozit karşılaştırıldığında %2 ofset kuralına göre akma dayanımında %14.7, maksimum çekme dayanımında %11.1 artış tespit etmiştir [10]. Wang ve diğ. yürüttükleri çalışmada, grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitler toz metalürjisi metoduyla üretmişlerdir. Yaptıkları çalışma neticesinde; %0.3 GNT eklenmesi %5'lik ofset kuralına göre

çekme dayanımını 154 MPa'dan 249 MPa'a (%62'lik artış) çıkarmış ve %13 uniform uzama elde etmiştir [11]. Yan ve diğ. çalışmalarında ağırlıkça sırasıyla %0, %0.15, %0.5 grafen takviyeli alüminyum esaslı nanokompozitler üretmiş olup grafen takviyesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği sonucuna ulaşmıştır. Ağırlıkça %0.15 grafen katkılı GNT/Al kompozitin akma dayanımı 262 MPa iken; %0.5 grafen katkılı GNT/Al kompozitin akma dayanımı 319 MPa'a yükselmiştir. Ağırlıkça %0.5 grafen katkısı, akma dayanımını yaklaşık %50 oranında artırmıştır [12].

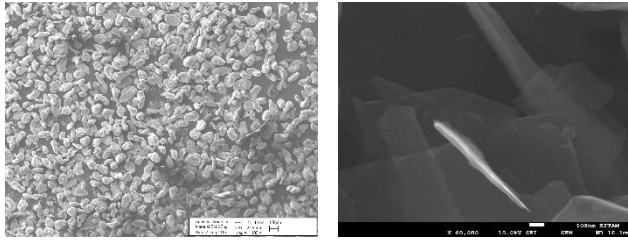
Bu çalışmada, grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde grafen katkı oranı, sinterleme işlemi, sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklığının kompozitin yoğunluğuna ve mikro Vickers sertliğine olan etkisi incelenmiştir. Üretilen kompozitlerde en iyi sertlik değerine ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde, 630 °C'lik sinterleme sıcaklığında ve 180 dk'lık sinterleme süresinde ulaşılmıştır. Bu durum, X-ışını kırınımı (XRD) örgü deseni, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-Ray (EDX) görüntüleriyle de ortaya konulmuştur.

2 Malzeme ve metod

2.1 Malzeme

Bu çalışmada, matris malzeme olarak saf alüminyum (Al), takviye elemanı olarak grafen nano tabaka (GNT) kullanılmıştır. Saf alüminyum, oda sıcaklığında YMK yapıda olup alüminyumun ergime sıcaklığı 660.37 °C, yoğunluğu 2.6989 g/cm³, elastisite modülü 68.3 GPa, sertliği yaklaşık HB21, çekme dayanımı yaklaşık 80 MPa'dır [4]. Grafen nano tabaka (GNT), birkaç tabakalı, sp² bağ ve hegzagonal kristal yapıda olup yoğunluğu 2.25 g/cm³, ısı iletkenliği yaklaşık 5000 W/m²K ve elastisite modülü 1 TPa'dır [13].

Toz metalürjisi metoduyla üretilen Al-GNT kompozitlerde matris malzeme olarak atomizasyon yöntemiyle üretilmiş saf alüminyum (Al) tozu kullanılmıştır. Alfa Aesar firmasından temin edilen küresel yapıdaki saf Al tozu, %99 saflıkta ve 8-15 µm boyut aralığındadır. Takviye elemanı olarak kullanılan grafen nano tabaka (GNT) ise Grafen Chemical Industries firmasından temin edilmiştir. GNT; plakamsı yapıda, %99 saflıkta, 5-8 nm kalınlıkta, 5 µm çapında olup 120-150 m²/g yüzey alanına sahiptir. Alüminyum ve GNT tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir.



(a)

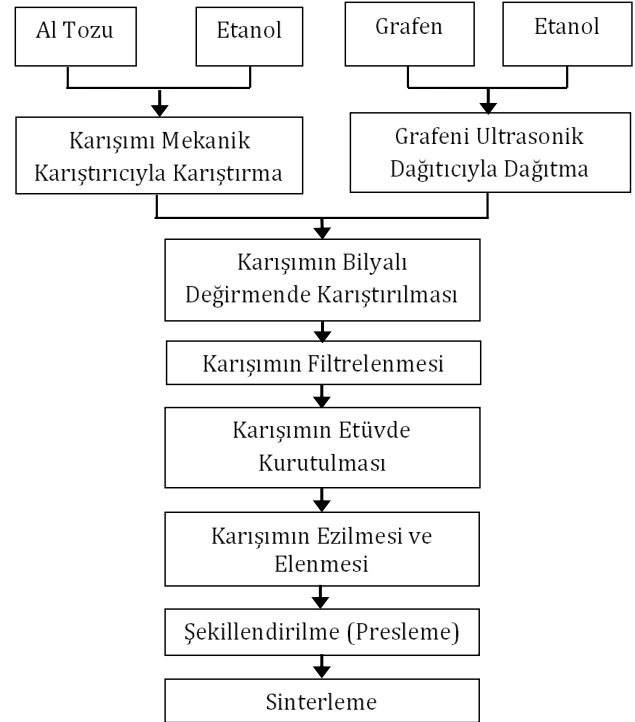
(b)

Şekil 1: Alüminyum tozu ve grafen tozunun taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (Al: x250, GNT: x60000 büyütme).

2.2 Yöntem

Grafen takviyeli alüminyum kompozit üretim aşamaları; ultrasonik dağıtma, mekanik karıştırma, öğütme, filtreleme, kurutma, eleme, şekillendirme ve sinterleme şeklinde sıralanabilir. Takviye elemanı olarak kullanılan grafen, ultrasonik dağıtıcıyla dağıtılır ve tabakalarına ayrıştırılır. Bu

sırada matris malzeme olan alüminyum tozu ise etanol içerisinde mekanik olarak karıştırılır. Sonrasında grafen-etanol karışımı alüminyum-etanol karışımına azar azar eklenerek karışım mekanik olarak karıştırılır. Mekanik olarak karıştırılan karışım, bir öğütme haznesi içerisine aktarılır. Öğütme haznesi içerisine alüminyum karışımının yanı sıra toz partiküllerinin kırılması amacıyla öğütücü zirkon bilya eklenir. Daha sonra öğütme haznesi, bilyeli değirmenin öğütme haznesi içerisine yerleştirilir ve toz karışımı, bilyeli değirmende öğütme işlemine tabi tutulur. İşlemin bu aşamasında, hem toz topaklarının açılması hem de homojen bir karışım elde edilmesi amaçlanmaktadır. Karışımın etanolü uzaklaştırmak amacıyla karışım filtrelenir. Filtreleme sonrası, karışım vakuma alınabilen etüv fırınında 50 °C'de kurutulur. Kurutulmuş Al-GNT toz karışımı, φ130x30 mm boyutlarındaki bir kalıp içerisinde, 600 MPa basınç altında tek eksenli preste disk şeklinde şekillendirilir. Şekillendirilen ham numuneler, belirli sinterleme sıcaklıkları (550, 600, 630 °C) ve sinterleme sürelerinde (20, 60, 90, 120, 180, 300 dk.) vakuma alınabilen bir tüp fırın içerisinde sinterlenir (Şekil 2).



Şekil 2: Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozit üretimi akış diyagramı.

Bu çalışmada, toz metalürjisi metoduyla grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üretilmiştir. Alüminyum matrisine, ağırlıkça %0.1, %0.3 ve %0.5 oranında grafen katkısı yapılmıştır. Burada iki farklı sinterleme işleminin kompozitin mikro Vickers sertliği üzerine olan etkisi incelenmiştir. İlk sinterleme işleminde, fırın içerisinde sinterleme sıcaklığına (630 °C) çıkıldıktan sonra, numuneler fırına direkt tepe sıcaklığında yerleştirilmiştir. Numuneler fırında 180 dk. bekledikten sonra, fırından çıkarılarak hızlı bir şekilde oda sıcaklığına soğutulmuştur. İkinci sinterleme işleminde ise, 10 °C/dk. ile sinterleme sıcaklığına (630 °C) çıkılmış ve bu sıcaklıkta 180 dk. beklenerek 10 °C/dk. ile oda sıcaklığına soğutulmuştur. En yüksek sertlik değerinin elde edildiği sinterleme işlemi en uygun sinterleme işlemi olarak

değerlendirilmiştir. Bu sinterleme işlemi uygulanarak da maksimum sertlik değerini veren en uygun sinterleme sıcaklığı (T_s) ve sinterleme süresi (t_s) belirlenmiştir.

Sinterleme çalışmaları Protherm PTF 12/50/450 tüp fırında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzeyindeki oksit tabakasını uzaklaştırmak ve tane yapısını gözlemleyebilmek amacıyla numunelere Metkon Forcipol-2V cihazıyla zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunlukları PCE-LS serisi yoğunluk ölçüm cihazıyla belirlenmiştir. Sertlik ölçümü ise HV1000B mikro Vickers sertlik ölçme cihazıyla 200 gf yük altında ve 10 s. süresince gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon çalışmaları, Jeol marka JSM 7001F model taramalı elektron mikroskobu ve Rigaku marka Rint-2200 model X-ışını kırınımı cihazından faydalanılarak yürütülmüştür.

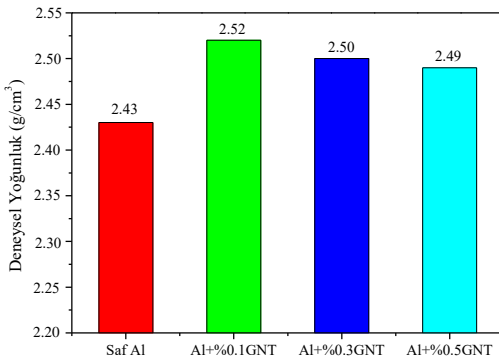
3 Araştırma sonuçları

3.1 Yoğunluk ölçümü sonuçları

Üretilen grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin deneysel yoğunluğu (ρ_D), Arşimet prensibine dayanarak Eşitlik (1)'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\rho_D = [m_K / (m_D - m_A)] \rho_{su} \quad (1)$$

Burada, m_K kompozitlerin kuru kütlesi (mg), m_D sıvı içerisindeki suya doymuş kütlesi (mg) ve m_A su içerisinde ölçülen asılı kütlesidir (mg). Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde, grafen katkı oranıyla %0.1 grafen katkısına kadar deneysel yoğunluğun (ρ_D) arttığı buna karşılık porozitenin ise azaldığı tespit edilmiştir. Sinterlemenin etkisiyle ise daha yoğun bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir. Grafen nano tabaka (GNT) takviyeli alüminyum kompozit yapılarında, $t_s=180$ dk sinterleme süresi ve $T_s=630$ °C sinterleme sıcaklığında farklı grafen katkı oranları (ağırlıkça %0.1, %0.3, %0.5) için yoğunluğun değişimi Şekil 3'te verilmiştir. En yüksek yoğunluk değerine 630 °C sinterleme sıcaklığında ve ağırlıkça %0.1 grafen katkisinde ulaşılmış olup bu yoğunluk değeri 2.52 g/cm³'tür. En düşük yoğunluk değerine (2.43 g/cm³) ise saf alüminyum yapıda ulaşılmıştır.



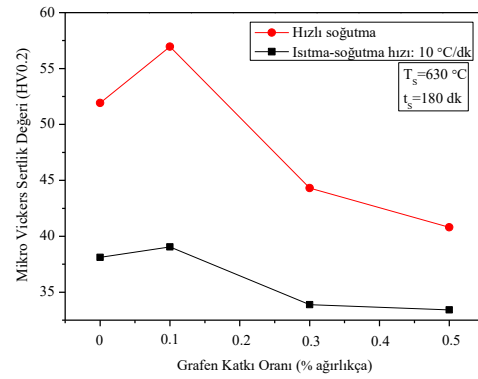
Şekil 3: Saf Al ve grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde yoğunluk değişimi.

3.2 Sertlik ölçümü sonuçları

Toz metalürjisi yoluyla üretilmiş grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozit yapılarında maksimum sertlik değerini veren en uygun sinterleme işleminin, sinterleme sıcaklığının ve sinterleme süresinin belirlenmesi son derece

önemlidir. Bu sebeple, literatürdeki çalışmalarla [9]-[11] uyumlu olarak seçilen 630 °C'lik sinterleme sıcaklığı (T_s) ve 180 dk'lık sinterleme süresi (t_s) için iki farklı sinterleme işlemi uygulanarak ortalama mikro Vickers sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Ortalama mikro Vickers sertlik değerini tespit etmek amacıyla beş sertlik verisinin ortalaması alınmıştır.

İlk sinterleme işleminde (hızlı soğutmayla sinterleme işlemi) tüm grafen katkı oranlarında (%0.1, %0.3, %0.5) diğer sinterleme işlemine göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 4). Hızlı soğutmayla sinterlenen ağırlıkça %0.1 grafen takviyeli alüminyum kompozitlerde ortalama mikro Vickers sertlik değeri 57 HV iken; aynı katkı oranı için 630 °C sıcaklıkta 10 °C/dk. ısıtma-soğutma hızıyla sinterlenen alüminyum esaslı kompozitlerde ortalama mikro Vickers sertlik değeri 39 HV'dir. Bu durum, yüksek mukavemetli kompozit üretiminde, ilk sinterleme işleminin (hızlı soğutma işlemiyle sinterleme) daha etkili bir sinterleme yöntemi olduğunu göstermektedir. Bu sebeple, maksimum sertlik değerini veren en uygun sinterleme sıcaklığının ve sinterleme süresinin belirlenmesinde ilk sinterleme işlemi (hızlı soğutma işlemiyle sinterleme) tercih edilmiştir.



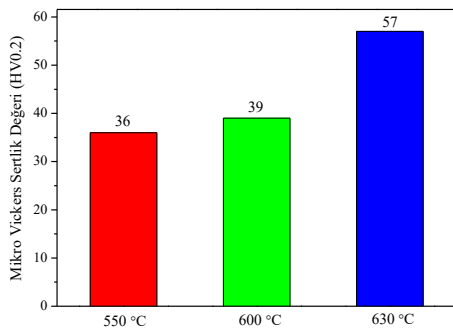
Şekil 4: Sinterleme prosesinin mikro Vickers sertliğine etkisi.

Sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklığı, tane büyümesi üzerine etkilidir. Hızlı soğutma prosesinde soğuma için geçen süre çok düşük olduğundan tane büyümesinin önüne geçilerek sertlik artışı sağlanmaktadır. Diğer taraftan yavaş soğuma esnasında süre artacağından bir miktar tane büyüyecektir. Bu da tane sınırı sayısının azalmasına ve dolaylı olarak da sertliğin düşmesine neden olacaktır.

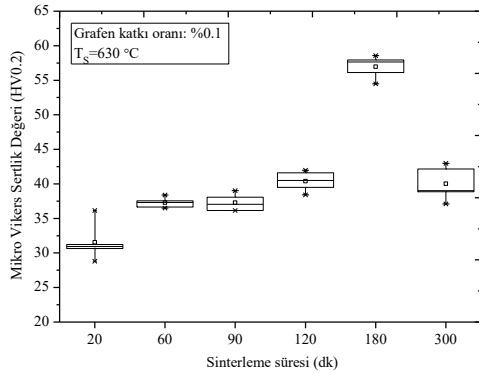
Belirli sinterleme süresinde ($t_s=180$ dk) farklı sinterleme sıcaklıkları (550, 600, 630 °C) için mikro Vickers sertlik değerleri (HV0.2) Şekil 5'te verilmiştir. Belirtilen üç sinterleme süresinde en yüksek sertlik değerine (57 HV) $T_s=630$ °C sinterleme sıcaklığında ulaşılmıştır. Bu sıcaklık ($T_s=630$ °C), üretilen grafen katkılı alüminyum kompozitlerde maksimum sertlik değerini veren en uygun sinterleme sıcaklığı olarak değerlendirilmiştir.

Mikro Vickers sertlik ölçümlerinde, sertlik verilerinin dağılımı kutu grafikte de verilebilmektedir. Kutu grafikte yer alan en alt ve en üst noktalar veri setindeki minimum ve maksimum değerleri ifade etmektedir. Kutu grafikte yer alan kutunun alt çizgisi 1. karteli (Q_1), üst çizgisi 3. karteli (Q_3) kutunun içerisindeki çizgi de medyanı ifade etmektedir. Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde farklı sinterleme

süreleri (t_s) için en yüksek sertlik değerlerine ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde ulaşılmaktadır. Bu sebeple, ağırlıkça %0.1 grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde $T_s=630$ °C için sinterleme süreleriyle ($t_s=20, 60, 90, 120, 180$ ve 300 dk) mikro Vickers sertlik değerlerinin (HV0.2) değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde $T_s=630$ °C için optimum sinterleme süresi (t_s) 180 dk olarak belirlenmiştir. Bu optimum sinterleme süresinde, mikro Vickers sertlik değeri 54.49 ile 58.56 HV arasında değişmekte olup ortalama mikro Vickers sertlik değeri yaklaşık 57 HV olmaktadır. Ağırlıkça %0.1 grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitte $t_s=120$ dk ve $t_s=300$ dk sinterleme sürelerinde, ortalama sertlik değerlerinin birbirine çok yakın (40 HV) olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5: Farklı sinterleme sıcaklıkları için mikro Vickers sertlik değerleri.



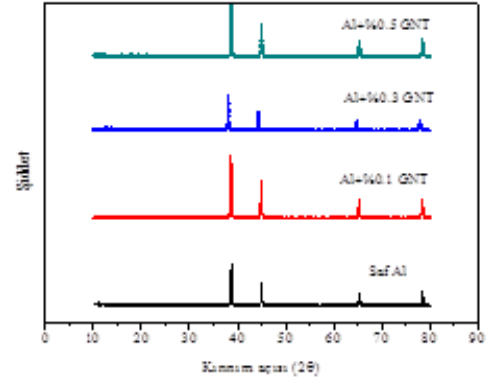
Şekil 6: Sinterleme süresiyle mikro Vickers sertliğinin değişimi.

Tane büyümesine ve tanelerin birbirleriyle boyun oluşumuna etki eden faktörlerden biri de sinterleme süresidir. Yürütülen süre çalışmasında, taneler arası boyun oluşumunun süreyle birlikte tane büyümesi olmaksızın arttığı; 180 dk.'lık sinterleme süresinden sonra ise tane büyümesi gerçekleştiğinden sertlik değerinin düştüğü gözlenmiştir.

3.3 Karakterizasyon çalışmaları

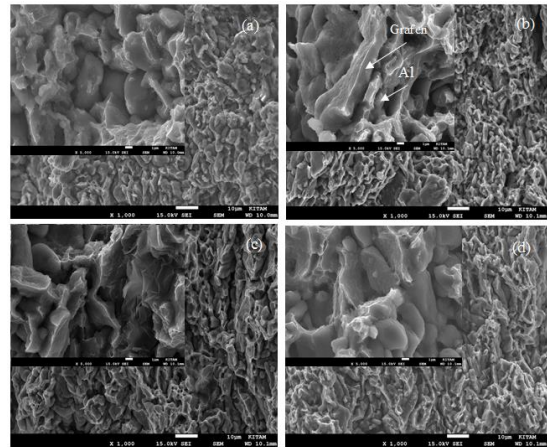
Üretilen saf alüminyum ve ağırlıkça %0.1, %0.3 ve %0.5 grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozit yapılarıdaki faz analizi için X-ışını kırınımı (XRD) örgü deseni, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-Ray (EDX) görüntüleri elde edilmiştir.

Saf Al ve farklı grafen katkı oranları (ağırlıkça %0.1, %0.3, %0.5) için elde edilen XRD örgü deseni incelendiğinde; üretilen yapının tamamen alüminyum piklerine ait olduğu grafen kullanımından kaynaklanan Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil fazların oluşmadığı görülmektedir (Şekil 7). Burada, grafenin oldukça düşük miktarlarda kullanılması ve cihazın düşük deteksiyon limitinden dolayı grafen piki görülmemektedir.



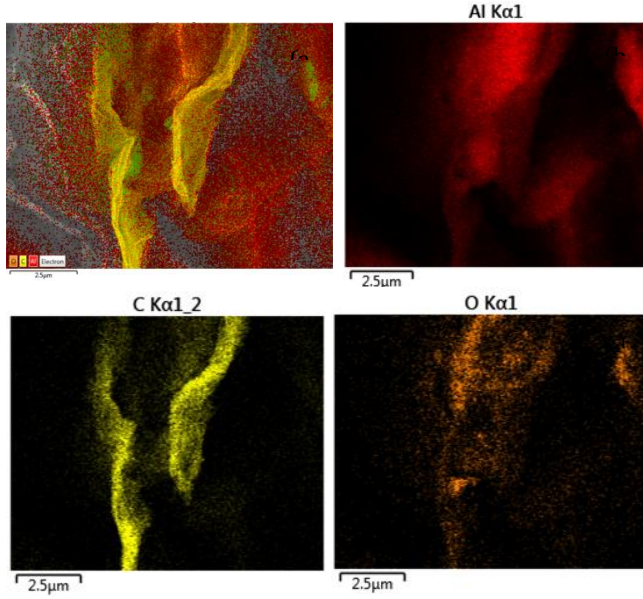
Şekil 7: Saf alüminyum ve grafen katkılı alüminyum esaslı kompozitlere ait XRD örgü desenleri.

$T_s=630$ °C ve $t_s=180$ dk. süresince sinterlenmiş saf alüminyum(a), ağırlıkça %0.1(b), %0.3(c), %0.5(d) grafen katkılı alüminyum esaslı kompozitlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) kırık yüzey iç yapı görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir. Kompozitin kırık yüzey görüntüsünden, mikro yapının oldukça yoğun olduğu görülmektedir. SEM analizinden ise Al tanelerinin iyi bir şekilde sinterlendiği belirlenmiştir. Mikro Vickers sertlik ölçümlerinde, en yüksek sertlik değerine ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde ulaşılmıştır. Ağırlıkça %0.1'den fazla grafen takviyesi ise grafenin topaklanmasına sebep olmuş ve kompozitin sertliğini düşürmüştür. Bu sonuç, yapılan deneysel yoğunluk analizleriyle de uyumludur. Grafenin nano boyutta olduğu düşünüldüğünde; proses esnasında homojen dağıtılması artan grafen miktarıyla daha zor olacağından grafenin topaklanma eğilimini de arttıracaktır.



Şekil 8: Saf alüminyum. (a): Ağırlıkça %0.1. (b): %0.3. (c) ve %0.5. (d): Grafen takviyeli alüminyum kompozitlere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ($T_s=630$ °C, $t_s=180$ dk, x1000, x5000 büyütme).

Üretilen Al-GNT kompozit yapılarda grafenin varlığını net bir şekilde doğrulamak ve grafenin daha çok tane sınırlarında olduğunu göstermek amacıyla taramalı elektron mikroskopundaki Enerji dağılımlı X-Ray (EDX-Energy Dispersive X-Ray) dedektörü kullanılarak kompozitlerin element haritalaması yapılmıştır (Şekil 9a). Al-GNT kompozit yapıda alüminyum, karbon ve oksijen elementleri tespit edilmiştir (Şekil 9b, 9c, 9d). İç yapı içerisindeki yoğun karbon elementi, grafenin varlığını göstermektedir. Yapıdaki oksijenin varlığı ise, alüminyumun ortam şartlarında bile oksitlenmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 9: Ağırlıkça %0.1 grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitin EDX haritalama görüntüsü ($T_s=630\text{ }^\circ\text{C}$, $t_s=180\text{ dk.}$).

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, toz metalürjisi metoduyla saf alüminyum ve grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üretilmiş olup kompozit yapılar içerisinde en iyi yoğunluk ve sertlik değerine ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde ulaşılmıştır. Ağırlıkça %0.1'in üzerindeki grafen takviyesinde ise alüminyum esaslı kompozitlerin sertliğinin ve yoğunluğunun düştüğü belirlenmiştir.

Sinterleme prosesi olarak $630\text{ }^\circ\text{C}$ sinterleme sıcaklığında direkt sinterlenen ve hızla oda sıcaklığına soğutulan kompozitlerin sertliklerinin daha yüksek olduğu analiz edilmiştir. Maksimum sertlik değerini veren en uygun sinterleme süresi 180 dk olarak belirlenmiştir. Bu sinterleme süresinin üzerine çıktığında ise kompozit yapıda tane büyümesi etkisiyle sertliğin düştüğü tespit edilmiştir.

Ağırlıkça %0.1 grafen takviyeli ve $550\text{ }^\circ\text{C}$, $600\text{ }^\circ\text{C}$, $630\text{ }^\circ\text{C}$ sinterleme sıcaklıklarında sinterlenen kompozitlerin sertlikleri sırasıyla 36 HV, 39 HV, 57 HV olarak belirlenmiştir. Sinterleme sıcaklığındaki artışın alüminyum esaslı kompozitin sertliğini olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

5 Kaynaklar

- [1] Kalemtaş A. "Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış". *Putech&Composites*, 22, 18-30, 2014.
- [2] Şahin İ. "Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin matkap ile delinmesi konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi". *Mühendis ve Makina Dergisi*, 55(649), 9-16, 2014.
- [3] Kurşun T. "Alüminyum esaslı SiC takviyeli metal matrisli kompozitlerin birleştirilmesinde Al₄C₃ oluşumunun önlenmesi ve sinerjik kontrollü darbeli MIG (GMAW-P) kaynak yöntemi". *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi*, 10(1), 86-98, 2011.
- [4] Azo Materials. "Aluminium-Specifications, Properties, Classifications and Classes, Supplier Data by Alcoa". <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863#7> (03.11.2016).
- [5] TMMOB Metalürji Mühendisleri Odası. "Alüminyum Raporu". Ankara, Türkiye, 2006.
- [6] Geim AK, Novoselov KS. "The rise of graphene". *Nature Materials*, 6, 183-191, 2007.
- [7] Randviir EP, Brownson DAC, Banks CE. "A decade of graphene research: production, applications and outlook". *Materials Today*, 17(9), 426-432, 2014.
- [8] Savage N. "Materials science: super carbon". *Nature*, 482, 30-31, 2012.
- [9] Bastwros M, Kim GY, Zhang, CZK, Wang S, Tang X. "Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid sintering". *Composites: Part B*, 60, 111-118, 2014.
- [10] Rashad M, Pan F, Tang A, Asif M. "Effect of graphene nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminium using a semi-powder method". *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(2), 101-108, 2014.
- [11] Wang J, Li Z, Fan G, Pan H, Chen Z, Zhang D. "Reinforcement with graphene nanosheets in aluminium matrix composites". *Scripta Materialia*, 66(8), 594-597, 2012.
- [12] Yan SJ, Dai SL, Zhang XY, Yang C, Hong QH, Chen JZ, Lin ZM. "Investigating aluminum alloy reinforced by graphene nanoflakes". *Materials Science&Engineering A*, 612, 440-444, 2014.
- [13] Kumar HG, Xavier MA. "Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): A review". *Pocedia Engineering*, 97, 1033-1040, 2014.