

Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile Al6061/TiB₂/B₄C/GNL Hibrit Yüzey Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Burcu ŞAHİNGÖZ¹ , Halil KARAKOÇ^{2*} , Ramazan ÇITAK³ 

^{1,3}Department of Metallurgy and Materials Eng., Gazi University, 06500 Ankara, Turkey

²Department of Mechanical Program, Hacettepe University, 06930, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/02/2024
Düzeltilme: 14/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

AL6061, TiB₂, B₄C, grafen nano levha, Hibrit, Sürtünme karıştırma yöntemi, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Aşınma.

Article Info

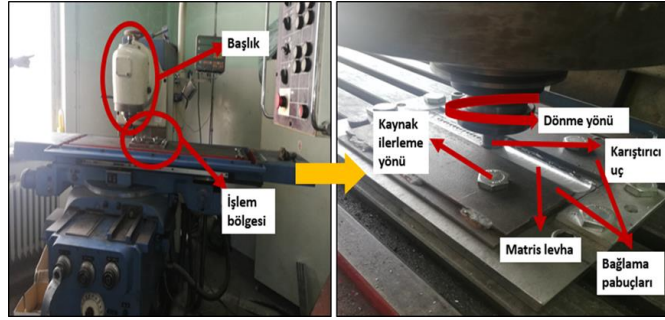
Research article
Received: 12/02/2024
Revision: 14/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

AL6061, TiB₂, B₄C, Graphene nano plated, Hybrid, Friction stir process, Microstructure, Mechanical Properties, Wear.

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, sürtünme karıştırma yöntemi (SKY) kullanılarak farklı oranlarda TiB₂/B₄C/ Grafen nano levha/ takviyeli hibrit yüzey kompozitlerinin üretimini ve mekanik özelliklerinin incelenmesini ele almaktadır. /This study focuses on the production and characterization of hybrid surface composites reinforced with varying ratios of TiB₂/B₄C/ Graphene nanoplate/ using the friction stir process (FSP) method.



Şekil A: SKY için kullanılan FU 400x1600 V1 Universal Freze Tezgâhı ve işlem bölgesi / Figure A: FU 400x1600 V1 Universal Milling Machine and processing area used for FSP

Önemli noktalar (Highlights)

- FSP method used to produce surface composites of AL6061 alloy with B₄C, TiB₂, and GNP hybrid particles.
- Tensile strength highest in 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL surface composite.
- Improved wear properties with B₄C and GNL additions, with increased GNL content correlating with decreased volume loss.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın ana hedefi, SKY ile üretilen farklı oranlarda TiB₂/B₄C/Grafen nano levha takviyeli AL6061 alaşımının mekanik özelliklerini ve mikroyapısını incelemektir. / The main objective of this study is to investigate the mechanical properties and microstructure of AL6061 aluminum alloy reinforced with different ratios of TiB₂/B₄C/Graphene nano plate using Friction Stir Mixing (FSM) method.

Özgünlük (Originality): Bu çalışmada, AL6061 alüminyum alaşımına sürtünme karıştırma yöntemi (SKY) ile farklı oranlarda TiB₂/Grafen nano levha/B₄C takviyeli hibrit yüzey kompozitleri üretilmiştir. / In this study, hybrid surface composites reinforced with different ratios of TiB₂/graphene nano platelets/B₄C were produced using friction stir mixing (SKY) method on AL6061 aluminum alloy.

Bulgular (Results): Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapı analizleri incelenmiş, takviyesiz alaşımda en düşük çekme dayanımı elde edilmiştir; B₄C ve GNL ilavesi ile aşınma özellikleri iyileşmiştir. / The mechanical properties and microstructure analyses of the produced composites were examined, revealing the lowest tensile strength in the unreinforced alloy, while the addition of B₄C and GNP improved wear properties.

Sonuç (Conclusion): Bu araştırma, TiB₂/Grafen nano levha/B₄C takviyeli hibrit yüzey kompozitlerinin üretimi ve karakterizasyonunu ele almaktadır. Yapılan deneyler sonucunda, takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinde artışlar görülmüştür. Ayrıca, aşınma direnci ve sürtünme katsayısı gibi önemli özelliklerde iyileşmeler gözlemlenmiştir. / This study addresses the production and characterization of TiB₂/Graphene nanoplatelet/B₄C hybrid surface composites. Experimental results showed enhancements in the mechanical properties of the reinforced composites. Moreover, improvements in important properties such as wear resistance and friction coefficient were observed.



Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile AL6061/TiB₂/B₄C/GNL Hibrit Yüzey Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Burcu ŞAHİNGÖZ¹ , Halil KARAKOÇ^{2*} , Ramazan ÇITAK³

^{1,3}Department of Metallurgy and Materials Eng., Gazi University, 06500 Ankara, Turkey

²Department of Mechanical Program, Hacettepe University, 06930, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/02/2024
Düzeltilme: 14/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

AL6061, TiB₂, B₄C, grafen nano levha, Hibrit, Sürtünme karıştırma yöntemi, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Aşınma.

Öz

Bu çalışmada sürtünme karıştırma yöntemi (SKY) ile AL6061 alüminyum alaşımı ve farklı oranlarda TiB₂/Grafen nano levha/B₄C takviyeli hibrit yüzey kompozitleri üretilmiş ve mekanik özellikleri ile mikroyapı analizleri yapılmıştır. AL6061 altlığı üzerine 2 mm sabit aralıklarla 3 mm çapında ve 1.5 mm derinliğinde delikler açılmış, açılan bu deliklere farklı oranlarda karıştırılmış TiB₂/Grafen nano levha/B₄C tozları doldurulmuştur. Takviye tozları ultrasonik ve mekanik olarak karıştırılmıştır. Sürtünme Karıştırma yöntemi ile 7 farklı takviye oranında yüzey kompoziti aynı profilde karıştırıcı uç kullanılarak sabit hızda üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin çekme dayanımları, farklı yüklerdeki aşınma dirençleri ve sertlikleri belirlenmiştir. Ayrıca optik ve SEM mikroskoplar ile mikroyapı, kırık yüzey ve aşınma yüzeyi analizleri ile element haritalaması yapılmıştır. En düşük çekme dayanımı takviyesiz alaşımda elde edilirken TiB₂, nano grafen ve B₄C ilaveli yüzey kompozitlerin dayanımı artmıştır. Mikroyapılarda herhangi bir gözenek ve boşluk tespit edilmemiştir. Kırık yüzeylerde takviye elemanı arttıkça gevrek kırılmaların meydana geldiği görülmüştür. B₄C ve GNL ilavesi ile birlikte aşınma özelliklerinin iyileştiği görülmüştür.

Production and Investigation of Mechanical Properties of AL6061/TiB₂/B₄C/GNP Hybrid Surface Composites with Friction Stir Process

Article Info

Research article
Received: 12/02/2024
Revision: 14/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

AL6061, TiB₂, B₄C, Graphene nano plated, Hybrid, Friction stir process, Microstructure, Mechanical Properties, Wear.

Abstract

In this study, hybrid surface composites reinforced with TiB₂/Nano Graphene/B₄C at different ratios were produced using the friction stir process (FSP) method with AL6061 aluminium alloy, and their mechanical properties and microstructure analyses were conducted. On the AL6061 substrate, holes with a diameter of 3 mm and a depth of 1.5 mm were drilled at fixed intervals of 2 mm, and these holes were filled with TiB₂/Graphene nano plate/B₄C powders mixed at different ratios. The reinforcement powders were mixed ultrasonically and mechanically. Surface composites at 7 different reinforcement ratios were produced at a constant speed using the friction stir mixing method with the same profiled mixing tool. Tensile strengths, wear resistances at different loads, and hardness of the produced composites were determined. Additionally, optical and SEM microscopes were used for microstructure analysis, and element mapping was performed on fractured surfaces and worn surfaces. While the lowest tensile strength was obtained in the unreinforced alloy, the strength of surface composites with TiB₂, Graphene nano plate, and B₄C additions increased. No pores or voids were detected in the microstructures. It was observed that as the reinforcement element increased, brittle fractures occurred on the fractured surfaces. It was observed that the wear properties improved with the addition of B₄C and GNP.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum ve alaşımları, hafif, sünek ve iyi korozyon özelliklerinden dolayı özellikle havacılık, otomotiv sektörleri ve askeri alanlarda büyük ölçüde kullanılmaktadır [1-2]. İyi şekil kabiliyetine sahip olan bu Al alaşımlarının aşınma dirençlerini

iyileştirebilmek ve yüksek mukavemet kazandırabilmek için ikincil ve üçüncül seramik parçacık ilaveleri yapılabilmektedir [3-4]. Bu tip malzemelere Al esaslı seramik parçacık ilaveli kompozit malzemeler denilmektedir [5-6]. Al esaslı kompozit malzemelerin (AEKM), başlıca sıvı metalürjisi ve toz metalürjisi (TM) olmak üzere

birbirinden farklı üretim metotları bulunmaktadır [7-8]. Her tarafında homojen dağılımlı bir kompozit malzeme üretmek yerine ticari Al alaşımlarının yüzeyine seramik parçacıklar kaplanarak yüzey özellikleri geliştirilebilirler [9]. Bu tip kaplamalı kompozit malzemelere yüzey kompozitler denilmektedir [10]. Son zamanlarda bilim insanlarının yüzey kompozitler üretmek için sürtünme karıştırma yöntemi (SKY) kullanılmaktadır [11-12]. Bu işlem ile Al alaşımının ana özelliklerini korurken yüzey özelliklerini iyileştirmek mümkündür [13-14]. Böylelikle daha az takviye elemanı ilave edileceğinden düşük maliyetli kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilecektir [15]. SKY ile yüzey kompoziti üretiminde ilk olarak ticari Al alaşımı yüzeyine seramik parçacıkların ilavesi için ardışık aralıklar ile delik delinir veya çeşitli geometrilere kanallar açıldıktan sonra kanallara seramik parçacıklar ilave edilir [16]. SKY için pim ve omuzdan meydana gelen aynı zamanda sürtünme karıştırma kaynağında (SKK) kullanılan karıştırma uç takımı kullanılır [17-18]. Pim iş parçasının içine battığında omuzda iş parçasının yüzeyine temas eder [19]. Takım dönme hızı ile birlikte iş parçası ile dönen uç arasında sürtünmeden dolayı ısı oluşur [20]. Isının etkisi ile birlikte A alaşımı yumuşar ve kanal içerisindeki seramik parçacıklar Al alaşımı içerisinde dağıtılır [21]. Böylelikle yüzeyde seramik parçacık dağılımlı yüzey kaplamalı kompozit malzemeler üretilmiş olur [22]. Başta malzeme ve takviye elemanı olmak üzere SKY ile üretilen yüzey kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen pek çok parametre vardır [23]. SKY ile üretilen yüzey kompozitlere tek tip seramik parçacık ilavesi yapılabildiği gibi birden fazla (hibrit) seramik parçacık ilavesi de yapılabilmektedir [24-25]. Hibrit seramik parçacık

ilaveli kompozit malzemeler birden fazla takviye elemanının farklı özelliklerini bir araya getirdiğinden üstün mekanik ve korozif özellikler sergileyebilmektedir [26-27]. Takviye elemanları arasında titanyum diborür (TiB_2), yüksek sertlikte olması, yüksek erime noktası, iyi termal iletkenlik, kimyasal kararlılık gibi özelliklerinde dolayı son zamanlarda en çok çalışılan takviye elemanları arasında yer almaktadır [28]. Bor karbür (B_4C) dünya genelinde en sert madenlerden biri olması sebebi ile özellikle aşınmaya karşı iyi bir direnç sağlamaktadır [29]. Ayrıca, B_4C 'nin hafifliği, Yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve nötron yakalama yeteneği olmasında dolayı en çok çalışılan takviye elemanları arasındadır [29-30]. Grafen nano levhalar (GNL), tek atom kalınlığında olmaları, eşsiz mekanik özelliklere sahip olmalarını sağlar [31]. Ayrıca, GNL yüksek termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik, geniş bir kimyasal dayanıklılık ve yağlayıcı gibi özelliklerinden dolayı nano teknolojide oldukça tercih edilmektedir [31-32].

Ticari Al6061 alaşımı hafif, yüksek şekil kabiliyeti ve yüksek korozyon özelliklerine sahip olmasına karşın aşınmaya karşı dirençleri oldukça zayıftır. Bu çalışmada SKY ile ticari Al6061 alaşımının sadece yüzeyine hibrit (TiB_2 - B_4C ve GNL) parçacık ilavesi yapılarak otomotiv sektörü ve savunma sanayinde kullanılabilecek aşınmaya karşı dirençli yeni nesil yüzey kompozit malzeme üretilmiştir.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

Bu çalışmada altlık malzemesi olarak kimyasal bileşimi Çizelge 1'de mekanik özellikleri Çizelge 2 de verilen AL6061 alüminyum alaşımı kullanıldı.

Çizelge 1. Al6061 Kimyasal bileşimi (Chemical composition of Al6061)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,7	0,4-0,8	0,15-0,4	0,15	0,8-0,12	0,25	0,04-0,35	0,15	0,15	Kalan

Çizelge 2. Al6061 mekanik özellikleri (Al6061 mechanical properties)

Akma Mukavemeti (MPa)	240-270
Çekme Mukavemeti (MPa)	260-310
Uzama (%50)	20
Sertlik (Brinel)	95

Çalışma kapsamında 7 farklı yüzey kompozit malzeme üretildi. Bu malzemelerden biri takviyesiz AL6061 alaşımı diğerleri ise Çizelge 3’de karışım oranları verilen yüzey takviyelerle üretildi. Yapılan çalışmalarda 20 µm parçacık boyutunda B₄C, 10 µm parçacık boyutunda TiB₂ ve nano grafen kullanıldı.

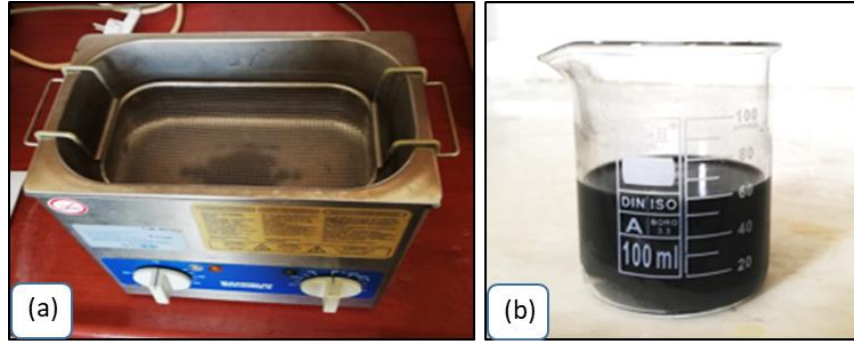
7 farklı yüzey kompozit malzeme üretildi Bu malzemelerden biri takviyesiz AL6061 alaşımı, diğerleri ise Çizelge 7.3.te karışım oranları verilen yüzey takviyelerle üretilen yüzey kompozit malzemeleridir.

Çizelge 3. Yüzey takviye tozlarının karışım oranları (Mixing ratios of surface reinforcement powders)

Malzeme kodu	Toz karışımı
N1	AL6061 alaşım tozu
N2	100% TiB ₂
N3	50% TiB ₂ + 50% B ₄ C
N4	99.5% TiB ₂ + 0.5% GNL
N5	98% TiB ₂ + 2% GNL
N6	49.75% TiB ₂ + 49.75% B ₄ C + 0.5% GNL
N7	49% TiB ₂ + 49% B ₄ C + 2% GNL

Çizelge 3’de oranları verilen B₄C, TiB₂ ve nano grafen içeren tozlar, nano grafenler levhalar arası çekim kuvvetinden kaynaklı oluşabilecek topraklanmaların önüne geçmek için öncelikle Şekil

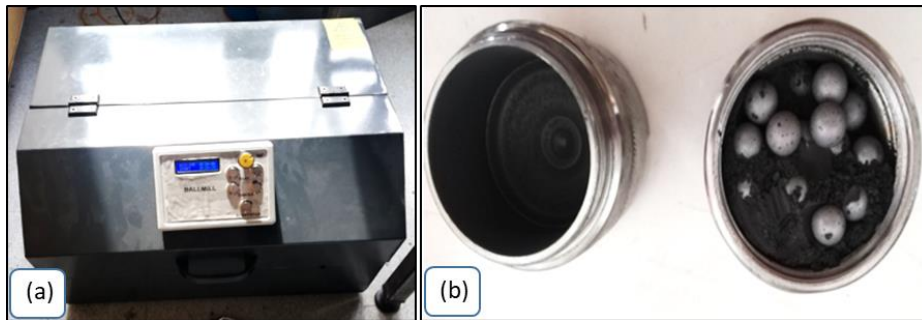
1-a’da verilen Bandelin RK 100H Ultrasonik banyo cihazı ile 30 cc metanol içerisinde 30 dakika süreyle ultrasonik olarak karıştırıldı.



Şekil 1. Bandelin RK 100H marka ultrasonik banyo cihazı a) 30 cc metanol toz karışımı b) (Bandelin RK 100H brand ultrasonic bath device a) 30 cc methanol powder mixture b))

Ultrasonik banyoda karıştırılan tozlar kurutulduktan sonra Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan bilyeli karıştırıcıda 300 rpm dönme hızında, 30 dakika süreyle karıştırıldı. Karıştırma işleminde Şekil 2-a-b’de verilen toplam toz karışım ağırlığının 5/1 oranında toplam bilye çapı olacak kadar 2344 serisi,

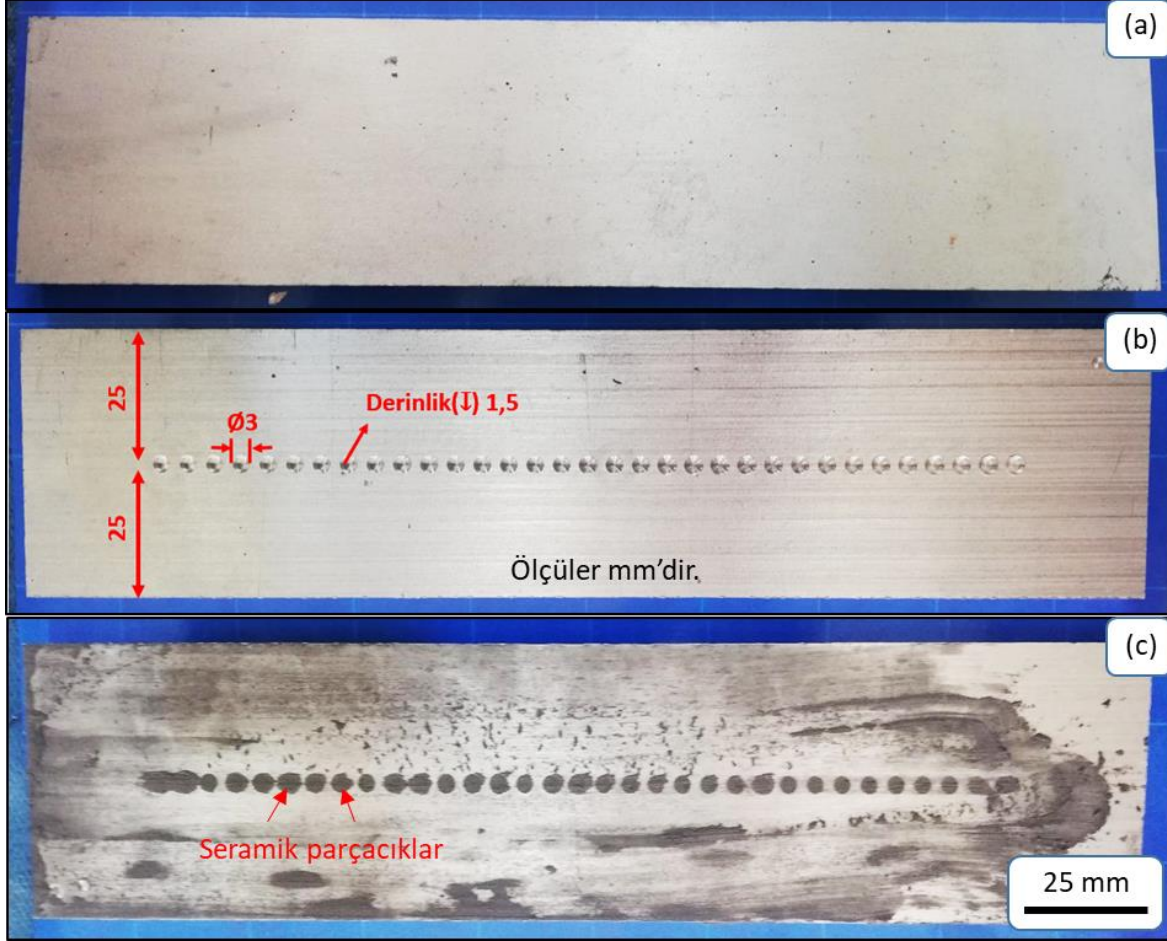
H13 kalitesi, 55 RWC sertliğindeki sıcak iş takım çeliği bilye kullanıldı. Bilyeli karıştırıcıda kullanılacak bilye çapı toplam; toplam toz ağırlığının 5/1 katı olacak şekilde; 20x5=100 mm kadardır. Bu hesaplama göre kullanılan bilye adedi ve çapı; 30 adet 3 mm, 1 adet 10 mm’dir.



Şekil 2. a) Bilyalı karıştırıcı b) sıcak iş takım çeliği bilye (a) Ball mixer b) hot work tool steel ball

Şekil 3-a'da görüntüsü verilen AL6061 altlık malzemesi 210x50x8 mm boyutlarında kesildi. Altlık AL6061 malzemesine Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı CNC laboratuvarındaki JOHNFORD VMC-550 marka, bilgisayar denetimli CNC torna tezgâhında Şekil 3-b'de görüntüsü verilen 2 mm aralıklar ile 3 mm

delindi. İlk deliğin merkezi her bir kenara 25 mm uzaklıkta olacak şekilde konumlanıp diğer delikler verilen mesafede sırasıyla delindi. Hazırlanan tozlar her biri farklı altlık levhaya yerleştirilecek şekilde deliklere öncelikle bir çubuk sonrasında ise parmakla bastırarak Şekil 3-c'de verildiği şekilde sıkıştırıldı.



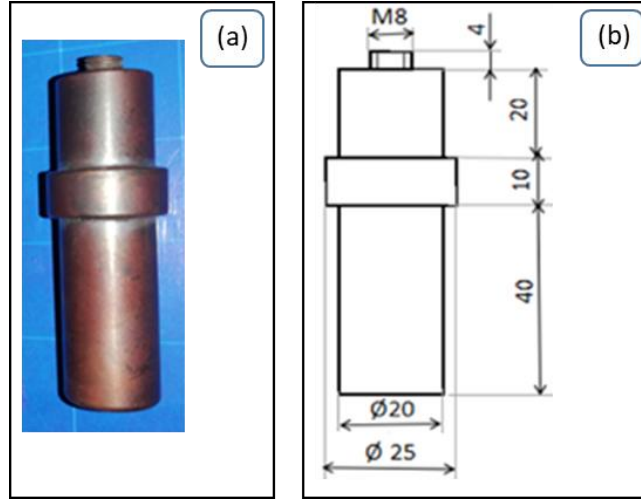
Şekil 3. a) Al6061 altlık malzemesi b) Delikleri açılan AL6061 altlık levha c) Takviye toz doldurulmuş AL6061 altlık (a) Al6061 backing material b) AL6061 backing plate with drilled holes c) AL6061 backing filled with reinforcement powder)

Karıştırma ucu olarak kimyasal kompozisyonu Çizelge 4'de, makro görüntüsü ve boyutları Şekil 4'de verilen 8 mm çapında, 4 mm derinliğinde

Böhler W302 marka 2344 serisi sıcak iş takım çeliği kullanıldı. Karıştırıcı uç bilgisayar denetimli CNC torna tezgâhında işlenerek hazırlandı.

Çizelge 4. 2344 takım çeliği kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of 2344 hot work tool steel)

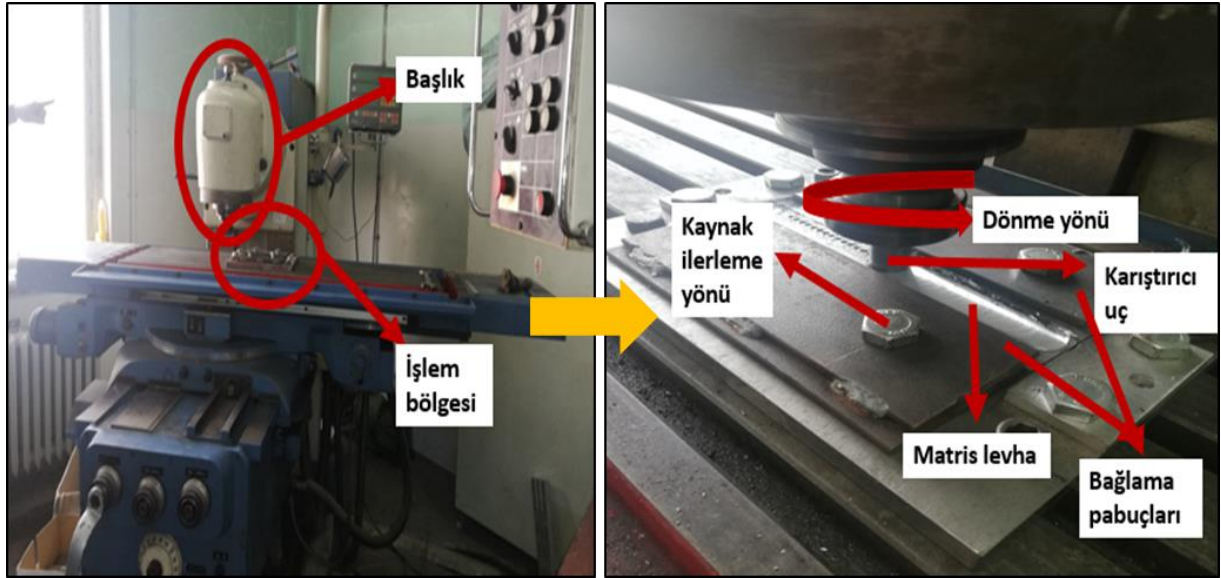
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,39	1	0,38	5,15	1,3	1



Şekil 4. a) Karıştırıcı uç makro görüntüsü b) teknik resim ölçüleri (a) Mixer tip macro view b) drawing dimensions)

Şekil 5’de verilen Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan FU 400x1600 V1 Universal Freze Tezgâhında kullanılarak Sürtünme

Karıştırma Kaynak Yöntemi ile hibrit yüzey kompozit üretimi gerçekleştirildi.



Şekil 5. SKY için kullanılan FU 400x1600 V1 Universal Freze Tezgâhı ve işlem bölgesi (FU 400x1600 V1 Universal Milling Machine and processing area used for FSP)

1400 devir/dk, 20 mm/dk ilerleme hızında işlem yapıldı. İlk olarak takım malzemesi SKY uygulanacak alana 1400 devir/dk dönme hızı ile indirilerek sürtünme ısı elde edildi. 3° takım eğim açısı ile levha ve takım omzu arasında boşluk kalmaması amaçlanarak yüzeyden 4,5 mm dalma derinliğine ulaşıldı. Matris malzemesinin yumuşaması için takım ucu levhaya daldırıldıktan sonra 10 saniye bekletilerek ilerleme yapıldı. Elde

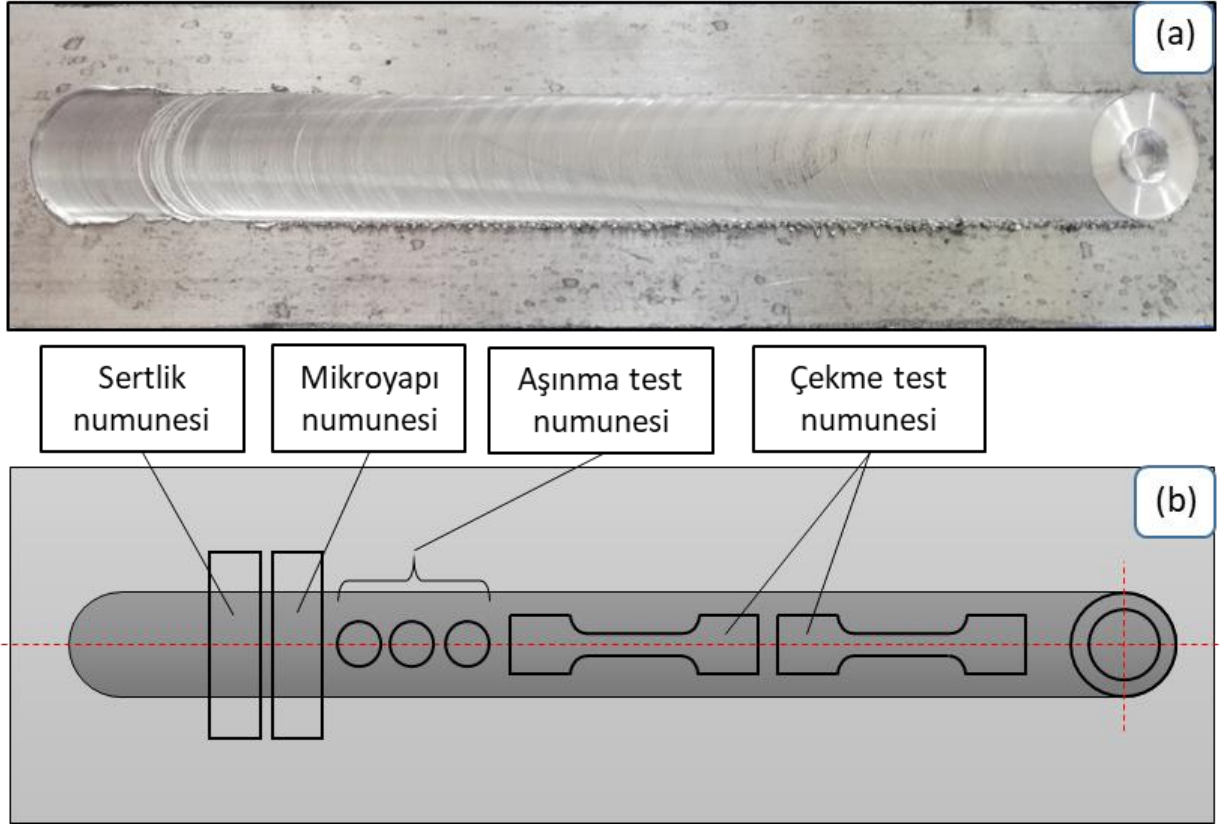
edilen gerekli ısı sonrası freze tezgâhı ayarlanan ilerleme hızıyla hareket ettirildi. Takviyesiz matris malzemesi ve 6 farklı toz karışımıyla toplam 7 adet malzemenin tek paso işlemiyle üretimi tamamlandı. Şekil 6’da SKY sonrası numune üzerinde ilerleme yönü, dönme yönü ve takım çıkış noktası görüntüleri verildi.



Şekil 6. SKY sonrası ilerleme yönü, dönme yönü, takım çıkış noktası gösterimi (Display of feed direction, rotation direction, tool exit point after FSP)

Sürtünme karıştırma kaynağı ile üretilen yüzey kompozit AL6061 levhanın işlem sonrası görüntüsü ve numune yerleri şekil 7.2. da verilmiştir. Yüzey hibrit kompoziti oluşturulan 7 ayrı numuneden resim Şekil 7’de teknik çizimi verilen 2 şer adet

çekme testi numunesi, 3er adet aşınma numunesi ve sertlik numunesi için parçalar kesildi. Test numunelerinin hazırlanmasında Mitsubishi MV1200S Marka CNC Tel Erozyon Makinesi kullanıldı.



Şekil 7. a) Kaynak işlemi sonrasında numune görüntüsü b) Alüminyum plakadan alınan test numunelerinin konumları ve teknik çizimleri (a) Sample image after welding b) Locations and technical drawings of the test samples taken from the aluminum plate)

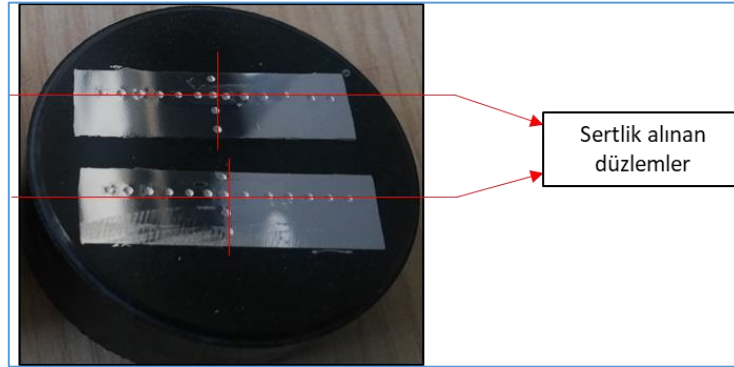
Mikroyapı incelemeleri yapılacak numuneler FSP işleri uygulanan yüzeyleri dışta kalacak şekilde Opal 460 Sıcak Bkalit Alma Cihazında kalıplandı. ATM Saphir 520 Otomatik Zımpara ve Parlatma cihazıyla zımparalama ve parlatma yapıldı. Zımparalama işleminde; ilk olarak 320 mesh aşındırıcı zımpara ile 1 dakika, aynı yönde, 300 rpm devir sayısında, 30 N yük ile yapıldı. İkinci olarak

600 mesh aşındırıcı zımpara ile 1 dakika, aynı yönde, 300 rpm devir sayısında 30 N yük ile yapıldı. Üçüncü olarak ise 1200 mesh aşındırıcı zımpara ile 1 dakika, aynı yönde 300 rpm devir sayısında ve 30 N yük ile yapıldı. Parlatma işlemi ATM Saphir 520 Otomatik Zımpara ve Parlatma Cihazı ile yapıldı. İlk olarak 9 µm elmas suyu parlatma sıvısı ile 6,5 dakika, zıt yönde, 150 rpm devir sayısında,

35 N olarak yapıldı. İkinci işlem olarak 3 µm elmas suyu parlatma sıvısı ile 6,5 dakika, aynı yönde, 150 rpm devir sayısında ve 30 N yükü yapıldı. Final işlemi kollodial silica süspansiyon ile 2,5 dk, zıt yönde, 150 rpm devir sayısında ve 25 N olarak yapıldı. Final işleminin son 30 saniyesinde numuneye su verildi. Parlatılan numuneler 30 ml HCl + 40 ml HNO₃ + 2,5 ml HF + 12 gr CrO₃ + 52,5 ml su kullanılarak hazırlanan çözeltide dağlandı. Dağlama işlemi yaklaşık 30 sn kadar sürdü. Dağlanan numunelerin makro ve mikro görüntüleri LECIA DM 4000M Optik Mikroskop ile çekildi. Mikroyapı görüntüsü alınan her numunenin pim karışım bölgesi, transfer bölgesi, termodinamik olarak etkilenmiş bölge ve ana metal bölgelerinden görüntü alındı. 20 µm, 100µm ve 500µm boyutlarında incelendi. Taramalı Elektron mikroskobu ile çekme testi uygulanan numunelerin kırık yüzeylerinin ve aşınma numunelerinin SEM görüntüsü Jeol JEM 6060 LV Taramalı Elektron

Mikroskobu ile alındı. Mikroyapı için kesilen her numune de farklı büyütme oranlarında görüntü alındı. Çekme testi sonrası kırık yüzeylerden ve aşınma testi sonrası numune yüzeyinden farklı büyütme oranlarında aynı bölgelerden görüntü alındı. Görüntü alınan bölgelerde EDS analizi ve Mapping işlemi yapıldı. Numunelerin XRD analizleri Gazi Üniversitesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü bünyesindeki X Işını Difraktometresi ile yapıldı. Açık aralığı (2θ) 20-90°, tarama hızı 0,04 2θ/dk olarak seçildi.

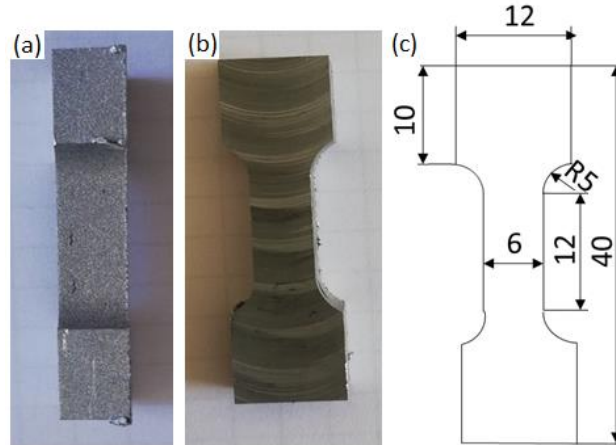
Mikroyapı görüntüsü için kesilen numunelerin mikroyapı görüntüsü alındıktan sonra Duravision 2000 Emco Test Sertlik Cihazında sertlik değerleri ölçüldü. Numunenin karışım bölgesinden geçmek koşuluyla dikey ve yatay doğrultularında test sonrası hali gösterildiği şekilde HBW 2,5/31/25 değeri kullanılarak ve her bir ölçüm arası mesafe 2d olarak belirlenerek testler yapıldı (Şekil 8).



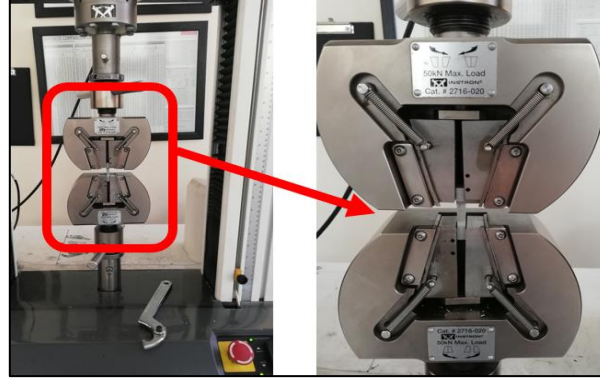
Şekil 8. Sertlik değerleri ölçülen numunenin ölçüm doğrultuları (Measurement directions of the sample with hardness values measured)

Malzemelerin bir yük altındaki davranışlarını incelemek için çekme direnci testi yapıldı. Şekil 9'da verilen test numunesi boyu 12 mm, kalınlığı 6mm, genişliği 5,5 mm olarak hazırlandı.

Numunelere 1mm/dk hızında Şekil 10'da verilen INSTRON 3369 Çekme/Basma Cihazı kullanılarak test yapıldı.



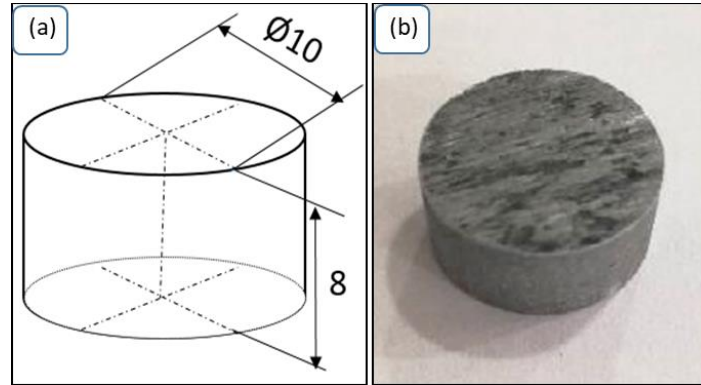
Şekil 9. a-b) Çekme testi numunesi ve c) boyutları (a-b) Tensile test specimen and c) dimensions)



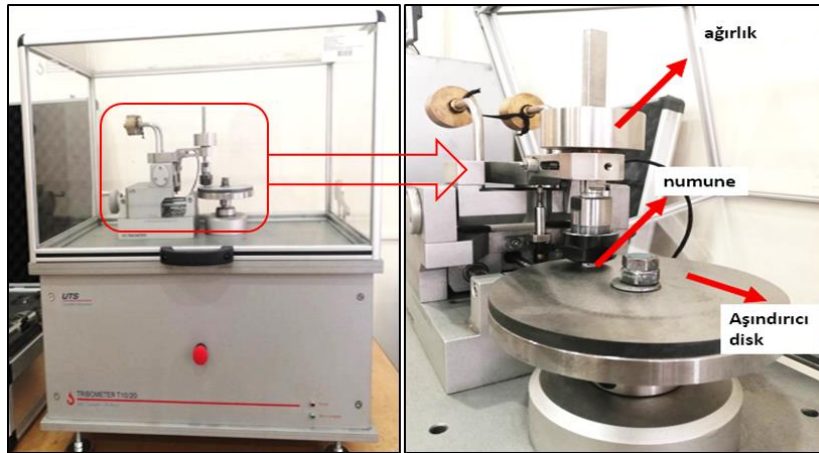
Şekil 10. INSTRON 3369 çekme cihazı Cihazı
(INSTRON 3369 tensile Device)

Aşınma testi için Şekil 11’de makro görüntüsü ve boyutları verilen; çapı 10mm yüksekliği 8 mm olan aşınma test numuneleri kullanıldı. Test için Şekil 12’de kısımları gösterilen UTS Tribometer 10/20 cihazı kullanıldı. Üretilen her farklı toz oranlarındaki yüzey kompozit malzemeden alınan 3 numuneye sırasıyla 5-10-20 Newton yük uygulandı.

Uygulanan her bir yükte 1200 m aşınma mesafesi, 1m/sn aşınma hızı, 191 rpm dönme hızı, 100 mm aşınma mesafesi, Harox 400 aşındırıcı çelik disk ve 20 dakika test süresi sabit tutuldu. Her numunenin test öncesi ve test sonrası ağırlıkları hassas terazi ile ölçüldü ve ağırlık kayıpları hesaplandı.



Şekil 11. a) Aşınma testi numunesi boyutları ve b) makro görüntüsü (a) Wear test specimen dimensions and b) macro image)

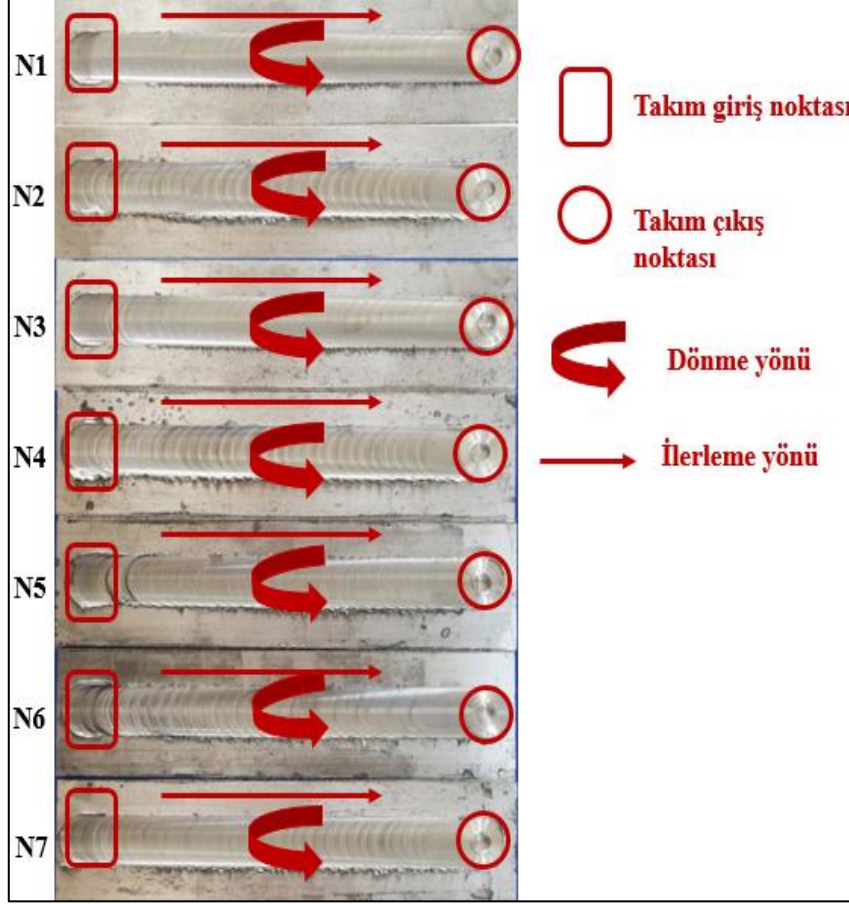


Şekil 12. UTS Tribometer 10/20 cihazı ve kısımları (UTS Tribometer 10/20 device and parts)

3. BULGULAR (RESULTS)

SKY sonrası numunelerde gözle görülür oluşan tek hata Şekil 13'de örnekleri verilen çapak

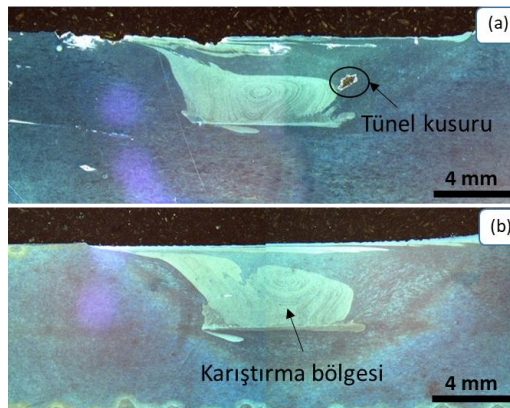
oluşumudur. Bunun dışında gözenek, boşluk veya çatlak gibi kusurlara rastlanmadı. Çapak oluşumu ise işlem sırasında uygulanan yüksek basınç ve ısı sebebiyle yumuşayan malzemenin işlem bölgesinin kenarlarında birikmesiyle oluşmuş bir hatadır [33].



Şekil 13. SKY sonrası çapak oluşumu örnekleri (Examples of burr formation after FSP)

Yüzey kompozitlerin ön deneylerinin yapımında düşük yükler altında yapılan deneylerde yüzeylerde çapak oluşmazken kesit incelendiğinde tünel kusurunun meydana geldiği anlaşılmıştır (Şekil 14-a). Benzer bir çalışmada da yeterli ısı sağlanamadığından düşük yükler altında tünel

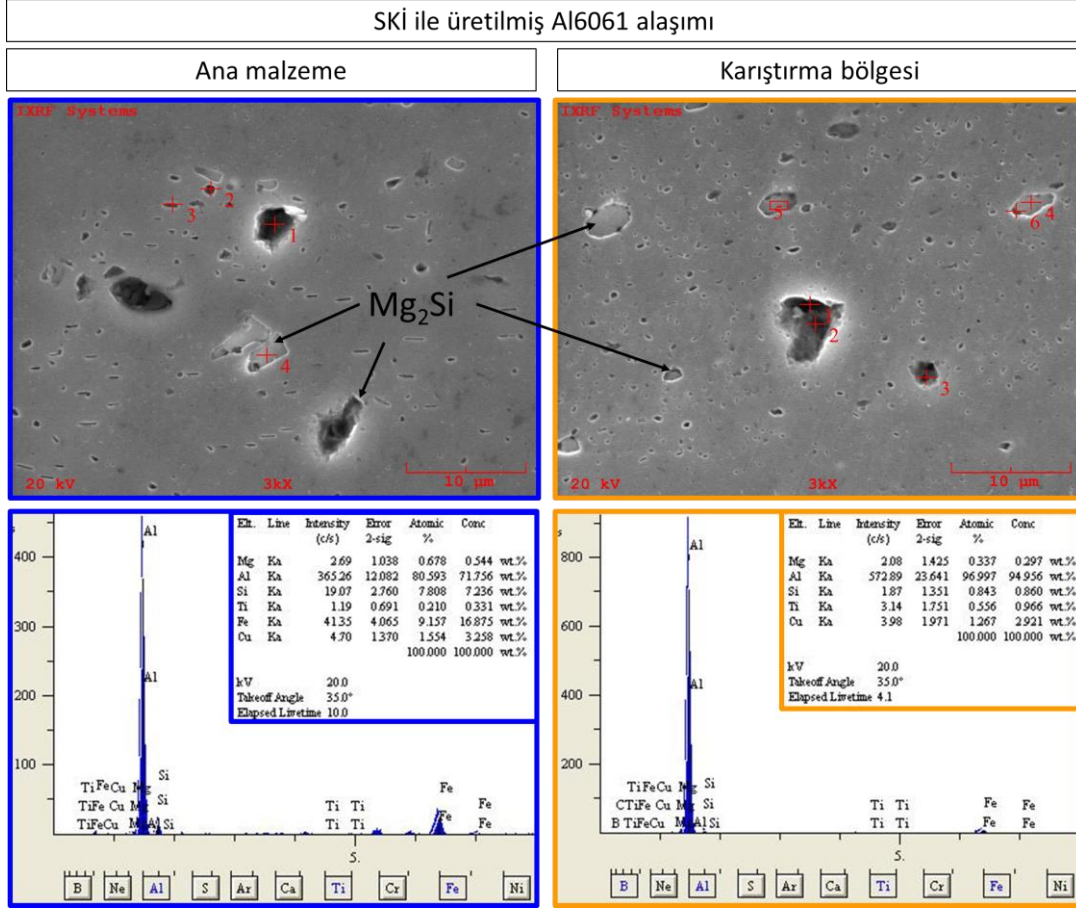
kusuru olduğu görülmüştür [34]. Yüksek yükler altında yapılan deneylerde ise yüzeylerde çapak hattı oluşumunun arttığı aynı zamanda iç kısımda meydana gelen tünel kusurunun azaldığı görülmüştür (Şekil 14-b).



Şekil 14. Al6061 malzemesinin SKY sonrası makro görüntüsü a) düşük yük b) yüksek yük (Macro image of Al6061 material after FSP a) low load b) ideal load)

Al6061 malzemesinin SKY sonrası ana malzeme ve karışım bölgeleri kısımlarından SEM görüntüleri ve EDS analizleri alınmıştır (Şekil 15). Görüntüler incelendiğinde mikro yapıda Al6061 alaşımında meydana gelen Mg₂Si çökeltilerinin olduğu görüldü. Benzer şekilde Arya ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada ana faz olan Al6061 alaşımında

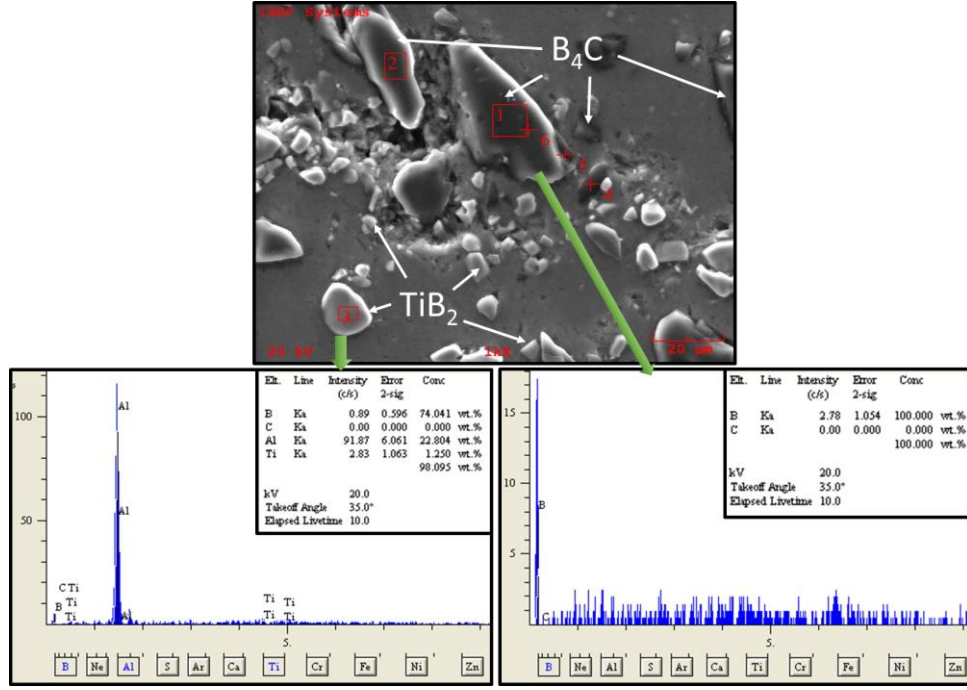
Mg₂Si fazlarının oluştuğunu göstermişlerdir [35]. EDS analizinde oluşan pikler yardımı ile Mg₂Si faz yapıları belirlendi. Ana malzemede meydana gelen yassı halde duran Mg₂Si çökeleklerinin karıştırma bölgesinde daha ince ve küresel hale geldiği görüldü.



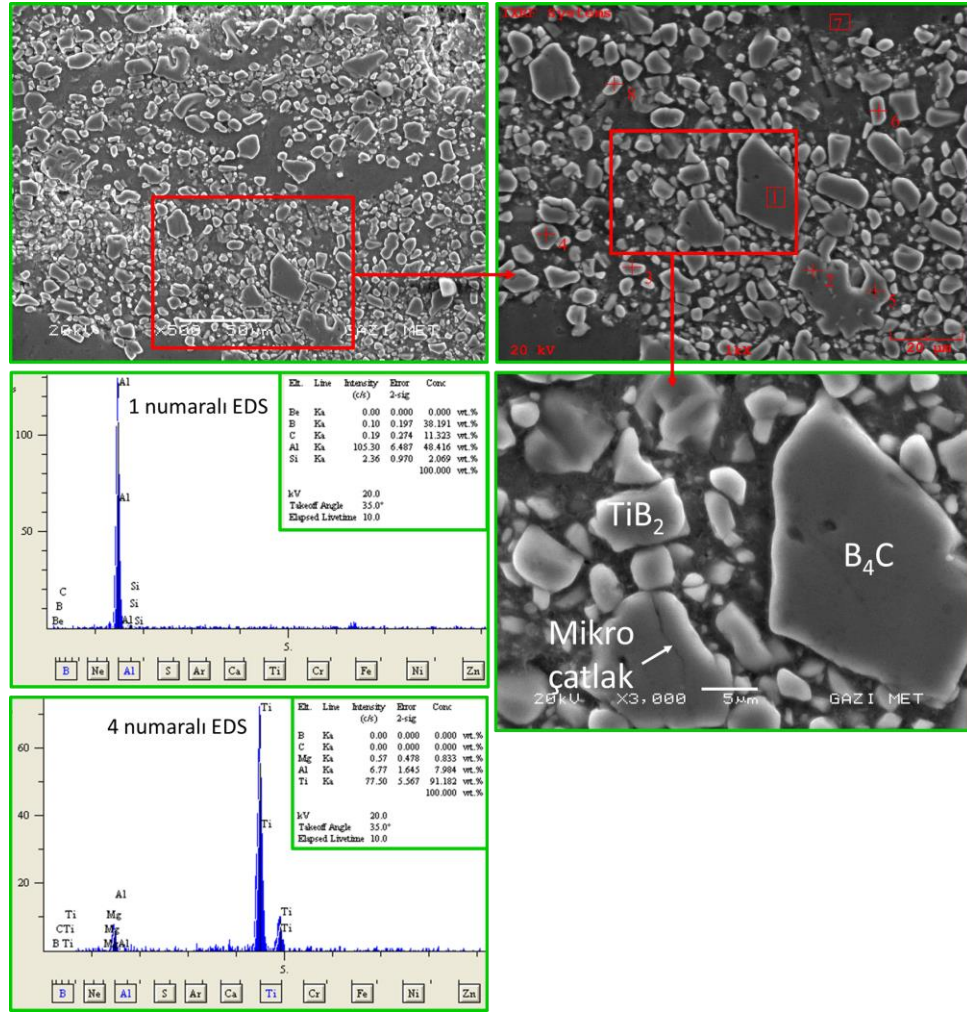
Şekil 15. Al6061 SKY malzemenin iki farklı bölgesinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri (SEM images and EDS analyzes taken from two different regions of Al6061 SKI material)

49.75% TiB₂/49.75% B₄C/0.5%GNL parçacık ilaveli yüzey kompozitin karıştırma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analiz sonucu Şekil 16'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde büyük ve koyu renkli duran parçacıkların B₄C olduğu daha açık renkli parçacıkların ise TiB₂ olduğu anlaşılmıştır. Karıştırma bölgesinde topaklanma ve etraflarında boşluk oluşumlarının meydana geldiği anlaşılmıştır. Yapı içerisinde aynı zamanda küçük ebatlarda grafen nano levhaların dağıldığı görülmüştür. TiB₂ parçacıkların Al alşımı ile çevrelendiği B₄C parçacıkların ise etrafında boşlukların oluştuğu görülmüştür. Bu durum B₄C takviye elemanının ıslatılabilirliğinin az olmasından kaynaklanmasından meydana gelmektedir [36].

49% TiB₂/49% B₄C/2%GNL parçacık ilaveli yüzey kompozitin karışım bölgesinden alınan farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde genel olarak parçacıkların homojen olarak dağıtıldığı tespit edilmiştir. Bu durum sürtünme karıştırma işlemi esnasında takım ile ana malzeme arasında kalan seramik parçacıkların ısı ve sürtünmenin etkisi ile dağıtılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca takım ile ve birbirleri ile temas eden sert kırılğan fazdaki seramik parçacıklarda çatlak ve kırılmaların meydana geldiği görülmüştür (Şekil 17).



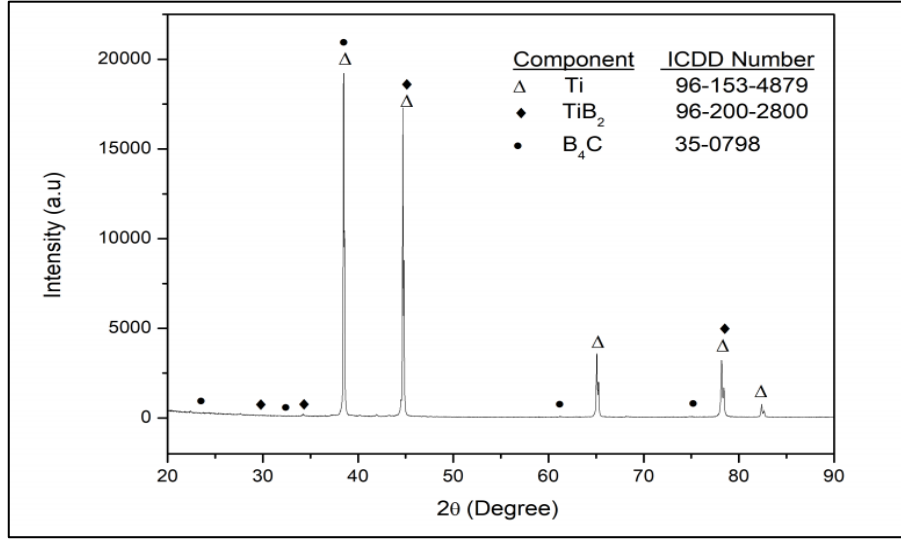
Şekil 16. N6 nolu malzemenin karıştırma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analizleri (SEM image and EDS analysis taken from the mixing zone of N6 material)



Şekil 17. N7 malzemenin karıştırma bölgesinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri (SEM images and EDS analyzes taken from the mixing zone of N7 material)

XRD analizlerindeki fazların varlığı ilave metallerin ana faz içindeki dağılımını kanıtladı. Xrd sonuçları, mikroyapı analizleri için destek sağladı. Yapılan analizler sonucunda Al un ilave metaller içindeki elementlerle tepkime vermesine yetecek bir

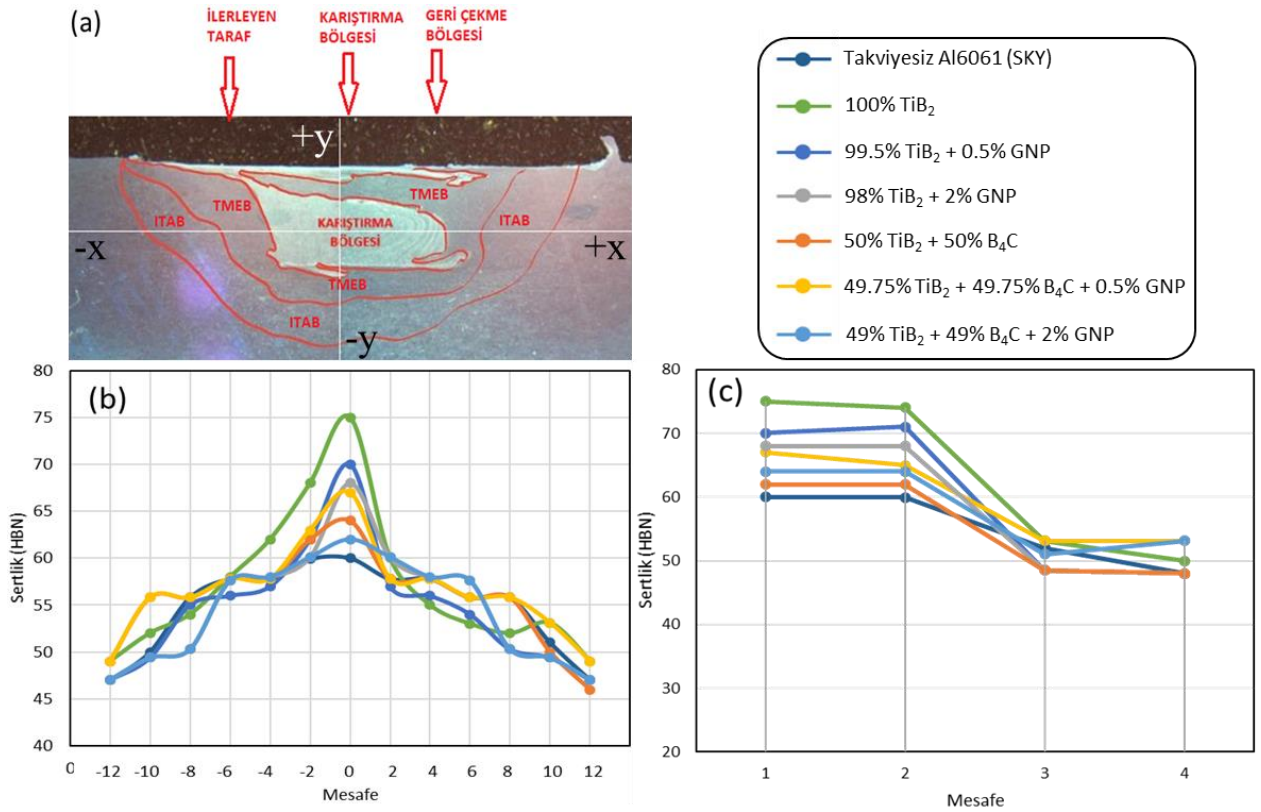
aktivasyon enerji oluşmadığı görüldü. Analizde sadece eklenen ilave metaller tespit edildi (Şekil 18). Amir ve arkadaşları da farklı bir Al alaşımlı matris ve farklı bir ilave metalle yaptığı çalışmada benzer sonuca ulaşmıştır [37].



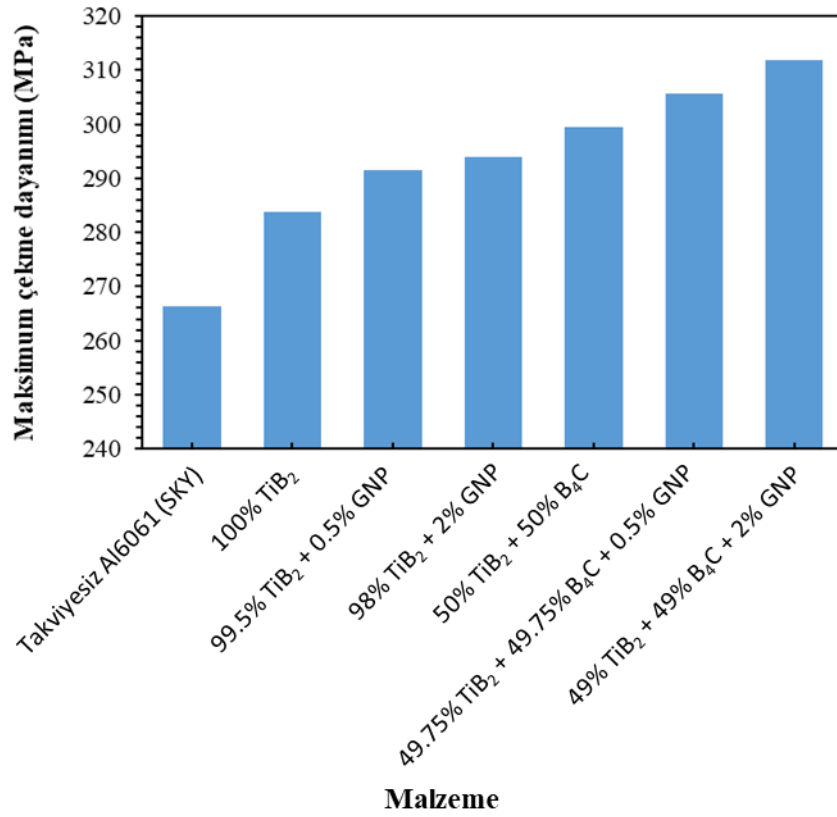
Şekil 18. N7 nolu %49B₄C/%49TiB₂/%2GNL içerek hibrit yüzey kompozitinin XRD analiz sonucu (XRD analysis result of hybrid surface composite number N7 containing 49%B₄C/49%TiB₂/2% GNP)

Sertlik değeri +x/-x ve +y/-y doğrultularında 2d mesafesinde ölçüldü. Üretilen yüzey kompozitlerden ölçülen sertlik değerlerinde en yüksek sonuçlar karışım bölgesinde elde edildi. Karışım bölgesinden ana metale doğru gidildikçe ölçülen sertlik değerinde azalma gözlemlendi. Sertlik testi yapılan numunelerin sonuç grafiği Şekil 19'de verildi. Tüm malzemeler içindeki en yüksek sertlik değerine %100 TiB₂ takviyeli yüzey kompozitinde ulaşılırken en düşük değer takviyesiz AL6061 plakada ölçüldü. Şimşek yaptığı çalışmada Al-grafit matrisine tek çeşit ilave metal ekleyerek benzer sonuçlara ulaşmıştır [38]. Singh ve Pall benzer şekilde yaptığı çalışmada ilave metal ile SKY yoluyla üretilen bir kompozitin sertlik değerinde saf matrise oranla ciddi bir artış gözlemlenmiştir [39]. İlave toz karışımlarla sertlik değerinde elde edilen artışın öncelikli nedeni tane küçülmesi ve dislokasyon yoğunluğudur. Ek olarak takviye parçacıklarının varlığı sebebiyle orowan çevrimi, parçacıklar ve matris arasındaki termal genişleme farkı, parçacıklar ve matris arasındaki gerinim uyumsuzluğundan kaynaklanan deformasyon sertleşmesi mekanizmaları devreye girerek dislokasyon yoğunluğunda artışa sebep olarak sertlik değerlerini arttırır [40]. Çekme

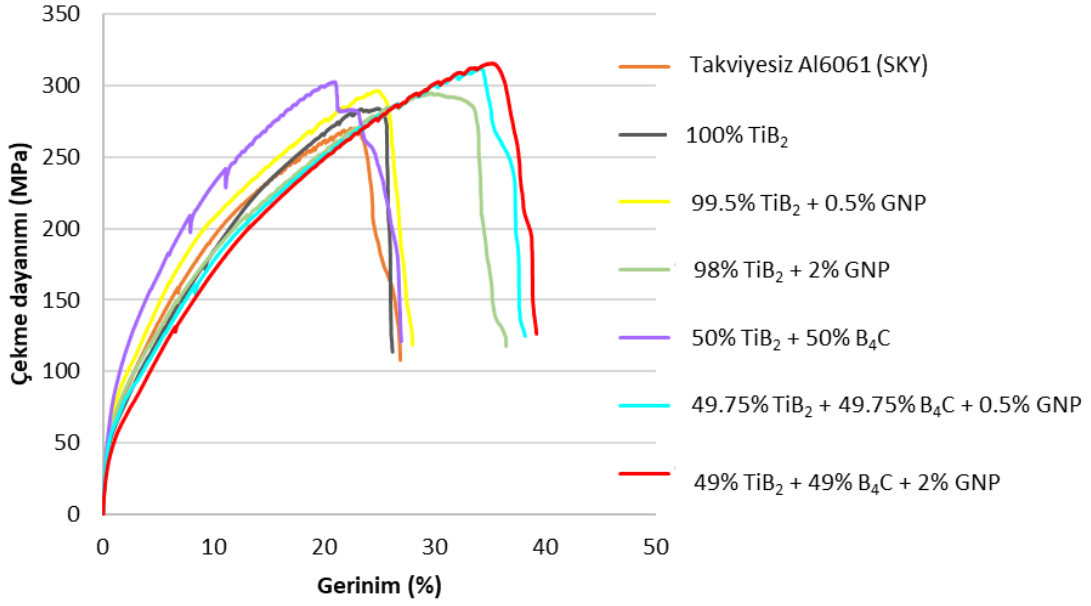
dayanımı sonuçları incelendiğinde en düşük dayanım takviyesiz AL6061 alaşımında tespit edildi. En yüksek dayanım ise %49 TiB₂ + %49 B₄C + %2 GNL tozlarıyla oluşturulmuş yüzey kompozit malzemede görüldü (Şekil 20-21). Yüzey kompozitlerde sertliğin yüksek olduğu %100 TiB₂ ilavesinde çekme dayanımı düşük olurken B₄C ve GNL ilavesine bağlı olarak çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Bu durum hibrit parçacık ilaveli kompozitlerin mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermektedir. Benzer bir çalışmada Senthilnathan ve Balachandar TiB₂-B₄C ilaveli Al esaslı tekli ve hibrit kompozit malzemelerde ikili olan (TiB₂-B₄C) ilavesinin çekme dayanımını iyileştirdiğini rapor etmişlerdir [41]. Essam ve arkadaşları SKY ile ürettikleri grafen nano levha ilaveli yüzey kompozitlerde GNL ilavesinin çekme dayanımını iyileştirdiğini göstermişlerdir [42]. Dayanım sonuçları ve mikroskopik görüntülerde çekme testi sonrası kopan numunede ilave edilen toz parçacıklarının herhangi bir tarafta kalmadığı, tozların malzeme içerisinde kırılarak homojen olarak dağıldığı görüldü. İlave tozların malzeme çekme dayanımı üzerinde artırıcı etki yaptığı görüldü. Çekme sonrası kopan malzemelerin makro resimleri Şekil 22'de verildi.



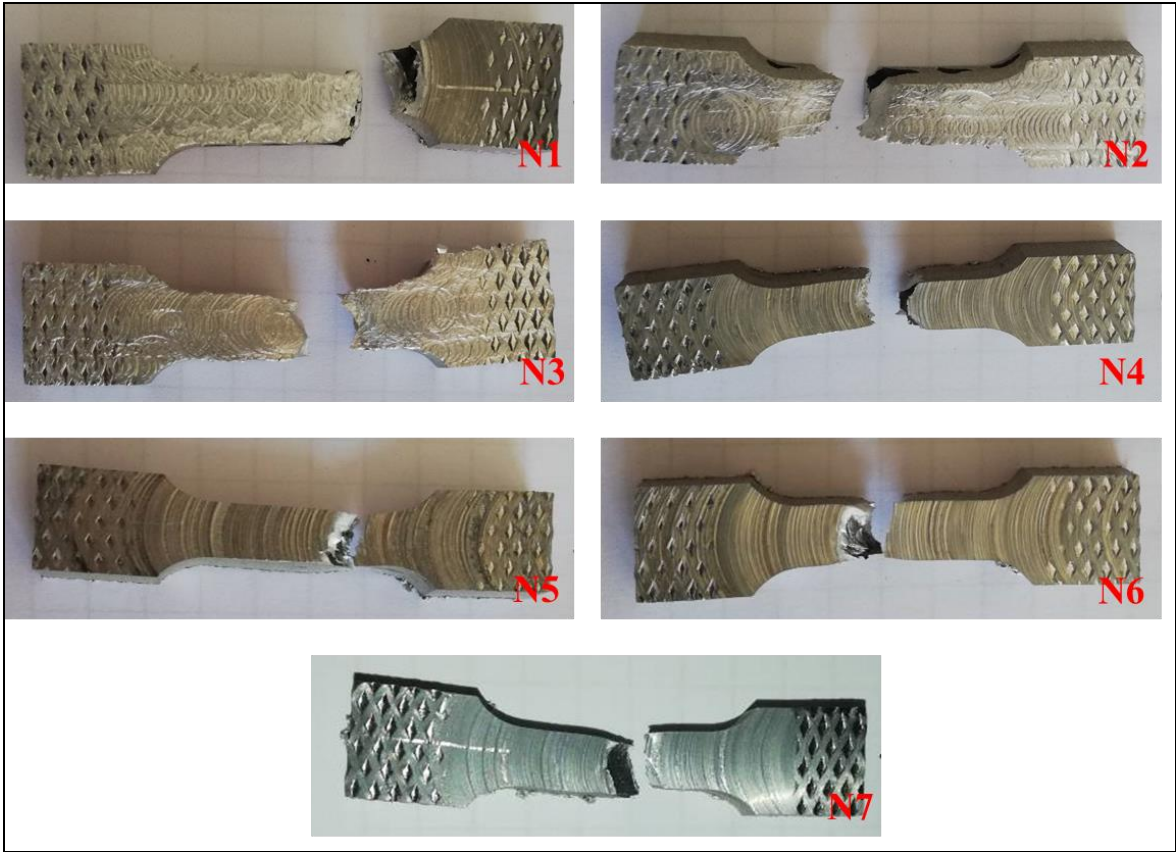
Şekil 19. a) Sertlik alınan noktaların yan kesitte gösterimi b) yatak (+x/-x) alınan sertlik değerleri grafiği c) dikey alınan sertlik değerleri grafiği (a) Side section representation of hardness points b) bed (+x/-x) hardness values graph c) vertical hardness values graph



Şekil 20. Çekme testi sonuçları grafiği (Tensile test results chart)



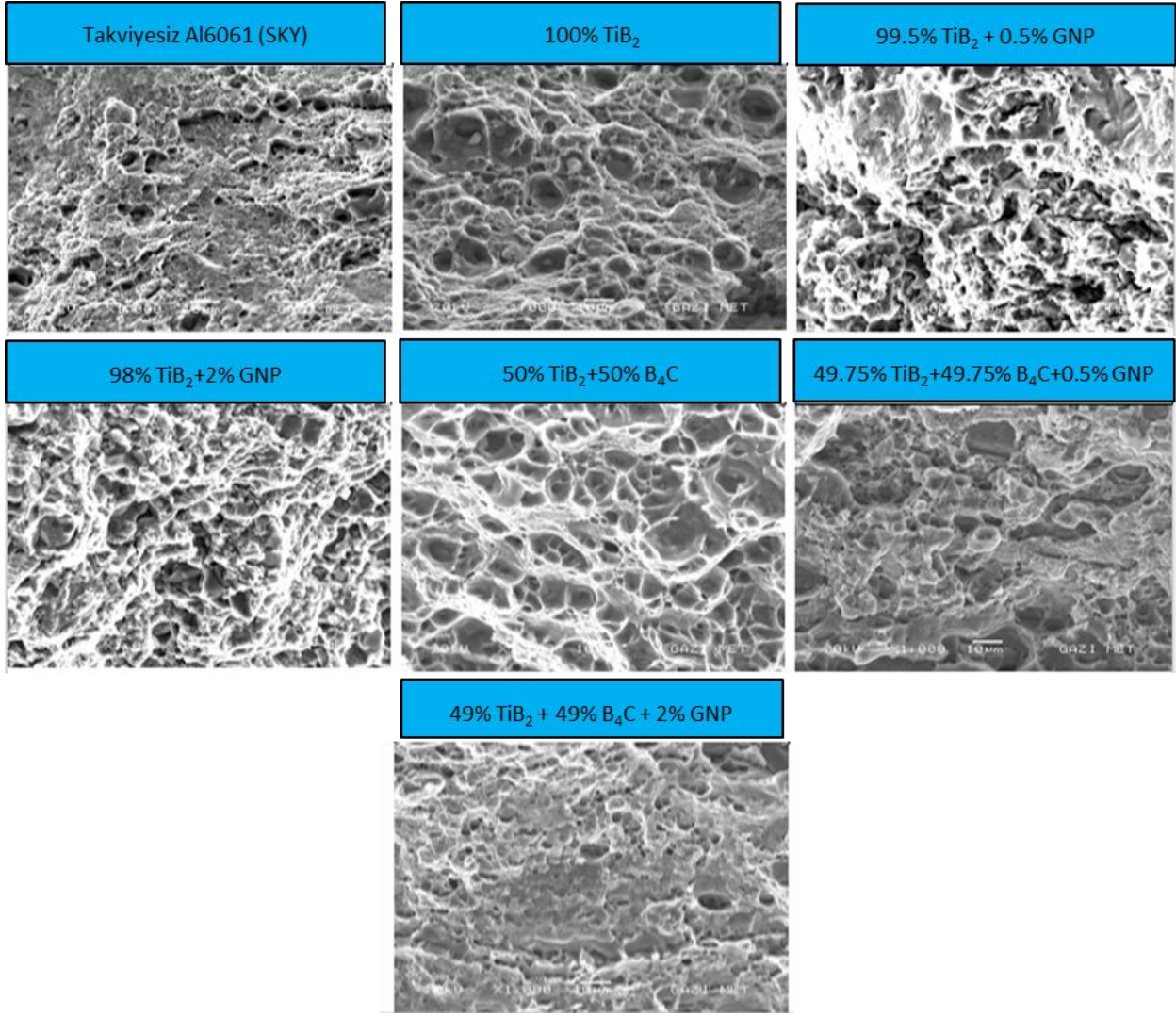
Şekil 21. Tüm malzemelerin ortak gerilim-gerinim grafiği (stress-strain graph of all materials)



Şekil 22. Çekme testi yapılan numunelerin test sonrası görüntüsü (Post-test image of tensile tested samples)

SKY ile üretilen yüzey kompozitlerin çekme testi sonrası kırık yüzey görüntüleri Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) alınarak Şekil 23'de olduğu gibi verilmiştir. Al6061 malzemesinde karıştırma bölgesinde kırık yüzey görüntülerine bakıldığında sünme bölgeleri saptanmıştır. Bu ana malzemenin

sünme yapıda olmasından kaynaklı olabilir. Takviye elemanlı malzemenin çekme dayanımını artırıp malzeme daha gevrek bir hale getirdiği görülmüştür. Bu da kırık yüzey görüntülerine yansımış ve kırık yüzeylerde daha sığ ve geniş sünme bölgeleri oluşturmuştur.



Şekil 23. Yüzey kompozitlerinin kopma bölgelerinin SEM görüntüleri (SEM images of rupture zones of surface composites)

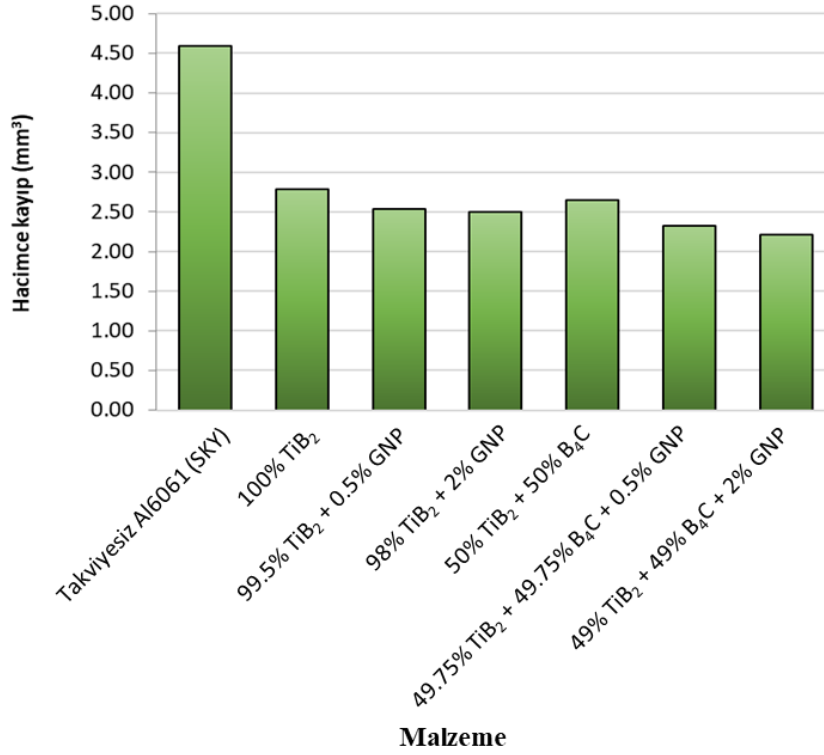
Numunelerin aşınma davranışları pin-on disk yüzeyinde, Hardox400 aşındırıcı çelik disk ile oda sıcaklığında, 1200 m mesafede, 1mm aşındırma hızı ve 191 rpm dönme hızında, malzemelerin 10N yük altında incelendi. Test öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları ölçüldü. Hacim kayıplarını gösteren grafik Şekil 24’de verilmiştir. En yüksek hacimce kayıp SKY ile kaplanan Al6061 malzemesinde 4.59 mm³ olarak görülürken en düşük hacimce kayıp ise 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL yüzey kompozitinde 2.21 mm³ olarak bulunmuştur. Al6061 SKY yüzey kompozitindeki aşınmadan sonra en fazla aşınma meydana gelen malzeme % 100 TiB₂ yüzey kompozit malzemesidir. % 100 TiB₂ ile 50% TiB₂ + 50% B₄C yüzey kompozitlerini birbiri ile kıyasladığımızda B₄C ilavesinin aşınma özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Al-B₄C kompozit malzemelerde B₄C parçacıklarının yüksek sertlikte olması ve yağlayıcı özellikte olması sebebi ile aşınma özelliklerini

iyileştirdiği bilinmektedir [43][44]. Şenel ve Demir ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada B₄C ilavesinin aşınma miktarını düşürdüğünü rapor etmişlerdir [45]. 0.5 ve 2 oranında GNL ilavesini kıyasladığımızda, GNL miktarının artması ile birlikte hacimce kayıpların azaldığı görülmüştür. GNL’lar Al alaşımı içerisinde çok iyi yağlayıcı özelliğe sahip olduklarından aşınma özelliklerini iyileştirmişlerdir. Başka bir çalışmada yazarlar GNL ilavesi ile birlikte aşınma hacimce kayıpların azaldığını rapor etmişlerdir [46].

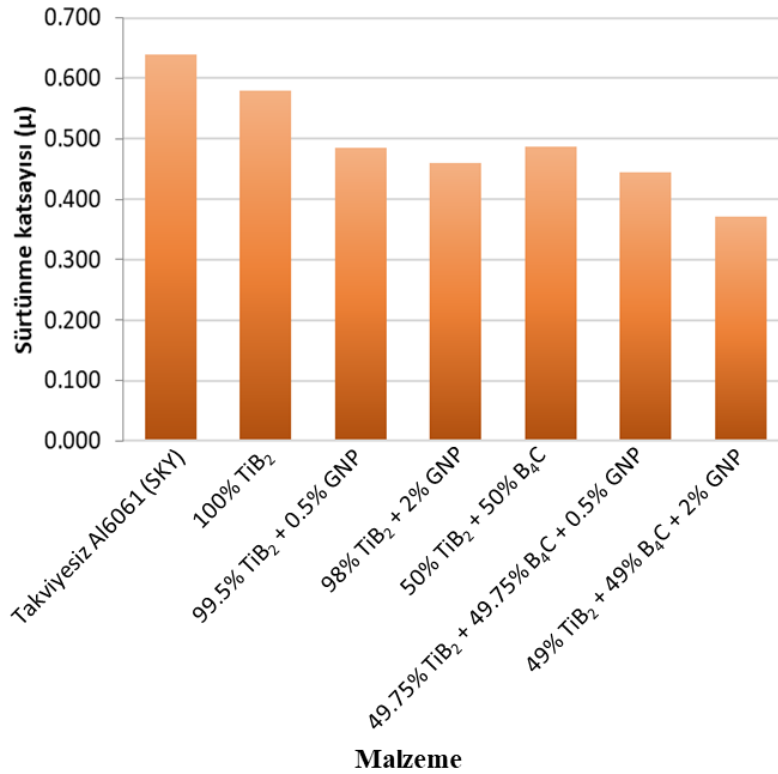
Aşınma testleri sonrası elde edilen ortalama sürtünme katsayıları değeri incelendiğinde en yüksek aşınma katsayısı değeri SKY ile işlem görmüş Al6061 ana malzemesinde (0.64) meydana gelirken en düşük sürtünme katsayısı değeri SKY ile yüzeyi hibrit kaplanmış 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL Malzemesinde (0.37) olarak bulunmuştur (Şekil 25). Eşit şartlar altında yapılan aşınma testi

sonrası sürtünme katsayısı değeri B₄C ve GNL ilavesi ile düşmüştür. Bener çalışmalarında da B₄C ve

GNL ilavesi ile sürtünme katsayısında düşüş olduğu görülmüştür [47][48][49].



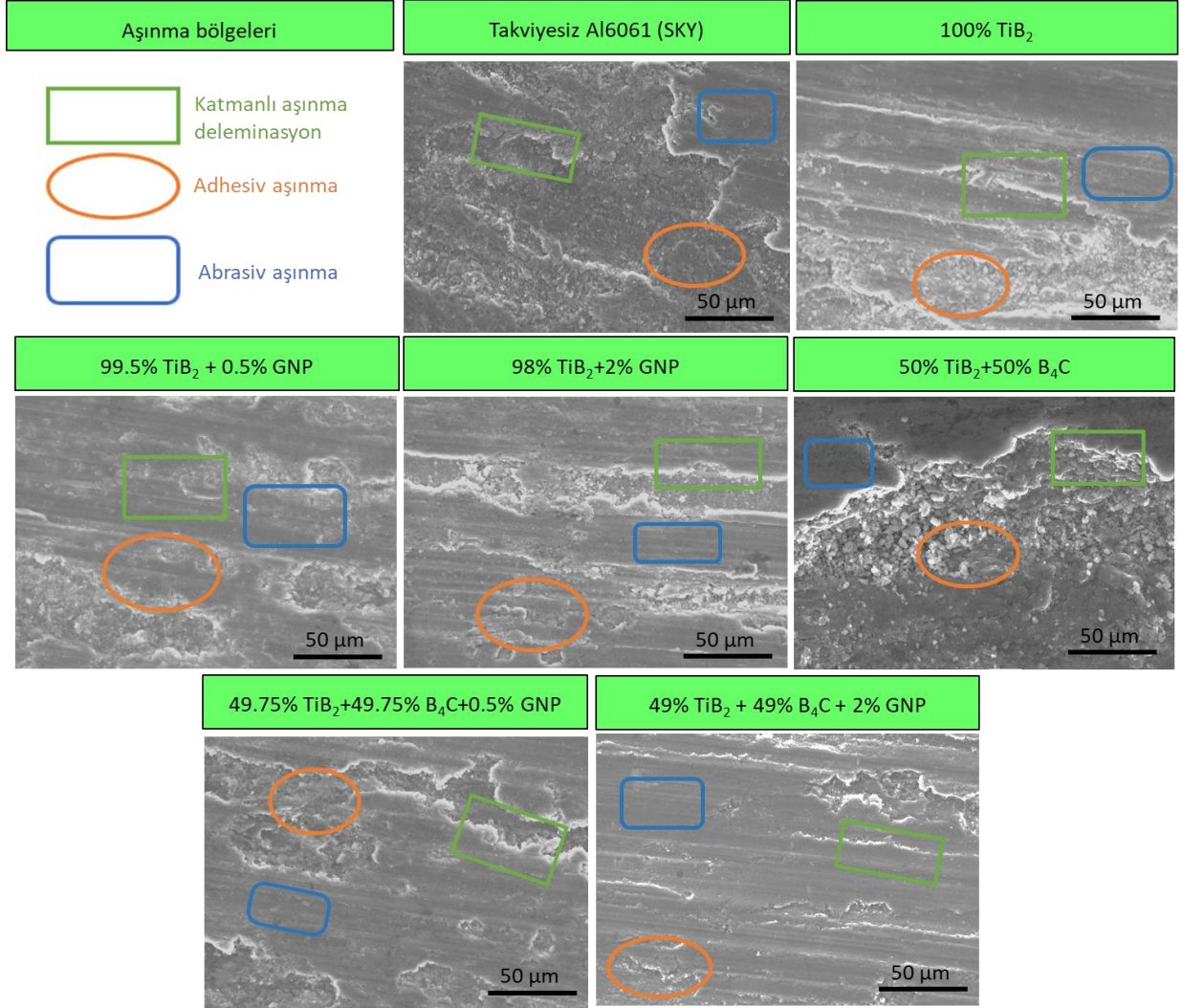
Şekil 24. Yüzey kompozitlerinin farklı yükler altındaki hacimce kayıpları (Volume losses of surface composites under different loads)



Şekil 25. Hibrit yüzey kompozitlerinin sürtünme katsayısı (Friction coefficient of hybrid surface composites)

Şekil 26'da SKY ile yapılan yüzey kompozit numunelerin aşınma davranışı sonrası aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri verildi. Bu resimlerde yeşil dikdörtgen şekli delaminasyon bölgesini, turuncu elips şekli adhezif aşınma bölgesini, mavi dikdörtgen ise abrasif aşınma

bölgesini göstermektedir. Aşınma yüzeyleri SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C ve GNL ilavesi ile birlikte aşınan yüzeylerde adhezif aşınma bölgesi ve delaminasyon bölgesi hacminde azalma, abrasif aşınma bölgesi hacminde artma meydana geldi.



Şekil 26. Al6061/TiB₂/B₄C/Nano grafen hibrit yüzey kompozitlerinin aşınma testi sonrası yüzeylerinin (SEM) görüntüleri ve aşınma davranışı türleri (Post-wear test (SEM) images and wear behavior types of Al6061/TiB₂/B₄C/Nano graphene hybrid surface composites)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Bu araştırmada, Al6061 alaşımına ek olarak B₄C, TiB₂ ve GNP hibrit parçacıkların ilave edilmesiyle elde edilen yüzey kompozitler, SKY adı verilen bir üretim yöntemiyle üretilmiştir. Elde edilen kompozit malzemelerin incelenmesi sonucunda şu bulgular elde edilmiştir:

- SKY işlemi sonrası incelenen numunelerde gözle görülür tek hata çapak oluşumu oldu. Çapaklar, yüksek basınç ve ısıyla

yumuşayan malzemenin işlem bölgesinin kenarlarında birikmesiyle meydana geldi.

- Ön deneylerde, düşük yükler altında yüzeylerde çapak oluşmazken, kesit incelendiğinde tünel kusurlarının meydana geldiği tespit edildi.
- SEM görüntüleri incelendiğinde, mikro yapıda Al6061 alaşımında meydana gelen Mg₂Si çökeltilerinin olduğu görüldü. EDS analizi ile Mg₂Si faz yapıları belirlendi ve

ana malzemede meydana gelen yassı halde duran Mg₂Si çökeltilerinin karıştırma bölgesinde daha ince ve küresel hale geldiği gözlemlendi.

- 49.75% TiB₂/49.75% B₄C/0.5% GNL parçacık ilaveli yüzey kompozitin karıştırma bölgesinde topaklanma ve etraflarında boşluk oluşumlarının meydana geldiği anlaşılmıştır. Yapı içerisinde aynı zamanda küçük ebatlarda grafen nano levhaların dağıldığı görülmüştür. TiB₂ parçacıkların Al alaşımı ile çevrelendiği B₄C parçacıkların ise etrafında boşlukların oluştuğu görülmüştür.
- 49% TiB₂/49% B₄C/2% GNL parçacık ilaveli yüzey kompozitin karışım bölgesinde parçacıkların homojen olarak dağıtıldığı tespit edilmiştir. Bu durum sürtünme karıştırma işlemi esnasında takım ile ana malzeme arasında kalan seramik parçacıkların ısı ve sürtünmenin etkisiyle dağıtılmasından kaynaklanmaktadır.
- XRD analizleri, ilave metallerin ana faz içinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Bu analizler, mikroyapı analizleri için önemli bir destek sağlamıştır. Ayrıca, yapılan analizler sonucunda Al'un ilave metaller içindeki elementlerle tepkime vermesine yetecek bir aktivasyon enerjisi oluşmadığı, sadece eklenen ilave metallerin tespit edildiği görülmüştür.
- Elde edilen sonuçlara göre, üretilen yüzey kompozitlerinde en yüksek sertlik değerleri karışım bölgesinde tespit edildi. Tüm malzemeler arasında, en yüksek sertlik değeri %100 TiB₂ takviyeli yüzey kompozitinde elde edilirken, en düşük değer takviyesiz AL6061 plakada ölçüldü.
- Çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde, en düşük dayanım takviyesiz AL6061 alaşımında (266 MPa) tespit edildi. En yüksek dayanım ise %49 TiB₂ + %49 B₄C + %2 GNL tozlarıyla oluşturulmuş yüzey kompozit malzemede görüldü (312 MPa).
- Yüzey kompozitlerinde sertliğin yüksek olduğu %100 TiB₂ ilavesinde çekme dayanımı düşük olurken, B₄C ve GNL ilavesine bağlı olarak çekme dayanımının arttığı gözlemlendi.
- Dayanım sonuçları ve mikroskopik görüntülerde, çekme testi sonrası kopan numunelerde ilave edilen toz parçacıklarının herhangi bir tarafta kalmadığı, tozların malzeme içerisinde kırılarak homojen olarak dağıldığı gözlemlendi.

- En yüksek hacimce kayıp, SKY ile kaplanan Al6061 malzemesinde 4.59 mm³ olarak kaydedilirken, en düşük hacimce kayıp 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL yüzey kompozitinde 2.21 mm³ olarak belirlendi.
- Al6061 SKY yüzey kompozitindeki aşınmadan sonra en fazla aşınma meydana gelen malzeme %100 TiB₂ yüzey kompozit malzemesidir. %100 TiB₂ ile 50% TiB₂ + 50% B₄C yüzey kompozitlerini kıyasladığımızda, B₄C ilavesinin aşınma özelliklerini iyileştirdiği gözlemlendi.
- 0.5 ve 2 oranında GNL ilavesini karşılaştırdığımızda, GNL miktarının artması ile birlikte hacimce kayıpların azaldığı görülmüştür. GNL'lar Al alaşımı içerisinde çok iyi yağlayıcı özelliğe sahip olduklarından aşınma özelliklerini iyileştirmişlerdir.
- Aşınma testleri sonrası elde edilen ortalama sürtünme katsayıları değerleri incelendiğinde, en yüksek aşınma katsayısı değeri SKY ile işlem görmüş Al6061 ana malzemesinde (0.64) gözlenirken, en düşük sürtünme katsayısı değeri SKY ile yüzeyi hibrit kaplanmış 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL Malzemesinde (0.37) olarak belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi FYL-2022-7829 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir. / This study was supported by Gazi University Scientific Research Project numbered FYL-2022-7829.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Burcu ÇİLİNGİR: Deneyleri yapmış, verileri analiz etmiştir.

She conducted the experiments and analyzed the data.

Halil KARAKOÇ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Ramazan ÇITAK: Sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Z. Hao, Y. Ju, L. Chen, The Use of Aluminium and Magnesium Alloys in Automotive Lightweight Technologies, *J. Mech. Sci. Technol.* 37 (2023) 4615–4622. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0712-2>.
- [2] S. Thanikodi, A.S.F. Britto, V.S.N.C. Dattu, S. Al Obaid, S. Alfarraj, M.A. Kalam, Machining and mechanical characterization of friction stir processed (FSP) surface hybrid composites (AA8014 + TiB₂ + ZrO₂), *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12198-z>.
- [3] S.A. Kara, C. Özarpa, İ. Esen, H. Ahlatci, Y. Turen, Investigation of corrosion behavior of boron carbide reinforced AA7075 powder composites, *J. Alloys Compd.* 968 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172198>.
- [4] M.M. Jalilvand, Y. Mazaheri, A. Heidarpour, M. Roknian, Development of A356/Al₂O₃ + SiO₂ surface hybrid nanocomposite by friction stir processing, *Surf. Coatings Technol.* 360 (2019) 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.126>.
- [5] H. DOĞAN, Y. MUTLU, Production of AA2024-Matrix B4C-SiC- and B4C-Y₂O₃-Particle-Reinforced Composites by Powder Metallurgy and Investigation of Their Mechanical Properties, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilim. Derg.* 18 (2022) 321–330. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.1130031>.
- [6] A. Fathy, D. Ibrahim, O. Elkady, M. Hassan, Evaluation of mechanical properties of 1050-Al reinforced with SiC particles via accumulative roll bonding process, *J. Compos. Mater.* 53 (2019) 209–218. <https://doi.org/10.1177/0021998318781462>.
- [7] H. ARIK, Toz Metalurjisi Metoduyla Al-SiC Kompozit Malzeme Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* 7 (2019) 741–754. <https://doi.org/10.29109/gujsc.587637>.
- [8] P. Samal, P.R. Vundavilli, A. Meher, M.M. Mahapatra, Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties, *J. Manuf. Process.* 59 (2020) 131–152. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.010>.
- [9] L.F. Ali, R. Soundararajan, S. Jeyasurya, M. Kovarthanam, S.N. Prasath, Metallurgical assessment of AA7075 - T6 with x wt% tungsten carbide nanoparticle surface composites processed by FSP route, *Mater. Today Proc.* 45 (2021) 2152–2158. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.003>.
- [10] R. Dhayalan, K. Kalaiselvan, R. Sathiskumar, Characterization of AA6063/SiC-Gr surface composites produced by FSP technique, *Procedia Eng.* 97 (2014) 625–631. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.291>.
- [11] M.Z. Rahman, A.N. Siddiquee, Z.A. Khan, S. Ahmad, Multi-response optimization of FSP parameters on mechanical properties of surface composite, *Mater. Today Proc.* 62 (2022) 5–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.379>.
- [12] S. Li, M. Paidar, S. Liu, S. Mehrez, P.S. Kumar, V. Mohanavel, Importance of pin number on mechanical properties and wear performance during manufacturing of AL6061/316 surface composite via FSP, *Mater. Lett.* 326 (2022) 132919. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132919>.

- 9.
- [13] N. Kaya, C. Çetinkaya, H. Karakoç, H. Ada, Effect of process parameters of Al5083/SiC surface composites fabricated by FSP on microstructure, mechanical properties and wear behaviors, *Mater. Chem. Phys.* 315 (2024) 128991. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.128991>.
- [14] T. Thankachan, K.S. Prakash, V. Kavimani, Investigating the effects of hybrid reinforcement particles on the microstructural, mechanical and tribological properties of friction stir processed copper surface composites, *Compos. Part B Eng.* 174 (2019) 107057. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107057>.
- [15] M.A. Khan, R. Butola, N. Gupta, A review of nanoparticle reinforced surface composites processed by friction stir processing, *J. Adhes. Sci. Technol.* 37 (2023) 565–601. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2037054>.
- [16] C.N. Shyam Kumar, R. Bauri, D. Yadav, Wear properties of 5083 Al-W surface composite fabricated by friction stir processing, *Tribol. Int.* 101 (2016) 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.04.033>.
- [17] H. Mehdi, R.S. Mishra, Consequence of reinforced SiC particles on microstructural and mechanical properties of AL6061 surface composites by multi-pass FSP, *J. Adhes. Sci. Technol.* 36 (2022) 1279–1298. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1964846>.
- [18] W. Ma, M. Paidar, O.O. Ojo, S. Mehrez, A.M. Zain, A. Kulandaivel, V. Mohanavel, S. Kannan, Improving the wear resistance and mechanical properties of hybridized AZ80 Mg/CeO₂+ZrO₂ surface composite by friction stir processing: Effect of pin geometry, *Vacuum.* 212 (2023) 111980. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111980>.
- [19] L. Huang, M. Paidar, A. Mohd Zain, M.R.A. Refaai, S. Abdullaev, M. Šlapáková, Effect of processing environment during friction stir processing of AZ31/(ZrO₂+CuO)_p surface composite on the mechanical and tribological performance, *J. Mater. Res. Technol.* 28 (2024) 1891–1899. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.222>.
- [20] E.B. Moustafa, A. V. Mikhaylovskaya, M.A. Taha, A.O. Mosleh, Improvement of the microstructure and mechanical properties by hybridizing the surface of AA7075 by hexagonal boron nitride with carbide particles using the FSP process, *J. Mater. Res. Technol.* 17 (2022) 1986–1999. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.150>.
- [21] A. Sharma, D. Narsimhachary, V.M. Sharma, B. Sahoo, J. Paul, Surface modification of Al6061-SiC surface composite through impregnation of graphene, graphite & carbon nanotubes via FSP: A tribological study, *Surf. Coatings Technol.* 368 (2019) 175–191. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.001>.
- [22] Ö.B. Acımert, S. Murat, A.K. Dayauç, K. Tefvik, Farklı Pasolarda Uygulanmış Sürtünme Karıştırma Prosesinin Al- 5083 ' ün Tribolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi Investigation of the Effect of Friction Stir Process Performed in Different Passes on the Tribological Properties of Al-5083, (n.d.) 0–2.
- [23] S. Bharti, N.D. Ghetiya, K.M. Patel, A review on manufacturing the surface composites by friction stir processing, *Mater. Manuf. Process.* 36 (2021) 135–170. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1813897>.
- [24] H. Gökmeşe, H.B. KARADAĞ, Toz Metal AA 2014-SiC-B4C Kompozit/Hibrit Malzemelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* (2018) 385–398. <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.364857>.
- [25] M. Narimani, B. Lotfi, Z. Sadeghian, Evaluation of the microstructure and wear behaviour of AA6063-B4C/TiB₂ mono and hybrid composite layers produced by friction stir processing, *Surf. Coatings Technol.* 285 (2016) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.11.015>.

- [26] M. Patel, J. Murugesan, Fretting Wear and Corrosion Behaviour of an Al–ZrO₂/Ni Hybrid Composite Developed by Friction Stir Processing, *Trans. Indian Inst. Met.* 75 (2022) 1525–1534. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02527-3>.
- [27] Karakoca, Y. E., & AYTAÇ, A. (2022). Investigation of Drillability of CFRP/Al 7075 Stack. *Mechanics*, 28(6), 430-438. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.31038>
- [28] B. Basu, G.B. Raju, A.K. Suri, Processing and properties of monolithic TiB₂ based materials, *Int. Mater. Rev.* 51 (2006) 352–374. <https://doi.org/10.1179/174328006X102529>
- [29] Z.L. Chao, Z.W. Wang, L.T. Jiang, S.P. Chen, B.J. Pang, R.W. Zhang, S.Q. Du, G.Q. Chen, Q. Zhang, G.H. Wu, Microstructure and mechanical properties of B₄C/2024Al functionally gradient composites, *Mater. Des.* 215 (2022) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110449>.
- [30] O. ALTUNTAŞ, Taguchi Based Gray Relational Analysis of Production Parameters of Al7075/B₄C/GNP's Hybrid Composites, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* 11 (2023) 850–856. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1348957>.
- [31] P. Cataldi, A. Athanassiou, I.S. Bayer, Graphene nanoplatelets-based advanced materials and recent progress in sustainable applications, *Appl. Sci.* 8 (2018). <https://doi.org/10.3390/app8091438>.
- [32] O. Altuntas, M. Ozer, G. Altuntas, A. Ozer, Investigation of the microstructure, hardness and electrical conductivity properties of Fe/Graphene compacts, *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*. 39 (2023) 2670–2679. <https://doi.org/10.1080/02670836.2023.2213554>.
- [33] S.K. Patel, V.P. Singh, B.S. Roy, B. Kuriachen, Recent research progresses in Al-7075 based in-situ surface composite fabrication through friction stir processing: A review, *Mater. Sci. Eng. B.* 262 (2020) 114708. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114708>
- [34] A. Kumar, V. Kumar, A review of recent progress in the fabrication of surface composites through friction stir processing, *Mater. Today Proc.* 63 (2022) 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.648>
- [35] R.K. Arya, R. Kumar, A. Telang, A.S. Yadav, Effect of Microstructure on Mechanical Behaviors of Al6061 Metal Matrix Composite Reinforced with Silicon Nitride (Si₃N₄) and Silicon Carbide (SiC) Micro Particles, *Silicon*. 15 (2023) 5911–5923. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02468-6>.
- [36] R.F. Guo, S.M. Chen, P. Shen, Influence of Si, Ti, and Cu as alloying elements on the wettability and reactivity of an Al/B₄C system, *J. Mater. Res. Technol.* 27 (2023) 6104–6116. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.058>.
- [37] A. Jamali, S.E. Mirsalehi, Investigation on effects of traverse speed and number of passes on mechanical and abrasive properties of AA7075-T6/ZrO₂ surface nanocomposite produced using friction stir processing, *Weld. World.* 66 (2022) 2297–2313. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01331-3>.
- [38] İ. ŞİMŞEK, The Effect of B₄C Amount on Wear Behaviors of Al-Graphite/B₄C Hybrid Composites Produced by Mechanical Alloying, *J. Boron.* 4 (2019) 100–106. <https://doi.org/10.30728/boron.556707>.
- [39] S. Singh, K. Pal, Effect of texture evolution on mechanical and damping properties of SiC/ZnAl₂O₄/Al composite through friction stir processing, *J. Mater. Res. Technol.* 8 (2019) 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.07.006>.
- [40] V. Sharma, U. Prakash, B.V.M. Kumar, Surface composites by friction stir processing: A review, *J. Mater. Process. Technol.* 224 (2015) 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.019>.
- [41] T. Senthilnathan, K. Balachandar, Mechanical and microstructure evaluation of novel hybrid TiB₂/B₄C aluminium metal matrix composite, *Mater. Res. Express.* 10 (2023). <https://doi.org/10.1088/2053->

- 1591/acda18.
- [42] E.B. Moustafa, A. Melaibari, G. Alsuruji, A.M. Khalil, A.O. Mosleh, Al 5251-based hybrid nanocomposite by FSP reinforced with graphene nanoplates and boron nitride nanoparticles: Microstructure, wear, and mechanical characterization, *Nanotechnol. Rev.* 10 (2021) 1752–1765. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0108>.
- [43] M. Çelebi, A. Çanakçı, O. Güler, S. Özkaya, A.H. Karabacak, K.A. Arpacı, Investigation of Microstructure, Hardness and Wear Properties of Hybrid Nanocomposites with Al2024 Matrix and Low Contents of B4C and h-BN Nanoparticles Produced by Mechanical Milling Assisted Hot Pressing, *Jom.* 74 (2022) 4449–4461. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05441-7>.
- [44] I. Şahin, A. Bektaş, F. Gül, H. Çinici, Modeling of wear behavior of Al/B4C composites produced by powder metallurgy, *Mater. Test.* 59 (2017) 491–496. <https://doi.org/10.3139/120.111028>.
- [45] M.C. Şenel, M. DemİR, Effect of Induction Heat Treatment Process and Graphene/B4C Amount on the Tribological and Mechanical Properties of Al6061 Hybrid Composites, *Jom.* 75 (2023) 2554–2568. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05790-x>.
- [46] N.F.B. Wakhi Anuar, M.S. Salleh, M.Z. Omar, W.F.H.W. Zamri, A. Md Ali, S. Samat, Wear properties of graphene-reinforced aluminium metal matrix composite: A review, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 62 (2023). <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0326>.
- [47] R. Harichandran, N. Selvakumar, Effect of nano/micro B4C particles on the mechanical properties of aluminium metal matrix composites fabricated by ultrasonic cavitation-assisted solidification process, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 16 (2016) 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.07.001>.
- [48] S. Rengifo, C. Zhang, S. Harimkar, B. Boesl, A. Agarwal, Tribological Behavior of Spark Plasma Sintered Aluminum-Graphene Composites at Room and Elevated Temperatures, *Technologies.* 5 (2017) 4. <https://doi.org/10.3390/technologies5010004>.
- [49] H. min Xia, L. Zhang, Y. chao Zhu, N. Li, Y. qi Sun, J. dong Zhang, H. zhong Ma, Mechanical properties of graphene nanoplatelets reinforced 7075 aluminum alloy composite fabricated by spark plasma sintering, *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 27 (2020) 1295–1300. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2009-0>.