



Yüksek Fırın Cürufu Takviyeli Epoksi Kompozitin Kuru Kayma Davranışının İncelenmesi

Azmi ERDOĞAN*

Bartın Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bartın

aerdogan@bartin.edu.tr ORCID: 0000-0001-8337-7919, Tel: (378) 501 10 00 (1569)

Geliş: 22.11.2018, Kabul Tarihi: 14.02.2019

Öz

Bu çalışmada yüksek fırın cürufu partiküllerinin epoksi matris içine katılarak oluşturulan polimer matrisli kompozitin aşınma dayanımına etkisi araştırılmıştır. Karşılaştırma yapmak amacıyla yüksek fırın cürufu takviyeli kompozit yanında Al_2O_3 katkılı epoksi matrisli kompozitler üretilmiştir. Takviye edici partikül olarak 61 μm , 91 μm ve 125 μm boyutunda yüksek fırın cürufu ve Al_2O_3 tozları, %30 oranında epoksi reçine içine karıştırılmıştır. Oda sıcaklığında 36 saat kürleme işlemine bırakılan numuneler ball-on disk aşınma cihazında aşınma işlemine tabi tutulmuştur. 10N, 15N ve 20N yükler altında 300 m aşınma işlemi uygulanan numunelerde yüksek fırın cürufu katkılı kompozitin Al_2O_3 katkılı kompozitle kıyaslanarak aşınma ve sürtünme davranışı incelenmiştir. Aşınma yüzeylerinde meydana gelen hacim kayıpları ve muhtemel aşınma mekanizmaları SEM mikroskobu ile incelenmiştir. Aşınma testleri sonucunda özellikle düşük yüklerde olmak üzere tüm yükler altında yüksek fırın cürufu takviyeli kompozitin aşınma kayıpları Al_2O_3 'e oranla daha düşük çıkmıştır. Artan yüke bağlı olarak kompozitlerin aşınma dayanımları arasındaki fark azalmıştır. Artan yüke bağlı olarak batıcı uçun numune üstünde oluşturduğu kuvvetlerin artması, tüm numunelerde aşınma hacim kayıplarını artırmıştır. Takviye edici partikül boyutunun artması matris-partikül tutunmasını zayıflattığı ve daha az alanda var olduğu için kompozitlerin aşınma dayanımında düşüşe sebep olmuştur. Yüksek fırın cürufu takviyeli kompozitlerde baskın aşınma türü olarak plastik deformasyon görülürken, Al_2O_3 takviyeli kompozitlerde yüzey altı yorulması aşınma mekanizması baskın olarak görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Epoksi, Yüksek fırın cürufu, Kompozit, Aşınma, Sürtünme

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Polimer matrisli kompozitler, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli, otomobil, havacılık ve ev aletleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilen gelişmiş malzemelerdir (Suresha vd., 2009; Pattanik vd., 2016). Hareketli ve sürtünen parçalarda farklı tribolojik uygulamaların gereksinimleri nedeniyle polimer bazlı parçaların önemi gittikçe artmaktadır (Shivamurthy vd., 2013; Lin vd., 2018). Polimerler nispeten kolay üretim proseslerine ancak düşük ısı direnç ve dayanıklılığa sahiptirler. Seramikler ise yüksek ısı dirence, aşınma direncine ve mukavemete, ancak düşük kırılma tokluğu ve daha karmaşık üretim süreçlerine sahiptirler. Bu iki mühendislik malzemesinin bir arada kullanılmasıyla üretilen polimer matrisli kompozitlerde yüksek dayanım ve kırılma tokluğu elde edilebilir (Kanchanamai vd., 2011).

Polimer matrisli kompozitler, yüksek aşınma direncine bağlı olarak endüstriyel tesislerde aşınmaya maruz kalan parçalarda yaygın kullanılan önemli bir kompozit sınıfıdır (Sudheer, 2016). Polimerler düşük yoğunluklu olmaları sebebiyle ağırlığa duyarlı uygulamalar için en uygun malzemelerdir, ancak yüksek maliyetleri bazen ticari uygulamalar için sınırlayıcı faktör haline gelir. Bu nedenle, düşük maliyetli, kolayca bulunabilen dolgu maddelerinin kullanımı, kompozitin maliyetini düşürmek açısından faydalıdır (Kranthi ve Satapathy, 2010).

Yaygın ve ticari olarak kullanılan kompozitler genel olarak matris malzemesi olarak polimer kullanılır ve çoğunlukla reçine çözeltisi olarak bilinirler. Matris türü olarak çeşitli polimer malzemesler mevcuttur ve yaygın olarak kullanılan polimerler epoksi, üretan, poliamid, polyester, polieter eter keton (PEEK) vs.'dir. Kullanılan takviye edici tipleri genellikle lifler, partiküller ve öğütülmüş minerallerdir (Hanumantharaya vd., 2018).

Wu ve diğerleri (Wu vd., 2017) ZrB₂ katkı epoksi kompozitin tribolojik özelliklerini incelemiştir. ZrB₂ partiküllerinin eklenmesi nedeniyle termal iletkenlikteki artışın, sürtünme koşullarında aşınma direncine katkıda bulunduğunu ve artan ZrB₂ partikül miktarı ile sürtünme katsayısı (CoF) ve aşınma katsayısının önemli ölçüde azaldığını belirlemiştir. Başka bir çalışmada Kurahatti ve diğerleri (Kurahatti vd., 2014) nano boyutlu ZrO₂ takviyesinin epoksi kompozitin aşınma dayanımına etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Deneysel çalışmalarda düşük ZrO₂ takviyesi oranlarında bile sürtünme katsayısının ve aşınma oranının düştüğü belirtilmiştir. Xing ve Li (Xing ve Li, 2014) mikron altı boyutlara sahip küresel silika partikül ile takviye edilmiş epoksi kompozitin aşınma davranışını araştırmışlardır. Düşük oranlarda bile partikül katılan numunelerde aşınma direncinde artış meydana geldiği ve artan partikül oranı ile daha da arttığı belirtilmiştir. Bununla beraber düşük boyutlu partikül takviyesinin, yüksek boyutlu partikül takviyesine oranla aşınma dayanımını arttırmada daha etkili olduğu da belirlenmiştir. Bu çalışmalarla birlikte birçok çalışmada uçucu kül (Shahapurkar vd., 2018), cam fiber (Kumar vd., 2017), karbon fiber (Sudarshan vd., 2015), bor karbür (Madhanagopal ve Gopalakannan, 2018), Al₂O₃ (Bazrgari vd., 2018) gibi takviye edici partiküllerin polimer matrisli kompozitlerin aşınma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Her geçen gün artan demir çelik üretimi sebebiyle yüksek miktarlarda cüruf ortaya çıkmakta ve hem üreticiler hem de çevre açısından sorun teşkil etmektedir. Bu noktadan hareketle bu çalışmada, sert seramik içerikli bileşenleri olduğu bilinen yüksek fırın cürufunu (YFC) değerlendirmek adına, takviye edici olarak epoksi matris içinde kullanılabilirliği aşınma davranışı üzerinde araştırılmıştır.

Materyal ve Yöntem

EP100 epoksi reçinesi ve EP385H sertleştirici, ticari olarak temin edilmiştir. Epoksi reçine

matris olarak seçilmiştir ve takviye edici olarak 61 μm , 91 μm ve 125 μm boyutlarında Al_2O_3 ve yüksek fırın cürufu tozları (Tablo 1) kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerde takviye edici oranı %30 olarak sabit tutulmuştur ve homojen bir karışım elde edilene kadar epoksi

ve takviye edici tozlar karıştırılmıştır. Sertleştirici, karışım sırasında ilave edilmiştir ve işlem sonunda karışım silikon kalıba dökülmüştür. Numuneler daha sonra oda sıcaklığında 36 saat süresince kürlleme işlemine bırakılmıştır.

Tablo 1. Al_2O_3 ve yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.

TOZLAR	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CAO	MGO	Cr_2O_3	Mn_2O_3	DİĞER
Al_2O_3	-	98.51	0.41	-	0.21	0.05	0.02	0.8
YFC	39.99	10.51	3.49	31.55	5.95	0,02	3.55	4,94

Numunelerin kuru kayma aşınma davranışı ball on disk aşınma cihazı ile test edilmiştir. Ball olarak yüksek sertliğe sahip Al_2O_3 bilya (6mm çapında) kullanılmıştır. Aşınma testleri için numuneler 30 mm x 7 mm x 6 mm boyutlarında işlenmiştir. Numune yüzeyleri testlerden önce 600 ve 1000 Mesh'lik SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Aşınma işleminden önce numuneler ve bilya aseton ile ıslatılmış yumuşak kağıt ile silinmiştir. Aşınma testi 10, 15 ve 20N yükler altında, 300 rpm hızında ve 300m mesafede yapılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Şekil 1'de numunelerde meydana gelen hacim kayıpları verilmiştir. Görüleceği üzere tüm yüklerde yüksek fırın cürufu ile takviye edilen kompozitlerin aşınma dirençleri Al_2O_3 ile takviye edilen numunelerden daha yüksek çıkmıştır. YFC takviyeli kompozitlerin tüm yükler için ortalama olarak; 61 μm partikül takviyeli kompozitlerde %21.6, 91 μm partikül takviyeli kompozitlerde %19.1, 125 μm partikül takviyeli kompozitlerde %20.6 oranında daha az aşınma kaybı gösterdiği belirlenmiştir. Ancak özellikle düşük yüklerde yüksek fırın cürufu ile takviye edilen kompozitlerin hacim kayıpları Al_2O_3 ile takviye edilen numunelere oranla çok daha düşüktür. Bunun sebebi olarak; kırılmalı bir yapıya sahip olan yüksek fırın cürufunun yüksek yük altında kırılarak keskin köşeli birçok partiküle ayrılması ve matrinden ayrılan bu partiküllerin aşındırıcı top önünde abrasif aşındırıcı gibi davranarak aşınmaya katkı sağlaması gösterilebilir.

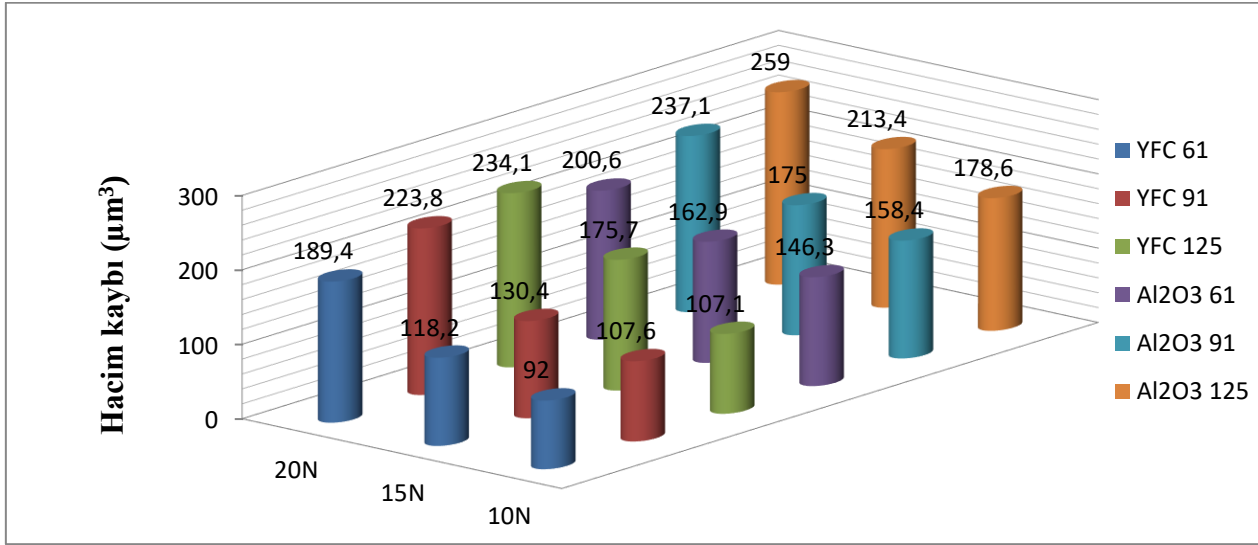
Artan yük ile birlikte numunelerin hacim kayıpları artmıştır. Çünkü aşınma esnasında iki kuvvet aşınma kayıplarına etki etmektedir. Bunlardan birisi bilyanın karşı yüzeye batmasına etki eden kuvvet iken diğeri ise kesme kuvvetidir. Yükün artması ile aşındırıcı bilyanın karşı yüzeye penetrasyonu artmıştır. Dolayısıyla aşındırıcı bilyanın nispi hareketi sırasında etkilenecek malzeme miktarı da artmıştır. Sonuç olarak yeterli kesme kuvveti oluşması durumunda bilya karşı yüzeyden daha fazla kütleyi transfer eder.

Her iki kompozit türünde de artan takviye edici partikül boyutu ile aşınma kayıplarında artış meydana gelmiştir. Düşük boyuttaki takviye edici partiküller matris içinde daha fazla noktada daha homojen dağılmıştır. Aşındırıcı uç; bu durumda daha fazla noktada yük taşıyıcı takviye edici partikül ile karşılaşacağı için matrise nüfuz etmesi zorlaşacak ve düşük boyutlu takviye edici partikül malzemenin aşınma direncine daha fazla katkıda bulunacaktır. Ayrıca düşük boyutlu partiküllerin matris içinde tutunması da daha fazla olacaktır. Bu da aşınma kayıplarının azalmasına yardımcı olacaktır.

Numunelerin 15N yük altındaki sürtünme katsayısı grafikleri (Şekil 2) incelendiğinde Al_2O_3 ve yüksek fırın cürufu ile takviye edilen numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Ancak az da olsa yüksek fırın cürufu ile takviyeli kompozitin sürtünme katsayısının düşük olduğu görülmüştür. Numunelerin SEM aşınma izi görüntüleri incelenecek olursa Al_2O_3 ile

takviyeli kompozitlerin yüzeyinin daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Bu pürüzlülüğün sürtünme katsayısının yükselmesinde sebep olduğu söylenebilir. İlk 0-10 metrelik mesafede sürtünme katsayısında ani bir artış meydana gelmiş ve bundan sonra stabil olarak devam etmiştir. Dolayısıyla ilk 5m'lik yol diliminde numune yüzeyindeki pürüzler kırılarak daha düzgün bir yüzey oluşmuş ancak aşınmaya bağlı

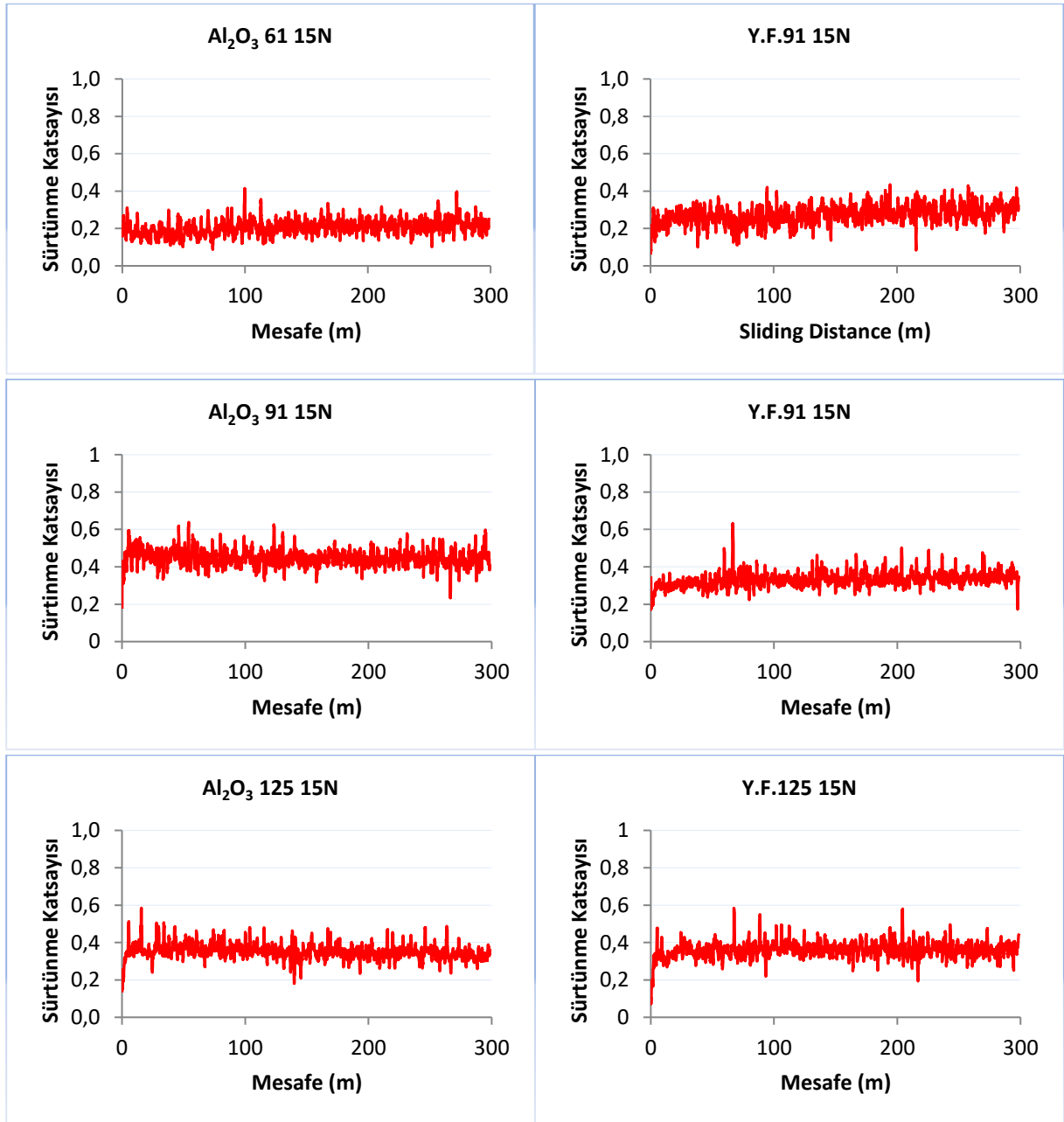
yüzeyde meydana gelen pürüzlenmeler veya aşınma atığı partiküller grafikte dalgalanmalara sebep olmuştur. Takviye edici tane boyutunun artmasıyla aşınma hacim kaybının arttığı daha önce belirtilmiştir. Dolayısıyla iz genişliğinin artması ile birlikte aşındırıcı top ile karşı yüzey arasında temas alanının artması sürtünme katsayısının yükselmesinde etken olmuştur.



Şekil 1. Al₂O₃ ve Yüksek fırın cürufu takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde meydana aşınma kayıpları.

Şekil 3a-f'de 15N yük altında farklı takviye edici boyutlarındaki kompozit numunelerin SEM aşınma izi görüntüleri verilmiştir. Düşük büyütmelelerdeki aşınma izi görüntüleri incelendiğinde yüksek fırın cürufu ile takviye edilen numunelerin aşınma izlerinin daha pürüzsüz olduğu dikkat çekmektedir. Bununla beraber daha yüksek büyütmelelerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde aşınma tipinin polimer kompozitlerde sık olarak görülen yüzey altı yorulma mekanizması ve plastik deformasyon mekanizması olduğu söylenebilir. Okla gösterilen kayma yönünde matris

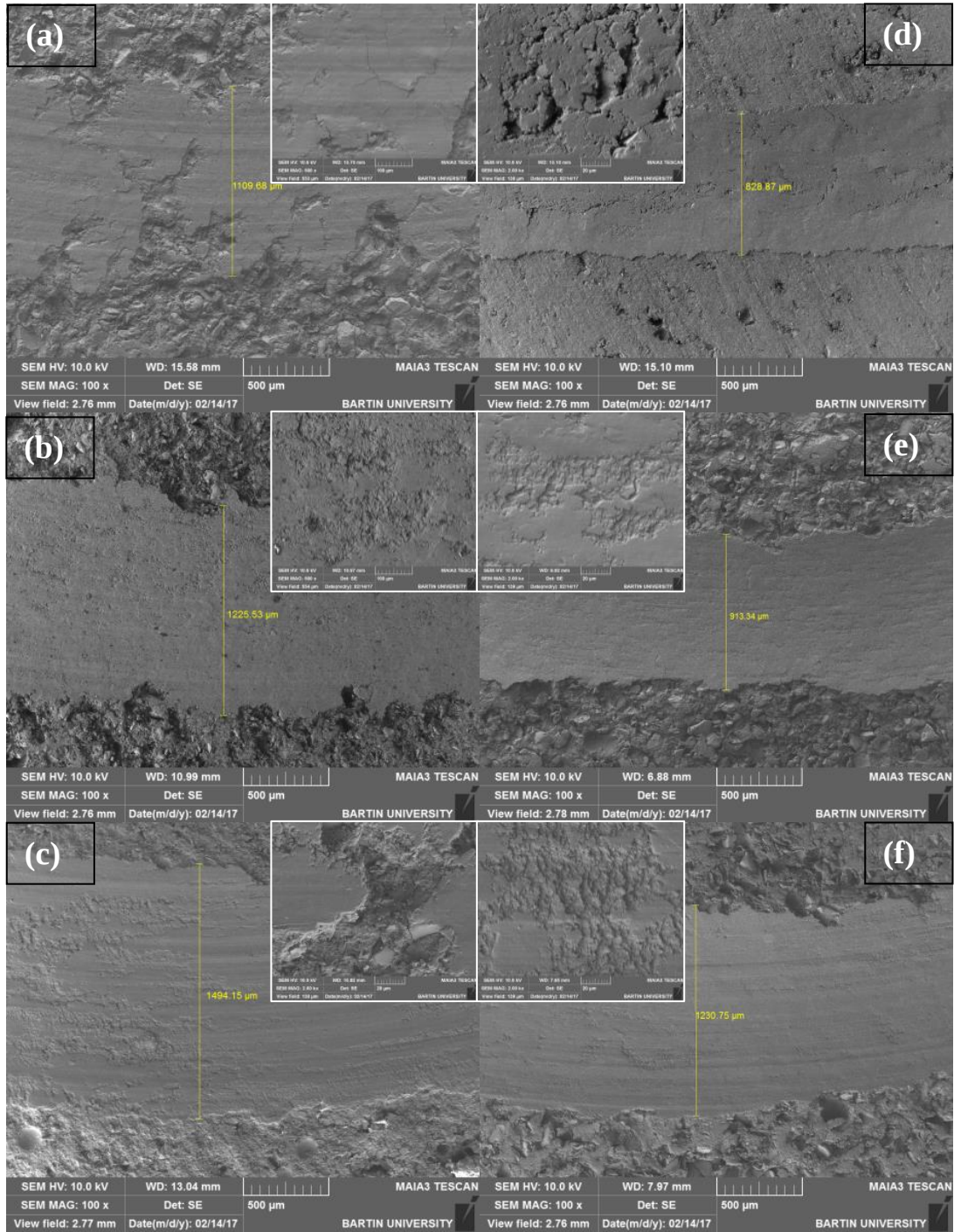
malzemenin plastik akışı olduğu görülebilir. Uygulanan yükün artmasıyla, sürtünmeye bağlı ısı oluşumundan dolayı polimerik reçinenin yumuşaması ve keskin kenarlara sahip olan cüruf parçacıkları, matrisi kolayca yırtıp yavaş yavaş kayma doğrultusu boyunca matrise zarar vermişlerdir. Kompozitlerin aşınma davranışı bu takviye edici partiküllerin boyutlarından, şekillerinden ve orta sertliklerinden dolayı değişir. 61 µm takviyeli kompozitte plastik deformasyon mekanizması ile birlikte yüksek gerilmeye bağlı olarak polimer matriste yırtılmalar yüksek büyütmelelerde görülmüştür.



Şekil 2. 15N yük altında yapılan aşınma testlerinde elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri.

Yorulma genellikle yüksek miktarlarda malzeme ayrılması ve dolayısıyla düşük aşınma direnci ile ilişkilidir. Üretilen Al_2O_3 takviyeli kompozitler için bu mekanizma daha belirgindir. Epoksi matris içindeki Al_2O_3 dağılımının, polimerik matrisin deformasyonunu sınırladığı ve bunun sonucu olarak, aşınma izi alt yüzeyinde deformasyonun birikme eğiliminde olduğu söylenebilir. Yorulma aşınmasında bu sebeple

hacim kayıpları daha yüksek oranlarda görülmektedir. Ayrıca 125 μm Al_2O_3 takviyeli kompozitte yüksek büyütmelerde görülen hasarın partikül çevresinde olduğu görülmektedir. Yüksek takviye edici partikül boyutu sebebiyle bazı noktalarda matris partikülü tutmakta zorlanmış ve ayrıca aşındırıcı bilya ile takviye edici partikül arasında sıkışan polimer matris koparak aşınma artışına sebep olmuştur.



Şekil 3. 15N yük altında yapılan aşınma testlerinde elde edilen SEM aşınma izi görüntüleri. a,b,c sırasıyla 61, 91,125 µm Al_2O_3 takviyeli kompozit; d,e,f sırasıyla 61,91,125 µm yüksek fırın cürufu takviyeli kompozit.

Sonuçlar

Bu çalışmada yüksek fırın cürufunun epoksi matris içinde takviye edici olarak aşınma dayanımına etkisi belirlenmiş ve kompozit üretiminde takviye edici olarak kullanılabilirliği

araştırılmıştır. Bu amaçla farklı partikül boyutlarına sahip, %30 takviye oranında Al_2O_3 ve YFC takviyeli kompozit numuneler üretilmiş, ve ball on disk aşınma cihazında aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Araştırmanın sonucunda aşağıdaki sonuçlar belirlenmiştir.

- Yüksek fırın cürufu ile takviye edilen kompozitlerin aşınma dayanımları Al_2O_3 ile takviye edilen kompozitlere oranla her koşulda daha iyi çıkmıştır. Tüm yükler ve partikül boyutları için YFC takviyeli kompozitlerde ortalama %20,4 oranında daha az aşınma kaybı olduğu görülmüştür.
- Artan yüke bağlı olarak tüm numunelerin aşınma kayıpları artan kesme ve karşı yüzeye batma kuvvetleri sebebiyle artış göstermiştir.
- Artan takviye edici partikül boyutu her iki kompozit türünün aşınma kayıplarını arttırmıştır. Partikül boyutunun artması ile partiküllerin matrise tutunmaları azalmış ve aşındırıcı ucun daha az noktada yük taşıyıcı partikül ile karşılaşması sebebiyle aşınma artış göstermiştir.
- Hem Al_2O_3 hem de yüksek fırın cürufu takviyeli kompozitlerde yorulmaya bağlı yüzey bozulması ve plastik deformasyon aşınma mekanizmaları görülmüştür. Bununla beraber plastik deformasyon yüksek fırın cürufu takviyeli kompozitlerde baskın aşınma mekanizması iken Al_2O_3 takviyeli kompozitlerde yorulmaya bağlı yüzey hasarı baskın aşınma mekanizması belirlenmiştir.

Kaynaklar

- Bazrgari D., Moztaazadeh F., Sabbagh-Alvani A.A., Rasoulianboroujeni M., Tahriri M., Tayebi L., (2018). Mechanical properties and tribological performance of epoxy/ Al_2O_3 nanocomposite, *Ceramics International*, 44, 1220–1224.
- Hanumantharaya R, Vaishak N L, Suhas, Mahesh B Davanageri, Jaimon D Quadros, Premkumar B G, (2018). Mechanical and Tribological Wear Behavior of Epoxy Hybrid Composites, *Materials Today: Proceedings*, 5 7947–7953.
- Kanchanomai C., Noraphaiphaksa N., Mutoh Y., (2011). Wear characteristic of epoxy resin filled with crushed-silica particles, *Composites: Part B*, 42 1446–1452.
- Kranthi G., Satapathy A., (2010). Evaluation and prediction of wear response of pine wood dust filled epoxy composites using neural computation, *Computational Materials Science*, 49 609–614.
- Kumar S. T., Shivashankar G. S., Dhotey K., Singh J., (2017). Experimental study wear rate of glass fibre reinforced epoxy polymer composites filled with aluminium powder, *Materials Today: Proceedings*, 4, 10764–10768.
- Kurahatti R.V., Surendranathan A. O., Ramesh A.V. Kumar, Wadageri C. S., Auradi V., Kori S. A., (2014). Dry Sliding Wear behaviour of Epoxy reinforced with nano ZrO_2 Particles, *Procedia Materials Science*, 5 274 – 280.
- Lin Leyu, Alois K. S., (2018). The roles of rigid particles on the friction and wear behavior of short carbon fiber reinforced PBT hybrid materials in the absence of solid lubricants, *Tribology International*, 119 404–410.
- Madhanagopal A., Gopalakannan S., (2018). Dry slide wear behavior of boron carbide filled epoxy composites, *Materials Today: Proceedings* 5, 7289–7295.
- Pattanaik A., Satpathy M. P., (2016). Subash Chandra Mishra, Dry sliding wear behavior of epoxy fly ash composite with Taguchi optimization, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19, 710–716.
- Shahapurkar K., Chavan V. B., Doddamani M., Mohan Kumar G.C., (2018). Influence of surface modification on wear behavior of fly ash cenosphere/epoxy syntactic foam, *Wear*, 414–415 327–340.
- Shivamurthy B., Uday K. Bhat, S. (2013). Anandhan, Mechanical and sliding wear properties of multi-layered laminates from glass fabric/graphite/epoxy composites, *Materials and Design*, 44 136–143.
- Sudarshan Rao K., Varadarajan Y. S., Rajendra N., (2015). Erosive wear behaviour of carbon fiber-reinforced epoxy composite, *Materials Today: Proceedings*, 2, 2975 – 2983.
- Sudheer M., (2016). Evaluation of abrasive wear behavior of dual ceramic whisker reinforced epoxy composites, *Materials Discovery* 6, 17–27.
- Suresha B., Siddaramaiah, Kishore, Seetharamu S., Sampath Kumaran P., (2009). Investigations on the influence of graphite filler on dry sliding wear and abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites, *Wear*, 267 1405–1414.
- Wu Y., Yu Z., Liu X., (2017). Tribological performance of in-situ epoxy composites filled with micro-sized ZrB_2 particles, *Composites Part B*, 123, 148–153.
- Xing X.S., Li R.K.Y., (2004). Wear behavior of epoxy matrix composites filled with uniform sized sub-micron spherical silica particles, *Wear*, 256 21–26.

Investigation of Dry Sliding Behavior of Blast Furnace Slag Reinforced Epoxy Composite

Extended abstract

Polymer matrix composites are advanced materials that can be used in a variety of applications such as low density, high strength, automobile, aerospace and home appliances. Common and commercially used composites generally use polymers as matrix materials and are commonly known as resin solutions. Variety of polymer materials are available as a matrix type and the commonly used polymer matrix materials are epoxy, urethane, polyamide, polyester, polyether ether ketone (PEEK)... The reinforcement materials are generally fibers, particles and ground minerals.

Due to the increasing production of iron and steel, high levels of slag emerge and reveal problems for both producers and the environment. From this point of view, in order to evaluate the blast furnace slag (YFC), which is known to have hard ceramic components, its usability was investigated in terms of wear behavior in the epoxy matrix.

EP100 epoxy resin and EP385H hardener were commercially purchased. The epoxy resin was selected as matrix and Al_2O_3 and blast furnace slag dusts having 61 μm , 91 μm and 125 μm particle dimensions were used as reinforcement (Table 1). In produced composites the reinforcement ratio was kept constant at 30%. The epoxy and reinforcement powders were mixed until a homogeneous mixture was obtained. The curing agent was added during the mixing and at the end of the process the mixture was poured into the silicone mold. The samples were then allowed to cure for 36 hours at room temperature. Dry sliding wear behavior of samples was tested with ball on disc wear device.

The wear resistance of the composites that reinforced with blast furnace slag was higher at all conditions than the samples reinforced with Al_2O_3 . However, the volume losses of composites that

reinforced with blast furnace slag especially at low loads were much lower than the samples that reinforced with Al_2O_3 . It can be shown as a reason for this; that the blast furnace slag having a fragile structure was broken under high load and divided into many sharp edges and these particles contribute to abrasion by acting as abrasive material in front of the abrasive ball.

The volume losses of the samples increased with increasing load. Because two forces affect the wear losses during wear. One of them is the force that acting on the counter-surface of the ball, while the other is the shear force. The increment of the load increased the penetration of abrasive ball to the opposite surface. Therefore, the amount of material which was affected during the relative movement of the abrasive ball also increased. As a result, if sufficient shear force occurs, the ball will transfer more mass from counter-surface. In both types of composites, increasing reinforcement particle size caused to wear losses enhancement. Low size reinforcement particles are more homogeneously distributed in the matrix at more points. In this case abrasive ball will penetrate more difficultly into the matrix. Low-dimensional reinforcement particle will contribute to the wear resistance of the composite material. In addition, low-dimensional particles will more adhere to the matrix. This will help reduce wear losses.

Both Al_2O_3 and blast furnace slag reinforced composites showed fatigue related surface deterioration and plastic deformation wear mechanisms. However, plastic deformation was the dominant wear mechanism in blast furnace slag reinforced composites, while in Al_2O_3 reinforced composites fatigue-related surface damage wear mechanism was identified as dominant.

Keywords: Epoxy, Blast furnace slag, Composite, Wear, Friction