



Makale / Research Paper

NiAl Bazlı Malzemelerin Kuru Kayma Aşınmasının İncelenmesi

Hüseyin DEMİRTAŞ

Karabük Üniversitesi, TOBB TB Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü. 78050
Karabük/TÜRKİYE
hdemirtas@karabuk.edu.tr

Received/Geliş: 16.01.2020

Accepted/Kabul: 23.03.2020

Öz: Bu çalışmada farklı uygulamalarda alternatif malzeme olarak düşünülen ve bu amaçla üzerinde çalışılan NiAl intermetalik ve tok fazlar ile mukavemetlendirilmiş NiAl/Cr-Mo ve NiAl-Ti/Cr-Mo alaşımlarının çelik (AISI 52100) ve seramik (Al_2O_3) bilyelere karşı aşınma davranışları incelenmiştir. Deneysel numuneleri ark ergitme yöntemi ile üretilmiş ve ball on flat yöntemi ile kuru kayma koşullarında aşınma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular sertlik ölçümleri, SEM incelemeleri ve EDX analizleri ile irdelenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde çelik bilye kullanılan deneylerde belirlenen aşınma miktarının seramik bilyedekine göre ortalama yedi kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Farklı olarak Ti ilave edilmiş alaşımın seramik bilye ile yapılan aşınma deneyi sonucu aşınmanın çok daha geç olduğu ve ölçülen aşınma kaybı buna bağlı olarak düşük miktarda belirlenmiştir. Malzemeler arasında ise her iki aşındırıcı bilye türünde de en fazla aşınma kaybı NiAl intermetalikinde yaşanırken en düşük kayıplar NiAl-Ti/Cr-Mo alaşımında belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: NiAl; intermetalik; aşınma; sertlik.

Evaluation of Dry Sliding Wear Behavior of NiAl Base Materials

Abstract: In this study, the wear behaviour of NiAl intermetallic, NiAl/Cr-Mo pseudo-eutectic and NiAl-Ti/Cr-Mo alloys which is considered as alternative material in different applications were investigated. Wear tests were performed against steel (AISI 52100) and ceramic (Al_2O_3) balls. Test specimens were produced by arc melting method and abrasion tests were performed by ball on flat method under dry sliding conditions. Wear results were examined by hardness measurements, SEM investigations and EDX analyzes. As a result of the studies, it was found that the amount of abrasion loss determined in the experiments using steel balls was much higher than that of ceramic balls. Among the materials, the highest losses were seen in NiAl intermetallic in both abrasive balls, while the lowest losses were determined in Ti added pseudo-eutectic NiAl/Cr-Mo alloy.

Keywords: NiAl; intermetallic; wear; hardness.

1. Giriş

Atomca bire bir oranından oluşan nikel alüminid (NiAl) yüksek ergime sıcaklığı, termal iletkenlik, oksidasyon direnci ve düşük yoğunluk gibi çeşitli avantajlara sahiptir [1, 2]. Fakat oda sıcaklığında sahip olduğu düşük kırılma tokluğu ve sünekliliği tek fazlı NiAl intermetalikinin kütleli boyutta yapısal malzeme olarak kullanılmasını sınırlamaktadır [2, 3]. Bu olumsuzluğu gidermek için çözelti mukavemetlendirmesi, tek kristalli üretim, yönlü katılaştırma ve tokluğu yüksek ikincil faz takviyesi gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunların arasında özellikle Cr-Mo ilavesi ile yapıda tok ötektik yapılar oluşturma yöntemi en pratik ve en fazla üzerinde durulan yöntemlerin başında gelmektedir [2, 4-10].

NiAl'a ilave edilen at. % 34 Cr, ötektik yapı oluşturarak mekanik özellikleri geliştirebilmektedir [8, 11]. Fakat Mo katılarak oluşturdukları dört elementli ötektik benzeri yapının diğer üç elementlilerden daha iyi özellikler göstermesinden dolayı yapılan çalışmalarda genellikle NiAl/Cr-Mo şeklindeki yapılara yönelilmiştir [7, 10, 12]. Ayrıca bu alaşımları baz alarak yapıda Heusler ve Laves fazları gibi yeni çökelti oluşturarak mekanik özelliklerin geliştirilmesi üzerine de çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla tercih edilen alaşım elementleri ise Ti, Nb, Zr ve V gibi sıralanabilmektedir. Bunlar içerisinde Ti, alaşıma ilave edildiğinde yapıyı belirli bir şekilde modifiye etmesi ve mekanik özelliklerini geliştirmesi ile öne çıkmaktadır [9-13].

NiAl alaşımlarının mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış olmasına rağmen NiAl/Cr-Mo alaşımlarının aşınma davranışları üzerine yapılan çalışmalar sınırlı ve eksiktir [14–16]. Bu alaşımların NiAl'a göre tokluk ve mekanik özellikleri önemli derecede yüksek olduğu bilinmesine rağmen aşınma davranışı üzerindeki etkisi yeterince araştırılmamıştır. Bu hedef doğrultusunda hazırlanan çalışmada NiAl, NiAl/Cr-Mo ötektik benzeri yapı ve bu yapıyı modifiye edici olarak katılan Ti ile oluşan beşli alaşım şeklinde üç farklı alaşım oluşturmuş ve bu malzemelerin birlikte çalışabilecekleri rulman çeliği (AISI 52100) ve alümina seramik (Al_2O_3) bilye şeklinde iki farklı malzemeye karşı aşınma davranışları incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Temel alaşımların atomik olarak nominal kompozisyonları Ni50Al, 33Ni-33Al/28Cr-6Mo ve 33Ni-30Al-3Ti/28Cr-6Mo şeklinde belirlenmiştir. Alaşım oranları %99,9 saflıkta Ni, %99,99 saflıkta Al, %99,8 saflıkta Cr, %99,95 saflıkta Mo ve %99,9 saflıkta Ti tozları kullanılarak hazırlanmıştır. Homojen dağılım sağlanması için karıştırılan tozların tek eksenli pres ile çelik kalıp içerisine ve oda sıcaklığında sıkıştırılarak mekanik olarak paketlenmesi sağlanmıştır. Tablet haline gelen tozlar ark ergitme yöntemiyle su soğutmalı bakır pota üzerinde ve Ar atmosferinde 4 defa çevrilip tekrar tekrar ergitilerek homojen hale gelmiş bir alaşım şeklinde üretilmesi sağlanmıştır.

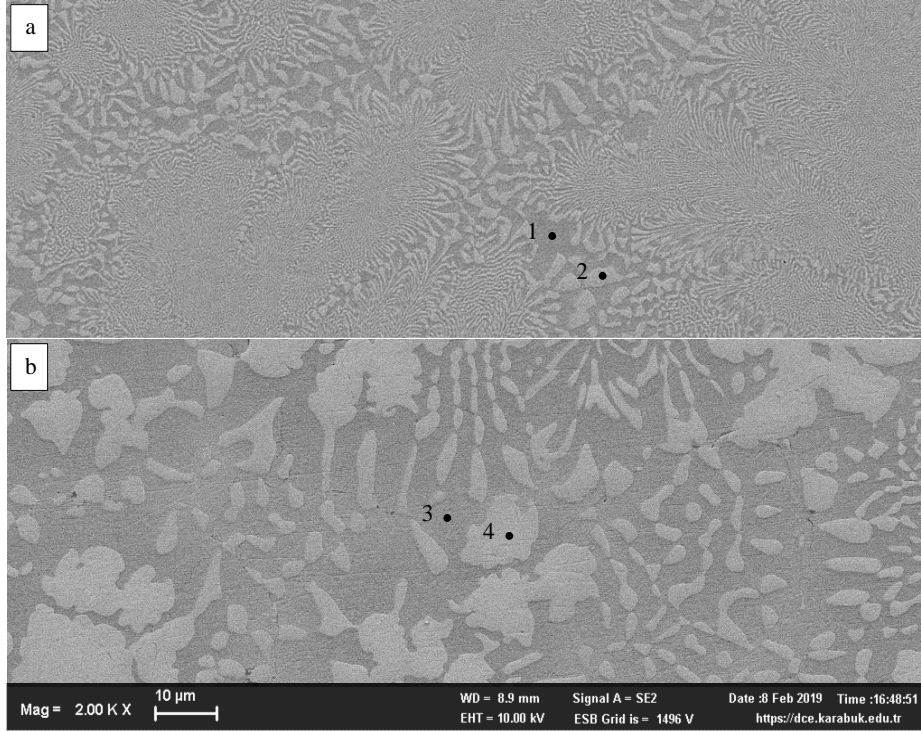
Hazırlanan numunelere ilk aşamada taşlama işlemi yapılarak yaklaşık 5mm derinliğe kadar kalınlığı azaltmış yüzey kusurlarından arındırılmıştır. Sonrasında bakalite alınıp kademeli olarak zımparalanmış ve 1 µm alümina süspansiyon kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri öncesinde yüzeyler 1 dakika süreyle Nital ile dağlanmıştır. Sertlik değerleri QNESS Q10 A+ mikro sertlik ölçüm cihazında Vicker yöntemiyle 500 g yükü 15 sn uygulayarak belirlenmiştir. Ölçüm noktaları özellikle farklı faz bölgelerine denk gelecek şekilde tercih edilmiş ve en az 10 ölçüm yapılarak ortalama değerleri verilmiştir. SEM incelemeleri ve EDX analizleri Carl Zeiss Ultra Plus Gemini (FESEM) cihazında gerçekleştirilmiştir.

Aşınma deneyleri UTS Tribometer T10 test cihazında lineer ball on flat yöntemiyle ASTM G133 standardına uygun olarak ileri-geri aşınma testi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yük seramik bilyedeki düşük aşınma değerlerinden dolayı 40 N olarak belirlenmiştir. Aşınma işlemi sabit bir hızda (0,02 m/s) 100 m boyunca ortam sıcaklık ve atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı bilye olarak 5 mm çapında Al_2O_3 seramik (800-1100 HV) ve AISI 52100 (700-900 HV) çelik bilyeler tercih edilmiştir. Test sonrası Mitutoyo SJ-410 cihazıyla 2 µm çaplı standart uç kullanılarak iki boyutlu aşınma iz profilleri çıkarılmıştır. Aşınma sonrası kayıp miktarı hesaplanırken ölçülen iz profillerine göre kesitteki ortalama aşınan alan belirlenmiş ve izin başlangıç ve bitişteki çeyrek küresel alanları gözetilerek aşınma mesafesine göre hacimce kayıp miktarları hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Üretilen deney numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 1'de ve EDX analiz değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu görüntülerde, tek fazlı bir yapı oluşturması ve mikroyapı görüntülerinin açıklayıcı

bir bilgi vermemesi dolayısı ile NiAl intermetalğine yer verilmemiştir. NiAl/Cr-Mo alaşımasının (Şekil 1.a) tamamen bir ötektik oluşturduğu ve mikroyapıda birincil NiAl fazının oluşmadığı görülmektedir. Bu görüntülerdeki açık renkli faz Cr(Mo) koyu renkli faz ise NiAl' u göstermektedir. Görüntülerden kısmen anlaşılan ve özellikle kaba fazların içerisinde bulunan diğer faza ait küçük çökeltiiler daha önceki çalışmalardan da bilinmektedir [17]. NiAl fazı içerisinde çökelen α -Cr' lar uyumlu bir arayüzey oluştururken Cr(Mo) fazında çökelen NiAl kaba olduğu durumda yarı uyumlu ince olduğu durumda ise uyumlu arayüzeyler oluşturmaktadır [18]. Bu çalışmada özellikle tane sınırlarına doğru kabalaşan fazlar içerisinde kaba çökeltilere rastlanmıştır. Ötektik havuzlarının merkezlerine doğru oldukça ince ve lamelli olan fazlar tane sınırlarına doğru kalınlaşmakta ve küreselleşmekte olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Üretilen deney numunelerinin mikroyapı görüntüleri a) NiAl/Cr-Mo, b) NiAl-Ti/Cr-Mo

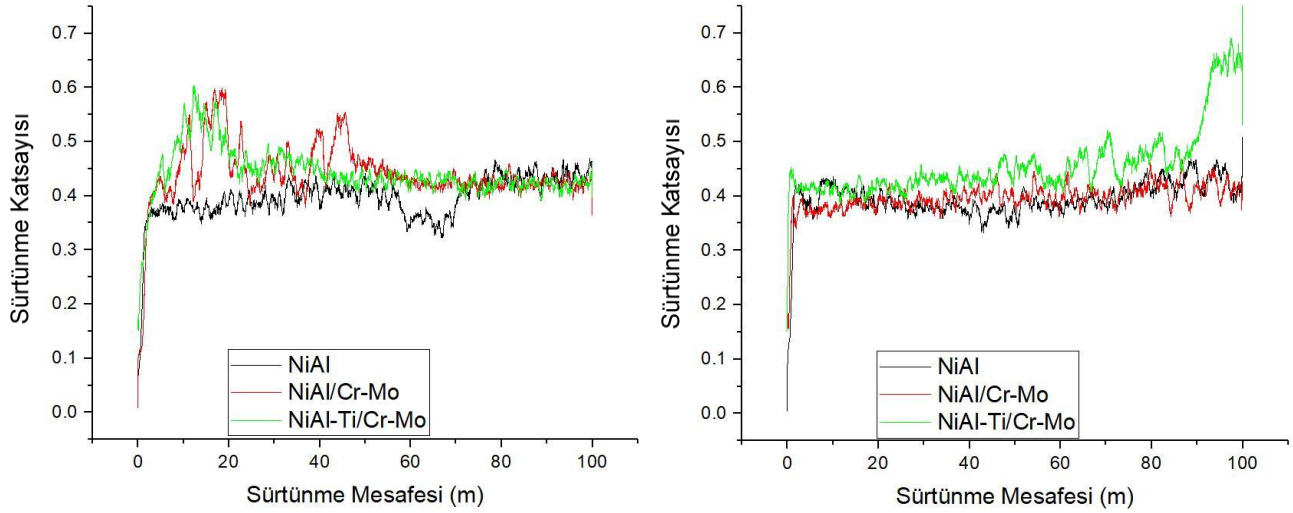
Şekil 1.b'de verilen görüntüde NiAl/Cr-Mo alaşımına yapılan Ti ilavesi ile lamelli ötektik yapının kısmen bozulduğu ve Cr-Mo içeren fazın küreselleşip irileştiği görülmektedir. Ayrıca içerisinde çökelen NiAl da büyümüştür. Buna sebep olan Ti ilavesinin mikroyapıda açıkça görülmeyen ince Ni_2AlTi Heusler fazıdır. Bu konuda yapılan daha önceki bir çalışmada NiAl/Cr-Mo alaşımına farklı oranlarda (at% 4-6) Ti katılmış ve yapıda oluşan bu faz ve etkisi gösterilmiştir [9]. Bu ilaveye bağlı olarak malzemede ötektik katılma yerini kısmen dentritik katılma bırakmıştır.

Tablo 1'de verilen EDX analiz değerlerine bakıldığında NiAl alaşımasının istenen değerlerde elementlerden oluştuğu (atomca yaklaşık 1:1) görülmektedir. Diğer alaşımlarda da öngörülen oranlar ölçülmüş ve fazların diğer alaşım elementlerini düşük miktarda barındırdığı belirlenmiştir. Ayrıca geniş bir stokiometrik aralıkta oluşabilen NiAl'un alaşım değerlerinin istenene yakın olduğunu gösteren bir diğer durum da sertlik ölçümleridir. Numunelerden ölçülen ortalama sertlik değerleri NiAl'de 322 HV olarak belirlenmiştir ve bu alaşımda 1:1 oranının değiştiği durumlarda sertliğin önemli ölçüde arttığı bilinmektedir [19]. Diğer üretilen alaşımların sertlik değerleri ise NiAl/Cr-Mo'de 569 HV ve Ti ilaveli alaşımda 622 HV olarak ölçülmüştür. Bu durumda en yüksek sertlik değerinin Ti ilaveli alaşımda elde edildiği görülmektedir ki yapılan bir diğer çalışmada NiAl/Cr-Mo alaşımına Ti ilavesinin sertliğin yanı sıra malzeme mukavemetini de arttırdığı belirlenmiştir [9].

Tablo 1. Ölçülen ortalama nokta EDX değerleri (atomca %)

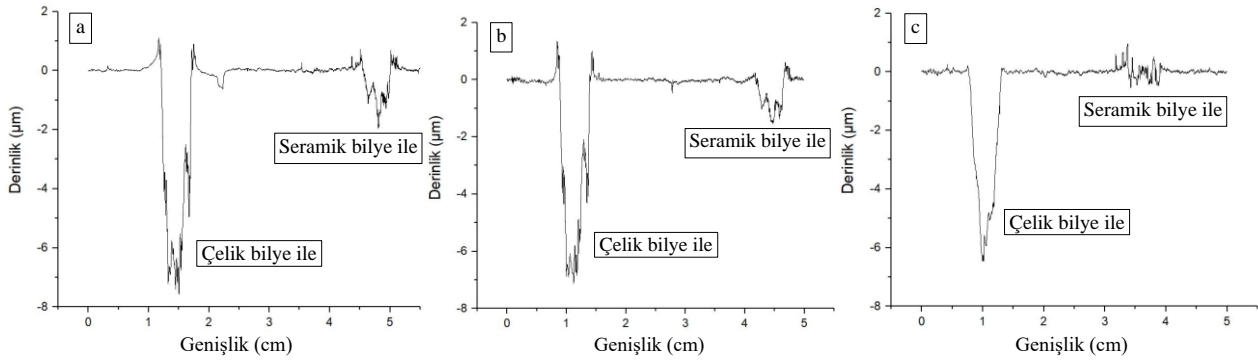
	Ni	Al	Ti	Cr	Mo
NiAl	52.46	47.54	-	-	-
1	50.70	46.69	-	2.48	0.13
2	5.12	3.63	-	76.42	14.83
3	47.82	45.95	3.32	2.73	0.18
4	4.60	4.32	0.65	75.32	15.11

Şekil 2’de alaşımların aşınma deneyi esnasında ölçülen anlık sürtünme katsayıları verilmiştir. Bu değerlerdeki değişime bakıldığında çelik bilyeye karşı en düşük sürtünme değeri NiAl’de ölçülmüştür. Ötektik yapı malzemelerde ise önce hızla yükseldiği sonra düşerek istikrarlı bir hal aldığı görülmektedir. NiAl’un yüzeyi başlangıçta yoğun bir oksit tabakası ile kaplıdır ve bu durum yağlayıcı etki oluşturması muhtemeldir [20]. Diğer alaşımlarda ise muhtemelen yüzey oksit tabakasına bağlı olarak daha yüksek sürtünme değerleri ölçülmüştür. Fakat sürtünme ile beraber arayüzeyde oluşan yeni oksitlerle birlikte sürtünme katsayıları düşmüştür. İlk aşamada daha fazla olan kopmaların yumuşak lamellere tutunarak kısmen yağlayıcı etki göstermesi ve bu yüzden istikrarlı bir hale dönüştüğü görülmektedir. Ayrıca NiAl/Cr-Mo ötektik yapının yağlayıcı film oluşumunu desteklediği de belirtilmiştir [21]. Muhtemel bu yapı oluşmaya başladıkça ötektiklerdeki sürtünme katsayısı giderek azalmıştır. Bu durum ötektik alaşımlarda aşınma ile yüzeylerinde oluşan Cr ve Al oksit tabakalarının yüzeye yağlayıcı etki yaparak aşınma değerlerini düşürdüğü ve malzemeye koruyucu tabaka oluşturduğunu göstermektedir. Oluşan bu oksit tabakaları SEM ve EDX analizlerinde belirlenmiştir. Arayüzeyde kararlı oksit tabakaları oluşmaya başladıkça sürtünme katsayısı ve muhtemelen aşınma kayıpları da azalmaya başlamıştır. Fakat NiAl’da yavaş da olsa artış gözlenmiştir. Literatürde NiAl’da oluşan oksit tabakasının ötektiklere göre daha zor olduğu belirtilmiştir ve düşüşün görülmemesi buna bağlanmıştır [15].



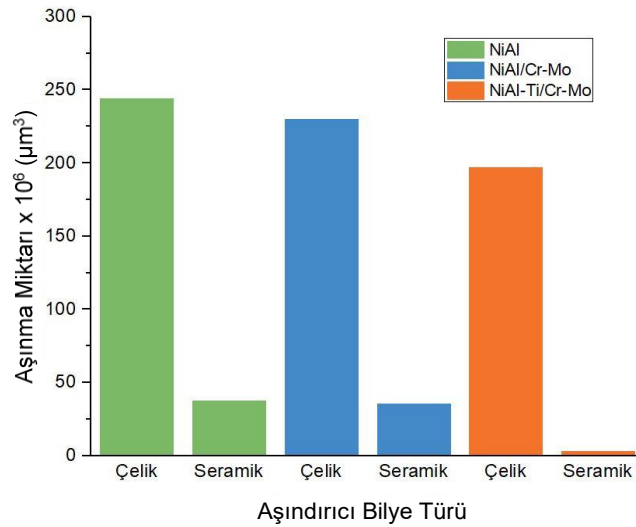
Şekil 2. Farklı alaşımların sırası ile çelik ve seramik bilyeye karşı aşınma esnasında ölçülen anlık sürtünme katsayısı değişimleri

Seramik bilye ile yapılan testlerde ise numunelerde benzer sürtünme katsayıları oluşmuştur. Farklı olarak Ti ilaveli alaşımda son aşamalarda bir artış olmuştur. Bu alaşımda aşınmanın çok düşük miktarda olması ve iz profilindeki dalgalanmalar (Şekil 3) son aşamalara doğru yüzeyde yapışma kopma gibi çeşitli mekanizmalarla hızlı bir aşınmanın gerçekleşme ihtimalini göstermektedir. Diğer numunelerin sürtünme katsayılarındaki dalgalanmalar ise aşınma devam ederken bazı ara tabakalardaki tekrarlı kopma ve yapışmalardan kaynaklanmaktadır. Bu kopma ve yapışmalar ve kopma öncesi ayrılmalar SEM analizlerinde açıkça görülmektedir (Şekil 5-6).



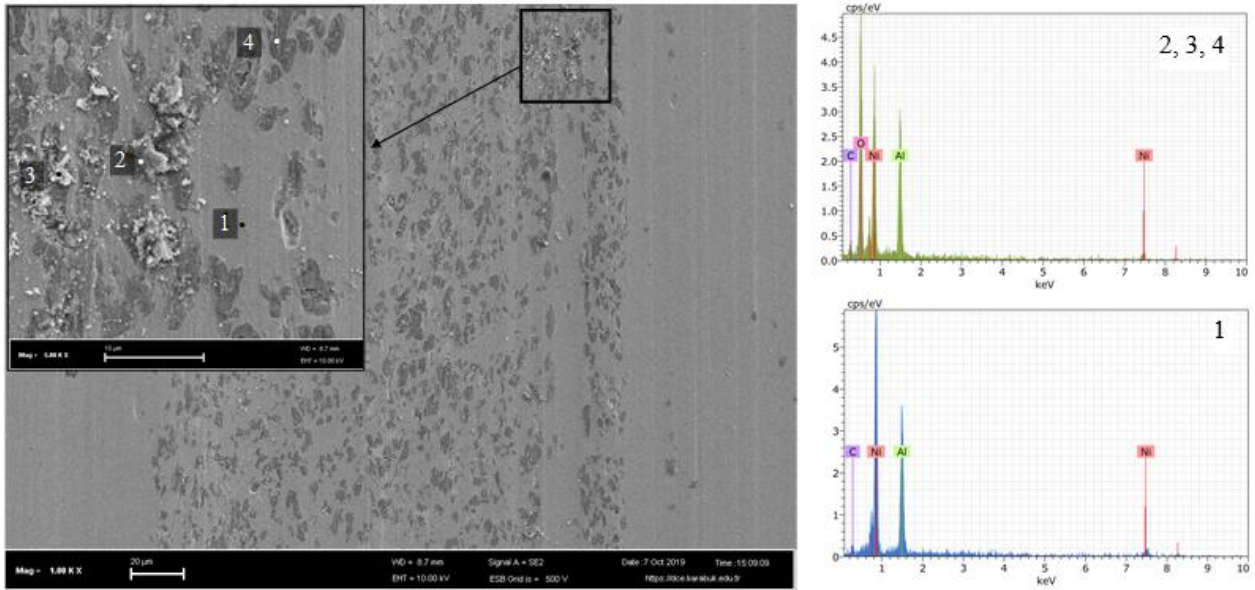
Şekil 3. Çelik ve seramik bilye aşındırması sonucu a) NiAl, b) NiAl/Cr-Mo ve c) NiAl-Ti/Cr-Mo alaşımlarının yüzeylerinde oluşan aşınma iz profilleri

Şekil 3'te verilen aşınma iz profilleri incelendiğinde deney numunelerine bağlı olarak her iki bilyeye karşı da iz derinliklerinde kademeli olarak bir düşüş olduğu görülmektedir. Hacimce kayıplar en fazla NiAl alaşımında ölçülmüştür. Tüm alaşımlarda aynı şartlarda olmasına rağmen çelik bilye kullanılan deneylerde aşınmalar daha fazla olmuştur. Şekil 2'de verilen sürtünme katsayıları incelendiğinde seramik bilye ile yapılan testlerde sürtünme katsayıları benzer değerlerde başlamasına rağmen çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde başlangıçta yüksek olarak başlamış, sonrasında benzer değerlere gelip stabil şekilde devam etmiştir. Bu durum aşındırıcı bilye ve malzeme ara yüzeyinin aşınma karakterini büyük ölçüde belirlediğini göstermektedir. Aşınma izi üzerinde yapılan görüntü analizlerinde de bu durum daha anlaşılır şekilde görülmektedir. Tüm numuneler için iz derinliklerine bağlı olarak hesaplanan ortalama hacimce kayıp miktarları Şekil 4'te verilmiştir.



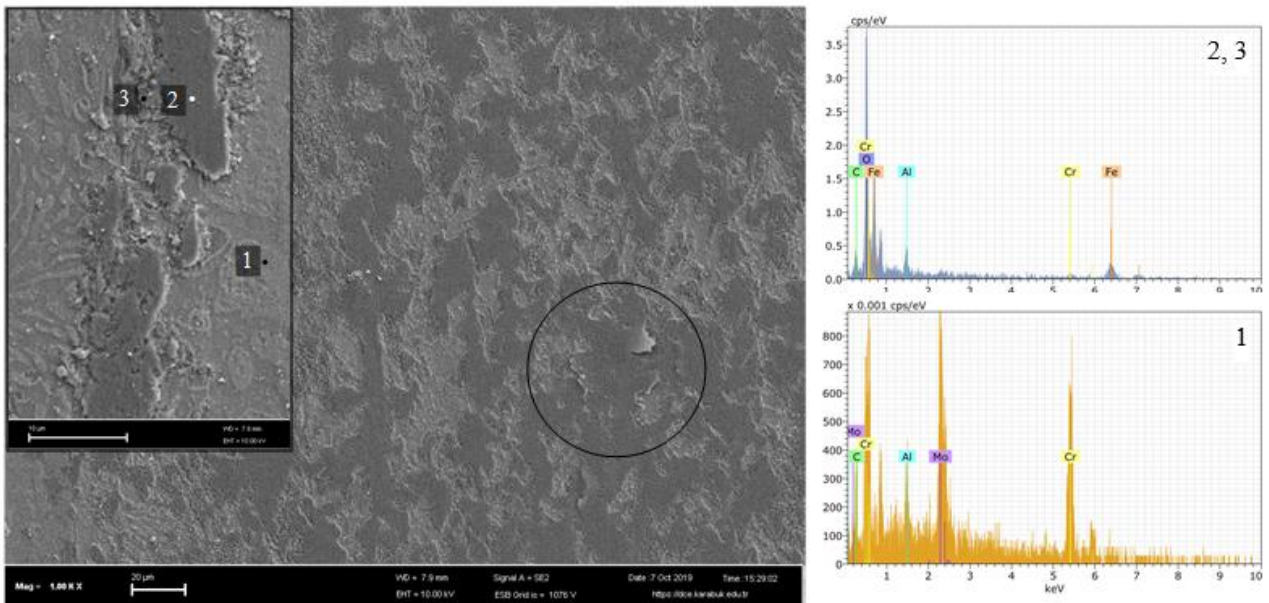
Şekil 4. Alaşımların toplam hacimce kayıp miktarları

Şekil 4'teki ortalama hacimce kayıplar incelendiğinde iz profillerinde de belirtildiği gibi her alaşım için çelik bilye ile yapılan deneylerdeki kayıp miktarı çok daha fazla olmuştur ve bu durum aşınma izleri üzerinden açıklanmıştır. Bunun dışında aynı bilye ile yapılan deneylerdeki farklı numuneler kıyaslandığında kayıp miktarı en fazla NiAl'da ve en az Ti ilaveli alaşımda hesaplanmıştır. Bu durum aşındırıcı ara yüzeyi ile ilişkili olmakla birlikte malzemelerin mukavemetleri ve sertlikleri ile de doğrudan ilişkilidir ki en yüksek sertlik değerleri Ti ilaveli alaşımda en düşük ise NiAl intermetalğinde tespit edilmiştir. Bununla ilgili olarak çeşitli aşınma izlerinin SEM incelemeleri ve nokta EDX analizleri Şekil 5 ve devamındaki görüntülerde verilmiştir.



Şekil 5. NiAl'un çelik bilye karşısındaki aşınma davranışı ve nokta EDX analizleri

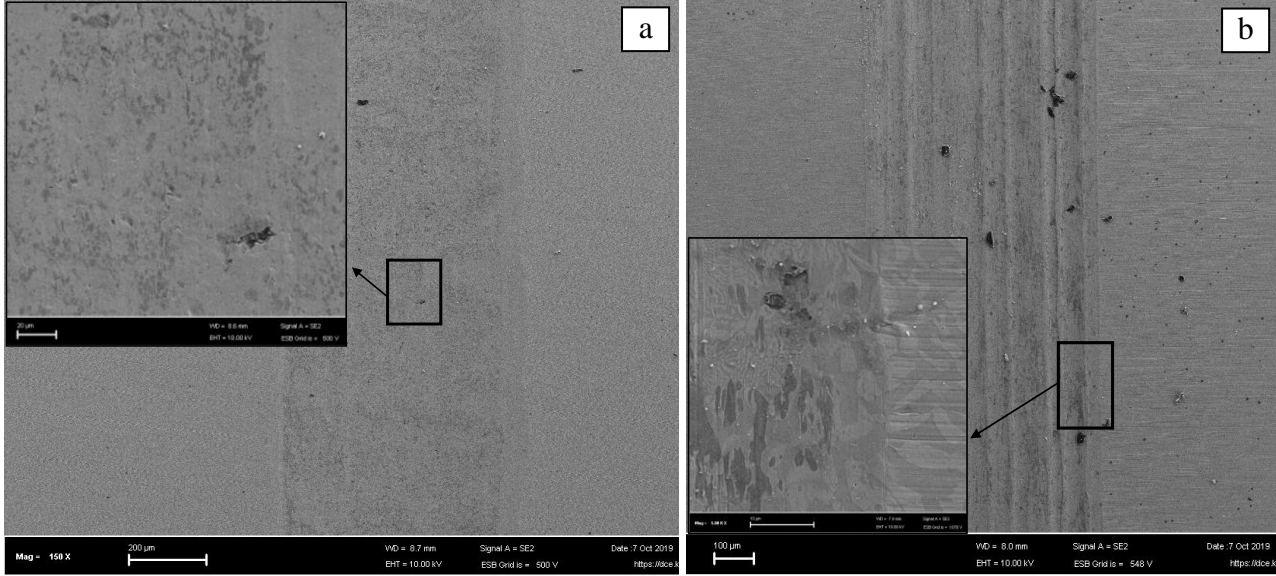
NiAl'un çelik bilye ile aşınan yüzeyi incelendiğinde (Şekil 5) aşınma yüzeyinde oluşan koyu renkli faz her bölgede açıkça görülmektedir. Görüntü üzerinde verilen detay görüntüsünde ise kopan faz boşlukları ve yeni yapışmış partiküller belirginleştirilmiştir. Oluşan bu bölgeler üzerinde yapılan nokta EDX analizlerinde bu bölgelerin genel olarak Al ve Ni oksitlerinden oluştuğu görülmektedir. Bunların dışında yüzeyde uzun kazıma çizgilerinin oluşmadığı fakat yer yer kopmalardan kaynaklı çukurlaşmalar bulunduğu görülmektedir. Bu durum yüzey üzerinde oluşan oksit tabakasının abrazyon aşınmayı doğrudan destekler şekilde değil kısmen koruyucu bir tabaka oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 6. NiAl/Cr-Mo alaşımının çelik bilyeye karşı oluşan aşınma iz görüntüsü ve nokta EDX analizleri

NiAl/Cr-Mo alaşımının çelik bilye ile aşındırılması sonucunda oluşan izlerde ise (Şekil 6) NiAl'den farklı olarak oluşan oksit tabakaları yüksek miktarda Cr ve Fe oksitleri de içermektedir. Benzer sonuçlara Ti ilaveli alaşımda da rastlanmıştır. Başka bir çalışmada benzer oksitlerin oluştuğu ve koyu renkli (NiAl aşınma izinde de görülen) fazların alüminyum oksitlere, açık renkli partiküllerin

ise Cr ve Fe içeren partiküllere ait olduğu belirtilmiştir [22]. Şekilde çizilen daire içerisindeki görüntüde görüldüğü üzere yüzeyde oluşan oksitler koruyucu ve yağlayıcı etki oluşturmakla birlikte bir aşamadan sonra yüzeyden ayrılmakta ve bazı durumlarda yüzeyde çukurcuklar oluşturabilmekte veya kazıma etkisi gösterebilmektedir. Bu durum aşınma mekanizmasının oksidatif ve abrazyon olduğunu göstermektedir. Sonuç itibarı ile aşınma yüzeyinde oluşan oksit partikülleri aşınmayı doğrudan etkilemektedir [20].



Şekil 7. a) NiAl ve b) NiAl/Cr-Mo alaşımının seramik bilye karşısındaki aşınma davranışı

Şekil 7-a ve b'de verilen farklı alaşımların seramik bilye ile yapılan aşınma görüntüleri incelendiğinde aşınma izlerinin çelik bilye kullanılan testlerdekine göre farklı olduğu görülmektedir. Temel farklardan ilki yüzeyde oluşan koyu renkli oksit tabakası çok daha azdır. Çelik bilye ile yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi seramik bilye ile yapılan aşınma izlerinde de koyu renkli faz alüminyum oksitlerine aittir. Bu oksitler görüntülerden de anlaşılacağı üzere çok daha az ve küçük boyutlardadır

Şekil 7-a üzerinde verilen detay görüntüsünde de paylaşıldığı gibi aşınma yüzeyinde derin olmayan çatlaklar bulunmaktadır. Bu çatlaklar benzer çalışmalarda da görülmüş ve oluşan bu mikro kırılmaların aşınma mekanizmasını yönlendirdiği belirtilmiştir [20, 23]. Malzemelerin gevrek olmasından dolayı aşınma yüzeyinde çatlaklar ve aşınma kalıntıları görülebilmektedir. Bu tip çatlaklar NiAl'un çelik bilye ile yapılan aşınma yüzeylerinde de bulunmaktadır. Fakat NiAl'de rastlanan bu yüzey çatlaklarına diğer alaşımlarda rastlanmamıştır. Bu durum sünek fazın aşınmada bir avantaj oluşturabileceğini göstermektedir ki diğer iki alaşımın süneklik ve tokluk değerleri NiAl'den daha yüksektir [17].

Şekil 7-b'deki aşınma yüzeyinde boydan boya çiziklerin oluşması Cr-Mo ilaveli ve Ti ilaveli alaşımlarda tam bir koruyucu film tabakanın oluşmadığını göstermektedir. Aynı malzemenin çelik bilye ile oluşturulan aşınma izi (Şekil 6) arasındaki fark açıkça görülmektedir. Özellikle seramik bilye ile yapılan testlerde yüzeyde oluşan bu paralel çizgiler ve oluşan oksitlenmiş parçacıklar aşınma mekanizmasının baskın şekilde abrazyon olduğunu göstermektedir. Yüzeyde oluşan saban izlerinin aşınmanın ilk aşamalarında oluşan oksitlerden kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Oluşan küçük oksit parçacıklarının çoğunun Cr_2O_3 ve Al_2O_3 olduğu başka bir çalışmada yapılan TEM incelemeleri ile belirlenmiştir [23]. Bu çalışmada da analiz edilen oksit parçacıklarının genelde Cr ve Al oksitlerinden oluşması benzer oksit parçacıklarının oluştuğunu göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada aşınma testleri için üretilmiş NiAl, ve diğer alaşımların yapılan SEM incelemeleri ve EDX analizlerinde literatürdekine benzer mikroyapısal özellikler gösterdikleri belirlenmiştir. Bu malzemelerin aşınma davranışları incelenmiş ve özellikle çelik bilye ile yapılan testlerde seramik bilye ile yapılan kıyasla çok daha fazla aşınma kaybının yaşandığı tespit edilmiştir. Aşınma mekanizmalarının ise çelik bilye kullanılan testlerde tüm numuneler için korozif-abrasif şeklinde olurken seramik bilye ile yapılan testlerde NiAl intermetaliginde çelik bilye ile yapılan testlere benzer yüzeyler oluşurken Cr-Mo ve Ti ilaveli alaşımlarda abrasif aşınmanın etkili olduğu görülmüştür.

Aynı deney koşullarındaki farklı malzemeler birbiri ile kıyaslandığında ise NiAl intermetaliginde en fazla, Ti ile modifiye edilmiş NiAl/Cr-Mo ötektiginde ise en düşük kayıplar hesaplanmıştır. Ti ilavesinin ötektik benzeri NiAl/Cr-Mo lamelli mikroyapısını büyük ölçüde değiştirdiği, sertliğini %10 civarı arttırdığı belirlenmiştir. Ölçülen aşınma kayıpları malzemelerin sertliği ve literatürdeki mukavemet değerleri ile paralellik göstermekte artan sertlik ve mukavemetle aşınma kayıpları azalmaktadır. Fakat değerler arasında lineer bir ilişki gözlenmemiştir ve bu durum mekanik özellikler yanı sıra ara yüzey ilişkilerinin ve yüzey oksitlenme davranışlarının da aşınmayı ciddi derecede etkilediğini göstermiştir.

Teşekkür

Çalışmanın deneysel kısmında vermiş oldukları katkılardan dolayı Karabük Üniversitesi Margem Laboratuvarı çalışanlarına ve Dr. Öğr. Üyesi İ. Hakkı Kara'ya teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1]. Noebe R.D., Bowman R.R., Nathal M. "V. Physical and mechanical properties of the B2 compound NiAl", *Int Mater Rev.*, 1993, 38(4): 193–232.
- [2]. Bowman R.R., Noebe R.D. "Development of NiAl and NiAl-Based Composites for Structural Applications: A Status Report", 2012, 341–50.
- [3]. George E.P., Yamaguchi M., Kumar K.S., Liu C.T. "Ordered intermetallics", *Annu Rev Mater Sci.*, 1994, 24(1): 409–51.
- [4]. Johnson D.R., Chen X.F., Oliver B.F., Noebe R.D., Whittenberger J.D. "Processing and mechanical properties of in-situ composites from the NiAlCr and the NiAl (Cr, Mo) eutectic systems", *Intermetallics*, 1995, 3(2): 99–113.
- [5]. Liu E., Gao Y., Jia J., Bai Y., Wang W. "Microstructure and mechanical properties of in situ NiAl–Mo₂C nanocomposites prepared by hot-pressing sintering", *Mater Sci Eng A*, 2014, 592: 201–6.
- [6]. Darolia R., Walston W.S., Noebe R., Garg A., Oliver B.F. "Mechanical properties of high purity single crystal NiAl", *Intermetallics*, 1999, 7(10): 1195–202.
- [7]. Yang J.M., Jeng S.M., Bain K., Amato R.A. "Microstructure and mechanical behavior of in-situ directional solidified NiAl/Cr (Mo) eutectic composite", *Acta Mater.*, 1997, 45(1): 295–308.
- [8]. Tiwari R., Tewari S.N., Asthana R., Garg A. "Development of NiAl-based intermetallic alloys: effect of chromium addition", *Mater Sci Eng A*, 1995, 192: 356–63.
- [9]. Demirtas H., Gungor A. "Improvement of mechanical properties of NiAl-Cr (Mo) alloy by Ti addition", *Optoelectron Adv Mater Commun.*, 2015, 9(7–8): 981–5.
- [10]. Demirtas H., Gungor A. "Effect of Alloying Elements on the Microstructure and Mechanical Properties of NiAl-Cr (Mo) Eutectic Alloy", *Mater Sci Non-Equilibrium Phase Transform.*, 2015, 1(2): 25–9.
- [11]. Cotton J.D., Noebe R.D., Kaufman M.J. "Ternary alloying effects in polycrystalline {beta}-

- NiAl", Los Alamos National Lab., NM (United States); 1993.
- [12]. Tang L.Z., Zhang Z.G., Li S.S., Gong S.K. "Mechanical behaviors of NiAl-Cr (Mo)-based near eutectic alloy with Ti, Hf, Nb and W additions", *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2010, 20(2): 212–6.
- [13]. Wilson A.W., Howe J.M. "Effect of alloying additions on β' precipitation in NiAl–Ti base alloys", *Acta Mater.*, 2001, 49(14): 2653–60.
- [14]. Johnson B.J., Kennedy F.E., Baker I. "Dry sliding wear of NiAl", *Wear*, 1996, 192(1–2): 241–7.
- [15]. Guo J., Wang Z., Sheng L., Zhou L., Yuan C., Chen Z., et al. "Wear properties of NiAl based materials", *Prog Nat Sci Mater Int.*, 2012, 22(5): 414–25.
- [16]. Kennedy F.E., Baker I., Johnson B.J. "Wear of ductile-phase toughened NiAl", *MRS Online Proc Libr Arch.* 1994, 364.
- [17]. Demirtaş H., "Nikel Alüminyum Bileşiklerinin Mikroyapısını Kontrol Ederek Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi", *Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2015.
- [18]. Sheng L., Wang L., Xi T., Zheng Y., Ye H. "Microstructure, precipitates and compressive properties of various holmium doped NiAl/Cr (Mo, Hf) eutectic alloys", *Mater Des.*, 2011, 32(10): 4810–7.
- [19]. Vedula, K. and Khadkikar, P., "Effect of Stoichiometry on Low Temperature Mechanical Properties of B 2 NiAl Alloys", *High Temperature Aluminides & Intermetallics*, 197–217 (1989)
- [20]. Sheng L.Y. "Microstructure and Wear Properties of the Quasi-Rapidly Solidified NiAl/Cr(Mo,Dy) Hypoeutectic Alloy", *Strength Mater.*, 2016, 48(1): 107–12.
- [21]. Sheng L.Y. "Microstructure, mechanical and tribological properties of the rapidly solidified NiAl/Cr(Mo,Dy) hypoeutectic alloy", *Mater Sci Forum*, 2016, 849: 590–6.
- [22]. Jin J.H., Stephenson D.J. "The sliding wear behaviour of reactively hot pressed nickel aluminides", *Wear*, 1998, 217(2): 200–7.
- [23]. Guo J., Wang Z., Sheng L., Zhou L., Yuan C., Chen Z., ve diğ. "Wear properties of NiAl based materials", *Prog Nat Sci Mater Int.*, 2012, 22(5): 414–25.