

PROTECTION 500 (P 500) ÇELİĞİNİN KURU-KAYMA AŞINMA DAVRANIŞI

Yılmaz Küçük^{1*}, M. Sabri Gök¹

¹Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın

Öz

Bu çalışmada, Protection 500 (P 500) çeliğinin iki farklı kayma hızında (4 ve 8 mm/s) ve üç farklı yük (10, 20 ve 30 N) altında kuru-kayma aşınma davranışı incelenmiştir. Deneyler ball-on-disk aşınma aparatında ileri-geri hareket modunda gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı olarak 6 mm çapında WC bilya kullanılmıştır. Test numunelerinin aşınma hacim kayıplarının hesaplanmasında 3D profilometre görüntüleri kullanılmıştır. Aşınma testleri sonrasında numune yüzeylerinde ortaya çıkan aşınma mekanizmaları SEM ve EDS analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda artan yüke ve kayma hızına bağlı olarak hacim kayıplarının arttığı ancak kayma hızının aşınma mekanizması üzerinde daha etkin bir parametre olduğu görülmüştür. Düşük kayma hızlarında oksidasyon ana aşınma mekanizması olurken yüksek kayma hızında oksidasyon, yorulma ve plastik deformasyon aşınma mekanizmaları görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Protection 500 çeliği, kuru kayma aşınması, kayma hızı

DRY-SLIDING WEAR BEHAVIOR OF PROTECTION 500 (P 500) STEEL

Extended Abstract

Protection 500 (P 500) is a ballistic penetration-resistant armor steel with high yield strength (1300 MPa) and tensile strength (1600 MPa) as well as high hardness (500 HBW). It is also preferred in parts exposed to high wear in service conditions, such as mining machines, crushers, excavators, dumper bodies, bulldozer blades, and chute-feeders. Since the loads and friction conditions to which the machine parts and components used in the mentioned harsh service conditions are exposed also vary considerably, evaluating the wear performance of these materials is also an important issue. In this study, the dry-sliding wear behavior of P 500 steel was investigated at two different sliding speeds (4 and 8 mm/s) and under three different loads (10, 20, and 30 N). The wear experiments were carried out in reciprocating mode on a ball-on-disc wear apparatus. The contact pair used a WC ball with a diameter of 6 mm and a hardness of 19 GPa as the abrasive counter body material. Thus, the aim was mainly to determine the wear characteristics of P 500 by limiting the surface mechanisms related to the wear of the abrasive part. 3D profilometer images were used to calculate the wear volume loss values of the test samples. The wear mechanisms occurring on the sample surfaces after the wear tests were evaluated using SEM and EDS analysis. As a result of the experimental studies, it was observed that the volume losses increased with increasing load and sliding speed. In addition, increased load and sliding speed resulted in a limited decrease in the CoF value. The main reason for this case is considered to be an increase in friction-induced heat and plastic deformation due to increasing load and sliding speed, resulting in a smoother worn surface. Besides, the sliding speed was detected as a significant parameter affecting the wear mechanism. While oxidation was the primary wear mechanism at low sliding speeds, oxidation, fatigue, and plastic deformation wear mechanisms were observed at high sliding speeds.

Keywords: Protection 500 steel, dry sliding wear, sliding speed

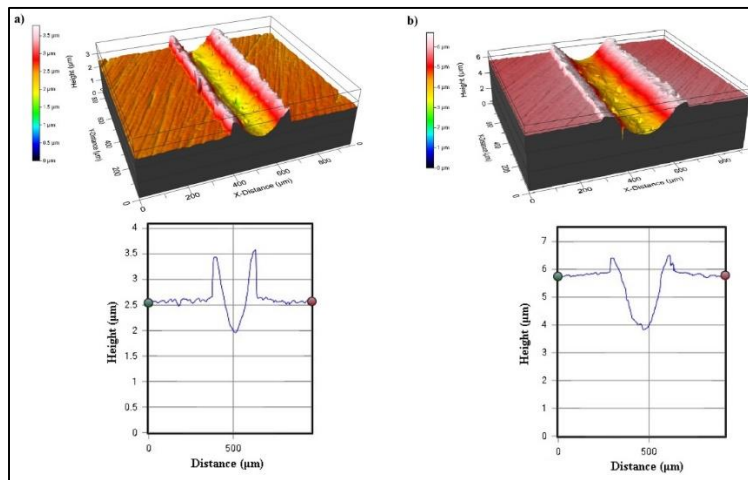
1. Giriş

Yüksek mekanik dayanıma sahip çelikler genellikle yüksek alaşımlı çelik sınıfındandır ve belirli uygulamalar için özel olarak imal edilmektedir (Ligier, Zemlik, Lemecha, Konat, & Napiórkowski, 2022). Kimyasal içeriklerinin yanı sıra bir dizi ısıl işlem sayesinde özel uygulamalar için ideal ürünler olarak piyasaya sürülmektedir. Yüksek dayanım, tokluk, sertlik gibi üstün mekanik özelliklere ek olarak yüksek korozyon ve aşınma direncine sahip çelik kalitelerine olan talep sürekliliğini korumaktadır (Küçük & Işık, 2023). Bu tür özelliklere sahip malzemelerden ilk akla gelenlerinden biri de zırh çelikleridir. Zırh çeliklerinin balistik performansına ilişkin araştırmalar devam etmektedir (Acar, Canpolat & Cora, 2024). Hafiflik ve balistik dayanımın birlikte talep edildiği araç zırhı uygulamaları için alüminyum ve titanyum alaşımları yaygın şekilde kullanılmaktadır (Hazell, 2015; Manes vd., 2014; Montgomery & Wells, 2001). Hafif alaşım ve özel olarak üretilen hibrit lamine kompozit zırhlarla birlikte tek veya katman malzemesi olarak yüksek mukavemetli çeliklerin temel zırh malzemesi olarak kullanımı önemini korumaktadır (Cheeseman & Bogetti, 2003; Küçük & Çelik, 2023). Düşük maliyet, kolay üretim ve tedarik, yüksek mukavemet ve süneklikle birlikte sertlik, çeliğin zırh uygulamalarında tercih edilen malzeme olmasının başlıca nedenleridir (Börvik, Dey & Clausen, 2009).

P 500, 500 HBW (Brinell Sertliği) nominal sertliğine göre adlandırılmış yüksek dirençli özel sınıf bir çeliktir. Zırh uygulamalarının yanı sıra aşınmaya, yıpranmaya ve mekanik strese karşı yüksek dirence ihtiyaç duyulan kırıcılar, kazıcılar, madencilik makinelerinin aşınma parçaları, damper gövdeleri, buldozer bıçağı, oluk-besleyiciler v.b. zorlu çalışma ortamlarındaki endüstriler için ideal bir malzemedir (URL-1, 2024). P 500 çeliğinin mekanik dayanımına ilişkin çalışmalar mevcuttur (Kharchenko vd., 2022). Ancak, aşınma davranışının incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada aşınmaya maruz kalan zorlu çalışma şartlarında kullanılan P 500 çeliğinin kuru kayma aşınma davranışı incelenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

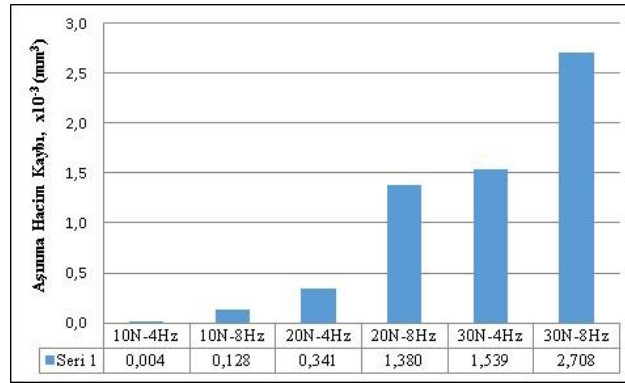
Bu çalışmada P 500 çeliğinin kuru-kayma aşınma davranışı incelenmiştir. Temin edilen ve 300 x 300 mm boyutlarında olan çelik plaka 40 x 40 x 10 mm boyutlarında lazer kesim cihazı ile kesilerek boyutlandırılmıştır. Kesme işleminden sonra metalografik parlatma cihazı kullanılarak, numunenin yüzeyi 1200 mesh SiC zımpara ile parlatılarak aşındırma işlemine hazır hale getirilmiştir. Aşınma testleri 4 ve 8 mm/s kayma hızlarında ve 10, 20 ve 30 N'luk yükler altında ball-on-disk aşınma cihazında ve ileri-geri doğrusal hareket yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı olarak sertliği 19 GPa olan 6 mm çapında WC bilya kullanılmıştır. Numunelerde meydana gelen hacim kayıplarının belirlenmesinde 3D profilometreden faydalanılmıştır. 6 mm boyunda oluşan izin 4 farklı bölgesinden alınan derinlik ölçümlerinin hacimsel hesabı yapılarak minimum hata olmasına dikkat edilmiştir. Ortalama iz kesit alanı ile ileri-geri kayma mesafesi çarpılarak aşınma hacim kaybı değerleri tespit edilmiştir. Şekil 1'de 20 N yük ve farklı kayma hızlarında numunelerden alınan 3B iz görüntüleri verilmiştir. Numune aşınma yüzey morfolojisinin belirlenmesinde, SEM görüntülerinden faydalanılmıştır.



Şekil 1. Farklı kayma hızlarında elde edilen aşınma iz profilleri (yük: 20N) a) 4 mm/s, b) 8 mm/s

3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 2’deki grafikte numunelere ait üç farklı kayma hızında ve iki farklı yük altında ileri-geri doğrusal hareket yöntemi ile kuru-kayma aşınması yapılan numunelerin hacim kaybı değerleri verilmiştir. Yükün 10 N’dan 30 N’a çıkması numunelerde meydana gelen aşınma hacim kaybının sert şekilde artmasına neden olmuştur. Sıcaklık, yük ve hız gibi çalışma koşullarının metalik malzemelerin tribomekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu bildirilmiştir (Kanth, Rao & Krishna, 2019; Velavan, Palanikumar, Natarajan, & Lim, 2021; Kumar vd., 2020). Aşındırıcı bilyanın malzeme ile temasından sonra bir yüke maruz bırakıldığında aralarındaki maksimum basma gerilmesi bilyanın merkez noktasında meydana gelmektedir (Öge vd., 2023; Küçük vd., 2023a; Küçük vd., 2023b; Küçük, 2020a). Yükün artması ile hem aşınma çiftlerinin etkileşim noktalarında hem de yüzey altı bölgelerde normal ve teğetsel kesme gerilmeleri meydana gelecek ve bunun sonucunda da plastik deformasyon meydana gelecektir. Ayrıca, yüksek yükler altında aşınmaya maruz kalan malzemelerde oluşan adezyon etkisi soğuk kaynak oluşumunu tetikleyerek yüzeyden malzeme transferini hızlandıracaktır. Diğer bir mekanizma ise artan yüklerle birlikte kısa sürede yüzeyde oluşan oksit tabakası temas başlangıcından itibaren belli bir süre yük taşıyıcı bir bariyer olarak görev yaparken (Küçük, 2020b; Öge vd., 2019; Kucuk vd., 2018), bu tabakanın kırılması ile oluşan oksit atıklarının yüzeyde gösterdiği abrazyon etkisidir (Küçük & Öge, 2022). Bununla birlikte yük ve kayma hızının etkisine ek olarak ileri-geri sürtünme hareketi esnasında uygulanan tekrarlı yüklemelerle birlikte malzeme yüzeyinde çatlak oluşumu artarak kırılmalara sebebiyet verecektir (Wang vd., 2020; Zhang vd., 2019; Essa vd., 2021).

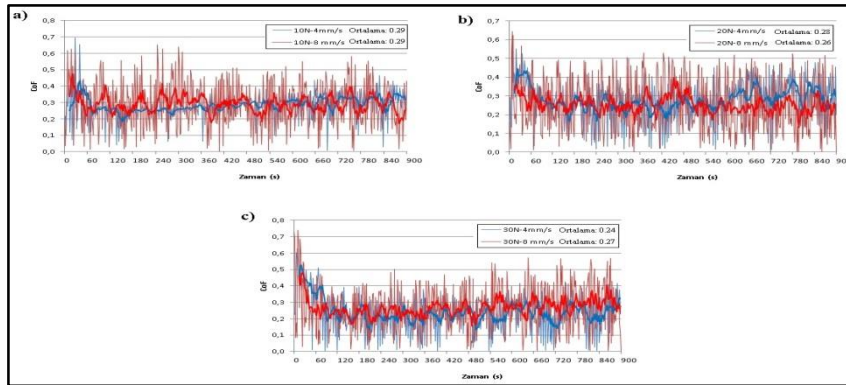


Şekil 2. P 500 çeliğinin değişen yük ve kayma hızlarına bağlı olarak ortaya çıkan aşınma hacim kaybı değerleri

Yine Şekil 2’de kayma hızının da hacim kaybında önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Düşük kayma hızlarında etkileşimli yüzeyler arasında oluşan sürtünme, temas yüzeyi sıcaklığının yükselmesine ve bunun sonucunda da yüzeyde oksit tabakası oluşumuna neden olmaktadır. Yüksek kayma hızlarında ise etkileşim halinde olan sürtünme yüzeyi yüksek gerinim oranına sahip şiddetli plastik deformasyona maruz kalarak indüklenen gerinim enerjisinden önemli miktarda ısı açığa çıkmasına neden olmaktadır (Wang vd., 2020). Oluşan bu ısı yüzeydeki oksit oluşum hızını arttıracak gibi bu oksitlerin parçalanmasına sebep olarak yüzeyde delaminasyon tipi aşınma oranını da arttırmıştır.

Delaminasyon teorisi ilk kez 1970 li yıllarda metallerin ve diğer katı malzemelerin aşınmasını açıklamak amaçlarla ortaya atılmıştır (Suh, 1973). Delaminasyon tipi aşınma bir dizi olaylar sonucunda aşınma partikülü oluşumunu açıklayan bir teoridir. Bu teoriye göre, sert pürüzlerin daha yumuşak yüzeye uyguladığı sürtünme kaynaklı gerilmeler, plastik kayma deformasyonuna neden olur ve tekrarlanan yüklerle yoğunlaşır. Etkileşime bağlı olarak yüzeyaltı deformasyonu devam ettikçe yüzey altında çatlaklar başlar. Ancak yüzeye çok yakın çatlak çekirdeklenmesi, yüzeyin hemen altında bulunan üç eksenli yüksek sıkıştırma gerilim bölgeleri oluşturduğu için tercih edilmez. Çatlaklar bir kez oluştuğunda (çatlak çekirdeklenmesi nedeniyle, veya önceden var olan boşluklara) daha fazla yüklemeye ve deformasyon ile birlikte genişler ve komşu çatlaklarla birleşerek yayılır. Oluşan bu çatlaklar malzeme özellikleri ve sürtünme katsayısı tarafından yönetilen bir derinlikte yüzeye paralel olarak ilerleyerek artar. Bu çatlaklar sonunda yüzeye doğru yöneldiğinde uzun ve ince aşınma tabakaları halinde koparak “delaminasyon” tipi aşınma ortaya çıkmaktadır (Suh, 1977). Kayma hızına bağlı diğer bir yaklaşım etkileşimli yüzeylerden aşındırıcı bilya kayma hızının artması ile bilyanın bir noktadan geçiş süresi daha kısa periyotlar arasında gerçekleşecektir. Bunun sonucu olarak parlama sıcaklığı veya flaş sıcaklık olarak ifade ettiğimiz ani sıcaklık yükselmeleri ve bu sıcaklığın yüzeyden iletimi daha uzun sürecektir. Bu durum ise plastik akışın daha kolay olmasında sebebiyet verecektir (Gök vd., 2023; Günen vd., 2015; Kucuk, 2012).

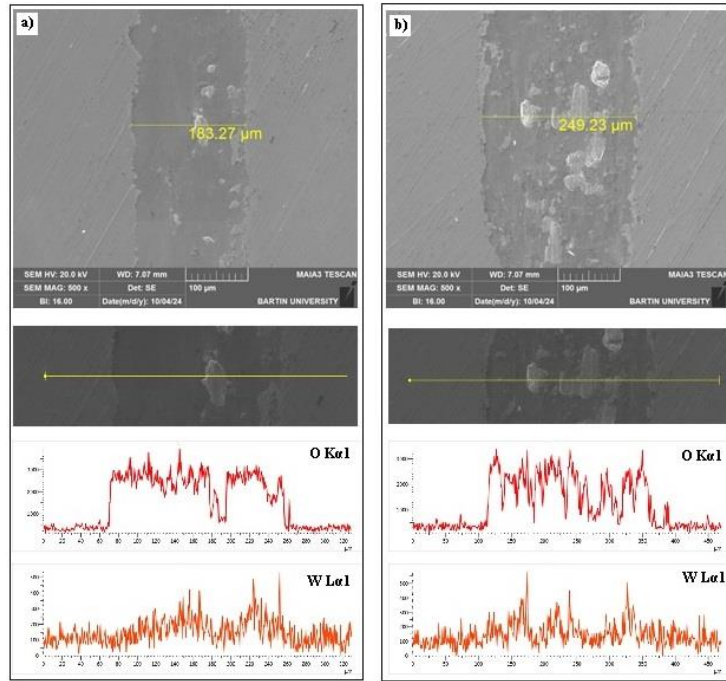
Şekil 3(a-c)'de farklı yük ve kayma hızlarında numunelere ait sürtünme katsayısı (CoF) değerleri verilmiştir. Şekil 3a'da 10 N luk yük altında iki farklı kayma hızında elde edilen değerler incelendiğinde ortalama CoF değerinin iki kayma hızı içinde 0.29 olduğu görülmektedir. Ancak 4 mm/s kayma hızında elde edilen grafik görüntüsü incelendiğinde zamana bağlı olarak pik ve vadi arası mesafelerin daha kısa olduğu dolayısıyla daha pürüzsüz bir yapıda aşınmanın gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu durumun daha iyi anlaşılması için Şekil 4(a-b)'de verilen numunelerin SEM aşınma izi fotoğrafları incelenecek olursa iki kayma hızı arasında numune yüzeyinde oluşan hasar mekanizması da açıkça görülebilmektedir. Şekil 4b'de aşınma izi üzerinde genişliği 20µm ile 40 µm arasında olan ve yüzeyden adezyon etkisi ile kopmuş aşınma atıklarının meydana getirdiği boşluklar görülmektedir. Bu boşluklar CoF değerinin yüksek kayma hızında daha pik genliklerinin fazla olmasının sebebidir. Yükün 20 N çıkması her iki CoF değerinde çok çok az olsa da bir düşmenin olduğu görülmüştür (Şekil 3b). Benzer durumun 30 N'luk yük altında da görüldüğünü söylemek mümkündür (Şekil 3c). Burada dikkat çeken durum artan kayma hızının vadi ve pikler arasındaki genliği artırmış olmasıdır. Bunun en önemli nedeninin yüzeyde yüksek kayma hızının oluşturduğu pürüzlü tabaka olduğunu söylemek mümkündür. Ancak 20 N yükü birlikte düşük kayma hızlarında da bu genlik artmıştır.



Şekil 3. P 500 çeliğinin farklı yük ve farklı kayma hızlarındaki CoF değerleri

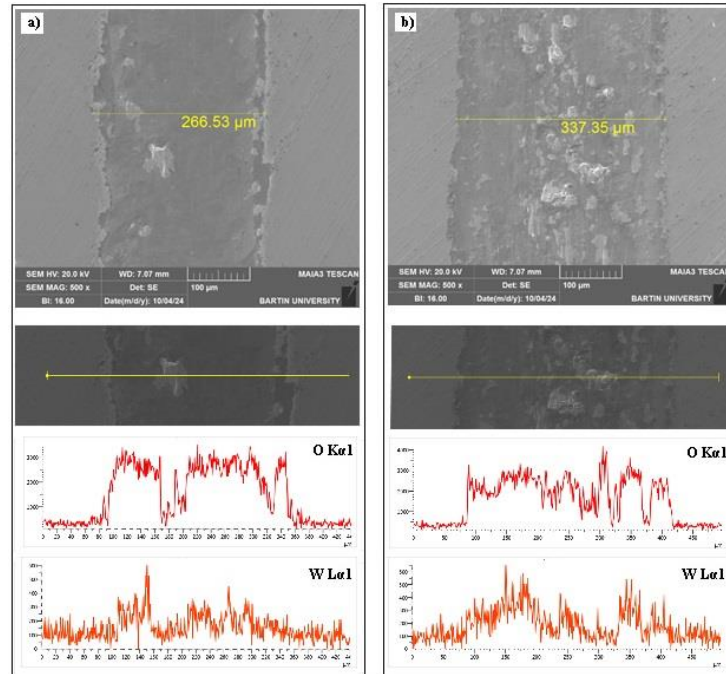
Şekil 4(a-b)'de 10 N luk yük altında ve farklı kayma hızlarında aşındırma işlemine tabi tutulan numunelerin SEM aşınma izi fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4a'da verilen EDS analizinde de açıkça görüldüğü gibi 4 mm/s kayma hızında yapılan aşındırma işleminde aşınma iz genişliğinin 183 µm olduğu aşınma mekanizmasının ise oksidasyon olduğu görülmektedir.

Kayma hızının artması (8 mm/s) ile aşınma izinin genişlediği, yüzeyde oksidasyon oluşumunun ana aşınma mekanizmasını oluşturduğu ve ayrıca yorulmaya bağlı plastik deformasyon mekanizmasının da gerçekleştiği görülmektedir. Kayma hızının artması ile birim zamanda bilyanın aynı noktadan geçme periyodu kısılacaktır. Dolayısıyla yüzeyde meydana gelen sürtünme ısı daha yüksek olup şiddetli oksit oluşumuna sebebiyet verecektir. Tekrarlı yükler altında kırılan bu oksitler ise yüzeyde aşınmaya neden olmuştur. Bununla birlikte yapılan EDS çizgi analizinde görüldüğü üzere, aşınmış iz yüzeyinde aşındırıcı bilyadan kopan sınırlı oranda partikülün de (W varlığı) mevcut olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 10 N luk yük altında aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri a) 4 mm/s b) 8 mm/s

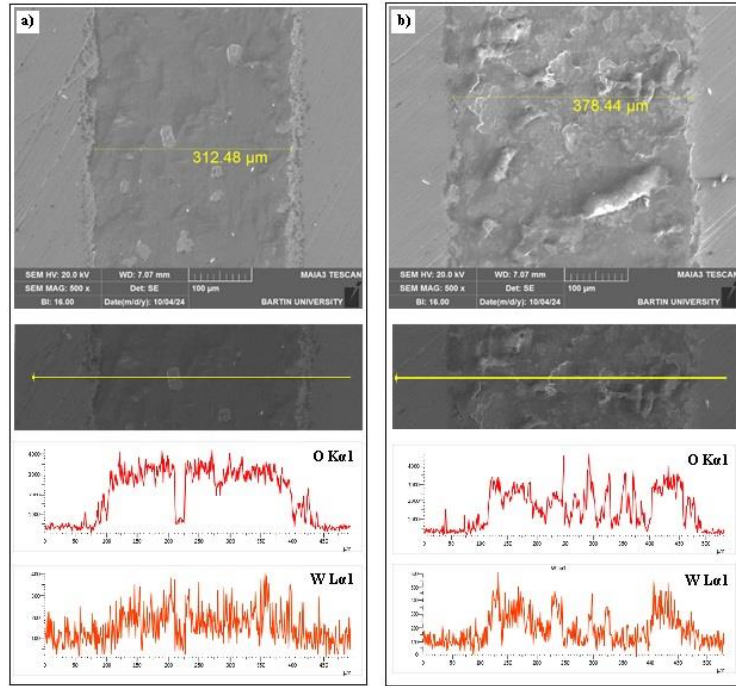
Şekil 5(a-b)'de ise 20 N luk yük altında aşındırma işlemine tabi tutulan numunenin SEM aşınma izi fotoğrafları verilmiştir. Bir önceki yani 10 N luk yük altında ve 4 mm/s kayma hızında test edilen numune ile kıyaslandığında benzer bir aşınma mekanizması sergilemiştir. Sadece iz genişliği daha fazla olmuştur. Benzer şekilde artan kayma hızı ile numunede hacim kaybı artmış ve yüzeyde yorulma ile oksit tabakasının parçalanarak oluşturduğu plastik deformasyona bağlı bir aşınma mekanizması oluşmuştur.



Şekil 5. 20 N luk yük altında aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri a) 4 mm/s b) 8 mm/s

Son olarak Şekil 6(a-b)'de ise 30 N luk yük altında aşındırma işlemine tabi tutulan numunenin SEM aşınma izi fotoğrafları verilmiştir. Artan yük ve kayma hızının bu numunelere de benzer şekilde etkisi olmuştur. Ancak numunenin aşınma mekanizmasında kayma hızının yükten daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Düşük kayma

hızında tam bir oksidasyon ve yerel pullanma şeklinde dökülmeler olurken yüksek hızda oksidasyon yorulma ve pullanma aşınma mekanizmaları görülmüştür.



Şekil 6. 30 N luk yük altında aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS çizgi analizi görüntüleri a) 4 mm/s b) 8 mm/s

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Protection 500 çeliğinin üç farklı yük altında ve iki farklı kayma hızında kuru-kayma aşınma davranışı incelenerek aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

1. Artan yük ve kayma hızı ile orantılı olarak aşınma hacim kaybı değerleri de artmıştır. Özellikle 20N yükte kayma hızının 4 mm/s den 8 mm/s ye çıkmasıyla aşınma hacim kaybı yaklaşık 4 kat artmıştır. 30 N yük altındaki benzer artış ise daha sınırlıdır.
2. Yük ve kayma hızındaki değişimin CoF değerinde önemli bir fark oluşturmadığı tespit edilmiştir. Tüm yüklerde tespit edilen sürtünme katsayısı değerleri ortalama 0.24 - 0.29 aralığındadır ve deney süresince önemli sapma ve dalgalanma meydana gelmemiştir.
3. Düşük kayma hızında numune yüzeylerinin tamamen oksit tabakası ile kaplandığı görülmüş, yüzeyde bölgesel pullanma şeklinde dökülmeler gözlenmiştir. Artan yük ile birlikte pullanma artmıştır.
4. Yüksek kayma hızında numune yüzeyinde oksidasyon tipi aşınma mekanizması ile yorulma, delaminasyon, pullanma tipi aşınma mekanizmaları görülmüştür. Yüksek kayma hızı temas yüzeyindeki hem anlık yüzey sıcaklığının artmasına bağlı oksidasyon artışını desteklemekte, hem de deformasyon hızına bağlı yorulma kaynaklı dökülme ve delaminasyonu artırıcı etki ettiği değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

1. Acar, D., Canpolat, B.H. & Cora, Ö.N. (2024). Ballistic performances of Ramor 500, ArmoX Advance and Hardox 450 steels under monolithic, double-layered, and perforated conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 51, 101653.
2. Børvik, T., Dey, S. & Clausen, A.H. (2009). Perforation resistance of five different high strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *Int. J. Impact Eng.* 36, 948–964.
3. Cheeseman, B.A. & Bogetti, T.A. (2003). Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates, *Composite Structures*, 61 (1–2), 161-173.

4. Essa, F.A., Elsheikh, A.H., Yu, J., Elkady, O.A. & Saleh, B. (2021). Studies on the effect of applied load, sliding speed and temperature on the wear behavior of M50 steel reinforced with Al₂O₃ and / or graphene nanoparticles. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 283-303.
5. Gök, M., Küçük, Y., Pehlivanlı, M. & Erdoğan, A. (2023). Investigation of Dry Sliding Wear Behavior of CFRP Composite Used in New Generation Aircraft Wings. *Journal of Aviation*, 7(2), 190-195.
6. Günen, A., Küçük, Y., Er, Y., Çay, V.V., Öge, M. & Gök, M. (2015). Effect of the powder particle size on the wear behavior of boronized AISI 304 stainless steel. *Materials Testing*, 57(5), 468-473.
7. Hazell, P.J. (2015). *Armour: Materials, Theory, and Design*, CRC Press.
8. Kanth, U.R., Rao, P.S. & Krishna, M.G. (2019). Mechanical behaviour of fly ash/SiC particles reinforced Al-Zn alloy-based metal matrix composites fabricated by stir casting method. *J. Mater. Res. Technol.* 8, 737-744.
9. Kharchenko, V., Katok, O., Sereda, A., Rudnitskyi, M., Kravchuk, R. & Bisyk, S. (2022). Determination of strength characteristics of high-strength sheet steels by hardness and instrumented indentation. 1st Virtual International Conference "In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction", *Procedia Structural Integrity*, 36, 277-283.
10. Kucuk, Y. (2012). Investigation of Abrasiveness Property of Blast Furnace Slag on Ceramic Coatings via the Abrasive Slurry Wear Method. *Tribology Transactions*, 55(6), 762-771.
11. Kucuk, Y., Oge, M., Gok, M. & Karaoglanli, A. (2018). Ferrochromium slag as a protective coating material against oxidation for caster rolls. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 15(5), 1240-1247.
12. Kumar, J., Singh, D., Kalsi, N.S., Sharma, S., Pruncu, C.I., Pimenov, D.Y., Rao, K.V. & Kaplonek, W. (2020). Comparative study on the mechanical, tribological, morphological and structural properties of vortex casting processed, Al-SiC-Cr hybrid metal matrix composites for high strength wear-resistant applications: fabrication and characterizations. *J Mater Res Technol.* 9(6), 13607-13615.
13. Küçük, Y. & Işık, E.A. (2023). AISI 304 paslanmaz sac malzeme bükme işlemi için k-faktörünün belirlenmesi. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 6 (2), 177-188.
14. Küçük, Y. & Çelik, B.K. (2023). Kompozit zırh tasarımı ve balistik direncinin incelenmesi. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 6 (1), 12-20.
15. Küçük, Y., Erdoğan, A., Kurşuncu, B. & Gök, M.S. (2023a). Effects of surface roughness and counter body variables on the dry sliding wear behavior of AISI 4140 steel based on the elastoplastic flattening model. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 11(2), 025002.
16. Küçük, Y., Altaş, E. & Topcu, M.E. (2023b). A comparative analysis of the effect of laser surface treatment on the dry sliding wear behavior of ductile cast irons with different microstructures. *Optik*, 274, 170540.
17. Küçük, Y. & Öge, M. (2022). Elevated Temperature Wear Behavior of FeCr Slag Coating as an Alternative Coating Material for Caster Rolls. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 58, 119-128.
18. Küçük, Y. (2020a). Effect of counter body on wear behavior of plasma-sprayed TiO₂-45Cr₂O₃ coating. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 9(1), 237-252.
19. Küçük, Y. (2020b). Effect of counterbody on the dry sliding wear performance of plasma sprayed calcia-stabilized zirconia coating. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 92, 105284.
20. Ligier, K., Zemlik, M., Lemecha, M., Konat, L. & Napiórkowski, J. (2022). Analysis of Wear Properties of Hardox Steels in Different Soil Conditions. *Materials*, 15, 7622.
21. Manes, A., Serpellini, F., Pagani, M., Saponara & Giglio, M. (2014). Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets. *Int. J. Impact Eng.* 69, 39-54
22. Montgomery, J.S. & Wells, M.G.H. (2001). Titanium armor applications in combat vehicles, *J. Mater. Met. Mater. Soc.* 53, 29-32.
23. URL-1, 2024. www.miilux.com.tr
24. Öge, M., Kucuk, Y., Gok, M. & Karaoglanli, A. (2019). Comparison of dry sliding wear behavior of plasma sprayed FeCr slag coating with Cr₂O₃ and Al₂O₃-13TiO₂ coatings. *Int. J. of Applied Ceramic Techn.*, 16(6), 2283-2298.
25. Öge, M., Küçük, Y., Öge, T., Günen, A., Kanca, Y. & Gök, M. (2023). Effect of boriding on high temperature tribological behavior of CoCrMo alloy. *Tribology International*, 187, 108697.
26. Suh, N.P. (1973). The delamination theory of wear, *Wear*, 25 (1), 111-124.
27. Suh, N.P. (1977). An overview of the delamination theory of wear, *Wear*, 44 (1), 1-16.
28. Velavan K., Palanikumar K., Natarajan E. & Lim W.H. (2021). Implications on the influence of mica on the mechanical properties of cast hybrid (Al+10%B₄C+Mica) metal matrix composite. *J. Mater. Res. Technol.* 10, 99-109.

- 29. Wang, C., Zhang, C., Gu, L., Bi, M., Hou, P., Zheng, D. & Wang, L. (2020).** Analysis on surface damage of M50 steel at impact-sliding contacts. *Tribol Int.*, 150, 106384.
- 30. Zhang, C., Peng, B., Wang, L., Ma, X. & Gu, L. (2019).** Thermal-induced surface damage of M50 steel at rolling-sliding contacts. *Wear*, 420-421, 116-122.