

Termo-Reaktif Difüzyon Tekniği ile Cr-Al-N Kaplanmış AISI D2 Çeliğinin Aşınma Davranışı

Bülent KILINÇ¹, Özkan ÇEĞİL², Uğur ŞEN³, Şaduman ŞEN³

¹Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,

²Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölümü, Sakarya,

³Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Böl., 54187, Sakarya, E-posta:

e-posta: kilinc.bl@gmail.com, ozkancegil@yahoo.com, sdmnsen@sakarya.edu.tr, ugursen@sakarya.edu.tr

Geliş Tarihi: 24.10.2012; Kabul Tarihi: 11.11.2013

Özet

Bu çalışmada, kaplanmamış, nitrürlenmiş ve krom alüminyum nitrid (Cr-Al-N) kaplanmış AISI D2 çeliklerinin silisyum nitrid bilyeye karşı 0.1 m/s, hızda ve 2.5 N, 5 N ve 10 N yükler altında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Çelik numuneler ilk olarak azot ve amonyak atmosfer içerisinde 8 saat boyunca 575°C' de nitrürlenmiş; daha sonra krom alüminyum nitrid kaplama işlemi ferro krom, alüminyum, amonyum klorür ve alümina içeren toz karışımı içinde 1000°C' de 2 saat süreyle termo-reaktif difüzyon (TRD) tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Çelik üzerine kaplanan krom alüminyum nitrid tabakalarının mikro yapısal incelemesi, faz analizi ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. AISI D2 çeliği üzerinde oluşan krom alüminyum nitrid tabakasının kalınlığı $11,8 \pm 1,3 \mu\text{m}$ tespit edilmiştir. Kaplama tabakasının ortalama sertliği $2067 \pm 160 \text{HV}_{0.01}$ olarak ölçülmüştür. Silisyum nitrid bilyeye karşı krom alüminyum nitrid kaplanmış AISI D2 çeliğinin sürtünme katsayısı 0.153 ile 0.446 arasında ve kaplama tabakasının uygulanan yüke bağlı olarak aşınma hızı $1.59 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ ve $6.07 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ arasında değişmektedir. Çeliklerin aşınma hızları krom alüminyum nitrid kaplama işlemi ile 2-4 kat azalmıştır.

Anahtar kelimeler

Aşınma; termo-reaktif difüzyon; AISI D2 çeliği, Cr-Al-N

Wear Behavior of Cr-Al-N Coated AISI D2 Steel by Thermo Reactive Diffusion Technique

Abstract

In this work, the wear test of uncoated, nitrided, chromium aluminum nitride coated AISI D2 cold work tool steel against silicon nitride ball realized at 0.1 m/s sliding speeds and under the loads of 2.5N, 5N and 10N. Steel samples were nitrided at 575 °C for 8 h in the first step of the coating process, and then chromium aluminum nitride coating was performed thermo-reactive deposition technique (TRD) in a powder mixture consisting of ferro-chromium, aluminum, ammonium chloride, alumina and naphthalene at 1000°C for 2 h. Nitro-chromized samples were characterized by X-Ray diffraction analysis (XRD), scanning electron microscopy (SEM), micro-hardness and ball on disk wear tests. The coating layer formed on the AISI D2 steel was compact and homogeneous. The depth of the layer was $11,8 \pm 1,3 \mu\text{m}$. The average hardness of the layer was $2067 \pm 160 \text{HV}_{0.01}$. The coefficient of friction of nitro-chromized layer of AISI D2 steel against silicon nitride ball was changing between 0.153 and 0.446, and wear rate of the coating layer ranged from $1.59 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ and $6.07 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ depending on applied load and sliding speeds. Sliding speeds of steels with chromium aluminum nitride coating process 2-4 times decreased.

Key words

Wear; thermo reactive deposition; AISI D2 steel; Cr-Al-N

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Birçok sanayi ve mühendislik uygulamaları iki yüzeyin birbiri üzerinde kaymasını gerektirir; bu nedenle iki yüzey arasında sürtünme ve aşınma oluşur. Örnek olarak ekstrüzyon, kesme, delme, damgalama, dövme ve döküm vb. sayılabilir (Ding et al. 2008). Aşınma genel olarak temas eden yüzeyler arasında bağlı hareketi nedeniyle malzemenin sürekli bir şekilde azalmasını da

kapsayan katı bir yüzeyde hasar olarak tanımlanabilir (Ding et al. 2008, Unal et al. 2005).

Pratik durumlarda, genellikle aşınma mekanizmalarının birçok türü içerisinde abrazif aşınma, adhezif aşınma, kazımalı aşınma, yorulma aşınması, erozyon aşınması, korozyon aşınma, difüzyon aşınma, oksidasyon aşınması vb. katılmaktadır (Ding et al. 2008). Abrazif aşınma bütün aşınma biçimleri arasında en önemlisidir;

çünkü aşınma nedeniyle oluşan toplam maliyette yaklaşık %63 oranında payı bulunur (Ding *et al.* 2008, Unal *et al.* 2005, Mimaroglu, *et al.* 2005).

Krom nitrür; metal şekillendirme, takım ömrünü ve verimliliğini arttırmak için metal işleme uygulamaları, yüksek sertlik, iyi aşınma ve korozyon direnci, dökümde geniş kullanımı ile tipik bir geçiş metal nitrür kaplamadır (Yu *et al.* 2009). Yağlanmış temas yüzeylerinde (lubricated contacts) yapılan deneysel araştırmalar iyi tribolojik sonuçlar ortaya koymuştur (Bobzin *et al.* 2007). CrN' ün korozyon ve aşınma direnci, sürtünme davranışı ve toklukta TiN' den üstün olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, TiAlN ile karşılaştırıldığında yüksek hızda mekanik işlemede CrAlN kaplamalarda daha iyi tribolojik özellikler beklenebilir. Son zamanlarda, CrAlN kaplamaların TiAlN kaplamalardan daha yüksek oksidasyon direnci sergilediği bile rapor edilmiştir (Ding and Zeng 2005).

Cr_{1-x}AlN filmlerin, AlN için CrN' ün yüksek çözünürlüğü nedeniyle çok geniş aralıkta bileşimleri elde edilebilir (Ding and Zeng 2005, Romero *et al.* 2006, Ding and Zeng 2005). Bu nedenle CrAlN kaplamalar özellikle yüksek sıcaklık oksidasyon-direnci uygulamaları için geleneksel CrN kaplamalara alternatif olarak iyi bir adaydır (Romero *et al.* 2006, Yu *et al.* 2009, Lin *et al.* 2008).

CrAlN kaplamalar farklı PVD teknikleri: magnetron sıçratma (Pulugurtha and Bhat 2006, Nouveau *et al.* 2007), ark iyon kaplama (Kimura *et al.* 2003, Romero *et al.* 2006, Barshilia *et al.* 2006), katodik ark buharlaşma (Yu *et al.* 2009, Ding *et al.* 2008) ve darbeli lazer çöktürme (Romero *et al.* 2006) ile yapılır.

Çelik malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılan yöntemlerden birisi de Termo Reaktif Difüzyon (TRD) yöntemidir. Bu yöntemde elde edilen karbür, nitrür ve borür kaplamalar yüksek sertlik ve yüksek yoğunluklu olup altlık malzemeye metalurjik olarak bağlıdır. TRD yöntemi, yüksek sıcaklıkta, etrafını kuşatan ortamdan belirli bir veya birkaç elementin difüzyonu ile malzemenin yüzey bileşiminin değiştirilmesi şeklinde tanımlanmaktadır (Çeğil and Şen 2010).

Bu çalışmada, kaplanmamış, nitrürlenmiş ve TRD yöntemiyle krom alüminyum nitrür kaplanmış AISI D2 çeliklerinin aşınma davranışları incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Numune hazırlama ve karakterizasyon

Deneysel çalışmalarda kimyasal bileşimi %1.56 C, %0.27 Si, %0.30 Mn, %0.020 P, %0.001 S, %11.2 Cr, %0.75Mo, %0.93 V olan AISI D2 çeliği kullanılmıştır. 20 mm çap ve 5 mm kalınlığında disk şeklinde çelik numunelerin yüzeyleri metalografik olarak hazırlanmıştır. Nitrürlenme işlemi 560°C sıcaklıkta 8 saat süre ile gaz ortamında gerçekleştirilmiştir. Cr-Al-N kaplama işlemi Termo Reaktif Difüzyon (TRD) tekniği ile nitrürlenmiş çeliklere ferro krom tozu, saf alüminyum tozu (ağırlıkça %5), alümina (inert dolgu maddesi), amonyum klorür (aktivatör) ve naftalinden (karbon verici bileşik) oluşan bir katı ortamda pota içerisinde 1000°C' de 2 saat süreyle uygulanmıştır.

Nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış numunelerin yüzeyleri metalografik olarak hazırlandıktan sonra mikroyapı incelemeleri NİKON ECLIPSE L150 marka optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Cr-Al-N kaplama tabaka kalınlıkları optik mikroskop cihazının bünyesinde bulunan mikrometre yardımıyla ölçülmüştür. Mikroyapı incelemeleri için ayrıca JEOL JSM 6060 LV marka elektron mikroskopu kullanılmıştır. Tabakada oluşan fazların tespit edilmesi amacıyla RIGAKU/D/MAX/2200/PC marka x – ışınları difraktometresi ve Cu K_α karakteristik x-ışını kullanılmıştır. Yüzeyde oluşturulan tabakanın sertlik ölçümleri FUTURE TECH FM 700 marka mikro sertlik cihazında 10 gram yük altında gerçekleştirilmiştir.

2.2. Aşınma testleri

Aşınma deneyleri ASTM G-99 standardına uygun olan tribometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler Ball-On Disk metoduyla, 9.5 mm çapında silisyum nitrür (Si₃N₄) bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Tablo1). Aşınma deneyleri 2, 5N, 5N ve 10N yükler altında 320 m mesafede, 0.1 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma hacmi kaplanmamış, nitrürlenmiş ve krom alüminyum nitrür kaplanmış

çeliklerde oluşan aşınma izleri optik mikroskoba bağlı optik mikrometre ile ölçülerek Eşitlik 1 yardımıyla hacim kayıpları hesaplanmıştır. Aşındırıcı bilyelerin hacimsel aşınma değeri, aşınma izi çapı ve bilye çapının ölçümüyle belirlenmiştir (Martini *et al.* 2004).

$$V_b = \pi \times d^4 / (64 \times R) \quad (1)$$

V_b = Aşınma hacmi (mm³)
 R = Bilye yarıçapı (mm)
 d = Aşınma izi çapı (mm)

spesifik aşınma hızı (k) Eşitlik 2 kullanılarak (Benabdallah *et al.* 1999) hesaplanmıştır. Burada s kayma mesafesi (m) ve p uygulanan yükünü (N) ifade etmektedir.

$$k = \frac{v}{S.P} \quad (2)$$

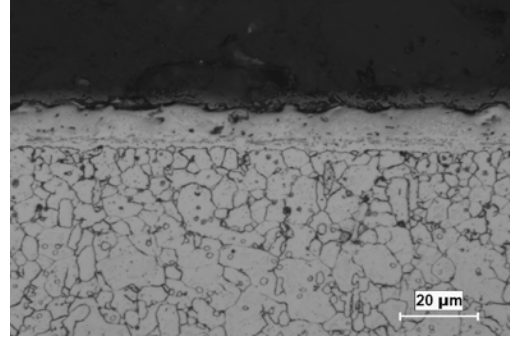
Tablo 1. Aşınma test parametreleri

Test parametresi	Değer
Aşınma numuneleri	Kaplanmamış, nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış çelik
Uygulanan yük (N)	2.5, 5, 10
Hız (ms ⁻¹)	0.1
Ortam	Hava
Nem (%)	65±5
Sıcaklık (°C)	21±3
Kayma mesafesi (m)	320
Test bilyesi	Si ₃ N ₄
Test bilye çapı (mm)	9,5

3. Bulgular ve Tartışma

AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan nitrür ve Cr-Al-N tabakasının mikro yapıları Şekil 1' de görülmektedir. Mikroyapı incelemelerinde Cr-Al-N kaplama tabakasının yoğun, homojen ve düzgün kaplama/matris ara yüzeyine sahip laminer yapıda olduğu belirlenmiştir. Özdemir ve ark. (2007) TRD tekniği ile üretilen AISI 1010 çelikleri üzerinde oluşan CrN kaplama tabakalarının matris ile pürüzsüz bir arayüzey oluşturduğunu ve kalınlıklarının düzgün ve homojen bir morfoloji sergilediğini belirtmişlerdir. AISI D2 çeliklerin yüzeyinde oluşan Cr-Al-N tabaka kalınlığının $11,8 \pm 1,3\mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir. X ışınları analiz çalışmalarında AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan kaplama tabakasının CrN, (Cr, Fe)₂N_{1-x}, AlN and Fe₂N fazlarından oluştuğu görülmüştür. Cr-Al-N

kaplama tabakası $2067 \pm 160 \text{ HV}_{0.01}$ değeri ile nitrürlenmiş tabakadan ($920 \pm 20 \text{ HV}_{0.01}$) ve kaplanmamış çelikten ($550 \pm 14 \text{ HV}_{0.01}$) daha yüksek sertlik değerleri sergilemiştir. Sertlik sonuçları Ding ve ark. (2005)'a ait çalışmalarla uyumludur.



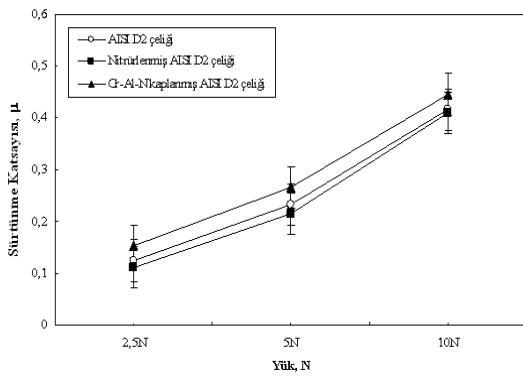
Şekil 1. AISI D2 çeliğinin yüzeyinde oluşan Cr-Al-N kaplanmış kaplama tabakasının mikroyapısı

Silisyum nitrür (Si₃N₄) bilyeye karşı yapılan aşınma deneyleri neticesinde kaplanmamış, nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliklerinin 0.1 m/sn hızda 2.5 N, 5 N ve 10 N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri Tablo 2'de verilmektedir. 0,1 m/s hız ve 2.5N, 5N ve 10N yükler altında silisyum nitrür bilyeye karşı Cr-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin sürtünme katsayısı değerleri kayma mesafesine bağlı olarak Şekil 3'de verilmektedir. Yüke bağlı olarak ölçülen sürtünme katsayısı değerleri AISI D2 çeliği için 0,125 – 0,417 arasında, nitrürlenmiş çelik için 0,11 – 0,41 arasında ve Cr-Al-N kaplanmış çelik için 0,153 – 0,446 arasında değişmektedir. Yapılan aşınma deneyleri neticesinde kaplanmamış, nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliklerinin sürtünme katsayısı değerlerinin aşınma yükünün artmasına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir (Şekil 2a).

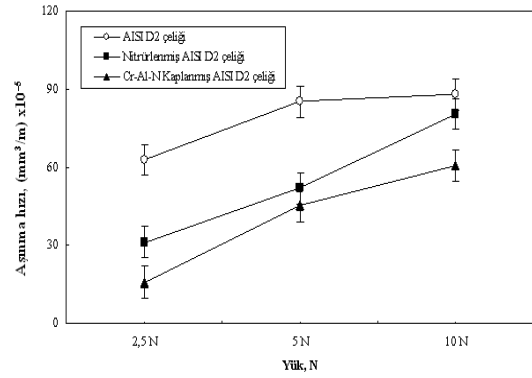
AISI D2, nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış çeliklerin 0.1 m/sn hızda 2.5 N, 5 N ve 10 N yüklerde yapılan aşınma deneylerinde aşınma hızı değerleri sırasıyla $62,943 \times 10^{-5}$ – $87,997 \times 10^{-5}$, $31,215 \times 10^{-5}$ – $80,48 \times 10^{-5}$, $15,921 \times 10^{-5}$ – $60,663 \times 10^{-5}$ arasında değişim göstermektedir. Aşınma deneyleri sonucunda hesaplanan aşınma hızlarındaki değişimler incelendiğinde kaplanmamış, nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış çeliklerin silisyum nitrür bilye ile aşındırılması sonucunda aşınma hızlarının uygulanan yüke bağlı olarak arttığı görülmektedir (Şekil 2b).

Tablo 2. Kaplanmamış, nitrürlenmiş, Cr-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliklerin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri

NUMUNELER	Hız (m/sn)	Yük (N)	Sürtünme katsayısı	Aşınma hızı (mm ³ /m)x10 ⁻⁶
AISI D2	0,1	2,5	0,125±0,097	62,943
		5	0,233±0,112	85,21
		10	0,417±0,116	87,997
Nitrürlenmiş AISI D2	0,1	2,5	0,11±0,050	31,215
		5	0,214±0,051	52,034
		10	0,41±0,090	80,48
Cr-Al-N Kaplanmış AISI D2	0,1	2,5	0,153±0,014	15,921
		5	0,265±0,110	45,297
		10	0,446±0,090	60,663

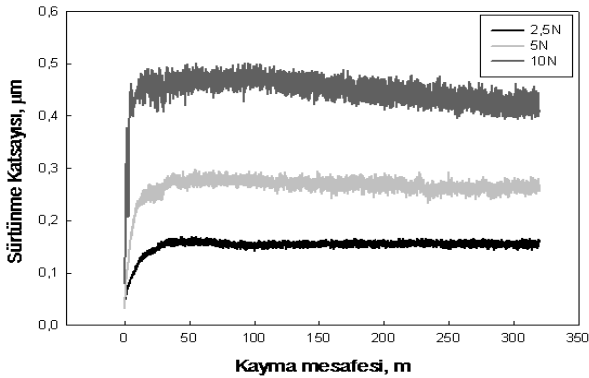


(a)



(b)

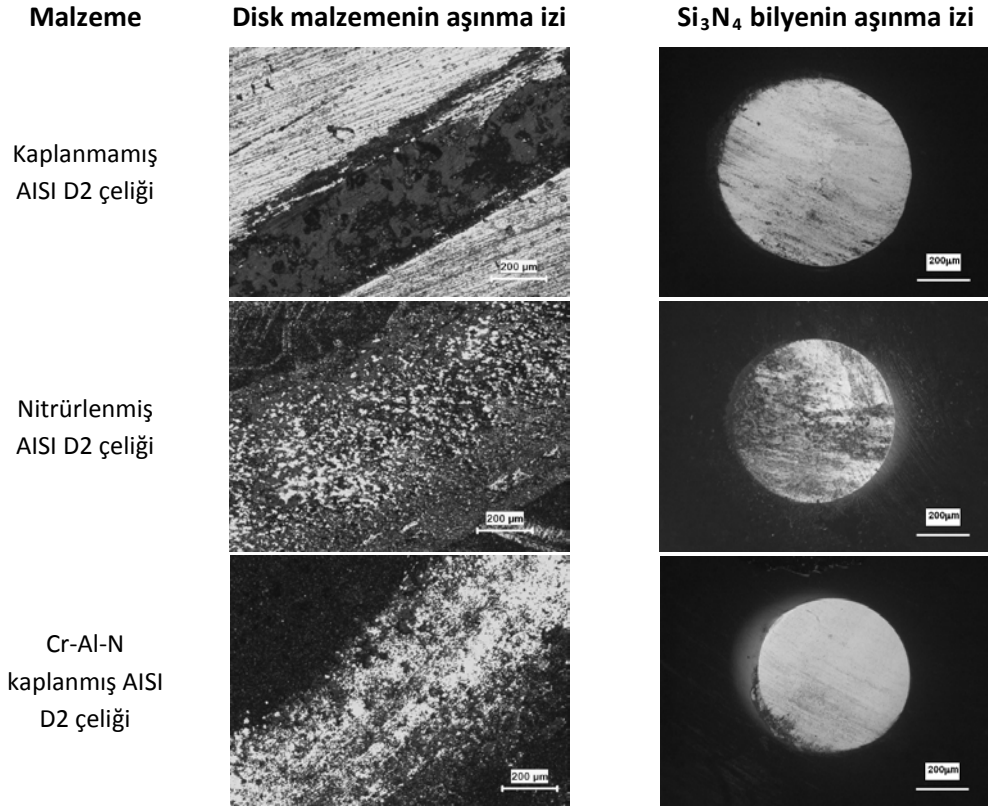
Şekil 2. Kaplanmamış, nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliklerinin aşınma yüküne bağlı olarak a) sürtünme katsayılarının ve b) aşınma hızlarının değişimi



Şekil 3. Cr-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliğinin kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim

Kaplanmamış, nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış AISI D2 çeliklerinin silisyum nitrür bilye karşısında 320 m mesafede, 2,5, 5 ve 10N yükler altında, 0,1m/sn hızında, gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda çeliklerde ve bilyelerde oluşan aşınma izleri Şekil 4' de gösterilmektedir. Farklı yüklerde yapılan aşınma deneylerinde hem bilye hem de

kaplanmamış, nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış çeliklerde oluşan aşınma izi kalınlıklarının artan yüklerle birlikte arttığı görülmektedir. Özellikle kaplanmamış çeliklerde ve aşındırıcı bilyede oluşan izlerin abrazif karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu izlerin derinlikleri yükün artışı ile artmaktadır. Buna karşılık nitrürlenmiş ve Cr-Al-N kaplanmış çeliklerde oluşan izler bilyeden kopan partiküllerin kaplanmış çelik üzerine yapışmasından dolayı adhezif karakterde olup yük artışı ile yapışma artmaktadır. Aşınma deneyi sonuçlarına göre en yüksek aşınma hızı değerleri kaplanmamış çeliklerde; en düşük değerler ise Cr-Al-N kaplanmış numunelerde tespit edilmiştir. Kaplanmamış çelik numunelerde aşınma hızı nitrürlenmiş numunelere göre 2 kat daha yüksek iken Cr-Al-N kaplanmış numunelere göre ise 4 kat daha fazla gerçekleşmiştir. Aşınma sırasında bilyede ise daha çok aşınma gözlenmiş ve abrazif karakterde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 0,1m/s hızda 5N yük altında gerçekleştiren aşınma deneyi sonucunda çeliklerin ve Si₃N₄ bilyenin aşınma izi mikroyapı görüntüleri

4. Sonuçlar

- AISI D2 çeliğinin Cr-Al-N kaplanması başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- Cr-Al-N kaplama tabakasının yoğun, homojen ve düzgün kaplama/matris ara yüzeyine sahip laminer yapıda olduğu belirlenmiştir.
- Cr-Al-N tabaka kalınlığının $11,8 \pm 1,3\mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir.
- Kaplama tabakasının CrN, (Cr,Fe)₂N_{1-x}, AlN and Fe₂N fazlarından oluştuğu görülmüştür.
- Cr-Al-N kaplama tabakası $2067 \pm 160 \text{ HV}_{0.01}$ değeri ile nitrürlenmiş tabakadan ($920 \pm 20 \text{ HV}_{0.01}$) ve kaplanmamış çelikten ($550 \pm 14 \text{ HV}_{0.01}$) daha yüksek sertlik değerleri sergilemiştir.
- Tüm malzemelerde uygulanan yükün artışına bağlı olarak sürtünme katsayısı ve aşınma hızının arttığı görülmüştür.
- Cr-Al-N kaplanmış çeliklerde nitrürlenmiş ve kaplanmamış çeliklere göre sırasıyla 2-4 kat daha az aşınma hızı değerleri bulunmuştur.

Kaynaklar

- Bobzin, K., Lugscheider, E., Nickel, R., Bagcivan, N., Kramer, A., 2007. Wear behavior of Cr_{1-x}Al_xN PVD-coatings in dry runnig conditions. *Wear*, **263**, 1274–1280.
- Barshilia, H.C., Selvakumar, N., Deepthi, B., Rajam, K.S., 2006. A comparative study of reactive direct current magnetron sputtered CrAlN and CrN coatings. *Surface & Coatings Technology*, **201**, 2193-2201.
- Benabdallah H. S. and Boness, R. J., 1999. Boness, Tribological behavior and acoustic emissions of alumina, silicon nitride and SAE52100 under dry sliding. *J. Mater. Sci.* **Vol. 34**, 4995-5004.
- Coatings Technology. *Surface and Coatings Technology*, **Vol., 169-170**, 367–370.
- Çeğil, Ö. And Şen, Ş., 2010. Termoreaktif Difüzyon Yöntemiyle Çeliklerin Yüzeyinde Ti-Al-N Esaslı Kaplamaların Oluşturulması Ve Özelliklerinin İncelenmesi. *13th International Materials Symposium*, Denizli, 1351-1359.
- Ding, X. Z., Tan, A.L.K., Zeng, X.T., Wang, C., Yue, T., Sun, C.Q., 2008. Corrosion resistance of CrAlN and TiAlN coatings deposited by lateral rotating cathode arc. *Thin Solid Films*, **516**, 5716–5720.

- Ding , X.Z., Bui, C.T., Zeng, X.T., 2008. Abrasive wear resistance of Ti_{1-x}Al_xN hard coatings deposited by a vacuum arc system with lateral rotating cathodes. *Surface & Coatings Technology*, **203**, 680–684.
- Ding X. Z. and Zeng, X. T., 2005. Structural, mechanical and tribological properties of CrAlN coatings deposited by reactive unbalanced magnetron sputtering. *Surface & Coatings Technology*, **200**, 1372 – 1376.
- Ding X. Z. and Zeng, X. T., 2005. CrAlN coatings deposited by reactive unbalanced magnetron sputtering, *Zeng, SIMTech. Reports*, Vol. 6, No. 3.
- Kimura, A., Kawate, M., Hasegawa, H., Suzuki, T., 2003. Anisotropic lattice expansion and shrinkage of hexagonal TiAlN and CrAlN films *Surface and*
- Lin, J., Mishra, B., Moorea, J.J., Sprou, W.D., 2008. A study of the oxidation behavior of CrN and CrAlN thin films in air using DSC and TGA analyses. *Surface & Coatings Tech.* **202**, 3272-3283.
- Mimaroglu, A., Sen, U., Unal, H., 2008. Abrasive Wear Volume Maps for PA6 and PA6 Composites Under Dry Working Condition. *Appl Compos Mater*, **15**, 13–25.
- Martini, C., Palombarini, G., Poli G., Prandstraller, D., 2004. Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings. *Wear*, **Volume: 256-6**, 608-613.
- Nouveau, C., Labidi, C., Martin, J. P. F., Collet , R., Djouadi, A., 2007. Application of CrAlN coatings on carbide substrates in routing of MDF. *Wear*, **263**, 1291-1299.
- Ozdemir, O., Sen, S., Sen, U., 2007, Formation of chromium nitride layers on AISI 1010 steel by nitro-chromizing treatment. *Vacuum*, **81**, 567-570.
- Pulugurtha S. R. and Bhat, D.G., 2006. A study of AC reactive magnetron sputtering technique for the deposition of compositionally graded coating in the Cr–Al–N system. *Surface & Coatings Technology*, **201**, 4411-4418.
- Romero, J., Gomez, M.A., Esteve, J., Montala, F., Carreras, L., Grifol, M., Lousa, A., 2006. CrAlN coatings deposited by cathodic arc evaporation at different substrate bias. *Thin Solid Films*, **515**, 113-117.
- Romero, J., Gomez, M.A., Esteve, J., Montala, F., Carreras, L., Grifol, M., Lousa, A., 2006. CrAlN coatings deposited by cathodic arc evaporation at different substrate bias. *Thin Solid Films*, **515**, 113-117.
- Unal, H., Sen, U., A. Mimaroglu, 2005. Abrasive wear behaviour of polymeric materials. *Materials and Design*, **26**, 705–710.
- Yu, C., Wang, S., Tian, L., Li, T., Xu, B., 2009. Microstructure and mechanical properties of CrAlN coatings deposited by modified ion beam enhanced magnetron sputtering on AISI H13 steel. *J. Mater. Sci.*, **44**, 300-305.
- Yu, C., Tian, L., Yinghui, W., Wang, S., 2009. The effect of substrate bias voltages on impact resistance of CrAlN coatings deposited by modified ion beam enhanced magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, **255**,40.