

CrN Kaplamanın Dizel Motor Silindir Gömleği Aşınmasına Etkisi

Hanbey HAZAR, Cengiz ÖNER

Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü

ÖZET

Bu çalışmada, bir dizel motorunun silindir yüzeyi CrN (Krom Nitrür) ile kaplanarak aşınma davranışı incelenmiştir. Yapılan deneylerde dört zamanlı bir dizel motorunun silindir yüzeyi katodik Ark PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemi kullanılarak seramik bir malzeme olan (CrN) ile kaplanmıştır. Önce CrN kaplanmış test motoru farklı devir ve yüklerde test edilmiştir. Daha sonra aynı motor standart (kaplamasız) olarak aynı çalışma şartlarında test edilmiştir. Yapılan deneyler sonrasında silindirlerin aşınma karakteristiklerini araştırmak için mikro sertlik, SEM (Scanning Electron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectrograph) ve yüzey pürüzlülüğü analizleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre CrN kaplanmış silindir yüzeyi üzerinde, normal silindire göre daha az aşınma ve çiziklerin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dizel motor, silindir, CrN kaplama

ABSTRACT

In this study, the wear behaviour of CrN coating on the cylinder in a diesel engine were investigated. The surface of cylinder a four-stroke diesel engine selected for experiment was coated ceramic material (CrN) using the katodik Ark PVD (Physical Vapour Deposition) technique. At the first stage CrN coated test engine was tested at different speed and load conditions. After this test, engine was tested again under the same operation conditions as the standard engine. Micro-hardness, SEM (Scanning Electron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectrograph), and surface roughness tests were used to study the wear characteristics of the specimens. The results show that the poor wear and worn depth on the CrN coated cylinder less than uncoated cylinder.

Keywords: Diesel engine, Cylinder, CrN coating

GİRİŞ

otomotiv parçalarındaki aşınma, günümüzde önemli bir problem olmaya devam etmektedir. İçten yanmalı motorlarda meydana gelen aşınmanın birçok sebebi vardır. Aşınma, çeşitli mekanik etkilerle cisimlerin yüzeylerinden mikro taneciklerin kopması neticesinde meydana gelen malzeme kaybıdır. Bu şekilde yüzeyler ilk şekillerini kaybeder; parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez. Makine elemanlarının yaklaşık olarak % 70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır.

Tribolojik sistemlerde malzemelerin aşınma davranışlarının iyileştirilmesi yanında, yüzey kalitesinin artırılmasına ve sürtünme katsayısının düşürülmesine çalışılır. Hareketli makine sistemlerinde sürtünmenin neden olduğu enerji kayıplarının azaltılması için yağlar ve yağlama teknikleri üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır. Aşınmayı azaltmak için genelde yağlama ve malzeme çalışmaları birlikte yapılmaktadır. Sürtünmenin sebep olduğu enerji kayıplarının yanı sıra aşınmadan dolayı meydana gelen malzeme kayıpları ve makine onarımı için harcanan zaman göz önüne alınırsa, tribolojinin makine tasarımı ve malzeme geliştirme üzerindeki etkisi önemini korumaktadır [1].

Aşınma miktarı; malzemenin cinsine, sürtünen yüzeylerin şekil ve pürüzlülüğüne, sürtünme koşullarına ve çevrenin

çeşitli kimyasal etkilerine bağlıdır. Büyük ekonomik kayıplara neden olduğundan bu konu üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Ancak çok çeşitli etkenlerin rol aldığı bir olay olduğundan laboratuvar koşullarında elde edilen sonuçlara dayanarak uygulamadaki aşınma miktarını tam olarak tahmin edecek bir bağıntı henüz geliştirilmemiştir. Aşınmayı tamamen önlemek olanaksızdır. Ancak bu olayı yakından tanımanın ve etkileyen faktörleri iyi bir şekilde saptamanın aşınmayı en düşük düzeyde tutma bakımından çok yararlı olacağı açıktır [2].

Bu bağlamda malzeme bilimi önem kazanmaktadır. Malzemelere çeşitli işlemler yapılarak kalitesinin artırılması, ömrünün uzatılması sağlanmaktadır. Birbiri üzerinde sürtünerek hareket eden motor parçalarının zamanla aşınması kaçınılmazdır. Aşınmayı azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunların başında malzemenin yüzey kalitesinin artırılması gelmektedir. Günümüzde ileri teknoloji kaplama yöntemleri yardımıyla, çeşitli kompozit malzemeler kullanılarak bir makine parçasının yüzeyinin kimyasal terkihi değiştirilmekte ve daha nitelikli olması sağlanmaktadır.

Motorun efektif verimini artırmanın en etkin yolu, kayıp enerjileri azaltmaktır. Bunun için bir taraftan malzeme teknolojisine dayanan sürtünme kayıplarının azaltılmasına çalışılırken, diğer taraftan yanma verimi artırılarak egzoz ve soğutma kayıpları azaltılmaya çalışılmaktadır [3].

Günümüz otomotiv endüstrisinde yaygın olarak gri dökme demir (örneğin GG 25) veya alüminyum silisyum alaşımı (örneğin 6 k AlS: 6CU4) kullanılmaktadır [4].

Alüminyum motor blokları, standart dökme demir bloklara göre; motor ağırlığının ve hacminin düşürülmesi, silindir aralıklarının azaltılması ve ısı transferi özelliklerinin iyileştirilmesi gibi birçok üstünlüğe sahiptir. Fakat alüminyum silindir yüzeyleri, soğuk çalışma ya da ısınma gibi fakir yağlama şartlarında yapışarak daha fazla aşınmaya sebep olmaktadır [5].

Motorlarda kullanılan yağlama yağları, silindir-piston ve segman arasında bir yağ filmi meydana getirerek metal-metal temasını önler. Fakat, aşınmayı istenen düzeyde azaltamaz. Bu amaçla motorların silindir yüzeyleri çeşitli yöntemler kullanılarak aşınmaya dayanıklı seramik malzemeler ile kaplanmaktadır. Böylece ana malzeme (substrate) zarar görmemekte ve silindirlerin ömrü artmaktadır.

Juanshang ve arkadaşları [6], içten yanmalı motorlardaki silindir-piston ikilisinin aşınma davranışını iyileştirmek için yaptıkları bir çalışmada, plazma sprey yöntemi ile bu parçaları kaplamış ve lamel gri döküm-demir malzemeyle mukayese etmişlerdir. Deneyler neticesinde, kaplanmış parçalarda aşınmanın önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir.

Kvernes ve arkadaşları da [7], dizel motorlarındaki ısı yüklemelerinde oluşan termal şok ve korozyonu azaltmak için, plazma sprey yöntemi ile nikel-krom-alüminyum kaplamaları, bir dizel motorunda kullanmışlardır. Deneyler sonucunda, herhangi bir korozyon ya da çatlama rastlanmadığını belirlemişlerdir.

Motor parçalarının çoğu, sıcaklığa duyarlı sertleştirilmiş parçalardır. Bu parçalardaki tribolojik sistemler; temas basıncı, temas sıcaklığı, yağlama veya yağsızlık, aşınma oranı ve sürtünme kaybı gibi faktörlere bağlı olarak çalışır [8].

CrN kaplamalar, dökme demir silindire göre daha yüksek korozyon direncine sahiptir [9]. Yapılan çalışmalarda CrN (Krom Nitrid) kaplamanın, yüksek korozyon ve plastik deformasyon direncine sahip olduğu [9,10], sert kaplanmış malzemelerin korozyon direncinin iyileştirilmesinde; daha düşük substrate pürüzlülüğü ve uygun morfoloji faktörlerinin de etkili olduğu [11,12] bildirilmektedir.

Motor parçalarının kaplanmasında birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemidir. Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi, mikro yapıyı etkilemeyerek çok katlı kaplamaların oluşturulmasına ve bileşimin değiştirilerek

kaplama özelliklerinde ayarlama yapabilme imkanı sunmaktadır. Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi, yüksek verim ve yüksek iyon-akım yoğunluğundan dolayı tribolojik uygulamalar için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem; malzemelerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için CrN ile kaplanmasında oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Birçok çalışmada CrN kaplamaların biriktirme işleminde iyi bir yapışma (adhering) özelliği gösterdiği [13], ayrıca FBB (Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemiyle yapılan kaplama işleminde yüksek adhezyon özellikli kaplamalar elde edildiği bildirilmiştir [14].

Bu çalışmada, hava soğutmalı 6LD 400 Lombardini tek silindirli bir dizel motorun silindir yüzeyi, katodik Ark PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemi kullanılarak CrN kaplanmış ve bu silindirin, kaplanmamış silindire göre yüzeyi üzerinde meydana gelen aşınma davranışının iyileşmesi hedeflenmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada, hava soğutmalı 6LD 400 Lombardini motorlar kullanılmıştır. Tablo 1'de bu çalışmada kullanılan katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemine ait üretim parametreleri; Tablo 2'de kullanılan seramik malzemenin teknik özellikleri; Tablo 3'de ise deney motoruna ait teknik özellikler verilmiştir. Burada kullanılan motorun silindir gömleği yüzeyi, İstanbul Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında, seramik bir malzeme olan CrN ile $1,8 \pm 0,2$ μm kalınlığında kaplanmıştır. İki aşamada yapılan deneylerde, kaplanmamış ve CrN kaplanmış motorlar, aynı yük şartlarında (1/2 yükte), yaklaşık olarak her motor için, 200 saat çalıştırılmıştır.

Literatür araştırmalarına [5, 15] uygun olarak motor tipi, kaplama malzemesi, deney seti ve cihazları tespit edilerek gerekli test şartları hazırlanmıştır. SEM ve EDS analizlerinde LEO 440 Model, sertlik ölçümlerinde ise Instron wolpert Model cihaz kullanılmıştır. Sertlik ölçümü 30 gr. yük altında ve HV cinsinden yapılmıştır. Kaplama kalınlığı SEM fotoğraflarındaki ölçü sistemi kullanılarak beklenen değerde tespit edilmiştir. Motorlara yük vermek için Cusson P8 160 Model elektrikli dinamometre cihazı kullanılmıştır. Deneysel çalışmadan önce yapılan literatür araştırmasında, katodik ark PVD yönteminin motorlarda yanma odası parçaları üzerinde

Tablo 1. Ark PVD CrN Kaplamaların Üretim Parametreleri

Kaplama süresi (dk.)	80
Katod akımı (A)	90
Bias voltajı (V)	150
Kaplama sıcaklığı (°C)	250-300
Kaplama basıncı (Torr)	$7,5 \times 10^{-3}$

iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [17]. Bu nedenle, bu çalışmada kaplama yöntemi olarak katodik ark PVD yöntemi seçilmiştir.

Tablo 2. CrN Kaplamanın Özellikleri [14].

CrN	
Kaplama kalınlık aralığı (μm)	1.0 – 10
Sertlik HV (kg/mm^2)	2200 ± 400
Oksidasyon sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	700
Sürtünme katsayısı (μm)	0.50
Yüzey pürüzlülüğü (Ra)	0.20
Renk	Gümüş grisi
Kalınlık (μm)	1.8 ± 0.2

Tablo 3. 6LD 400 Lombardini Motorun Teknik Özellikleri

Motorun markası ve tipi	6LD 400 Lombardini
Strok sayısı	4
Silindir sayısı	1
Silindir çapı	86 mm
Strok	68 mm
Motor gücü	6.25 / 8.5 (kW / hp)
Yakıtı	Dizel motorini
Püskürtme şekli	Direkt enjeksiyonlu
Püskürtme basıncı	200 kg / cm^2
Soğutma şekli	Hava soğutmalı
Sıkıştırma Oranı	18:1
Devir	3600 d /dk

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, silindir yüzeyi CrN kaplanmış ve kaplanmamış silindir gömleklerinin aşınma davranışları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonrası her iki motordaki silindir gömleği sökülerek bu parçaların karşılıklı aynı bölgelerinden numuneler alınmış ve SEM fotoğrafları çekilmiş, yüzey pürüzlülüğü incelenmiş, yüzey sertlik ve EDS (Energy Dispersive Spectrograph) analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Tablo 4'de deneylerde kullanılan motor silindirlerinin ölçülen yüzey sertlik değerleri, Tablo 5'de ise seramik kaplanmış ve kaplanmamış motor silindirlerinin ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri verilmektedir.

Malzemelerin aşınma miktarları üzerinde, yüzey pürüzlülüğünün ve sertliğinin önemli ölçüde etkili olduğu bilinmektedir. Tablo 4'de kaplama yapılmış silindir gömleğinin kaplama yapılmamış silindire göre yüzey sertliğinin yüksek olması ve Tablo 5'de çalışma sonrası CrN kaplı silindir gömleğinin pürüzlülük değerlerinin düşük olması, bu düşüncüyü desteklemektedir.

Şekil 1'de kaplanmamış silindir gömleğinin çalışma sonrası, kaplanmış silindir gömleğine göre aynı bölgeden alınan, numunenin SEM fotoğrafı verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yüzeyi kaplanmamış silindir gömleğinde belirgin olarak aşınma çizgileri görülmektedir.

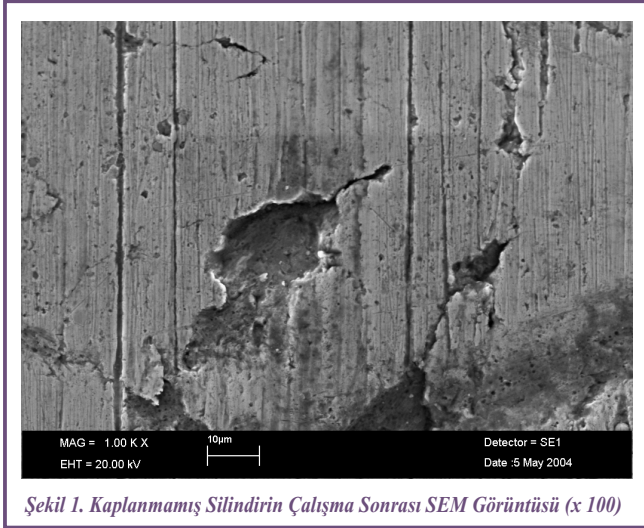
Tablo 4. Deneylerde Kullanılan Motor Silindirlerinin Ölçülen Yüzey Sertlik Değerleri

HV Sertlik (kg/mm^2)	
CrN kaplanmış silindir	1800
Normal silindir	243

Tablo 5. Seramik Kaplanmış ve Kaplanmamış Motor Silindirlerinin Ölçülen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Çalışma sonrası silindirlerin yüzey pürüzlülüğü (Ra)	
Normal silindir	0.47
CrN kaplanmış silindir	0.26

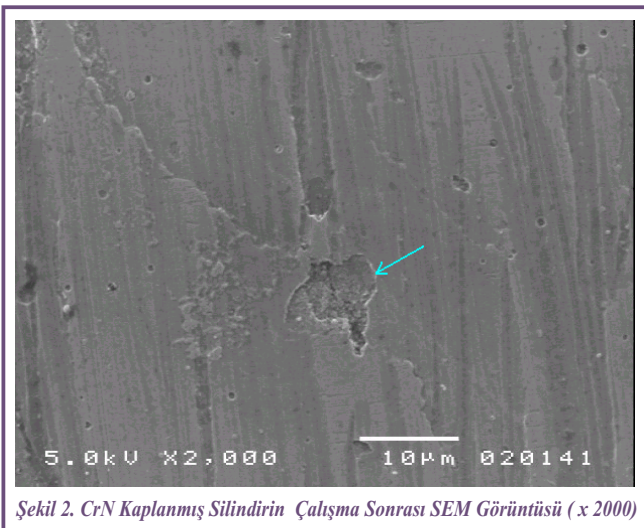
Pürüzlü yüzeylerdeki temas alanının genişlemesi, silindir yüzeylerindeki sürtünme katsayısının değerini yükselttiği ve aşınmayı arttırdığı söylenebilir. CrN kaplı silindir gömleğinin yüzey pürüzlülük değerinin düşük olmasının karşıt malzemede de aşınmayı azalttığı düşünülmektedir. Nitekim segman sürtünme yüzeyleri incelendiğinde CrN kaplı silindirde çalışan segman yüzeylerinin daha az aşındığı görülmüştür. Silindir-segman-piston çalışma mekanizması düşünüldüğünde CrN kaplanmış silindir yüzey pürüzlülüğünün düşük olması (Tablo 5), hem piston hem de segman üzerinde oluşan abrasiv aşınmayı azalttığı ifade edilebilir. Yüzey pürüzlülüğü arttığı zaman aşınma temas noktalarından kopan aşınma partikülleri, zamanla kazımalı aşınma olarak tarif edilen aşınmayı meydana getirmektedir. Şekil 1'de silindir yüzeyinde görülen derin çizgilerin ve yırtılmaların sebebinin, bu aşınma partiküllerinden kaynaklandığı söylenebilir. Motorun çalışması esnasında silindir ile segman arasındaki yağ filminin zaman zaman veya ilk çalışma esnasında yırtılmasından dolayı metal-metal teması sonucu üretilmiş çeşitli metal hasarları meydana gelmektedir. Şekil 1'e bakıldığında kaplama yapılmamış silindir yüzeyi üzerinde meydana gelen abrasiv aşınma ve aşınma partiküllerinin oluşturduğu serbest yüzey kırıkları, mikro çatlaklar ve aşınma izleri açık bir şekilde görülmektedir. Mikroyapı fotoğrafına bakıldığında aşınma kanalları dar ve derin olmasına rağmen bazı bölgelerde genişleyip derinleştiği, ayrıca silindir malzemesinin GG 25 gri dökme demir



olmasından dolayı oluşan kısmi döküm boşlukları görülmektedir.

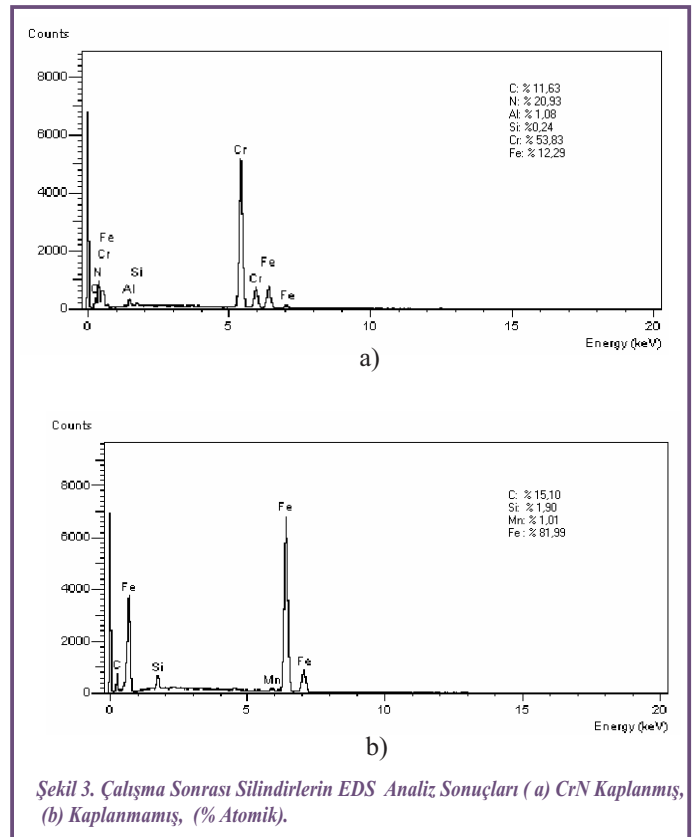
Şekil 2'de CrN ile kaplanmış silindir gömleği yüzeyinin çalışma sonrası, kaplanmamış silindir gömleğine göre aynı bölgeden alınan, numunenin SEM fotoğrafı verilmektedir.

CrN kaplanmış silindirin sürtünen yüzeyinde önemli bir hasarın olmadığı, ince taneli ve düzgün bir yüzey topografyasına sahip olduğu Şekil 2'de görülmektedir. CrN kaplamanın bağıl olarak daha yüksek yüzey sertliğine (Tablo 4) ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü (Tablo 5) sahip olmasının bir sonucu olarak silindir yüzeyinde aşınma direncini arttırdığı ve böylece aşınmayı azalttığı söylenebilir. Şekil 2'de CrN kaplanmış silindir yüzeyi incelendiğinde herhangi bir şekilde derin bir mikro çatlakın veya normal silindire göre aşınma izinin çok az olduğu açıkça görülmektedir. Yapılan kaplama işleminde bileşik tabaka yapısının (adhezyonun) yüksek olması, hem iyi bir aşınma hem de iyi bir sürtünme direncine sahip olduğunu göstermektedir. Silindir gömleğinin bu şekilde yüzey



modifikasyonun değiştirilmesi, bu olumsuz etkileri azaltmış ve aşınma miktarını düşürmüştür. Böylece ana malzemenin (substrate) zarar görmesi önlenmiş ve silindir gömleğinin ömrünün artması sağlanabilmiştir. Şekil 3'de CrN kaplanmış (a) ve kaplanmamış (b) silindirin çalışma sonrası EDS analizleri verilmektedir.

Yapılan EDS sonuçlarına göre, silindir gömleğinin karşılıklı bölgelerinden alınan numunelerin elementer içeriğinde ciddi bir değişimin olmadığı, meydana gelen değişimin ise silindir-segman-piston aşınma mekanizması düşünüldüğünde, piston ve segmanın silindir içindeki hareketiyle ana (substrate) malzeme yüzeyinden grafitin taşınmasının bir sonucu olduğu düşünülebilir. Bu ölçüm sonucuna göre malzeme değişiminin keskin bir düşüş ya da yükselme göstermediği ve element konsantrasyonunun normal olduğu söylenebilir.



SONUÇ

Motorlarda, silindirde meydana gelen aşınmayı azaltmanın etkin yollarından biri, silindir yüzeyinin çeşitli ileri seramik malzemelerle ve yöntemlerle kaplanmasıdır. Silindirlerin uygun bir seramik malzeme ile kaplanması, oluşan aşınmayı azaltmakta, böylelikle motorun ömrü arttırılabilmektedir. Bu çalışmada, bir dizel motorunun silindir yüzeyi CrN seramik malzeme ile kaplanmış ve meydana gelen aşınma incelenmiştir. Yapılan deneylerde:

1. Seramik kaplanmış silindir gömleğinin yüzey pürüzlülüğünün işlem görmemiş silindire göre daha az olduğu ve düşük yüzey pürüzlülüğünün aşınmayı azalttığı,
2. CrN kaplanmış silindir gömleğinin yüzey sertliğinin normal silindire göre yüksek olmasının da aşınma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu,
3. Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemi ile silindir yüzeyi kaplandığında, kaplama sonrası yüzeylerde herhangi bir ek işlem yapılmadan kullanılabileceği,
4. Yapılan kaplama neticesinde, seramik kaplanmış silindir gömleğinin kaplanmamış silindir gömleğine göre ömrünün arttığı söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar proje no: 924 numaralı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi kapsamında hazırlanan bu çalışmaya olan destekleri nedeniyle Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimine teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. **Akkurt, M.**, Makine Elemanları, İkinci Cilt, İ.T.Ü. Maçka Makine Fakültesi, 1982.
2. **Onaran, K.**, Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 348, 349, 355, 1992.
3. **Hazar, H., ve Öner, C.**, “The Effects of Thermal Barrier Coating on the Engine Performance”, 8th International Combustion Symposium, Turkey, 125-126, 2004.
4. **Kamu, R., ve Bryzik, W.**, “Adiabatic TurboCompound Engine Performance Prediction”, SAE Paper, 145, 1978.
5. **Venkatesh, S.**, “Surface Treatments for Pistons and Their Effect on Engine Performance”, Wear, No. 25, 65-71, 1973.
6. **Juanshang, J. ve Barbezat, G.**, “The Tribological Behavior of Various PlasmaSprayed Coatings Against Cast Iron”, Surface and Coatings Technology, No. 52, 169-178, 1992.
7. **Kvernes, I. ve Fortum, P.**, “Use of CorrosionResistant PlasmaSprayed Coatings in Diesel Engines”, Thin Solid Film, No. 5, 259-269, 1978.
8. **Yaşar, H. Büyükkaya, E., ve Fidil, A.**, “Termal Bariyer Kaplamanın Turbodoldurmalı Bir Dizel Motorunun Egzoz Gaz Ekserjisi Akışına Etkisi”, 12. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği ve Kongresi, 310- 391, 2000.
9. **Liu, C. Leyland, A. Bi, Q. ve Matthews, A.**, “Corrosion Resistance of MultiLayered PlasmaAssisted Physical Vapour Deposition TiN and CrN Coatings”, Surface and Coatings Technology, No. 141, 164-173.
10. **Liu, C. Bi, Q. and Matthesw, A.**, Eis Comparison on Corrosion Performance of PVD TiN and CrN Coated Mild Steel in 0.5 N NaCl Aqueous Solution, Corrosion Science, No. 43, 1953-196, 2001
11. **Jehn, H. A.**, “Improvement of the Corrosion Resistance of PVD Hard CoatingSubstrate System” Surface and Coatings Technology, No. 125, 212-217. 2000.
12. **Su, Y. L. Yae, S. H. Leu, Z. L., Wei, C. S., ve Wu, C. T.**, “Comparasion of Tribological Behavior of Three Films- TiN, TiCN and CrN Grown by Physical Vapour Deposition”, Wear, No. 213, 165- 174, 1997.
13. **Wang, Y. ve Brogan, K.**, Wear and Scuffing Characteristics of Composite Polymer and Nickel / Ceramic Composite Coated Piston Skirt Against Aluminum and Cast Iron Cylinder, Wear, No. 250, 706-717, 2001.
14. **Bozyazı, E. E.**, Elektrolitik Sert Krom ile Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemiyle Krom Nitrür Kaplamaların Yağlı Ortam Aşınma Davranışlarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 38, 2002.
15. **Joseph, H. T. ve Oregon, A.**, “Friction, Lubrication and Wear Technology”, ASM, No. 18, 1992.
16. **Gadow, R ve Scherer, R.**, Composite Coatings with Dry Lubrication Ability on Light Metal Substrate, Surface and Coatings Technology, No. 151, 471-477, 2002.