

İçi ve Dışı Plazma Sprey Yöntemiyle Cr_3C_2 Kaplanmış Egzoz Borusunun İncelenmesi

Serhat ŞAP^{1*}, Hanbey HAZAR¹

¹Bingöl Üniversitesi, T.B.M.Y.O. Bingöl/TÜRKİYE

*ssap@bingol.edu.tr

(Geliş/Received: 27.04.2017; Kabul/Accepted: 06.07.2017)

Özet

Bu çalışmada dizel bir motorun egzoz borusunun iç ve dış kısımları plazma spre yöntemiyle, krom karbür (Cr_3C_2) malzeme ile 100 mikron kalınlığında kaplanmıştır. Egzoz borusunun krom karbür (Cr_3C_2) malzeme ile kaplanmasıyla hem iç hem de dıştan etki eden, kimyasal ve fiziksel çözücü ve deformasyona uğratici faktörlerin etkisi azaltılmıştır. Seçilen kaplama malzemesinin korozyon direnci yüksek olduğu için egzoz manifoldu, egzoz borusu ve susturucunun çevresel şartlardan dolayı oluşacak korozif deformasyonun önüne geçilmiştir. Elde edilen sonuçlar, içi ve dışı kaplanmış egzoz borusunun malzeme ömrünün standart egzoz borusuna göre arttığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Plazma spre kaplama, Krom karbür, Dizel motor, Egzoz emisyon.

Investigation of Inside and Outside Cr_3C_2 Coated Exhaust Pipe by Plasma Spray Method

Abstract

In this study, inner and outer parts of the exhaust pipe of a diesel engine were covered with 100 micron thick chromium carbide (Cr_3C_2) material by plasma spray method. Coating of the exhaust pipe with chromium carbide (Cr_3C_2) material reduces the effects of chemical and physical solvent and deformation factors which affect both inside and outside. Due to the high corrosion resistance of the selected coating material, the corrosive deformation of the exhaust manifold, the exhaust pipe and the muffler due to the environmental conditions is prevented. The obtained results show that the material life of the inner and outer coated exhaust pipe increases compared to the standard exhaust pipe.

Keywords: Plasma spray coating, Chromium carbide, Diesel engines, Exhaust emissions.

1. Giriş

Modern teknolojinin ihtiyaç duyduğu temel maddelerin önemli bir kısmını oluşturan metal ve alaşımlar, çeşitli faktörlerin etkin olduğu dış ortamlarda kullanılmaktadırlar. Metal yüzeylerinin dış ortamdan korunması veya kullanım alanına göre maruz kaldığı pas ve korozyonu ortadan kaldırmak veya minimuma indirmek amacıyla çeşitli yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Bu işlemlerden biri olan kaplama işlemi ile motor parçalarının zor çalışma ortamlarında mukavemetlerinin artırılması, yapısal olarak bozulmalarının

önlenmesi ya da en aza indirgenebilmesi, korozif koşullarda dayanımlarının sağlanması, mekanik sürtünme sonucu çizilme ve aşınmalarının bertaraf edilebilmesi sağlanmaktadır [2]. Makine parça ve ekipmanlarında, aşınma ve korozyona bağlı olarak çok büyük miktarlarda ekonomik kayıplar meydana gelmektedir [3]. Bu kayıpları azaltmak için malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirme imkânı vardır [4]. Yüzey kalitesini artırmak için uygulanabilecek yöntemlerden biri de plazma spre yöntemidir.

Plazma spre yardımıyla aşınma, ısınma veya korozyon ile bozulmuş bölgelerin kaplanmasıyla bu parçaların tamirata da

mümkündür. Plazma kaplama yöntemi bir tabakanın kuvvetlendirilmiş yüzey özellikleri ile bir ana metalin farklı nitelikli bir tabaka ile kombinasyonuna imkân sağlar. Plazma kaplama aynı zamanda işlem esnasında ana metal sıcaklıklarını düşük tutarak hassas parçaların ısıl deformasyonlara uğrama riskini ortadan kaldırır [5]. Egzoz sisteminin kaplanmasıyla; hem açık alanda çeşitli çözücülere maruz kalmasından dolayı oluşan dış deformasyonların önüne geçilecek hem de egzoz gazı içerisindeki kimyasal çözücülerin olumsuz etkisi karşılanacaktır. Motorun çalışması esnasında sürekli devrim halinde bulunan motor parçaları elemanları, gerek çalışma ortamı (yüksek sıcaklık, basınç, korozyon gazları vb.) ve gerekse alçaktan yükseğe devir aralıklarında tekrarlı zorlamalar altında tribolojik deformasyonlara maruz kalmaktadır. Bu deformasyonlar malzemenin yüzeyinden başlayarak, iç yapısına kadar ilerlemekte ve hasarlara sebep olmaktadır. Motor parçalarında meydana gelen bu deformasyonlar motorun bir süre sonra verimli çalışmasını engellemekte, yakıt tüketiminde artışa ve zararlı gaz emisyonlarına neden olabilmektedir. Termal bariyer kaplamalar altlık malzemesinin sıcaklığını düşürür; malzemeyi yanmış gazların olumsuz etkilerinden (sıcaklık, korozyon, oksitlenme) ve aşınmadan korur [6].

Bu çalışmada, egzoz borusunun iç ve dış kısımları krom karbür (Cr₃C₂) malzeme ile kaplanarak hem iç hem de dıştan etki eden, kimyasal ve fiziksel çözücü ve deformasyona uğraticı faktörlerin etkisi azaltılmıştır. Böylece egzoz borusunun ömrünü azaltıcı faktörler kaplama malzemesi tarafından karşılanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

4 zamanlı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, hava soğutmalı 6LD 400 model Lombardini marka dizel motor deney motoru olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada iki tip egzoz borusu kullanılmıştır. Bu egzoz borularından birincisi standart egzoz borusu (SB), ikincisi ise içi ve dışı kaplanmış egzoz borusudur (İDKB).

Kullanılan motorun teknik özellikleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri

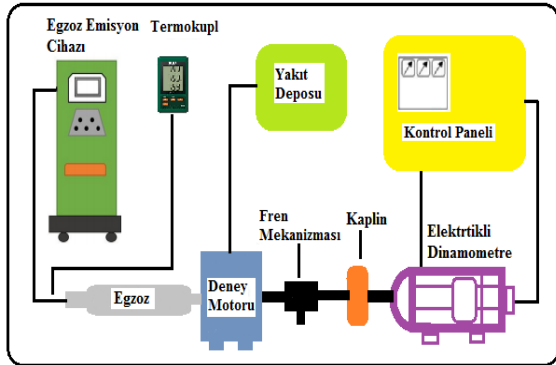
Motorun markası ve tipi	6LD 400 Lombardini dizel motor
Strok Sayısı	4
Silindir Sayısı	1
Silindir Çapı	86 mm
Silindir Hacmi	395 cm ³
Strok	68 mm
Motor Gücü	6.25 / 8.5 (kW / HP)
Maksimum Tork	19.6 – 2000
Ağırlık	45 Kg
Yağlama	Tam basınçlı
Püskürtme Şekli	Direkt enjeksiyonlu tam dizel
Püskürtme Basıncı	200 kg/cm ²
Soğutma Şekli	Hava soğutmalı
Devir	3600 dev/dk
Sıkıştırma Oranı	18:01
Boyutları	382 x 427 x 491 mm

Egzoz borusunun iç ve dış kısımları plazma sprej yöntemi kullanılarak krom karbür ile kaplanmıştır. Plazma sprej kaplama yönteminin seçilmesinin başlıca nedenlerinden bir tanesi de ana malzemenin özelliklerinde herhangi bir değişiklik yapmamasıdır. Kaplama malzemesi olarak krom esaslı sert kaplama malzemesi krom karbür kullanılmıştır. Kaplama, yaklaşık 100 mikron kalınlıkta yapılmış olup, kaplanacak olan malzemenin dış etkenlerden (korozyon vb gibi) korunması amaçlanmıştır. Kaplama yöntemi olan plazma sprej kaplama yöntemi, metallerin çeşitli tozlarla kaplanarak aşınmaya, oksitlenmeye, korozyona ve ısıya dayanıklı hale getirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir termal sprej kaplama yöntemidir. Bu yöntemle gerçekleştirilen kaplama sayesinde belirtilen özellikler elde edildiği gibi, ana malzemenin üstün özelliklerinden tokluk ve kolay şekillendirilebilme özellikleri de korunmaktadır. Böylece plazma sprej kaplama, metal ve seramiklerin üstün özelliklerinin yeni bir malzemedeki toplanmasına imkan sağlamaktadır. Kaplama üretim parametreleri ise Tablo 2.’ de verilmiştir.

Tablo 2. Plazma sprey kaplamanın üretim parametreleri

Parametreler	
Plazma Tabancasının Adı	Sulzer Metco 9 MB 80 KW
Kaplama Kalınlığı (Mikron)	100 Mikron
Bağlayıcı Toz Adı	80/20, Ni/Cr
Bağlayıcı Toz Katman Kalınlığı (Mikron)	20-30 Mikron
Argon Basıncı (Psig),	75 psig,l/dk
Hidrojen Basıncı (Psig), Akışı (l/dk.)	50 psig,l/dk
Toz Besleme Miktarı (gr/dk.)	45-60-g/dk
Püskürtme Mesafesi (cm)	8.5-9.0 cm
Taşıyıcı Gaz (N ₂) Basıncı (bar), Akışı (l/dk.)	26 (SCFH),l/dk

Cussons P8160 Model elektrikli dinamometre düzeneği üzerinde motor deneyleri yapılmıştır. Deney düzeneği; test motoru, egzoz emisyon cihazı, termometre, dinamometre, fren mekanizması, yakıt deposu ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Şekil 1’de deney düzeneği görülmektedir.

**Şekil 1.** Motor test düzeneği şematik görünümü

Deney motoru olarak sadece dizel motor kullanılmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış egzoz boruları çamur testine tabi tutulmuştur. Çamur testinde egzoz borularının gerçek çalışma koşulları oluşturulmaya çalışılmıştır. SB ve İDKB çamurlu bir ortamda ve boruların içerisinde su akacak şekilde 120 gün boyunca takip edilmiştir. Daha sonra egzoz borularının aynı bölgelerinden olmak üzere numuneler alınmıştır. Bu numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulduktan sonra metalografik incelemeler (SEM, EDAX, X-RAY) yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak mukayese edilmiştir. Bu işlemlerin

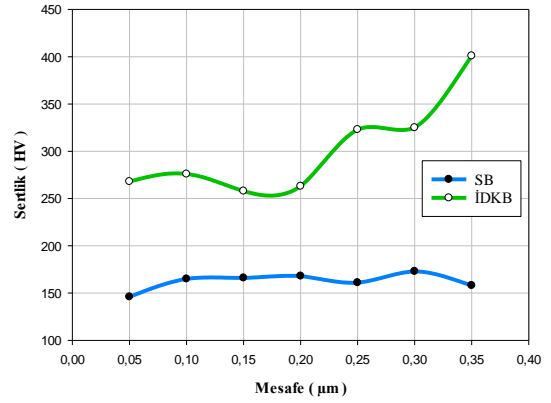
ardından kaplanmış ve kaplanmamış numuneler üzerinde korozyon deneyleri yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Metalografik mukayeseler

3.1.1. Mikrosertlik ölçümleri

İçi dışı kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin mikro-sertlik ölçümleri 10 gr/f yük altında yapılmıştır. Numunelerin değişen şartlar karşısında sertlik değerleri gözlemlenmiştir. Kaplama yapılan numunelerde oluşan Cr₃C₂-WC gibi stabil karbürler sertlikteki heterojen bir dağılıma neden olabilmektedir [7]. Şekil 2.’de SB ve İDKB numunelerinin yüzeylerinden altlık malzemesine doğru alınan sertlik değerleri ve yükün vurulduğu noktanın merkezinden bakalıte kadar olan mesafelerin grafiği görülmektedir.

**Şekil 2.** SB ve İDKB numunesinin sertlik-mesafe değişimi

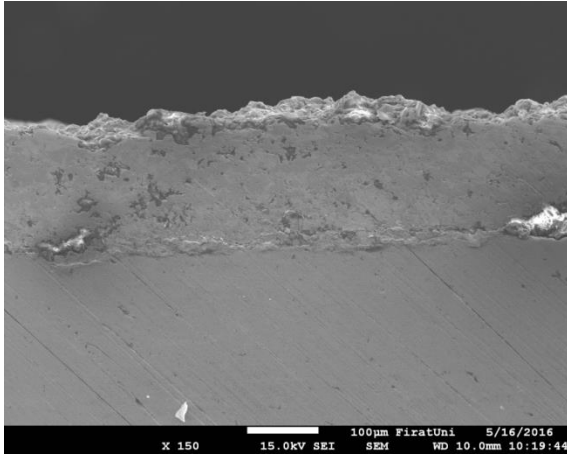
Sertlik analizinde tarama yaparken Vickers ucu çoğu zaman kaplama malzemelerine denk gelmesine rağmen, bu karbürlere ucun bastırılması sonucu sertlikte ani artışlar görülebilmektedir. Aşağıdaki sertlik-mesafe grafiklerinde görülen malzeme yüzeyinde ani artışların ve düşüşlerin görülmesinin sebebi de o anda Vickers ucunun karbürü bölgeye denk gelmesi olarak yorumlanabilir. Kaplama kalınlığı arttıkça malzeme gevrek bir hal alır ve darbelere karşı malzemenin direnci azalır. Başka bir deyişle malzeme gevrekleşerek kırılabilir bir hale gelir.

Şekil 2’de görüldüğü gibi SB ve İDKB numunelerinin sertlik değerleri mukayese edilmiştir. Burada SB numunesinin 7 bölgeden alınan sertlik değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir. Literatüre bakıldığında SB numunesinin sertlik değerlerinin dökme demir sertlik değerlerine yakın değerler olduğu tespit edilmiştir. İDKB numunesinde ise kaplama malzemesinden altlığa doğru sertlik değerlerinin 260 HV ile 400 HV arasında lineer bir şekilde arttığı görülmektedir. Ani artış ve düşüşlerin Vickers ucunun karburlu bölgelere denk gelmesi olarak yorumlanabilir. İDKB numunesinin SB numunesine göre sertlik değerlerinde artış görülmektedir. Bunun sebebi İDKB numunesinin Cr_3C_2 malzemesi ile kaplanmış olmasıdır. Sertlik Cr_3C_2 malzemesinin tipik bir özelliğidir.

3.1.2. Egzoz borularına ait numunelerin SEM analizi

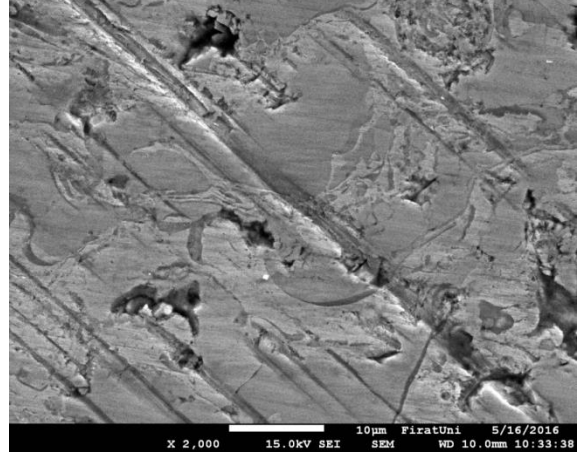
Kaplamaların detaylı mikro yapı analizlerinde, kaplama morfolojisi, dikey ve yatay çatlak oluşumlarını incelemeye kullanılmak üzere 43x,150x, 350x ve 2000x büyütmelerde SEM fotoğrafları alınmıştır.

Şekil 3’te İDKB Numunesinin x150 büyütmedeki SEM görüntüsünde kaplama kalınlığı görülmektedir. Kaplama tabakası, altlık malzeme ve ana malzeme net bir şekilde görülmektedir. Kaplama tabakasının ana malzemeye iyi bir şekilde yapışma özelliği gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3. İDKB numunesinin SEM görüntüsü

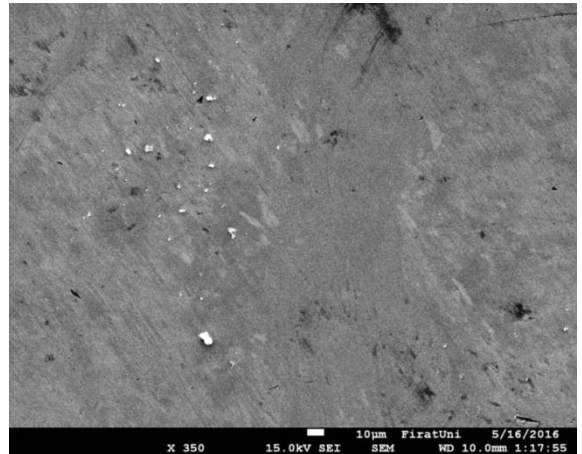
Şekil 4.’te İDKB Numunesinin x2000 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4. İDKB numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 4.’te İDKB Numunesinin x2000 büyütmedeki SEM görüntüsünde kaplama tabakası içerisinde oluşan çatlaklar net bir şekilde görülmektedir. Plazma sprej kaplamalarda termal şoklar nedeniyle çatlaklar oluşabilmektedir. Ayrıca SEM görüntüsünde kaplama sırasında oluşan gözenek ve boşluklar görülmektedir [8]. Kaplama tabakasında açık renkli bölgelerin yoğun olduğu bölgelerde karbür fazlalığından ötürü sertliğin arttığı söylenebilir [9].

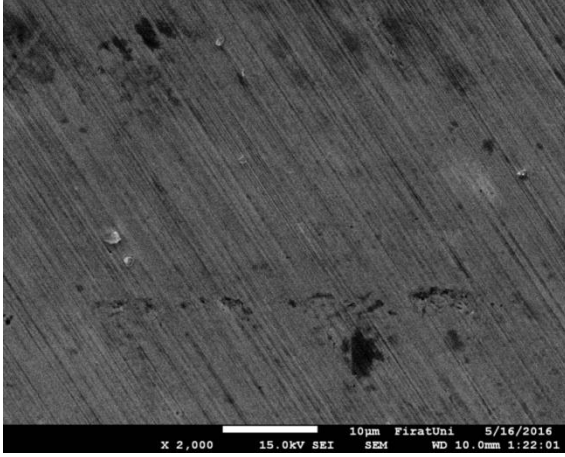
Şekil 5.’te SB Numunesinin x350 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 5. SB numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 5.’te SB Numunesinin x350

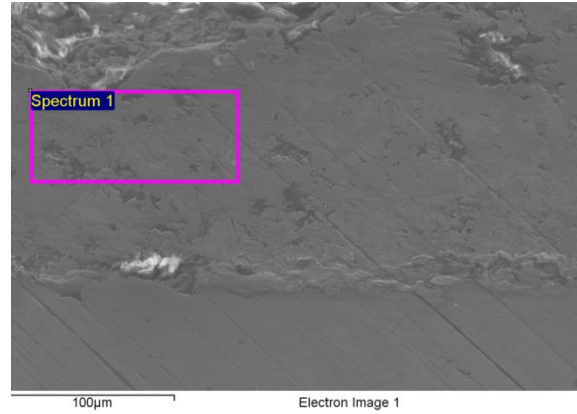
büyütmedeki SEM görüntüsünde küresel grafitler görülmektedir [10]. SB numunesinde herhangi bir kaplama işlemi yapılmamıştır. SB numunesinin EDAX analizinde içerisinde bulunan elementlerin Fe, C ve Mg olduğu tespit edilmiştir. Bu elementlerin yüzde ve atomsal olarak ağırlıkları EDAX analizinde verilmiştir. Şekil 6.'da SB Numunesinin x2000 büyütmede SEM görüntüsü görülmektedir.



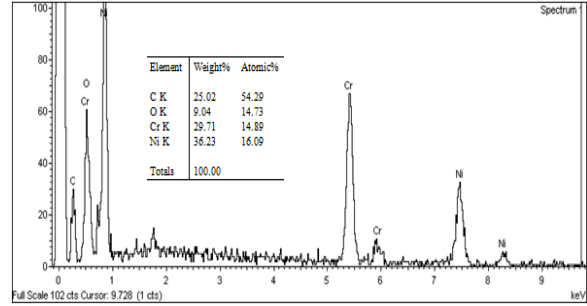
Şekil 6. SB numunesinin SEM görüntüsü

3.1.3. Egzoz borularına ait numunelerin EDAX analizi

Şekil 7'de İDKB numunesinin SEM elektron mikroskopunda fotoğrafı çekilmiştir ve bir nokta tespit edilerek spectrum 1 olarak işaretlenmiştir. Bu bölgede yapılan EDAX analizi bizlere numune hakkında detaylı bilgi vermektedir. İDKB numunesinin EDAX görüntüsünde spectrum 1 numaralı bölgedeki elementler Şekil 8' de görülmektedir. Hakim element (Ni) Nikeldir. İDKB numunesinin spectrum 1 bölgesindeki analiz sonuçlarına göre tespit edilen elementlerin yüzde ağırlıkları; % 25.02 C , % 29.71 Cr ve % 36.23 Ni' dir. Atomal ağırlıkları ise % 54.29 C , % 14.89 Cr ve % 16.09 Ni' dir [11].

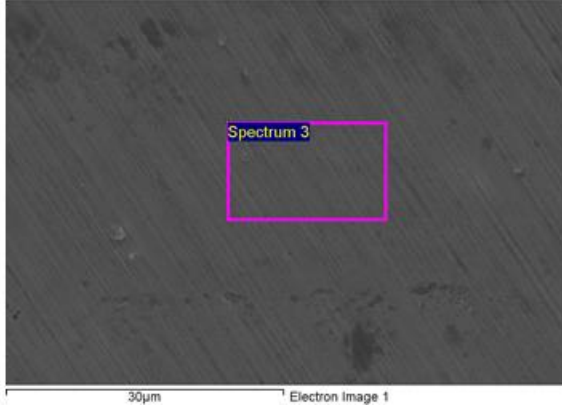


Şekil 7. İDKB numunesinin EDAX analizi alınan nokta

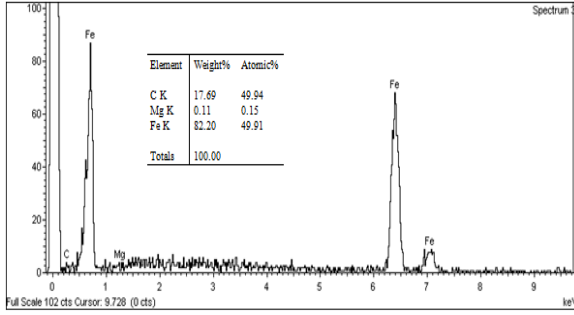


Şekil 8. İDKB 1 nolu spektrumun EDAX analizi grafiği

Şekil 9'da SB numunesinin SEM elektron mikroskopunda fotoğrafı çekilmiştir ve bir nokta tespit edilerek spectrum 1 olarak işaretlenmiştir. Bu bölgede yapılan EDAX analizi bizlere numune hakkında detaylı bilgi vermektedir. SB numunesinin EDAX görüntüsünde spectrum 3 numaralı bölgedeki elementler Şekil 10' da görülmektedir. Hakim element (Fe) demirdir [12]. SB numunesinin spectrum 3 bölgesindeki analiz sonuçlarına göre tespit edilen elementlerin yüzde ağırlıkları; % 17.69 C , % 0.11 Mg ve % 82.20 Fe' dir. Atomal ağırlıkları ise % 49.94 C , % 0.15 Mg ve % 49.91 Fe' dir.



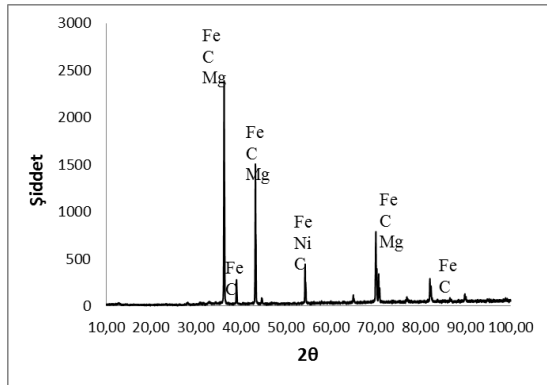
Şekil 9. SB numunesinin EDAX analizi alınan nokta



Şekil 10. SB 3 nolu spektrumun EDAX analizi grafiği

3.1.4. Egzoz borularına ait numunelerin X-RD analizi

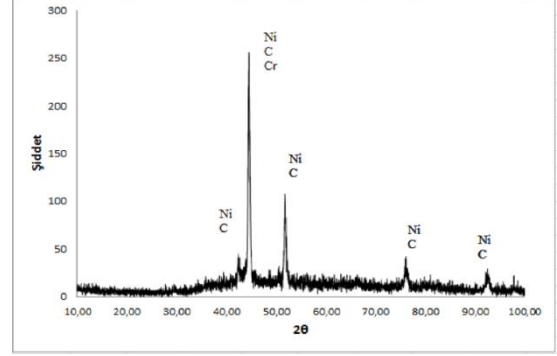
Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin mevcut fazlarını belirlemek amacı ile X-ışınları difraksiyon analizi yapılmıştır.



Şekil 11. SB numunesinin X-RD grafiği

Şekil 11.'de SB numunesinin X-ışınları analizinde bulunan fazlar görülmektedir. Bunlar;

Fe, C ve Mg fazlarıdır. Hakim faz ise yüksek pikten ötürü Fe, C ve Mg'dur.



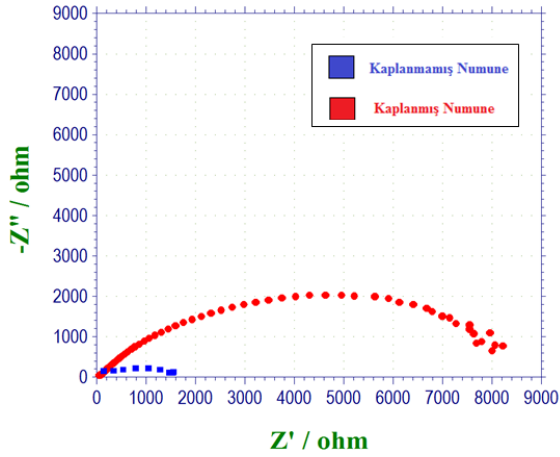
Şekil 12. İDKB numunesinin X-RD grafiği

3.1.5. Egzoz borularına ait numunelerin korozyon deneyi

Bu çalışmada iki tip korozyon testi uygulanmıştır. Bunlardan birincisi Elektrokimyasal İmpedans spektroskopisi yöntemi ile korozyon direncin belirlenmesi, ikincisi ise Tafel ekstrapolasyonu yöntemi ile korozyon akımın belirlenmesidir. Her iki yöntemle korozyon testi yapılmıştır.

Elektrokimyasal impedans spektroskopisi yöntemi ile korozyon direncinin belirlenmesi:

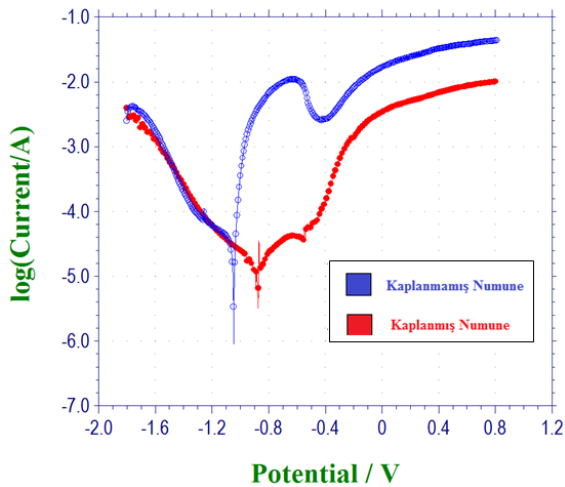
Şekil 13.'deki grafikte krom karbür kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borusunun elektrokimyasal ölçümler sonucunda alınmış nyquist diyagramları gösterilmektedir. Numuneler 1'er saat % 3.5'lik NaCl çözeltisinde bekletildikten sonra elde edilen nyquist diyagramları aracılığı ile numunelerin korozyona karşı koydukları direnç belirlenmiştir [13]. Krom karbür kaplanmayan egzoz borusunun korozyon direnci 1130 ohm olarak tespit edilmiştir. Krom karbür kaplanan egzoz borusunun korozyon direnci ise 8000 ohm olarak tespit edilmiştir. Bunun sonucunda egzoz borusunun krom karbür kaplanmasıyla birlikte korozyon direnci % 85 artmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin korozyon direnci lineer polarizasyon yöntemi ile de tespit edilmiştir. Bu yöntem sonucunda da korozyon direncinin % 84 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 13. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin nyquist diyagramları

Tafel ekstrapolasyonu yöntemi ile korozyon akımının belirlenmesi:

Şekil 14.'te krom karbür kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının yarı logaritmik akım potansiyel grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 14. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin yarı logaritmik akım potansiyel grafikleri

Grafikteki eğriler yardımı ile malzemelerin korozyon akımı hakkında bilgi edinebiliriz. Mavi renkte gösterilen eğri krom karbür kaplanmamış numuneye aittir ve kırmızı renkte gösterilen eğri ise krom karbür kaplanmış numunenin yarı logaritmik akım potansiyel eğrileridir. Kaplanmamış numunenin korozyon akımı çok yüksek olmasına rağmen kaplanmış numunenin

korozyon akımı daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda kaplanan malzemenin korozyona karşı direncinin arttığını ve akımın azaldığını söyleyebiliriz [14].

4. Sonuçlar

Bu çalışmayla, egzoz borusu ana malzemesi üzerinde değişiklik yapmadan var olan malzemenin ömrü plazma sprey yöntemiyle krom karbür kaplanarak artırılmıştır. Egzoz borusunun krom karbür (Cr_3C_2) malzeme ile kaplanmasıyla hem iç hem de dıştan etki eden, kimyasal ve fiziksel çözücü ve deformasyona uğraticı faktörlerin etkisi azaltılmıştır. Egzoz borularının aynı bölgelerinden olmak üzere numuneler alınmıştır. Bu numunelerin metalografik incelemeleri (SEM, EDAX, X-RD,) yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından kaplanmış ve kaplanmamış numuneler üzerinde Mikro-sertlik ve korozyon deneyleri yapılmıştır. Bu sonuçlara göre;

- Egzoz borusunun krom karbür (Cr_3C_2) malzeme ile kaplanmasıyla kimyasal ve fiziksel çözücü ve deformasyona uğraticı faktörlerin etkisi azaltılmıştır. Böylece egzoz borusunun ömrünü azaltıcı faktörler kaplama malzemesi tarafından karşılanmıştır.
- Korozyon deneyi sonucunda kaplanmış egzoz borusunun korozyon direnci kaplanmamış egzoz borusuna göre % 84 daha yüksek çıkmıştır. Korozyon deneyi sonucunda egzoz borusu malzemesinin ömrünün arttığı görülmüştür.
- Seçilen kaplama malzemesinin korozyon direnci yüksek olduğu için egzoz borusunda çevresel şartlardan dolayı oluşacak korozif deformasyonun önüne geçilmiştir. Yüzeyde oluşan homojen tabakası sayesinde yüksek termal şoklara dayanım elde edilmiş olup, ayrıca egzoz borusu yüzeyinde mevcut üniform kaplama tabakasından dolayı lineer bir ısı dağılımı sağlanmıştır.

5. Kaynaklar

1. Ezirmik, K.V. (2000). Nitrür seramik kaplamaların yüksek sıcaklıklarda oksidasyon davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 1-77.
2. Matthews S., James B. and Hyland M. (2013). Erosion-corrosion of Cr₃C₂-NiCr high velocity thermal spray coatings. *Corros. Sci.*, **70**:203–211.
3. Şap, S. (2016). Plazma spre y yöntemiyle seramik kaplamanın egzoz borusu üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Syf. 1-2.
4. Mudgal D., Singh S. and Prakash S. (2015). Hot corrosion behavior of bare, Cr₃C₂-(NiCr) and Cr₃C₂-(NiCr) + 0.2 wt.%Zr coated SuperNi 718 at 900 °C J. *Mater. Eng. Perform.*, **24**: 1–15.
5. Aw, P.K., Tan, A.L.K., Tan, T.P. and Qiu, J. (2008). Corrosion resistance of tungsten carbide based cermet coatings deposited by high velocity oxy-fuel spray process. *Science Direct*, p.5710–5715.
6. Sharafat, S., Kobayashi, A., Chan, Y. and Ghoniem, N.M. (2001). Plasma spraying of micro-composite thermal barrier coatings. *Vacuum*, **65**: 415-425.
7. Murthy, J.K.N., Satya Prasad, K., Gopinath, K. and Venkataraman, B. (2010). Characterisation of HVOF sprayed Cr₃C₂-50(Ni20Cr) coating and the influence of binder properties on solid particle erosion behaviour Surf. *Coat. Technol.*, **204**: 3975–3985.
8. Suarez, M., Bellayer, S., Traisnel, M., Gonzalez, W., Chicot, D., Lesage, J., Puchi-Cabrera, E.S. and Staia, M.H. (2008). Corrosion behavior of Cr₃C₂-NiCr vacuum HVOF sprayed coatings Surf. *Coat. Technol.*, **202**: 4566–4571.
9. Janka, L., Norpoth, J., Rodriguez-Ripoll, M., Katsich, C., Trache, R., Toma, F.L., Thiele, S. and Berger, L.M. (2015). Abrasionsverschleiss von Chromcarbid-basierten, HVOF- und HVAF-gespritzten Hartmetallschichten bis 800 °C. Proceedings of the 56. Tribologie-Fachtagung der Gesellschaft für Tribologie, *Gesellschaft für Tribologie e.V.*, Göttingen, Germany pp. 31/1–10
10. Janka, L., Norpoth, J., Eicher, S., Rodriguez, M.R. and Vuoristo, P., 2016. Improving the toughness of thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings by laser post-treatment. *Surf. Coat. Technol.*, **98**: 135–142.
11. Hong, S., Wu, Y., Wang, Q., Ying, G., Li, G., Gao, W., Wang, B. and Guo, W. (2013). Microstructure and cavitation–silt erosion behavior of high-velocity oxygen–fuel (HVOF) sprayed Cr₃C₂-NiCr coating., *Surf. Coat. Technol.*, **225**: 85–91.
12. Kamal, S., Jayaganthan, R. and Prakash, S. (2009). High temperature oxidation studies of detonation-gun-sprayed Cr₃C₂-NiCr coating on Fe- and Ni-based superalloys in air under cyclic condition at 900 °C., *Journal of Alloys and Compounds*, **472**(Issues 1–2): 378–389.
13. Zhoua, W., Zhoua, K., Dengc, C., Zengc, K. and Lib, Y. (2016). Hot corrosion behaviour of HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCrMoNbAl coating, *Surface and Coatings Technology*, **225**: 85–91.
14. Oksa, M., Metsäjoki, J. and Kärki, J. (2015). Thermal spray coatings for high temperature corrosion protection in biomass co-fired boilers, *J. Therm. Spray Technol.*, **24**: 194–205.