
Araştırma Makalesi / Research Article

Plazma Sprey Yöntemiyle AISI 304 Paslanmaz Çelik Üzerinde Üretilen Ti₃SiC₂ MAX Fazlı Kaplamanın Karakterizasyonu

Serkan ISLAK^{*1}, Cihan ÖZORAK², Özkan ESKİ¹

¹Kastamonu Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Kastamonu

²Kastamonu Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kastamonu

Öz

Bu çalışmada, plazma spre yöntemi ile AISI 304 paslanmaz çelik üzerinde üretilen Ti₃SiC₂ MAX fazlı kaplamanın mikroyapı, aşınma ve korozyon özellikleri araştırılmıştır. Ti₃SiC₂ fazını üretmek için başlangıç malzemesi olarak Ti ve SiC tozları kullanılmıştır. Ti tozuna ağırlıkça % 35 SiC ilave edildikten sonra elde edilen toz karışımı atmosfer kontrollü plazma spre tabancası ile alt tabaka üzerine kaplanmıştır. Kaplamanın mikroyapı ve faz oluşumunu incelemek için optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve XRD kullanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri kaplama mikroyapısının lamelli bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. XRD analizlerine göre Ti₃SiC₂ MAX fazı kaplama tabakasında tespit edilmiştir. Mikrosertlikler, kaplama tabakasından alt tabakaya doğru bir hat boyunca ölçülmüştür. Kaplama ve alt malzemenin aşınma özellikleri, çizik testi ile tespit edilmiştir. Kaplama tabakasının sürtünme katsayısı alt malzemeye göre düşük çıkmıştır. Alt malzeme ve kaplamanın korozyon özellikleri %3,5 NaCl çözeltisinde potansiyodinamik ölçümler yapılarak belirlenmiştir. Korozyon sonuçları, kaplama tabakasının alt malzemeye göre 3,5 katlık bir korozyon direncine sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Ti₃SiC₂ MAX fazı, plazma spre kaplama, mikroyapı, aşınma, korozyon.

Characterization of Ti₃SiC₂ MAX Phase Coating Produced on AISI 304 Stainless Steel by Plasma Spray Method

Abstract

In this study, microstructure, wear and corrosion properties of Ti₃SiC₂ MAX phase coated on AISI 304 stainless steel by plasma spray method were investigated. Ti and SiC powders were used as starting materials to produce the Ti₃SiC₂ phase. After adding 35 % SiC by weight to the Ti powder, the resulting powder mixture was coated on the substrate with an atmosphere-controlled plasma spray gun. An optical microscope, scanning electron microscope and XRD were used to examine the microstructure and phase formation of the coating. Microstructure studies have shown that the coating microstructure has a lamellar structure. According to XRD analyzes, Ti₃SiC₂ MAX phase was detected in the coating layer. Microhardnesses were measured along a line from the coating layer to the substrate. Wear characteristics of coating and substrate were determined by scratch test. The coefficient of friction of the coating layer was lower than that of the substrate. Corrosion properties of substrate and coating were determined by potentiodynamic measurements in 3.5% NaCl solution. Corrosion results have shown that the coating layer has a corrosion resistance of 3.5 times that of the substrate.

Keywords: Ti₃SiC₂ MAX phase, plasma spray coating, microstructure, wear, corrosion.

1. Giriş

Son zamanlarda ileri malzemeler üzerine yapılan yoğun çalışmalar sonucunda hem metalik malzemelerin hem de seramik malzemelerin özelliklerine sahip MAX fazı adında yeni nesil malzemeler bulunmuştur [1,2]. M_{n+1}AX_n fazı terimi ilk olarak 2000 yılında Michel W. Barsoum tarafından kullanılmıştır. Daha sonra, MAX olarak kısaltılan fazların M_{n+1}AX_n şeklindeki genel formülünde n=1-3, M=geçiş metali, A=genellikle IIIA ve IVA grubu elementleri ve son olarak X ise karbon (C) veya

*Sorumlu yazar: serkan@kastamonu.edu.tr

Geliş Tarihi: 13.08.2018, Kabul Tarihi: 30.10.2018

azotu (N) temsil eder. Geçiş metalleri Sc, Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf ve Ta iken, A grubu elementler Al, Si, P, S, Ga, Ge, As, In, Sn, Tl ve Pb şeklindedir. n sayısının değerine bağlı olarak, M_2AX , M_3AX_2 ve M_4AX_3 şeklindeki MAX fazları, sırasıyla 211, 312 ve 413 olarak temsil edilirler [3]. Literatürde M_5AX_4 , M_6AX_5 ve M_7AX_6 şeklindeki MAX fazları da rapor edilmiş olup, bu fazlar sırasıyla 514, 615 ve 716 olarak temsil edilirler [4,5]. Bu rakam dizilimleri stokiometrik yapılar olup, molekül bileşimi ifade etmektedir. Örneğin, 312 yapısında (M_3AX_2) A katmanı 3 adet oktahedral M katmanı ile ayrılmaktadır [6].

Mükemmel özelliklere sahip olan MAX fazları elektrik kontak ve yatakları, ısıtma elemanları, nozullar, ısı eşanjörleri, kalıp endüstrisinde takımlar gibi daha birçok uygulama alanına sahiptir. MAX fazları bu uygulama alanlarının çoğunda halen test aşamasındadır. Hem deneysel hem de teorik olarak incelenen yaklaşık 240 MAX fazının fiziksel özellikleri tamamen anlaşılammıştır [7-11]. MAX fazları yapılan çalışmalarda genellikle, soğuk presleme (CP)+sinterleme, sıcak presleme (HP), sıcak izostatik presleme (HIP), kimyasal buhar çöktürme (CVD), kendi kendine ilerleyen yüksek sıcaklık sentezlemesi (SHS), termal sprey, mekanik alaşımlama, manyetik alanda saçırma ve yanma reaksiyon yöntemleri ile üretilmiştir. Bu yöntemlerle MAX fazları toz, kütle halinde malzeme veya ince film kaplaması şeklinde elde edilmiştir [12].

Literatürde MAX fazlı malzemelerin termal sprey yöntemi ile üretilebilirliğine dair çok az çalışma vardır. Bu çalışmalarda doğrudan MAX esaslı tozların kaplanması ile ilgilidir. Tamamen termal sprey yöntemi ile üretimi mevcut değildir. Yazarlar olarak literatürdeki bu açıktan faydalanarak ve MAX fazlı malzemelerin üretim yelpazesini genişletmek için termal sprey yöntemi ile MAX fazlı kaplamaların üretimi üzerine yoğunlaştık. Bu çalışmada Ti_3SiC_2 MAX fazlı kaplamalar, termal sprey yöntemlerinden olan plazma sprey tekniği ile üretilmiştir. Üretilen kaplamaların mikroyapı, aşınma ve korozyon özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

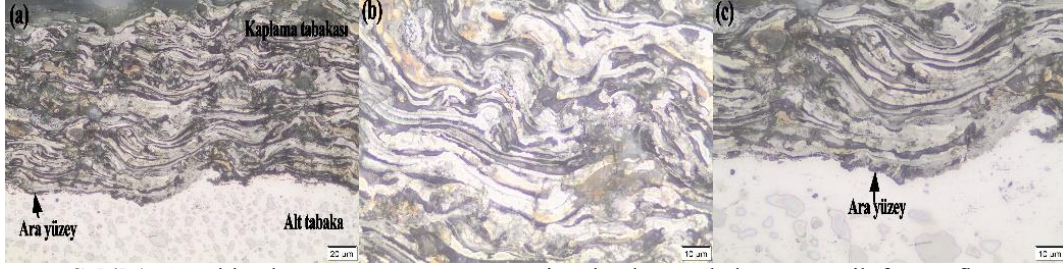
Alt malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik ve kaplama tozu olarak, -90+22 μm tane boyutundaki Ti (Metco 4010) ve yaklaşık 44 μm tane boyutundaki SiC (Sigma Aldrich) tozu kullanılmıştır. Kaplama işleminde, Ti_3SiC_2 fazını elde etmek için Ti+% 35 SiC (% ağırlık) toz karışımı kullanılmıştır. Alt tabaka ile kaplama katı arasında sağlam bir bağlanma elde etmek için alt tabaka 24-35 mesh arasındaki tane boyutuna sahip Al_2O_3 kumu ile kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Kaplama tabakalarının üretilmesinde 80 kVA gücüne sahip Sulzer Metco 9MB plazma sprey kaplama sistemi kullanılmıştır. Kaplama işleminde argon gazının debisi 35-73 l/dak. seçilmiştir. Püskürtme mesafesi 75 mm olarak sabitlendi. H_2 gazının debisi 6.6 l/dak ve taşıyıcı gazın debisi ise 9-11.4 l/dak seçildi. Kaplama tabakası olarak yaklaşık 250 μm kalınlığında tabaka üretilmiştir.

Mikroyapı incelemeleri için numuneler metalografik olarak hazırlanıp HNO_3 ve alkol karışımı çözeltide dağlanmıştır. Böylece kaplama tabakası kesiti ve kaplama tabası-ana malzeme ara yüzeyi optik mikroskopi ve SEM için hazır hale getirilmiştir. SEM analizleri için ise FEI QUANTA 250 FEG marka SEM cihazı kullanılmıştır. SEM ile birlikte, kaplama tabakası ve ara bölgesinde oluşması muhtemel fazlar için EDS analizleri de yapılmıştır. Kaplama tabakasında oluşan fazları tespit etmek amacıyla X-ışını analizi yapılmıştır. X-ışını analizleri, Rigaku Ultra IV XRD marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri Shimadzu HVM-G21 marka mikrosertlik cihazı ile ölçülmüştür. Kaplamaların sertlikleri 200 g yükte 10 sn sürede alınmıştır.

Aşınma deneyi öncesi numuneler 1200 mesh zımparaya kadar zımparalanmış ve yüzeyleri elmas solüsyonla parlatılmıştır ve daha sonra da ultrasonik olarak temizlenmiştir. Temizleme Elma MF3/130KHz cihazında saf su içinde 10 dakika 35KHz'de yapılmıştır. Aşınma deneylerinde Bruker marka modeli UMT-2-SYS olan mekanik test cihazı kullanılmıştır. Aşınma mikro çizik şeklinde yapılmıştır. Aşındırıcı uç olarak Rockwell uç kullanılmıştır. Çizik boyu tüm numuneler için 2 mm olarak seçilmiştir. Korozyon testleri için, numuneler zımparalanıp, ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Ölçümler, Referans 3000 Potentiostat / Galvanostat / ZRA korozyon sistemi kullanılarak yapılmıştır. Korozyon deneyleri, numuneler oda sıcaklığında (25 °C), ağırlıkça % 3.5'lik bir NaCl solüsyonunda (pH 3) 1 saat bekletildikten sonra gerçekleştirilmiştir. Korozyon hızlarını belirlemek için korozyon potansiyelleri için ekpolasyon yapan anodik ve katodik Tafel bölgeleri kullanılmıştır. Polarizasyon direnci değerleri korozyon potansiyeline yakın akım-potansiyel eğrilerinin lineer bölgelerinden hesaplanmıştır.

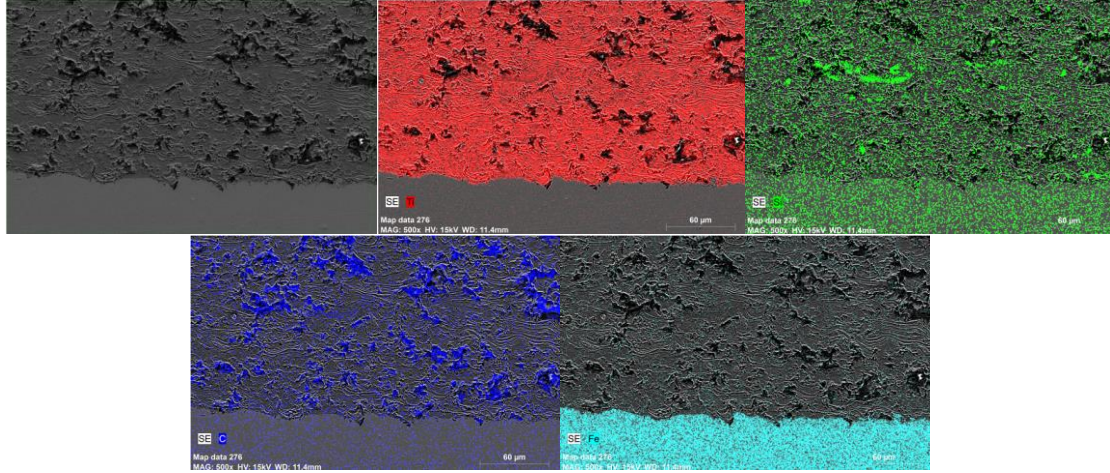
3. Bulgular ve Tartışma

Ti tozu içerisine ağırlıkça % 35 SiC tozunun ilave edilmesiyle elde edilen toz karışımının AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyine püskürtülmesiyle oluşturulan Ti_3SiC_2 içerikli kaplamalar Şekil 1'deki optik fotoğraflarda görülmektedir. Bu kaplamalarda, lamelli mikroyapı görülmektedir. Bu yapı termal sprey kaplamalarında genel olarak oluşmaktadır [13,14]. Lamel formulu yapı, ergimiş partiküllerin altlık malzemeye çarpması, deforme olması ve katı formu alması şeklinde oluşur [15,16]. Ana malzeme yüzeyine püskürtülen toz partiküller, ana malzeme yüzeyine çarptığı zaman kinetik enerjileri ısı ve deformasyon enerjisine dönüşür. Ana malzemeye temas anında toz partikülleri ısılarını ana malzemeye vererek soğuyup katılaşırlar [17].



Şekil 1. Genel kaplama görünümü, arayüzeyi ve kaplama tabakasının optik fotoğrafları

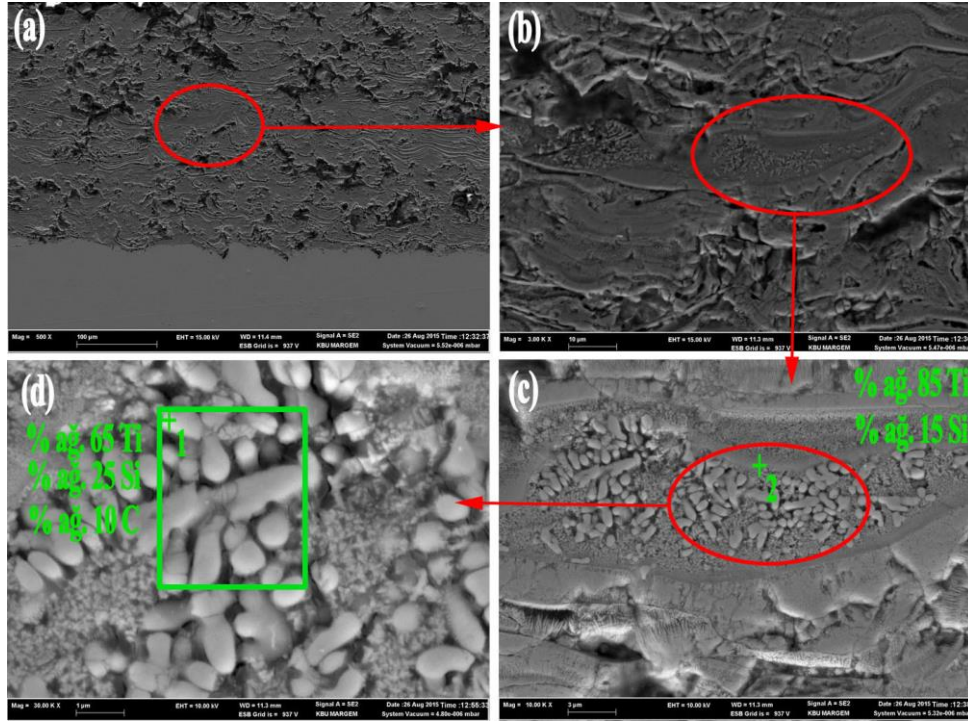
En az iki bileşenli malzemelerde, bileşenlerin birbiri içerisinde dağılımı malzemenin hem fiziksel hem de mekanik olarak önem arz etmektedir. SiC partiküllerinin veya çözülmüş haldeki Si ve C'un kaplamadaki dağılım özelliğini incelemek için yapılan MAP analizi Şekil 2'de verilmiştir. Bu analiz sonucuna göre Ti, SiC, Si ve C kaplamada homojen bir dağılım göstermiştir.



Şekil 2. Ti-SiC kaplama tabakasının MAP analizi

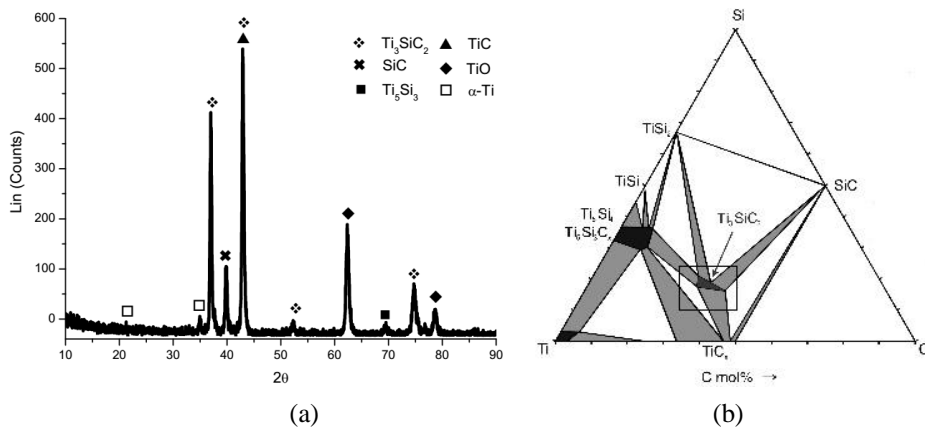
Şekil 3'de Ti-SiC kaplamasının detaylı SEM fotoğrafı ve EDS verileri görülmektedir. SEM fotoğrafları bir önceki fotoğrafın ard arda yüksek büyütülmüş şeklidir. Yapıda Ti ile yapıda kısmen çözünmemiş SiC partiküllerinin birleştiği bölgelerde gözeneklerin olduğu SEM fotoğraflarından görülmektedir (Şekil 3a-b). Lamelli yapının orta kısmında fasulye tanelerine benzer bir yapı göze çarpmaktadır. Bu taneler lamelli yapı arasında gelişmiş güzel bir dağılım sergilemektedir (Şekil 3c-d). Bu tanelerin boyutları 500 nm ile 1 µm arasında değişmektedir. Aynı SEM fotoğraflarında 1 nolu bölge ve 2 nolu noktanın EDS analizi de verilmiştir. 1 nolu bölge ve 2 nolu nokta sırasıyla ağırlıkça % 65 Ti, % 25 Si, % 10 C ve % 85 Ti, % 15 Si kimyasal bileşime sahiptir. 1 nolu bölgesinin Ti_3SiC_2 fazlı yapı olduğu düşünülmektedir. 2 nolu bölge ise Ti bakımından zengin Ti-Si katı çözeltilisini temsil etmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da Ti-Si katı çözelti kolları arasına Ti_3SiC_2 fazının gömüldüğü

ifade edilmektedir. Yine MAX fazı tanelerinin mikron altı yapıya sahip olduğu da rapor edilmektedir [18].



Şekil 3. Ti-SiC kaplamasının detaylı SEM fotoğrafları

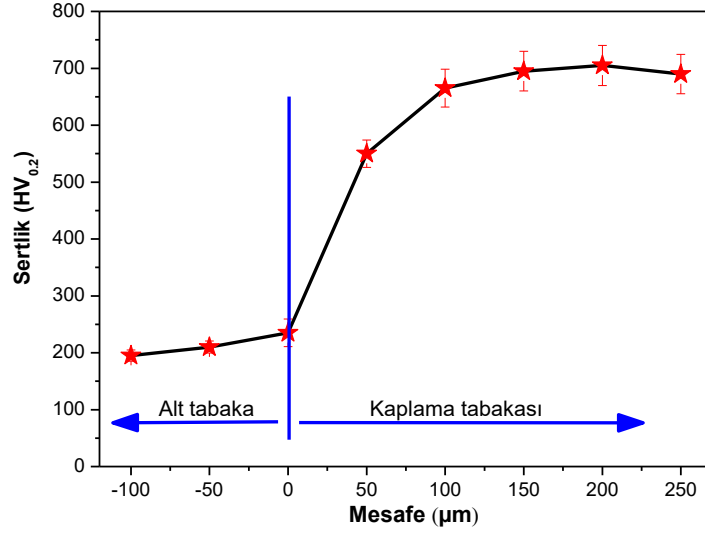
Şekil 4a'da plazma spreyle üretilen Ti-SiC kaplamasının XRD grafiği ve Şekil 4b'de ise Ti-Si-C üçlü faz diyagramı görülmektedir. Kaplamalarda Ti_5Si_3 , TiC, SiC, TiO, α -Ti ve Ti_3SiC_2 fazları oluşmuştur. SiC, TiO ve α -Ti dışında kaplama tabakasında oluşan iki bileşenli ve üç bileşenli fazlar kaplama işleminden önce tozların topaklaşmalarını önlemek amacıyla homojen bir şekilde karıştırılmış olduğunu göstermektedir [12]. Böylece toz partiküllerin birbiriyle olan temas yüzeyi genişletilmiş ve bu şekilde reaksiyona girmeleri kolaylaştırılmıştır. Yapılan kaplamaların mikroyapısında ikili, üçlü ve katı çözeltilerin olduğu teorik olarak Şekil 4b'deki Ti-Si-C üçlü faz diyagramından tespit edilmektedir. Ti_3SiC_2 fazının oluşum reaksiyonu plazma spreyle işleminde çok kısa sürede meydana gelmektedir. Muhtemel olabilecek oluşum reaksiyonları ve ara reaksiyonları $SiC \rightarrow Si(s/g) + C(k)$; $Ti + C \rightarrow TiC$ ve $Ti-Si + TiC \rightarrow Ti_3SiC_2$ şeklindedir [13,20].



Şekil 4. (a) XRD grafiği ve (b) Ti-Si-C üçlü faz diyagramı [21]

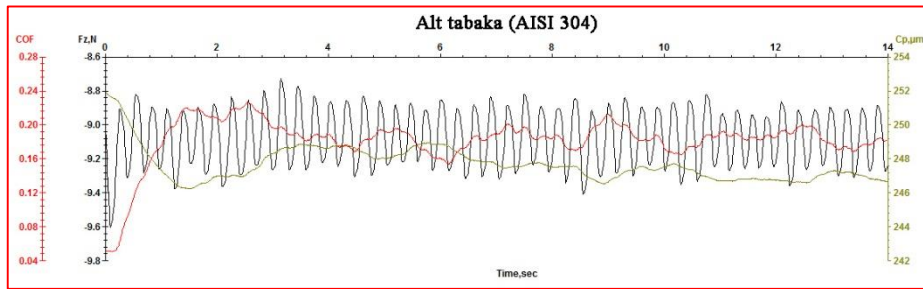
Plazma spreyle AISI 304 paslanmaz çelik üzerinde üretilen Ti+% 35 SiC (% ağırlık) kaplamasının mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişim grafiği Şekil 5'de verilmiştir. Alt malzemeye nazaran

kaplama tabakasında belirgin bir sertlik artışı olmuştur. Alt tabakanın sertliği yaklaşık 205 HV_{0.2} iken, kaplama tabakasının sertliği 550-705 HV_{0.2} arasında değişmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere kaplama tabakası alt tabakaya göre 3,5 kat daha sert hale gelmiştir.

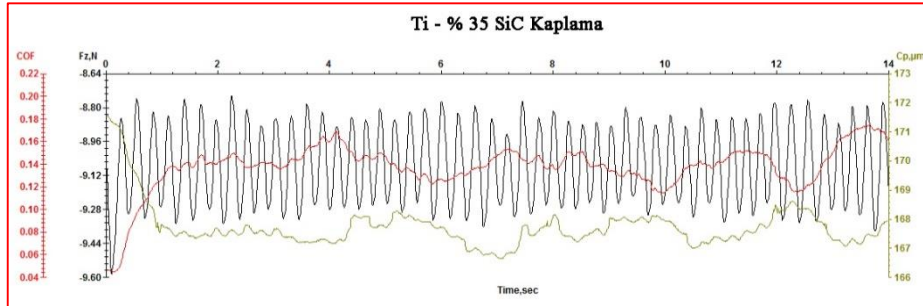


Şekil 5. Ti-SiC kaplamanın mikrosertlik profili

Alt tabaka ve kaplama tabakalarının çizilmeye karşı davranışlarını belirlemek için çizik testi yapılmıştır. Numunelerin çizik testi grafikleri Şekil 6'da görülmektedir. Grafikler incelendiğinde kaplama tabakasının sürtünme katsayısı ~0.15 olup, alt malzemenin sürtünme katsayısına ~0.22 göre oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum ikili ve üçlü sert fazların mikroyapıda bulunmasından kaynaklanmaktadır. Kaplama mikroyapısında oluşan bu sert fazlar dispersiyon mukavemeti ile kaplama tabakasına mukavemet kazandırmıştır. Bunun yanında TiO gibi oksitlerde yağlayıcı etkisi göstererek sürtünme katsayısını düşürmüştür [22]. Aşınma testi sonrası numunelerdeki aşınma kaybı derinlik olarak kıyaslandığı zaman, alt tabakada kayıp yaklaşık 250 µm iken, kaplama tabakasında yaklaşık 170 µm olmuştur. Tüm bu değerlendirmeler neticesinde kaplama tabakasının alt tabakaya göre aşınma karşı daha dirençli olduğu açıkça söylenebilir.



(a)



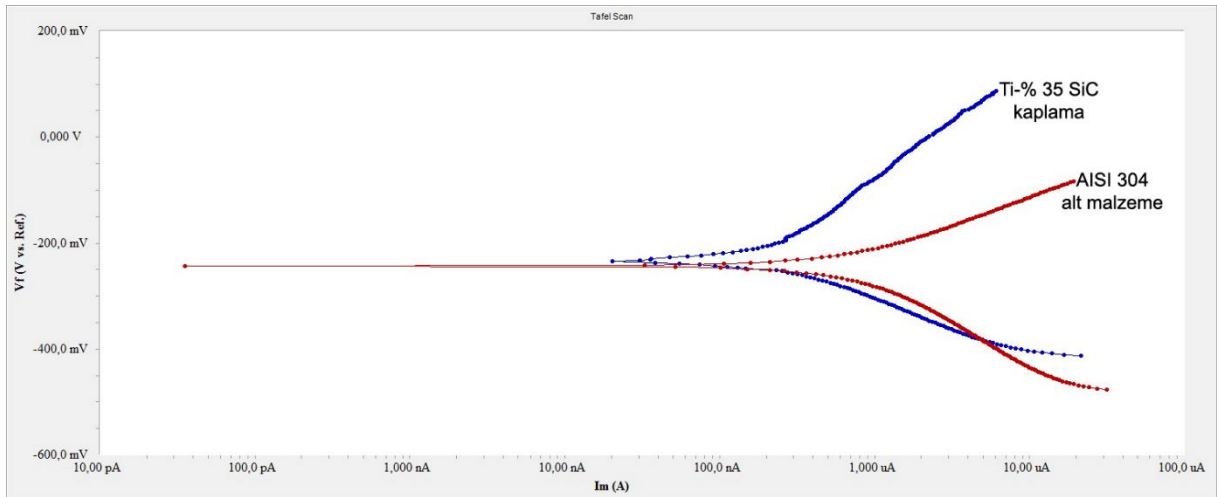
(b)

Şekil 6. Alt tabaka ve kaplama tabakalarının çizik testi grafikleri

% 3,5 NaCl korozif ortamda belirlenen alt malzeme ve kaplamaların potansiyel değişimi polarizasyon eğrileri Şekil 7’de gösterilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerinin sonuçları Tablo 1’de özetlenmiştir. Korozyon potansiyeli (E_{kor}), anodik ve katodik Tafel eğrileri (β_a ve β_c), korozyon direnci (R_p), korozyon hızı ve korozyon akımı (i_{kor}) Tafel eğrilerinden bulunmuştur. Korozyon direnci, Stern ve Geary denklemi ile hesaplanmıştır [23].

$$I_{kor} = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2.303 \times R_p (\beta_a + \beta_c)}$$

Burada, i_{kor} korozyon akımı yoğunluğu, R_p polarizasyon direnci (korozyon direnci) ve β_a ve β_c sırasıyla anodik ve katodik Tafel eğimleridir. Hem Şekil 7’deki eğrilerden hem de Tablo 1’deki verilerden görüldüğü üzere numunelerin korozyon potansiyel değerleri yakın olmasına rağmen, korozyon akımı değerleri farklıdır. Alt malzeme ve kaplama tabakası için E_{kor} değerleri -243 mV ve -233 mV iken, i_{kor} değerleri ise sırasıyla $0,714 \mu A cm^{-2}$ ve $0,249 \mu A cm^{-2}$ değerindedir. Korozyon ile ilgili genel yaklaşım şudur: düşük korozyon akımı ve yüksek korozyon potansiyeli, yüksek korozyon direnci anlamına gelmektedir [24,25]. Tablo 1’e göre alt malzemenin korozyon direnci (R_p) $37,87 k\Omega.cm^2$ iken, kaplama tabakası için bu değer $133,07 k\Omega.cm^2$ olarak hesaplanmıştır. Bu verilerden kaplama tabakasının alt malzeme göre 3,5 kat daha korozyona dayanıklı olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 7. Alt malzeme ve kaplamaların potansiyel değişimi polarizasyon eğrileri

Tablo 1. Alt malzeme ve kaplama tabakasının elektrokimyasal sonuçları

Numuneler	E_{cor} (mV)	I_{cor} ($\mu A cm^{-2}$)	β_a (mV)	β_c (mV)	Korozyon oranı (mpy)	Korozyon direnci ($k\Omega.cm^2$)
AISI 304 alt malzeme	-243	0,714	107,7	147,6	103,3	37,87
Ti-% 35 SiC kaplama	-233	0,249	243,7	111,1	36,05	133,07

4. Sonuç ve Öneriler

Ti₃SiC₂ MAX fazlı kaplamanın üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Kaplama tabakası olarak yaklaşık 250 μm kalınlığında tabaka elde edilmiştir. Ti matrisi içerisinde seramik partiküllerin, Ti ve Si çoğunlukla homojen olarak dağıldığı SEM mapping fotoğraflarından anlaşılmaktadır. Kaplamada düşük seviyede gözeneklilik mevcuttur. Lamellerin arasında nano boyutta gelişmiş güzel dağılmış olan fasulye tanesi görünümünde yapılar tespit edilmiştir.
2. XRD analizine göre kaplama mikroyapısında Ti₅Si₃, TiC, SiC, TiO, α -Ti ve Ti₃SiC₂ ikili, üçlü faz ve katı çözeltiler oluşmuştur.

3. Kaplamanın sertliğinde alt malzemeye göre belirgin bir artış olmuştur. Bu yapıdaki, sert fazların varlığından kaynaklanmaktadır.
4. Çizik testi sonuçlarına göre kaplama tabakasının alt malzemeye göre çizilmeye karşı daha dirençli olduğu anlaşılmaktadır. Bu, kaplamanın sert bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır.
5. Yapılan korozyon testine göre, kaplamanın korozyon direnci alt malzemeye göre 3,5 kat daha fazladır.

Teşekkür

KÜBAP 01/2014-19 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri (KÜBAP) Birimine, teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Barsoum M.W. 2000. The $M_{N+1}AX_N$ phases: A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates. *Progress in Solid State Chemistry*, 28: 201-281.
- [2] Sun Z.M., Hashimoto H., Zhang Z.F., Yang S.L., Tada S., 2006. Synthesis and Characterization of a Metallic Ceramic Material-- Ti_3SiC_2 . *Materials Transactions*, 47 (01): 170-174.
- [3] Amini S., Ni C., Barsoum M.W. 2009. Processing, microstructural characterization and mechanical properties of a Ti_2AlC /nanocrystalline Mg-matrix composite. *Composites Science and Technology*, 69 (3-4): 414-420.
- [4] Palmquist J.P., Li S., Persson P.O.A., Emmerlich J., Wilhelmsson O., Hogberg H., Katsnelson M.I., Johansson B., Ahuja R., Eriksson O., Hultman L., Jansson U. 2004. $M_{n+1}AX_n$ phases in the Ti-Si-C system studied by thin-film synthesis and ab initio calculations. *Physical Review B*, 70 (16): 165401-1-165401-13.
- [5] Lin Z., Zhuo M., Zhou Y., Li M., Wang J. 2006. Microstructures and Theoretical Bulk Modulus of Layered Ternary Tantalum Aluminum Carbides. *Journal of the American Ceramic Society*, 89: 3765-3769.
- [6] Altuncu E., Türkan S., Saka E., Atasoy A. 2015. Max fazı alaşımları ve termo-fiziksel özellikleri. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 8 (1): 75-86.
- [7] Bouhemadou A. 2009. Structural, electronic and elastic properties of MAX phases M_2GaN (M=Ti, V and Cr). *Solid State Sciences*, 11(11): 1875-1881.
- [8] Music D., Sun Z., Schneider J.M., 2005. Electronic structure of Sc_2AC (A=Al, Ga, In, Tl). *Solid State Communications*, 133 (6): 381-383.
- [9] Music D., Sun Z., Voevodin A.A., Schneider J.M. 2006. Electronic structure and shearing in nanolaminated ternary carbides. *Solid State Communications*, 139 (4): 139-143.
- [10] Bouhemadou A., Khenata R., Chegaar M. 2007. Structural and elastic properties of Zr_2AlX and Ti_2AlX (X = C and N) under pressure effect. *The European Physical Journal B*, 56 (3): 209-215.
- [11] Bouhemadou A. 2008. Prediction study of structural and elastic properties under pressure effect of M_2SnC (M=Ti, Zr, Nb, Hf). *Physica B: Condensed Matter*, 403 (17): 2707-2713.
- [12] Gauthier V., Cochepein B., Dubois S., Vrel D. 2006. Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Ti_3SiC_2 : Study of the Reaction Mechanisms by Time-Resolved X-Ray Diffraction and Infrared Thermography. *Journal of the American Ceramic Society*, 89 (9): 2899-2907.
- [13] Sun Z.M., Yang S., Hashimoto H., Tada S., Abe T. 2004. Synthesis and Consolidation of Ternary Compound Ti_3SiC_2 from Green Compact of Mixed Powders. *Materials Transactions*, 45 (2): 373-375.
- [14] Li C.J., Yang G.J., Ohmori A. 2006. Relationship between particle erosion and lamellar microstructure for plasma-sprayed alumina coatings. *Wear*, 260: 1166-1172.
- [15] Lee C.H., Kim H.K., Choi H.S., Ahn H.S. 2000. Phase transformation and bond coat oxidation behavior of plasma-sprayed zirconia thermal barrier coating. *Surface and Coatings Technology*, 124: 1-12.
- [16] Heimann R.B. 1996. Plasma-spray coating, VCH, New York.
- [17] Pawlowski L. 2008. The science and engineering of thermal spray coatings. John Wiley & Sons, Ltd., England.

- [18] Yılmaz R., Kurt A.O., Demir A., Tatlı Z. 2007. Effects of TiO₂ on the Mechanical Properties of the Al₂O₃-TiO₂ Plasma Sprayed Coating. *Journal of the European Ceramic Society*, 27: 1319-1323.
- [19] El-Raghy T., Barsoum M.W. 1999. Processing and Mechanical Properties of Ti₃SiC₂: I, Reaction Path and Microstructure Evolution. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(10): 2849–2854.
- [20] Kosolapova T.Y. 1990. *Handbook of High Temperature Compounds: Properties, Production, Applications*, Hemisphere Publishing Corp., New York
- [21] Sun Z.M., Zhang Z.F., Hashimoto H., Abe T. 2002. Ternary Compound Ti₃SiC₂: Part I. Pulse Discharge Sintering Synthesis. *Materials Transactions*, 43 (3): 428-431.
- [22] Weber K., Kuhn H.A. 2012. Lead-Free Wrought Copper Alloys for Bushings and Sliding Elements. In *Copper Alloys-Early Applications and Current Performance-Enhancing Processes*. InTech., 69-92.
- [23] Stern M., Geary A.L. 1957. Electrochemical Polarization I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves. *Journal of the Electrochemical Society*, 104: 56-63.
- [24] Sun J., Fu Q.G., Guo L.P., Liu Y., Huo C.X., Li H.J. 2016. Effect of filler on the oxidation protective ability of MoSi₂ coating for Mo substrate by halide activated pack cementation. *Materials & Design* 92: 602-609.
- [25] Bakhsheshi-Rad H.R., Hamzah E., Ismail A.F., Daroonparvar M., Yajid M.A.M., Medraj M. 2016. Preparation and characterization of NiCrAlY/nano-YSZ/PCL composite coatings obtained by combination of atmospheric plasma spraying and dip coating on Mg–Ca alloy *Journal of Alloys and Compounds*, 658: 440-452.