



Evaluation of the change in structural and mechanical properties after cermet coating made by thermochemical process on AISI 304 steel

Murat Kayaalp^{1*}, Hasan Hasırcı²

Department of Metallurgical and Materials Engineering, Gazi University, Ankara, 06500, Türkiye

Highlights:

- Evaluation of the cermet coating made by thermochemical treatment
- Change in the structural properties of the cermet coating made by thermochemical treatment
- Change in the mechanical properties of the cermet coating made by thermochemical treatment

Keywords:

- Cermet coating,
- Structural characteristics,
- Mechanical properties

Article Info:

Research Article
Received: 26.03.2024
Accepted: 03.11.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1459041

Correspondence:

Author: Murat Kayaalp
e-mail: kayaalpmurat@gmail.com
phone: +90 505 537 7216

Graphical/Tabular Abstract

In order to withstand the thermal, mechanical and chemical effects encountered under operating conditions, it is often preferred to make a coating suitable for the operating conditions, rather than replacing the entire material. There are many coating methods such as melting, electrochemical, chemical, thermochemical and mechanical methods. When materials need to work especially in high temperature conditions, coatings with ceramic-based components are preferred, but very special technologies and devices and high temperature and pressure are required to make these coatings. For these reasons; In this study, the AISI 304 stainless steel material surface was coated cost-effectively, without using expensive and special devices, by thermochemical method using $Al_2O_3+SiO_2+ZrO+B_4C+Ti+Al$ powder cermet material mixture in an atmosphere-uncontrolled and pressure-free heat treatment furnace. To determine the substrate surface quality, the materials were prepared with 600 and 1200 mesh surface quality before coating. The changes in structural (SEM) and mechanical properties of the coated materials were examined. Structural elements in thermal barrier coatings are presented schematically in Figure A. Basically, there is an intermediate transition coating on the substrate material, and a ceramic-containing layer is placed on it either by spraying or deposition.

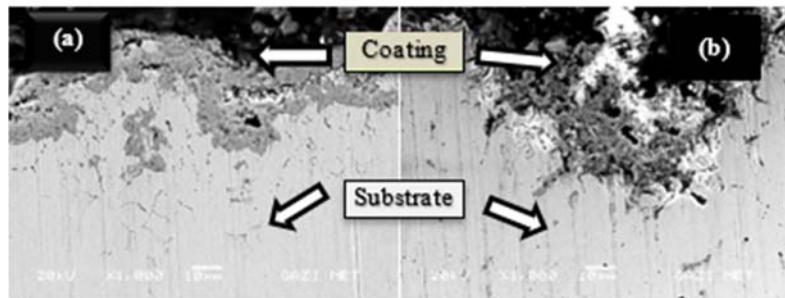


Figure A. Coating change exchange (SEM); a) Sample D, b) Sample E,

Purpose:

In our study, it was aimed to improve the mechanical properties with the cermet coating, to protect the main material and to ensure full diffusion in the coating. In this context, the structure and mechanical properties were evaluated by coating with a thermochemical process in a simple heat treatment oven

Theory and Methods:

In this study, the turbine blade material was coated with AISI 304 stainless steel cermet material 99% purity Alumina, Zircon, Silica, Boron Carbide and Titanium powder materials were used as coating components.

Results:

In the study, as a result of creating a thermal barrier coating by performing a thermochemical process during a heat treatment application and examining the changes in the structural and mechanical properties of this coating, it has been proven that thermochemical coating can be applied to steel material during the heat treatment that is generally applied.

Conclusion:

It has been determined that the coating process can be carried out successfully without requiring a special technology and device, and that a higher proportion of metal additives into the coating will have a positive effect on the coating success and mechanical properties



AISI 304 çeliği üzerinde termokimyasal işleme yapılan sermet kaplama sonrası yapısal ve mekanik özelliklerdeki değişimin değerlendirilmesi

Murat Kayaalp *¹, Hasan Hasırcı²

Gazi Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06560, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Buhar Türbin Kanadı kaplamasındaki korozif etkilerdeki değişim
- Buhar Türbin Kanadı kaplamasında yapısal özelliklerdeki değişim
- Buhar Türbin Kanadı kaplamasındaki eroziv özelliklerdeki değişim

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 26.03.2024

Kabul: 03.11.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1459041

Anahtar Kelimeler:

Sermet kaplama,
yapısal özellikler,
mekanik özellikler

ÖZ

İşletme koşullarında karşılaşılan termal, mekanik ve kimyasal etkilere karşı dayanım için malzemenin tamamını değiştirmek yerine, çalışma koşullarına uygun kaplama yapılması sıklıkla tercih edilir. Ergitme, elektrokimyasal, kimyasal, termokimyasal ve mekanik yöntemler gibi birçok kaplama yöntemi bulunmaktadır. Malzemelerin özellikle yüksek sıcaklık koşullarında çalışması gerektiğinde, seramik ağırlıklı bileşenlere sahip kaplamalar tercih edilmekte, ancak bu kaplamaların yapılabilmesi için de çok özel teknolojiler ve cihazlar ile yüksek sıcaklık ve basınç ihtiyacı da bulunmaktadır. Bu nedenlerle; bu çalışmada maliyet etkin bir şekilde pahalı ve özel cihazlar kullanmadan, AISI 304 paslanmaz çelik malzeme yüzeyi $Al_2O_3+SiO_2+ZrO+BaC+Ti+Al$ toz sermet malzeme karışımı kullanılarak termokimyasal yöntemle atmosfer kontrolsüz ve basınçsız bir ısıtma fırınında kaplanmıştır. Altlık yüzey kalitesinin tespiti amacıyla, kaplama öncesinde malzemeler 600 ve 1200 mesh yüzey kalitesinde hazırlanmıştır. Kaplanan malzemelerde yapısal ve mekanik özelliklerin değişimi incelenmiştir. İncelemeler sonunda; basit bir fırın içerisinde dahi başarıyla kaplama yapılabildiği, kaplamanın mekanik test sırasında malzeme ile birlikte deformasyona uğrayarak kopmadan/ayrışmadan birlikte şekil değişimine uğradığı ve kaplamanın mekanik özellikleri geliştirdiği tespit edilmiştir. Sermet kaplama sonrasında; çekme dayanımında \cong % 65, akma dayanımında \cong + %32 ve sertlikte ise \cong %66 artış olurken, uzamada ise \cong % 1 oranında azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Kaplama işleminde sürenin çok önemli olduğu, süre arttıkça özelliklerin daha da iyileştiği tespit edilmiştir.

Evaluation of the change in structural and mechanical properties after cermet coating made by thermochemical process on AISI 304 steel

H I G H L I G H T S

- Change in corrosive effects on Steam Turbine Blade Coating
- Change in structural properties of Steam Turbine Blade Coating
- Change in erosive properties of Steam Turbine Blade Coating

Article Info

Research Article

Received: 26.03.2024

Accepted: 03.11.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1459041

Keywords:

Cermet coating,
structural characteristics,
mechanical properties

ABSTRACT

In order to withstand the thermal, mechanical and chemical effects encountered under operating conditions, it is often preferred to make a coating suitable for the operating conditions, rather than replacing the entire material. There are many coating methods such as melting, electrochemical, chemical, thermochemical and mechanical methods. When materials need to work especially in high temperature conditions, coatings with ceramic-based components are preferred, but very special technologies and devices and high temperature and pressure are required to make these coatings. For these reasons; In this study, the AISI 304 stainless steel material surface was coated cost-effectively, without using expensive and special devices, by thermochemical method using $Al_2O_3+SiO_2+ZrO+BaC+Ti+Al$ powder cermet material mixture in an atmosphere-uncontrolled and pressure-free heat treatment furnace. To determine the substrate surface quality, the materials were prepared with 600 and 1200 mesh surface quality before coating. The changes in structural and mechanical properties of the coated materials were examined. At the end of the investigations; It has been determined that coating can be done successfully even in a simple oven, that the coating undergoes deformation along with the material during the mechanical test and changes shape without breaking/separating, and that the coating improves its mechanical properties. After cermet coating; it was determined that there was an increase of \cong 65% in tensile strength, \cong + 32% in yield strength and \cong 66% in hardness, while there was a decrease of \cong 1% in elongation. It has been determined that time is very important in the coating process, and as time increases, the properties get better.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : * kayaalpmurat@gmail.com / Tel: +90 505 537 7216

1. Giriş (Introduction)

Dünyada küresel çelik üretimi % 3.7 artarak 2020'de 1880 Mt'dan 2021'de 1950 Mt'a yükselmiştir [1, 2]. Pandemi sonrası (COVID-19) küresel ekonomik toparlanmanın daha güçlü demir cevheri tüketimini artıracığı tahmin ediliyor [3]. Küresel çelik üretiminin 2021'den 2025'e kadar olan dönemde % 32 büyümesi beklenmektedir [4]. Küresel çelik üretim kapasitesi 2020'de 2452 Mt'dan 2021'de 2488 Mt'a %1,5 artmıştır [1, 3]. Bununla birlikte, üretim kapasitesinin sürekli büyümesine rağmen, demir çelik üretim endüstrisinin verimliliği, son yirmi yılda üretim sisteminin teknolojik verimsizliklerini vurgulayan yalnızca marjinal bir artışa sahiptir [5]. Bu marjinal verimlilik artışına katkıda bulunan faktörler; çelik üretim süreci boyunca yüksek sıcaklık, aşındırıcı ortam ve aşındırıcı aşınma gibi aşırı ve sert çalışma koşullarına maruz kalmaları nedeniyle üretim donanımının sınırlamalarını içerir [5-7]. Demir ve çelik imalat endüstrisindeki teknik olarak zorlu uygulamalar, üretimin aksama süresine ve daha yüksek bakım maliyetlerine katkıda bulunan ürün kalitesini ve verimliliğini doğrudan etkilemektedir [8]. Yüzeysel modifikasyon/kaplama teknolojilerinin uygulanması yoluyla donanımın yüzey dayanıklılığının iyileştirilmesi, ürün kalitesinin iyileştirilmesi, ürün iş hacminin artırılması, bakım maliyetini ve arıza süresini azaltır. Bu nedenle, demir çelik yapım donanımının ömrü ve üretim verimliliği artar [5, 8, 9]. Malzemelere kaplama uygulayarak bölgesel veya tüm yüzeyin istenilen koşullarda çalışması süregelen başarılı uygulamalardandır. Yüzeysel kaplama; korozyon, erozyon ve aşınma direnci gibi istenen yüzey özelliklerini gerektiren malzemelerin, aletlerin ve makine parçalarının üretimi için ekonomik bir yöntemdir. Bireyler ve endüstri, aşınan yüzeye odaklanma eğilimindedir. Çalışma koşulları üzerinde en büyük etkiye sahip olan yüksek sıcaklık, korozyon, erozyon ve aşınmayı azaltmak için ya ağır işletme koşullarına dayanıklı malzeme kullanılarak veya bu özelliklerin mevcut malzemede yüzey kaplama yöntemleri kullanılarak iyileştirilerek azaltılması için araştırmalar yıllardır devam etmektedir [10, 11]. Kaplama teknolojileri aracılığıyla yapılan yüzey modifikasyon/kaplama; alt tabaka malzemesini korur ve malzeme bozulmasını geciktirerek değiştirme maliyetini düşürmekte, böylece bileşenlerin hizmet ömrünü uzatmaktadır [12]. Uygulanacak kaplama yöntemleri, arzu edilen kaplama kalınlığı, bağlanma mekanizması ve temel mekanik dayanım, bileşen geometrisi ve kimyası, bileşene uygun kaplama işlemi koşulları ve kaplamanın çalışma koşullarına bağlıdır [13]. Özellikle termal püskürtme işlemleri, bileşenlerin korunması ve onarımı için enerji üretimi, otomotiv, havacılık, denizcilik ve petrokimya gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılan ve kanıtlanmış teknolojilerdir [14, 15]. Kaplama işlemlerinde kaplama tozunun minimize edilmesi ve yüksek sıcaklık ve basınç altında uygulanması çoğunlukla plazma sprey cihazlarının çalışma prensiplerinin temelini oluşturur. Kaplama işlemleri çok farklı tekniklerle yapılmaktadır. Bunlar; Plazma Sprey,

Atmosferik Plazma Sprey (APS), Vakum Plazma Sprey (VPS), Yüksek Hızlı-Oksi Alev (HVOF), Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS), Elektron Demetiyle Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD) Yöntemi olarak sınıflandırılabilir [16, 17, 18, 20]. Plazma sprey kaplamalar aslında maliyetli bir işlem olması nedeniyle çoğunlukla kritik ve sistemi doğrudan etkileyen ekipman/malzeme üzerine tatbik edilmektedir [15]. Plazma sprey kaplama uygulaması her ne kadar ana malzemeyi değiştirmek yerine ömrünü uzatarak ekonomikliğini sağlasa da, sistemin karmaşıklığı nedeniyle hata riski fazla olan sistemlerdir. Tüm bunlara ilave olarak özellikle yeniden üretim maliyeti yüksek veya uygulanacağı malzemenin kritik görevinden dolayı kullanım alanı sınırlıdır. Ayrıca sistemin karmaşıklığı nedeniyle işlemin uygulanması esnasında dikkat edilmesi gereken birçok parametre (kaplamaya uygunluk, yüzeyin hazırlığı, yüksek sıcaklık ve basınç, vakum ortamı, kaplama tozlarının atomizasyonu vb.) vardır [19, 21, 22]. Bir sistemde dikkat edilmesi gereken parametre sayısı arttıkça hata payı da sistematik olarak artmaktadır. Yukarıda yapılan literatür araştırmalarından da görüleceği üzere kaplamaların maliyet yüksekliği ve uygulama kompleksliği nedeniyle, çalışmamızın özünü sistemin basitleştirilmesi ve süreçlerin daha kolay yönetilebilir olması, maliyet düşüklüğü ve hata oranının düşürülmesi oluşturmaktadır. Çalışmamızda mekanik özelliklerin yapılan sermet kaplama ile iyileştirilmesi, bunu yaparken ana malzemenin korunması, kaplamada difüzyonun tam olarak sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, basit bir ısıtma fırınında termokimyasal işlemle kaplama yapılarak yapı ve mekanik özellikler değerlendirilmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Study)

Bu çalışmada türbin kanat malzemesi olan AISI 304 paslanmaz çelik (Tablo 1) sermet malzemesi ile kaplanmıştır. Kaplama bileşenleri olarak da Tablo 2'de verilen % 99 saflıkta Alümina, Zirkon, Silis, Bor Karbür, Titanyum toz malzemeler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında mekanik testler (çekme ve sertlik testleri) ile yapısal (metalografik) incelemeler yapılmıştır. Kaplama sonucunda özelliklerdeki değişimin gösterilebilmesi için; hiç kaplanmamış ve yüzey pürüzlülüğü (600 ve 1200 mesh), işlem süresi (4 ve 8 saat) gibi farklı işlemler uygulanarak kaplanmış numuneler kullanılmıştır. Uygulanan işlemler Tablo 3'te özetlenmiştir. Kaplama işlemleri için muffle tipi atmosfer kontrolsüz fırın ve 1200 °C sabit sıcaklık kullanılmıştır. Numune (altlık) yüzeylerine asetonla karıştırılmış macun şeklinde 1-1.5 mm kalınlıkta olacak şekilde Tablo 3'te verilen karışım malzeme kullanılarak ön kaplama uygulanmıştır. Her bir farklı numune için en az 3 deney tekrarı yapılmıştır. Kaplama işlem sonrası numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Kaplama yapılan numuneler daha sonraki testler için uygun olması bakımından Şekil 1'de verilen yapısal analiz ve çekme testi numuneleri hazırlanarak kaplanmıştır.

Tablo 1. AISI 304L kimyasal bileşimi % ağırlıkça (Chemical composition of AISI 304L % by weight)

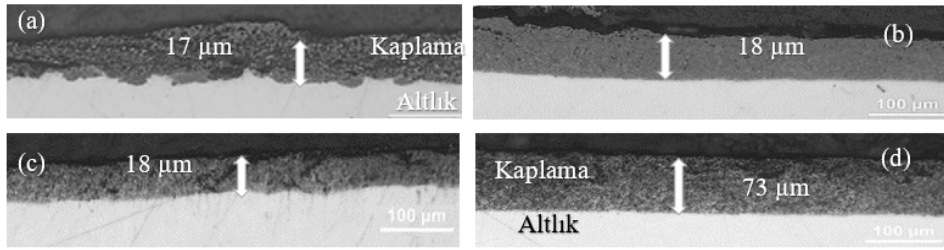
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0.045	1.15	0.35	0.005	0.003	18.7	12.3

Tablo 2. Kullanılan sermet kaplama tozu karışımının karışım oranları ve boyutları (Mixing ratios and dimensions of the coating powder mixture used)

Toz Cinsi	Toz Karışım Oranı (%)	Tane Boyutu (µm)
Alümina	15	30-40
Zirkon	23	20-30
Silis	16	70-80
Bor Karbür	15	35-50
Al	22	15-25
Ti	9	20-30

Tablo 3. Üretilen numunelere ait işlemler ve özellikleri (Processes and properties of the produced samples)

	Isıl İşlem Süresi	Kaplama Durumu	Yüzey İşlemi
A	Yok	Yok	Yok
B	4 Saat	Yok	Yok
C	8 Saat	Yok	Yok
D	4 Saat	Var	Kaba Yüzeyle (600 mesh)
E	8 Saat	Var	Kaba Yüzeyle (600 mesh)
F	4 Saat	Var	İnce Yüzeyle (1200 mesh)
G	8 Saat	Var	İnce Yüzeyle (1200 mesh)

**Şekil 2.** İşlem şartlarına bağlı olarak kaplama kalınlığının değişimi (optik); a) D, b) E, c) F ve d) G (Variation of coating thickness (optical) depending on process conditions; a) D, b) E, c) F and d) G)

Yapısal incelemeler için 20x20x5 mm boyutlarında ayrı numuneler üretilmiştir. Yapısal analiz ve çekme test numunelerinin tüm yüzeyleri kaplanmıştır. Çekme testleri Instron 3369 marka cihazda 1 mm/dk çekme hızında test edilmiştir. Sertlik testleri Emco marka cihazda Vickers metodu ile yapılmıştır. Kopma yüzeyi deformasyon izlerinin incelenmesi Leica M205 C Trinoküler stereo marka mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Numunelerde yapısal incelemeler Leica DM 4000M Metal Optik Mikroskopta optik ve detaylı SEM-EDS incelemeleri ise JEOL JEM 6060 LV marka cihazda yapılmıştır. Ayrıca kaplama içerisinde var olan ve oluşan bileşenlerin analizi ise Bruker D8 Advance marka XRD cihazında gerçekleştirilmiştir.

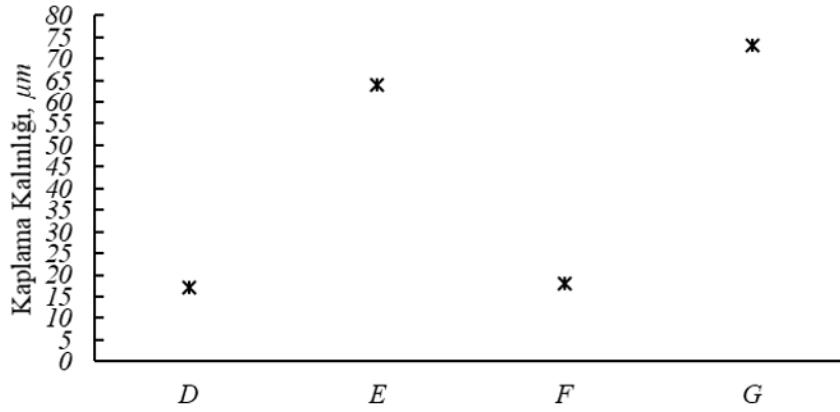
**Şekil 1.** Yapısal ve çekme test numunelerinin ön kaplama görüntüleri (Pre-coating images of structural and tensile test specimens)

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Study)

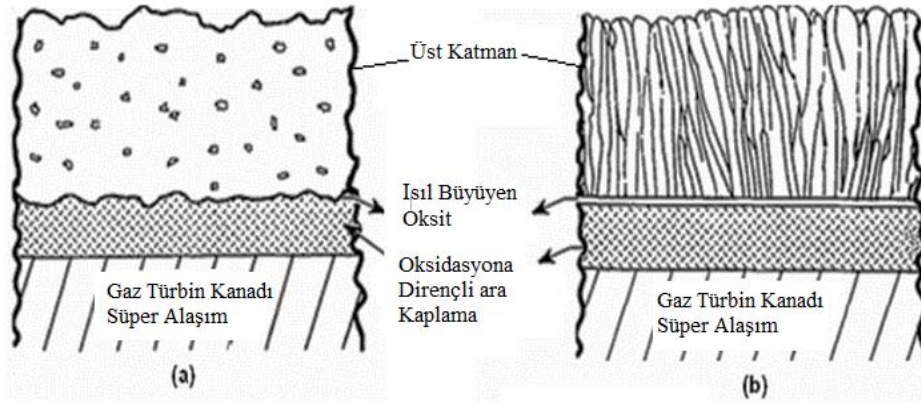
3.1. Kaplama ve Yapısal Özellikler (Coating and Structural Features)

Çalışma kapsamında 7 farklı numune üretilmiş ve incelenmiştir. Bu bölümde kaplama, kaplamanın başarısı ve altlık ile kaplama ilişkileri incelendiğinden dolayı; A, B ve C numuneleri kaplama yapılmadığından değerlendirmeye alınmamıştır. Yüzey pürüzlülüğü (600 ve 1200 mesh) ve işlem süresinin (4 ve 8 saat) kaplama yapımına ve özelliklere etkisinin gösterilmesi bakımından bu numunelere ait görüntüler optik (Şekil 2.a-d) ve SEM (Şekil 5.a-d)'de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde bütün numunelerde altlık yüzeylerinde kaplamanın başarıyla yapılabildiği görülmektedir. Genel incelemelerinden, oluşturulan bu kaplama tabakasının sürekli bir görünüm sergilediği tespit edilmiştir. İşlem süresinin artmasına bağlı olarak kaplama kalınlığının arttığı açıkça görülmektedir (Şekil 3).

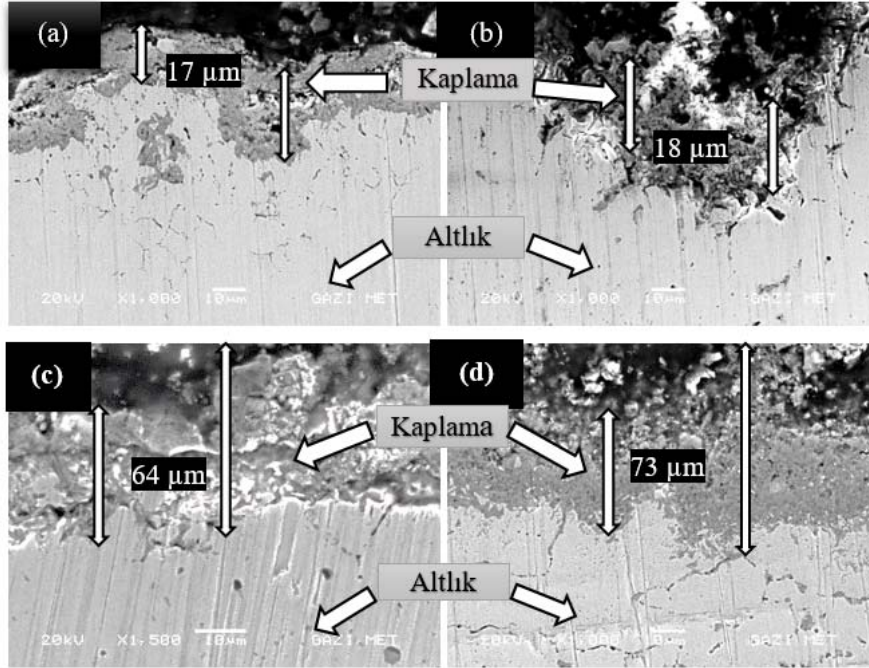
Aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü arttıkça toplam kaplama kalınlığı ve derinliği de artmaktadır. Yüzey kaplamanın bileşen ömrü ve performansı üzerindeki etkisi, yüzey malzemesine, alaşıma, servis koşullarına ve uygulama sürecine bağlı olacaktır. [15]. Yapılan bir çalışmada [23], yüzey pürüzlülüğünün artması kaplanacak yüzey alanını da artırarak altlık malzeme ile kaplama arasında difüzyonu arttırdığını göstermektedir. Genel olarak, pürüzlü bir bağ kaplama yüzeyi, bir türbin motorunda yüksek sıcaklık davranışlarını, bağ kuvvetini ve kullanım ömrünü iyileştirebilir, çünkü seramik ve bağ kaplama arasındaki arayüzde mekanik kilitleme sağlar. Bununla birlikte, Termal Bariyer Kaplamalardaki (TBK) stres alanı, TBK sisteminin erken arızalanmasına neden olabilecek ara yüzeyin pürüzlülüğüne bağlıdır [20, 21]. Optik görüntülerden altlık/kaplama ara yüzey özellikleri net olarak görülemediğinden dolayı daha detaylı incelemeler için SEM görüntüleri de Şekil 4'te verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; kaplama içerisinde termal yalıtım özelliğinin artırılmasına yardımcı olacağı düşünülen ya da olumlu katkı sunabileceği varsayılan gözeneklerin de bulunduğu, diğer yandan altlık malzeme ile iyi bir şekilde tutunmuş/bağlanmış süreklilik arz eden bir kaplama görülmektedir. Ayrıca kaplama yüzeyine hiçbir mekanik veya pnömatik basınç uygulanmamasına rağmen, yüzeydeki pürüzlülüğe bağlı olarak oluşan çukurların da doldurulabildiği tespit edilmiştir. Ancak derin olan çukurluklara kaplama malzemesinin hiç boşluk kalmadan daha da iyi bir şekilde doldurulması ve işlem öncesinde kaplama/altlık temasının artırılması işlemin başarısı ve kaplama kalitesini daha artıracaktır. Yapılan kaplama işleminin süresinin artmasına bağlı olarak, kaplamanın malzeme ile teması ve bağlanması da artmıştır. Sürenin artması hem kaplama içerisindeki yoğunluğu düzenlerken hem de kaplama ile altlık temas/bağlanma özelliğini de geliştirmiştir. Kaplamanın kendi içerisinde iyi bir birleşme (sinterleme) meydana geldiği, bölgesel olarak ≈ 100 μm kadar kalınlıkta kaplama oluşturulabildiği, sürenin artmasıyla birlikte kaplamada rijitliğin geliştiği görülmektedir. Kaplama/altlık ara yüzeyi incelendiğinde ise; sürenin artmasına paralel olarak ara yüzeyde difüzyon meydana geldiği, altlık ile malzeme arasında element geçişlerinin olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü de çok önemli parametre olarak kaplama işlemlerinde rol oynamaktadır (Şekil 5). Tüm bu sonuçlar kaplama yapabilmek için atmosfer kontrolsüz ve basınçsız bir fırının yeterli olabileceğini göstermektedir.



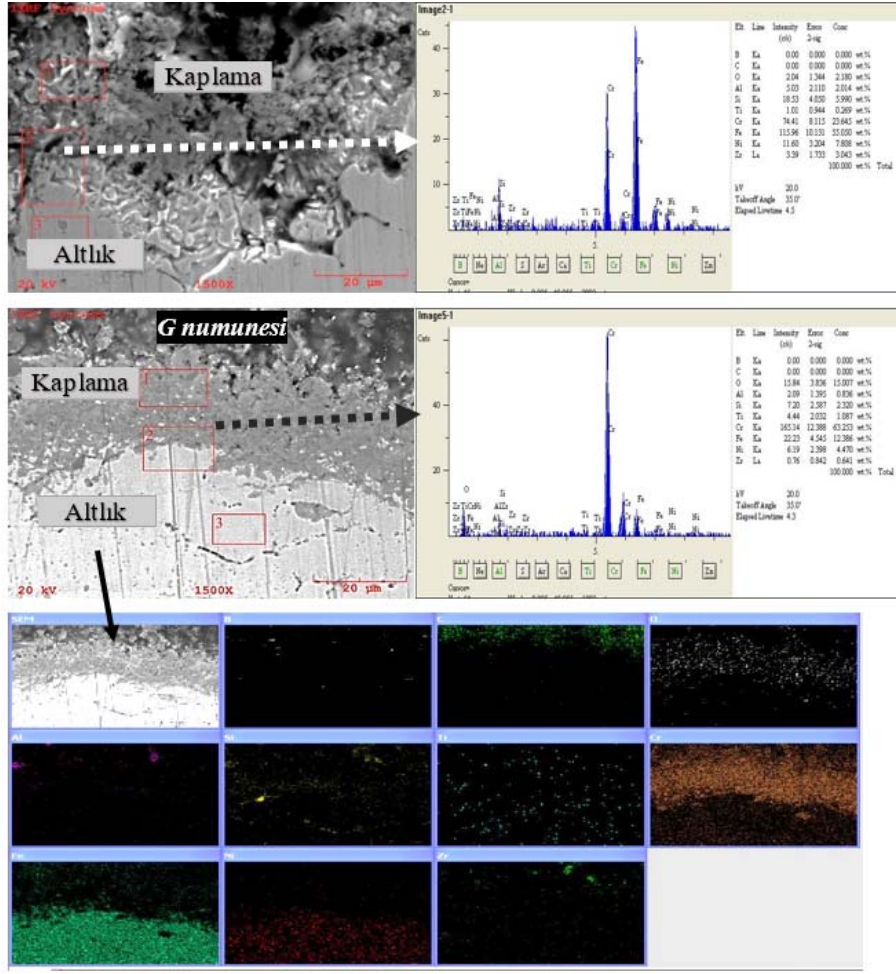
Şekil 3. İşlem şartlarına bağlı olarak kaplama kalınlığının değişimi (Variation of coating thickness depending on process conditions)



Şekil 4. Termal bariyer kaplamalarda oluşan yapısal unsurlar a) Spreyleme sonrası b) Biriktirme metodu sonrası (Structural elements formed in thermal barrier coatings a) After spraying b) After deposition method) [24]



Şekil 5. Kaplama yapısının değişimi (SEM); a) D, b) E, c) F ve d) G (Change of coating structure (SEM); a) D, b) E, c) F and d) G)



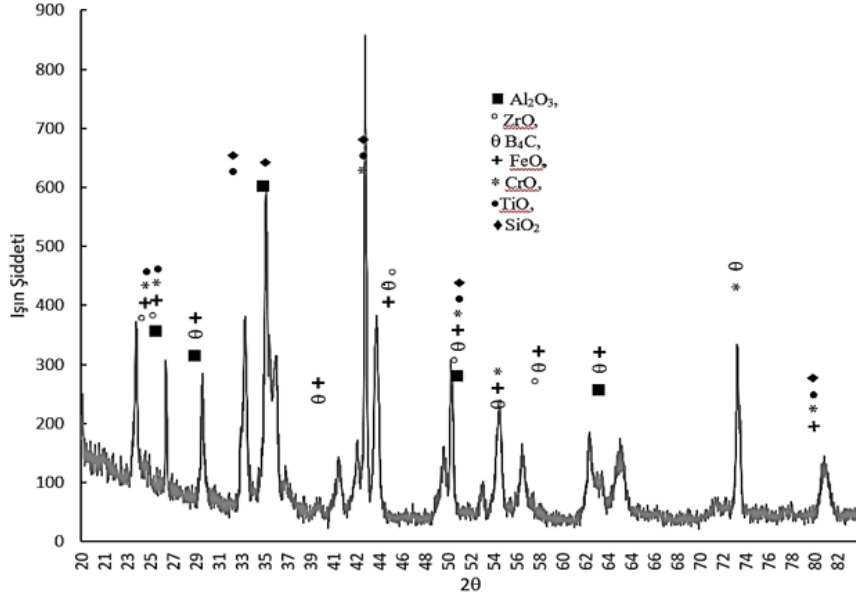
Şekil 6. E ve G numunelerinde yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak kaplama, altlık, ara yüzeyde kimyasal değişimin SEM-EDS analizleri (SEM-EDS analyzes of chemical change in coating, substrate, interface depending on the surface roughness of E and G samples)

Termal bariyer kaplamalarda oluşturulan yapısal unsurlar Şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir. Temel olarak altlık malzeme üzerinde bir ara geçiş kaplaması bulunmakta, bunun üzerinde ya spreyleme yada biriktirme ile seramik içerikli tabaka bulunmaktadır. Spreyleme yöntemlerinde yüzeye seramik kimyasal bir değişim olmadan doğrudan uygulanırken, biriktirmede ise özellikle oksidik seramikler kimyasal işlemle kaplama sırasında oluşturulmaktadır (büyütme). Diğer yandan spreylemede asıl dış katman gözezsiz yada dairesel kapalı gözenekli olurken, biriktirmede ise dışa doğru uzanan tane yapılı ve gözenekli yapılar oluşmaktadır.

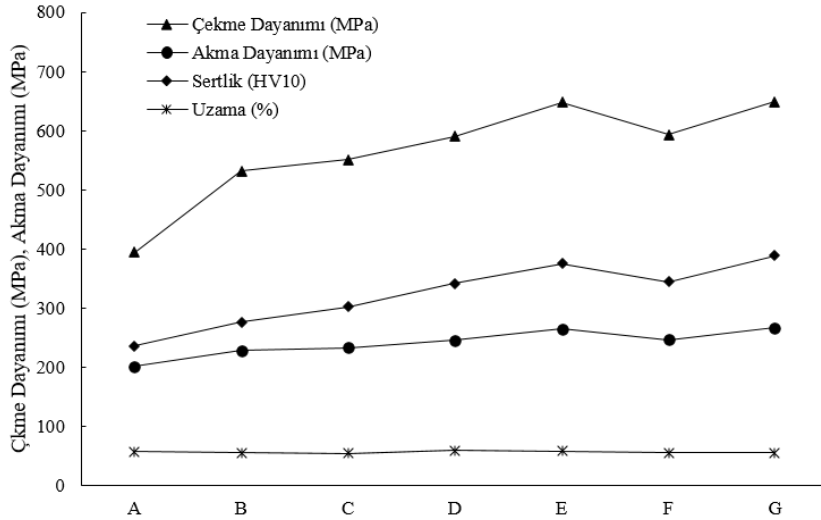
Bu bakımdan değerlendirme yapıldığında; bu çalışmamızda ara kaplama işlemi yapılmamıştır. Bu kaplama hem maliyet hem de teknolojik gereksinimleri gerektirmektedir. Bu nedenle çalışmamızda tercih edilmemiştir. Diğer yandan termokimyasal işlemle ürettiğimiz kaplama yapısı spreyleme metodundaki (Şekil 4.a) gibi dairesel ve kapalı gözeneklidir (Şekil 5 ve 6). Dış katman gaz türbinindeki sıcak çalışma gazlarıyla temas eden ve dolayısıyla motorun çalışma sıcaklığına maruz kalan en dış katmandır. Dış katmanın temel görevi alttaki katmanlara termal izolasyon yapmaktır. Bu amaca ulaşmak için dış katmanın; yüksek erime sıcaklığı (yüksek sıcaklıkta kaplamanın yapısal kararlılığı), düşük ısıletkenlik (ısı yalıtımı), altlık malzemeye uygun ısıl genleşme katsayısı (termal yorulma uyumu), oksidasyona ve korozyona karşı direnç (yüksek sıcaklıkta ve korozif ortamda çalışma) ve termal şoklara direnç olarak sayılabilir.

Bu bakımdan çalışma kapsamında üretilen katman bileşenleri ve yapısının bu amaçlara uygun olduğu ve yapılan çalışmalarla [24-27] da uyumlu olduğu görülmektedir.

Yapılan kaplamanın hangi bileşenlerden oluştuğu XRD analizi ile belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kaplamayı oluşturan bileşenlerin varlığını sürdürdüğü tespit edilmiştir. Bu durum kaplama bileşenlerinin ve yöntemin genel olarak uygun olduğunu göstermektedir. Yapılan işlemlerde tercih edilen malzemelerin varlığını koruması hedeflenen özelliklerin sağlanması bakımından son derece önemlidir. Analiz sonuçları (Şekil 7) özellikle tercih edilip kaplamada kullanılan oksit seramiklerin varlıklarını koruduklarını göstermektedir. Ayrıca analiz sonuçları; kaplamaya özellikle bağlayıcı ve termal genleşme uyumu katkısı olarak katılan element bileşenlerin (Al, Ti) iç kısımlarda element olarak varlıklarını devam ettirirken (Şekil 6), dış kısımlarda ise oksit haline dönüşerek hem dayanım hem de termal yalıtıma katkıda bulunabildiklerini göstermiştir. Bu bakımdan da termokimyasal işlemle termal bariyer kaplaması yapılırken; ilave edilen bağ yapıcı ve termal bakımdan boyutsal dengeleyici olarak ilave edilen elementlerin dış kısımlarda seramiğe dönüşerek katkı sundukları görülmüştür (Al_2O_3 , TiO). Oluşan bu oksitler kanadın türbinde çalışması sırasında sürekli yeni oksitlerin oluşumunun sağlanması ile kaplama etkinliğinin daha uzun süreli olmasına katkı sunacağı yönünde kanaat oluşmuştur.



Şekil 7. D, E, F, G numunelerine ait kaplama yüzeyi XRD analiz sonuçları (Coating surface XRD analysis results of D, E, F, G samples)

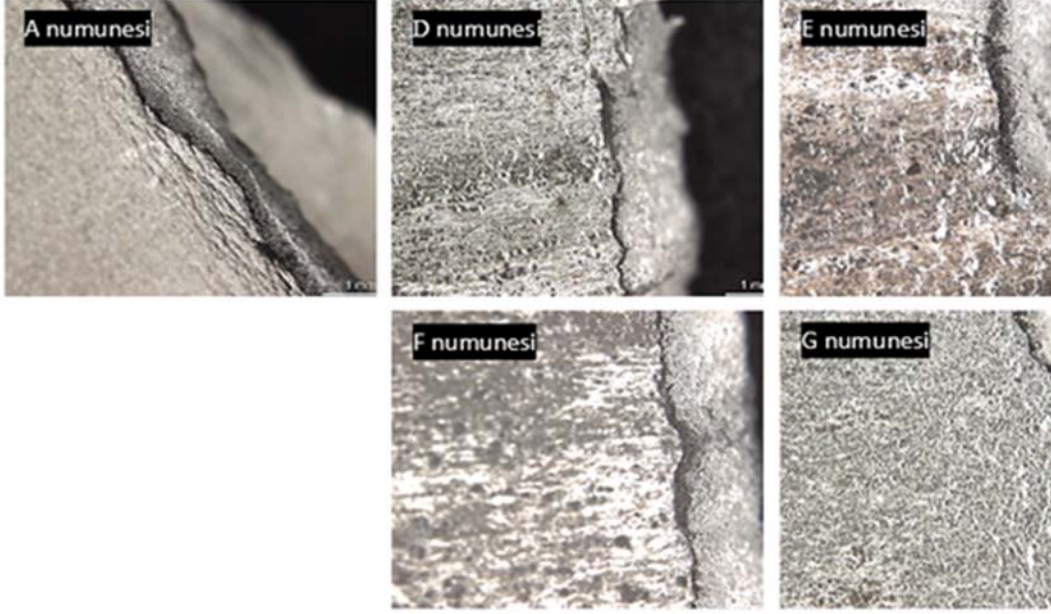


Şekil 8. Uygulanan işlemlerin altlık malzeme mekanik özelliklerine etkilerinin değişimi (Variation of the effects of applied processes on the mechanical properties of the substrate)

3.2. Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

Termal bariyer amaçlı kaplama yapımı sırasında kaplanmış altlık malzemelerinin mekanik özelliklerinin değişimi de incelenmesi gerekmektedir. Yapılan işlemler, işlem şartları ve kaplamanın altlık malzemesinin mekanik özelliklerini olumsuz bir etki yapmadan geliştirmesi de beklentiler arasında yer almaktadır. Altlık malzemesinin mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesi kaplama kalitesi ve kaplama/altlık bağlanması ile kaplamanın mekanik etkiler sırasında altlıkla birlikte hareket edebilmesine bağlıdır. Bu çalışmada incelenen numunelerin mekanik özellikleri Şekil 8’de verilmiştir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde; işlem yapılmamış orijinal altlık malzemesine (A) kıyasla ısıtma işlemi (kaplamada kullanılan şartlarla aynı) yapılan numunelerde (B ve C) özellikler genel olarak gelişirken (ortalama %25-30), işlem süresinin uzun (8 saat) olduğu C numunesinde tüm mekanik özelliklerde % 35-45 oranında daha fazla artış olmuştur. Yapılan ısıtma işlemi aslında bir yüksek sıcaklık normalizasyon işlemidir. Çelik malzemeler normalize edildiklerinde

dayanım ve sertlik özelliklerinde artış meydana gelmektedir. [5, 6, 8, 11] Kaplama işlemi de çeliğin normalizasyonu sırasında yapıldığından ek bir ısıtma işlemi yapılmadan hem ısıtma işlemi hem de kaplama işlemi yapılabilmektedir. Kaplanmış numunelerin özellikleri incelendiğinde; hem kaplamanın hem de işlem süresindeki artışın numunelerde mekanik özelliklerin artmasına katkı sundukları açıkça görülmektedir. Yapılan bazı çalışmalar [12, 22, 23, 24] kaplama işleminin özellikle dayanım ve sertlik mekanik özelliklerinin gelişmesinde olumlu katkı sağladığı belirtilmektedir. Çünkü malzeme yüzeyine yapılan kaplamalar genellikle seramik esaslı malzemeler olup, bu malzemelerin altlık malzemesinin dayanımına ve özellikle yüzey sertliğini artırması doğal bir sonuçtur [12, 13, 14, 22]. Bazı çalışmalar, işletme koşulları olan yüksek sıcaklık ortamlarında da özellikleri değerlendirmişler ve sonuç olarak kaplamanın yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklere olumlu katkı sağladıklarını göstermişlerdir [23-26]. Bu açıdan çalışma yapılan diğer çalışmalarla benzerlik göstermekte ve kaplama ile özellikler gelişmektedir.



Şekil 9. A, D, E, F ve G numunesi kopma yüzeyi ve deformasyon görüntüleri
(A, D, E, F and G specimen rupture surface and deformation images)

Diğer yandan; numune yüzey pürüzlülüğünün çok küçük bir olumsuz etkisi olmuş, bu nedenle aynı şartlarda üretilen E numunesinde G'ye göre biraz daha düşük mekanik özellikler elde edilmiştir. Başlangıç malzemesi (A) ile en iyi özelliklerin sağlandığı G numunesi karşılaştırıldığında; çekme dayanımında \cong % 65, akma dayanımında \cong + % 32 ve sertlikte ise \cong % 66 artış olurken, uzamada ise \cong % 1 oranında azalma meydana gelmiştir. Uzamadaki bu kayıp sünekliği çok fazla olan bu malzemeler için yok sayılabilecek düzeydedir. Yapılan çalışmalarda [14, 28, 29, 30] kaplama işlemi sonucunda altlık malzemelerde genellikle dayanım ve sertlik gibi özelliklerin de arttığı sıklıkla belirtilmektedir. Çünkü oluşturulan katmanlar genellikle oksit, karbür, intermetalik esaslı ve/veya metal bahsedilen malzemelerden meydana gelmektedir. Bu malzemelerin ortak noktası ise sert ve dayanıklı olmalarıdır. Bu nedenle kaplama yapıldığı zaman altlık malzemelerde bu özellikler doğal olarak gelişmektedir. Bu çalışmada da benzer durum olmuştur. Diğer yandan katman kalınlığının artmasıyla bahsedilen özelliklerin daha da arttığını göstermektedir. Bu çalışmada da katman kalınlığının artması nedeniyle altlık malzemenin uygulanan çekme ve batma yüklerine karşı direnci de artarak çekme ve sertlik özellikleri iyileşmiştir. Altlık yüzey pürüzlülüğü azaldıkça (600'den 1200 mesh) katman kalınlığı daha da arttığından dolayı bu özellikler artmıştır. Bu çalışmada diğer literatür çalışmalarının tamamından farklı olarak çekme ve sertlik gibi özelliklerin artmasına karşın, süneklik çok az oranda azalmıştır.

Kaplama işlemi sonucunda elde edilen tabakanın altlık malzemeye katkıları çok önemlidir. Bunun yanında kaplamanın mekanik etkiler sırasında altlık malzeme ile aynı ve/veya benzer karakterde davranış sergilemesi de çok önemlidir. Eğer kaplama ve altlık, mekanik etkiler sırasında benzer sünek veya gevrek davranış sergileyemiyorsa ara yüzeyde kolay bir biçimde ayrışmaların olması kaçınılmazdır. Bu nedenle yapılan çalışmalarda [19, 23, 24, 25] ara kaplama katmanını kullanıldığı görülmektedir. Ancak bu durum ek malzeme ve maliyet oluşturmaktadır. Bu bakımdan çalışma hem tek işlem hem de altlık ile uyumlu malzeme üretimi bakımından başarılıdır.

Bu çalışmada üretilen bazı numunelerin çekme testi sırasında kopma bölgesindeki altlık ve kaplama/altlık ara yüzeyinde meydana gelen yüksek orandaki deformasyon (şekil değişimi, boy uzaması)

davranışlarının stereo mikroskop görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir. Bu görüntülere bakıldığında; işlemsiz altlık malzemesinin yüksek sünekliği nedeniyle büyük oranda deformasyona uğradığı (% 58 süneklik) ve altlık yüzeyinde katmanlar şeklinde bir yüzeyin meydana geldiği görülmektedir. Yapılan kaplamanın da bu yüksek orandaki malzeme şekil değişimine uygun hareket etmesi ve altlık malzemesinin özellikle akma noktasına kadar yapacağı şekil değişimlerine de uygun olması bakımından son derece önem arz etmektedir.

Kopma bölgelerindeki deformasyon görüntüleri incelendiğinde; tüm numunelerde kopma bölgesinde yüksek oranda deformasyon maruziyeti gözlemlenmiş olup, bu durum altlık malzemesinin sünek (% 55-60) olmasından kaynaklanmaktadır. Bu kadar şekil değişimi neticesinde esnek olmayan ve altlık ile iyi bir tutunma/yapışma/birleşme sağlayamayan kaplamanın tahrip olması ve parçalar halinde kopması kaçınılmazdır. Yüksek deformasyon sonrası kaplanmış yüzeyler incelendiğinde; kaplamanın kendisinde ayrışmaların olduğu, ancak altlık malzemedeki kopmadan yüzeyde yapışık olarak kaldığı görülecektir. Bu durum kaplama yönteminin başarısının yanında kaplama malzemesinin de kabiliyetini göstermektedir.

Bu çalışmadaki kaplama sermet (seramik + metal) malzemesi olduğundan, sadece seramikten oluşan kaplamalardan daha yüksek esneme/deformasyon kabiliyeti bulunmaktadır. Özellikle türbin kanatlarında yüksek oranda vibrasyon, eğilmeye zorlanma, termal ve mekanik aşınma mekanizmaları etki yapmaktadır. Altlık malzemesinin ilk şeklini koruması o malzemenin çalışma sıcaklığındaki akma dayanımı ile ilişkilidir. Elastik şekil değişimleri kalıcı olmadığından, altlık malzemesi yük kalktığında eski şekline dönmektedir. Kaplama yapılan malzemelerde kaplamanın da bu tekrarlı termal ve mekanik etkili şekil değişimlerine uygun olması beklenir. Bu nedenle elastik özelliği yüksek olan kaplamaların kullanılması, termal ve mekanik yorulmalı çalışma ortamlarında kullanılmaya daha uygundur. Bu çalışmada altlık malzemenin kompası sonucunda bu yüksek deformasyonun olduğu bölgelerde dahi kaplamanın altlık yüzeyinde yapışık halde kalması bu kaplamanın başarısını göstermektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Yapılan çalışmada, bir ısıl işlem uygulaması esnasında termokimyasal bir işlem yapılarak bir termal bariyer amaçlı kaplama oluşturulması ve oluşan bu kaplamanın yapısal ve mekanik özelliklerindeki değişimin incelenmesi neticesinde;

- Çelik malzemeye genellikle uygulanmakta olan ısıl işlem sırasında termokimyasal kaplama yapılabileceği,
- Özel bir teknoloji ve cihaz gerektirmeden kaplama işleminin başarıyla yapılabileceği,
- Seramik ve metal tozlardan oluşan sermet malzeme kaplama yapılmasının sünek davranış gereksinimini karşıladığı,
- Tahribatlı test sırasında oluşan yüksek deformasyona rağmen kaplamanın altlık yüzeyinde başarılı bir şekilde tutunmaya devam ettiği,
- Altlık yüzey kalitesinin azalması kaplama ve mekanik özelliklere az da olsa olumsuz etki ettiği,
- İşlem süresinin hem kaplama kabiliyeti hem de mekanik özellikleri geliştirdiği,
- Sermet kaplama ile mekanik özelliklerde; çekme dayanımında \cong % 65, akma dayanımında \cong % 32 ve sertlikte ise \cong %66 artış olurken, uzamada ise \cong % 1 oranında azalmanın meydana geldiği,
- İşlem süresinin ve sıcaklığının değiştirilmesinin olumlu yönde etkileri olabileceği,
- Kaplama içerisine metal katkı oranının daha fazla yapılmasının kaplama başarısı ve mekanik özelliklere etkisinin olumlu yönde olacağı tespit edilmiştir.

Kaynaklar (References)

1. Pauliuk, S., Milford, R. L., Mu, D. B., Allwood, J. M. The steel scrap age. *Environ. Sci. Technol.* 47, 3448–3454, 2013.
2. World Steel Association. A Report on “Global Steel Production Forecast at Record High” <https://mepsinternational.com/gb/en/news/global-steel-production-forecast-at-record-high-in-2022>, Yayın tarihi 27 Mart 2022.
3. Tomohiro, H., Latest Developments in Steelmaking Capacity, DSTI/SC(2021)5/Final Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD), 9–23, March 2021.
4. A Report on Global Steel Production to Grow at 32% Annual Average until 2025—Report Hellenic Shipping News Worldwide. Available online: <https://www.hellenicshippingnews.com/global-steel-production-to-grow-at-32-annual-average-until-2025-report/>, accessed on 27 March 2022.
5. Matthews, S., James, B. Review of Thermal Spray Coating Applications in the Steel Industry: Part 1—Hardware in Steel Making in the Continuous Annealing Process. *J. Therm. Spray Technol.* 19, 1267–1276, 2010.
6. Matthews, S., James, B. Review of Thermal Spray Coating Applications in the Steel Industry: Part 2—Zinc Pot Hardware in the Continuous Galvanizing Line. *J. Therm. Spray Technol.* 19, 1277–1286, 2010.
7. Hasırcı H., Effects of heat treatment conditions and sliding rates on the adhesive wear resistance of AISI D6 Steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (3), 587-592, 2010.
8. Kay, C.M. Thermal Spray Applications in the Steel Industry, *ASM Handbook, Thermal Spray Technology*, 5A, 324–327, 2013.
9. Mindivan H., High temperature wear and oxidation behavior of electrochemically boronized low carbon steel, *Journal of Gazi University Faculty of Engineering and Architecture*, 38 (2), 937-946, 2022.
10. Ayman T., Orhan A., Coating of steel wires with Zn-Al-Mg alloy and investigation of coating characterization, *Gazi University Faculty of Engineering and Architecture Journal*, 38 (4), 2409-2420, 2023.
11. Bolelli, G., Giovanardi, R., Lusvarghi, L., Manfredini, T. Corrosion Resistance of HVOF-Sprayed Coatings for Hard Chrome Replacement. *Corros. Sci.* 48, 3375–3397, 2006.
12. Ang, A.S.M., Berndt, C.C., Cheang, P. Deposition Effects of WC Particle Size on Cold Sprayed WC-Co Coatings. *Surf. Coat. Technol.* 205, 3260–3267, 2011.
13. Singh, S., Singh, P., Singh, H., Buddu, R.K. Characterization and Comparison of Copper Coatings Developed by Low Pressure Cold Spraying and Laser Cladding Techniques. *Mater. Today Proc.*, 18, 830–840, 2019.
14. Singh, S., Raman, R.K.S., Berndt, C.C., Singh, H. Influence of Cold Spray Parameters on Bonding Mechanisms: A Review. *Metals* 2021, 11, 2016.
15. Morks, M., Cole, I., Corrigan, C., Kobayashi, A. Electrochemical characterization of plasma sprayed alumina coatings. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 1, 107, 2011.
16. Özgürlük, Y. Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemiyle Üretilen Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-17, 2016.
17. Tıfıralı, M. Tel Püskürtme ile Kaplamada Püskürtme Parametrelerinin Mikroyapı ve Gözenekliliğe Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 96, 2020.
18. Altuncu, E. YSZ ve CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 258, 2006.
19. Döleker, M. Bilyalı Dövme İşleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 94, 2015.
20. Pawlowski, L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. (Second Edition). John Wiley & Sons: Chichester, 67-107, 2008.
21. Gansert R.V., Plasma Sprayed Ceramic Coatings. *Ceramic Industry*, 2002.
22. Abdul Rahim Mahamad Sahaba, Nor Hayati Saadb, Salmiah Kasolangb and Juri Saedon, Impact of Plasma Spray Variables Parameters on Mechanical and Wear Behaviour of Plasma Sprayed Al₂O₃ 3%wt TiO₂ Coating in Abrasion and Erosion Application International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 page 1690, 2012.
23. Zhang D B, Gong S K, Xu H B. Effect of bond coat surface roughness on the thermal cyclic behaviour of thermal barrier coatings [J]. *Surf Coat Technol*, 201, 649-653, 2006.
24. Hass D.D., Thermal Barrier Coatings via Directed Vapor Deposition, Department of Materials Science and Engineering, Vol. PhD. Charlottesville, VA: University of Virginia, 1-256, 2001.
25. Sui, Y., Liao X., Liu, Z., Tu Y., Yu P. and Chu P., Study on Microstructure and Properties of Thermal Barrier Coating for Gas Turbine, *Journal of Physics: Conference Series* 2468 011001, 2023.
26. Liu, Longhai, Haiyuan Yu, Chenglong Zheng, Dongdong Ye, Wei He, Silei Wang, Jining Li, Liang Wu, Yating Zhang, Jianhua Xie, and et al. "Nondestructive Thickness Measurement of Thermal Barrier Coatings for Turbine Blades by Terahertz Time Domain Spectroscopy" *Photonics* 10 (2), 105, 2023.
27. Shi L, Long Y, Wang Y, Chen X, Zhao Q. Evaluation of Internal Cracks in Turbine Blade Thermal Barrier Coating Using Enhanced Multi-Scale Faster R-CNN Model. *Applied Sciences*. 12 (13), 6446, 2022.
28. Couto, Miguel & Dosta, S. & Fernández, Javier & Güilemany, Jose Maria. Comparison of the Mechanical and Electrochemical Properties of WC-25Co Coatings Obtained by High Velocity Oxy-Fuel and Cold Gas Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*. 23, 1251-1258, 2014.
29. Moridi, Atieh & Hassani, Mostafa & Vezzù, Simone & Guagliano, M. Number of Passes and Thickness Effect on Mechanical Characteristics of Cold Spray Coating. *Procedia Engineering*. 74, 449-459, 2014.
30. Lima, Rogerio & Kucuk, A. & Berndt, Christopher & Karthikeyan, J. & Kay, C. & Lindemann, J., Deposition efficiency, mechanical properties and coating roughness in cold-sprayed titanium. *Journal of Materials Science Letters*. 21, 1687-1689, 10.1023/A:1020833011448, 2002.

