

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMAL SPREY YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN OKSİT
ESASLI KAPLAMALARIN KATI PARTİKÜL EROZİF
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kudret GÜZEL

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU

Şubat 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

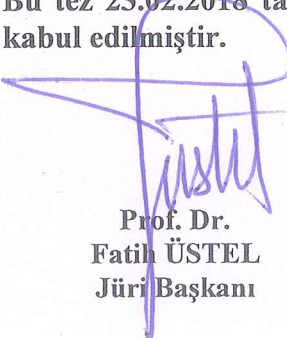
TERMAL SPREY YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN OKSİT
ESASLI KAPLAMALARIN KATI PARTİKÜL EROZİF
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

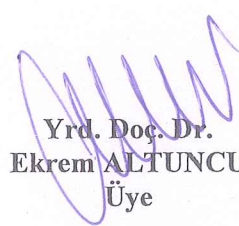
YÜKSEK LİSANS TEZİ


Kudret GÜZEL

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 23.02.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyeokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Fatih ÜSTEL
Jüri Başkanı


Yrd. Doç. Dr.
Ekrem ALTUNCU
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Sinan FİDAN
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Kudret GÜZEL

06.02.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam sayın Yrd.Doç.Dr. Ekrem ALTUNCU'ya teşekkürlerimi sunarım. Analiz ve karakterizasyon çalışmalarında laboratuvar imkanlarını kullanmamda desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Fatih ÜSTEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma SAU-BAPK 'nın 2013-0908003 No lu projesi kapsamında desteklenmiş olup, deneysel çalışmalarım sırasında kaplama üretimi kapsamında yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Merkezi tüm çalışanlarına ve özellikle teknisyen Semih YÜCEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi tez çalışmalarımda aşınma test sürecinde desteklerinden dolayı değerli hocalarım sayın Yrd.Doç.Dr. Sinan FİDAN ve Öğr.Gör.Dr. Barış ÖNEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca maddi ve manevi desteklerini asla esirgemeyen babam Raif GÜZEL ve annem Gülümser GÜZEL'e bana olan güvenlerinden, anlayışlarından ve sabırlarından dolayı sonsuz saygı ve hürmetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KATI PARTİKÜL EROZİF AŞINMA DAVRANIŞI.....	3
2.1.Oda Sıcaklığı Erozif Aşınma.....	5
2.2.Yüksek Sıcaklık Erozif Aşınma	7
BÖLÜM 3.	
KORUYUCU KAPLAMA UYGULAMALARI.....	11
3.1. Termal Sprey Kaplama Yöntemleri.....	12
3.1.1. Plazma Sprey Kaplamalar	14
3.1.2. HVOF kaplamalar	15
BÖLÜM4.	
YÜKSEK SICAKLIĞA DİRENÇLİ KAPLAMALARDA KATI PARTİKÜL EROZYON DAVRANIŞI.....	16
4.1. Alumina Seramikler.....	17

4.2. ZrO ₂ -MgO Seramikler.....	20
4.3. Spinel (MgO-Al ₂ O ₃) Seramik Kaplamalar.....	22
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	28
5.1. Altlık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu, Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.....	28
5.2. Altlık malzemenin yüzey hazırlama işlemleri.....	29
5.3. Kaplama Malzemelerinin Kimyasal Kompozisyonu ve Özellikleri.....	30
5.4. Kaplama Ünitesi ve Kaplama Parametreleri.....	31
5.5. Kaplamaların Karakterizasyon Yöntemleri ve Ekipmanları.....	34
5.5.1. Metalografik numune hazırlama.....	34
5.6. Kaplamaların mikro sertlik ölçümleri.....	36
5.7. Elektron mikroskobu incelemeleri (SEM-EDX).....	36
5.8. X ışınları difraksiyonu ile faz analizi (XRD).....	37
5.9. Kaplamaların Eroziyon Aşınma Testi.....	37
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	40
BÖLÜM 7.	
GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	72
KAYNAKÇA.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	84

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

APS	: Atmosferik plazma sprey
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
CSZ	: Serya ile stabilize zirkonya
ÇBK	: Çevresel bariyer kaplamalar
HV	: Vickers mikrosertlik
HVOF	: Yüksek hızda oksijen yakıt sprey
m/sn	: metre/saniye
MPa	: Mega paskal
PECVD	: Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
Ra	: Kaplama yüzey pürüzlülük değeri
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TBK	: Termal bariyer kaplamalar
TGO	: Termal gelişen oksit tabakası
YSZ	: Yitria ile stabilize zirkonya
XRD	: X-ışınları difraksiyonu
W_s	: Özgül aşınma miktarı (mg)
μm	: Mikrometre
Δm	: Püskürtülen Partikül miktarı(mg)
ΔV	: Hacimsel kütle kaybı(mg)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Eroziyon parçacık-yüzey etkileşim türleri.....	4
Şekil 2.2. Eroziyon aşınmaya maruz kalmış parçalar	4
Şekil 2.3. Çarpma açısının eroziyon hızına etkisi ..	6
Şekil 2.4. Türbin kanatçıklarında yüksek sıcaklıklarda katı partikül erozyonu sonucu oluşan hasar	8
Şekil 2.5. Metal erozyonunun şematik görüntüsü a ve b metal erozyonu c. oksit erozyonu	9
Şekil 2.6. Oksidasyon sonrası oluşan erozyon şematik görüntüsü	9
Şekil 3.1. Aşınmaya dirençli yüzey işlem ve kaplama uygulamalarının kalınlık seviyeleri.....	12
Şekil 3.2. Termal sprey kaplama tekniği şematik olarak.....	13
Şekil 3.3. Gaz hızı ve sıcaklığına bağlı termal sprey prosesleri.....	14
Şekil 3.4. Plazma sprey kaplama prosesi şematik görüntüsü.....	14
Şekil 3.5. Plazma sprey prosesi ile kaplama uygulaması örnekleri	15
Şekil 3.6. HVOF sprey kaplama prosesi şematik görüntüsü.....	15
Şekil 3.7. HVOF prosesi ile kaplama uygulamalarına örnekler.....	15
Şekil 4.1. Tipik bir plazma sprey yöntemi ile üretilmiş TBK kaplama mikro yapı kesiti.....	17
Şekil 4.2. Sıcaklığın eroziyon hızına etkisi	18
Şekil 4.3. Lameller arası yapışma	18
Şekil 4.4. a. % 13 gözenekliliğe sahip kaplamanın, b.16 saat boyunca 1482 ⁰ C' de yaşlandırma sonrası elektron mikroskobu kırılma yüzey görüntüsü.....	19
Şekil 4.5.16 saat boyunca termal yaşlandırma koşullarında a. Erozyon hızı ve b. Mikro sertlik ölçüm sonuçları	19
Şekil 4.6. Sıcaklık artışına göre erozyon hızı diyagramı	20
Şekil 4.7. Sıcaklığın 5YSZ hacim erozyon hızlarına etkisi	21

Şekil 4.8. a. Plastik deformasyon mekanizması b. 400 ⁰ C gözlenen plastik deformasyon SEM görüntüsü	21
Şekil 4.9. Plazma sprej yöntemi ile üretilmiş farklı seramik kaplamaların mikro yapısında porozite oranına bağlı olarak erozif aşınma hızının değişimi	24
Şekil 4.10. Yüksek sıcaklığa dirençli plazma sprej ile üretilmiş termal bariyer kaplama türleri a.Standard düşük poroziteli b. Yüksek poroziteli c. YSZ+YAG d. YSZ+YSZ Gd ₂ Zr ₂ O ₇	24
Şekil 4.11. Farklı termal bariyer kaplamaları 1000 ⁰ C 150-400 mesh partikül boyutlarında düşük ve yüksek açılarda erozif aşınma test sonuçları.....	25
Şekil 4.12. Erozif aşınma sonrası kesit mikro yapı görüntüleri a. segmente termal bariyer kaplamanın (60m/sn 90 ⁰ 400 mesh) b. YAG esaslı termal bariyer kaplama (60 m/sn 90 ⁰ 150 mesh) c. YAG esaslı termal bariyer kaplama (60 m/sn 90 ⁰ 400 mesh).....	26
Şekil 5.1. Kumlama kabini ve kumlanmış numune görüntüsü	29
Şekil 5.2. a. Alumina (A:Al ₂ O ₃), b.Zirkonat (ZM: MgO-Zr ₂ O ₃) ve c. Spinel (AM: Al ₂ O ₃ -MgO) seramik bağ tabaka kaplamaların üst yüzey makro görüntüleri (kaplama işlemi sonrası).....	33
Şekil 5.3. Yüksek sıcaklık fırını ve numune yerleştirme görüntüsü	33
Şekil 5.4. Hassas malzeme kesme cihazı görüntüsü	34
Şekil 5.5. Numuneyi bakalite alma, zımparalama ve parlatma ünitesi	35
Şekil 5.6. Mikro sertlik ölçümü	36
Şekil 5.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	37
Şekil 5.8. XRD analizi cihazı	37
Şekil 5.9. Numuneler aşınma öncesi ve sonrası ağırlıkları hassas terazide (±0,0001gr) ölçülmüştür	38
Şekil 5.10. Aşınma testi kullanılan kabin ve numune bağlama görüntüsü.....	39
Şekil 5.11. Numunelerin profilometre cihazı ile yüzey tarama anındaki görüntüsü	39
Şekil 6.1. Kaplamaların 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası aşınma oranları karşılaştırması a. Oda sıcaklığı b. Isıl işlem sonrasında	47

Şekil 6.2. Kaplamaların 20sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası aşınma oranları karşılaştırması a. Oda sıcaklığı b. Isıl işlem sonrasında	48
Şekil 6.3. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 45 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve kesit görünüş SEM görüntüleri	49
Şekil 6.4. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 90 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri	50
Şekil 6.5. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın 700 ⁰ C 60 saat ısıl işlem tabi olup 45 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri	51
Şekil 6.6. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın 700 ⁰ C 60 saat ısıl işlem tabi olup 90 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri	52
Şekil 6.7. Alumina esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 45 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüş SEM görüntüleri	53
Şekil 6.8. Alumina esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 90 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri.....	54
Şekil 6.9. Alumina esaslı seramik kaplamanın 700 ⁰ 60 saat ısıl işlem sonrası 45 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri	55
Şekil 6.10. Alumina esaslı seramik kaplamanın 700 ⁰ 60 saat ısıl işlem sonrası 90 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri	56
Şekil 6.11. Spinel esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 45 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüş SEM görüntüleri	57
Şekil 6.12. Spinel esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 90 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri.....	58
Şekil 6.13. Spinel esaslı seramik kaplamanın 700 ⁰ 60 saat ısıl işlem sonrası 45 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri	59

Şekil 6.14. Spinel esaslı seramik kaplamanın 700 ⁰ 60 saat ısı işlem sonrası 90 ⁰ 10sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri	60
Şekil 6.15. Alumina esaslı seramik kaplamanın katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş profilometre görüntüleri	61
Şekil 6.16. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş profilometre görüntüleri	62
Şekil 6.17. Spinel esaslı seramik kaplamanın katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş profilometre görüntüleri	63
Şekil 6.18. Kaplamaların mikro sertlik ölçüm sonuçları	64
Şekil 6.19. Kalın kaplamaların karşılaştırmalı aşınma oranı grafikleri	66
Şekil 6.20. Daha yüksek kalınlıklarda üretilmiş seramik kaplamaların katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüşleri	67
Şekil 6.21. Daha yüksek kalınlıkta üretilmiş spinel esaslı seramik kaplamanın 90 ⁰ katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüş SEM görüntüleri..	69
Şekil 6.22. Daha yüksek kalınlıkta üretilmiş alumina esaslı seramik kaplamanın 90 ⁰ katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüş SEM görüntüleri..	70
Şekil 6.23. Kromoksit esaslı seramik kaplamanın 90 ⁰ katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüş SEM görüntüleri.....	71

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Altlık Malzemesi 321 paslanmaz çeliğın kimyasal kompozisyonu ve özellikleri	28
Tablo 5.2. Kaplama tabakalarının özellikleri	30
Tablo 5.3. Fleksikord alev sprej tabancası parametreleri	31
Tablo 5.4. Kaplamaların Üretiminde Optimize Sprej Parametreleri	32
Tablo 5.5. Numune zımparalama ve parlatma parametreleri	35
Tablo 5.6. Katı partikül erozif aşınma test parametreleri	38
Tablo 6.1. Altlık malzeme (321 paslanmaz çelik) aşınma sonrası yüzey görüntüsü	40
Tablo 6.2. Altlık malzeme (321 paslanmaz çelik) aşınma sonrası kütle kayıp sonuçları	42
Tablo 6.3. Zirkonat esaslı kaplamaların aşınma sonrası görüntüsü	43
Tablo 6.4. Alumina esaslı kaplamaların aşınma sonrası görüntüsü	44
Tablo 6.5. Spinel esaslı kaplamaların aşınma sonrası görüntüsü	45
Tablo 6.6. Kaplamaların aşınma sonrası kütle kayıp sonuçları	46
Tablo 6.7. Kalın kaplamaların aşınma sonrası kütle kayıp sonuçları	65

ÖZET

Anahtar kelimeler: Termal sprej, Fleksi kord alev sprej, Oksit seramikler, Eroziyon aşınma

Termal sprej yöntemi ile üretilen seramik esaslı kaplamalar, başta havacılık ve uzay endüstrisi olmak üzere, otomotiv, tekstil, petrokimya, madencilik gibi birçok endüstride aşınma, korozyon ve yüksek ısıya maruz kalan metalik parçaların korunması amacıyla tercih edilmektedir. Metalik parçaların kullanım ömürlerinin ve performanslarının artırılması amacı ile kullanılan ileri teknolojik kaplamalardır. Bu tez çalışmasında, AISI 321 kalite östenitik paslanmaz çelik altlık malzeme üzerinde, fleksi kord alev sprej tabancası ile farklı kalınlıklarda oksit esaslı kaplamalar magnezyum zirkonat (Zr_2O_3 - MgO - Al_2O_3), spinel (Al_2O_3 - MgO), alümina (Al_2O_3) ve krom oksit (Cr_2O_3) biriktirilmiştir. Isıl işlemin eroziyon aşınma davranışına etkisini karakterize etmek amacıyla kaplamalara 700°C de 60 saat ısı işlem uygulanmıştır. Oda sıcaklığında ve ısı işlem sonrası bu kaplamalar ASTM G76 standartlarında katı partikül aşınma testlerine tabi tutulmuş ve aşınma kayıpları ve hızları karşılaştırılmıştır. Aşınma testleri sonrası kaplamaların üst yüzey aşınma izi mikroskopik görüntüleri, 3B yüzey profilleri, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Bununla birlikte kaplamaların ısı işlem öncesi ve sonrası sertlikleri de karşılaştırılmıştır. Aşındırıcı partikül çarpma açısı ve süresinin artışının aşınma kaybı üzerinde etkin olduğu gözlenmiştir. Kaplamaların gevrek davranışı, kaplama yapısında süreksizlikler ve kaplama kalınlıkları aşınma mekanizmasında etkin rol oynamıştır. Isıl işlemin etkisiyle kaplamalarda sertlik artışı ve porozite azalması nedeniyle aşınma performansını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda kromoksit kaplamalar alümina, spinel ve zirkonat esaslı kaplamalara göre sırasıyla daha üstün aşınma direnci elde edilmiştir.

INVESTIGATION OF SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIOR OF OXIDE BASED COATINGS PRODUCED BY THERMAL SPRAY METHOD

SUMMARY

Keywords: Thermal spray, Flexicord flame spray, Oxide ceramics, Erosive wear

Ceramic based coatings produced by thermal spraying method are preferred for aerospace industry, automotive, textile, petrochemical, mining and many other industries for the protection of metallic parts exposed to wear, corrosion and high temperature effects. They are advanced technological coatings that are used with the aim of improving the service life and performance of metallic parts. In this thesis, oxide-based coatings (magnesium zirconate (Zr_2O_3 -MgO- Al_2O_3), spinel (Al_2O_3 -MgO), alumina (Al_2O_3) and chromium oxide (Cr_2O_3)) of different thicknesses were deposited on AISI 321 austenitic stainless steel substrate material with flexible cord flame spray gun. In order to characterize the effect of heat treatment on the erosive wear behavior, the coating was heat treated at 700°C for 60 hours. Before and after the heat treatment, these coatings were subjected to solid particle erosion tests in accordance with ASTM G76 standards and wear losses and wear ratios were compared. After the wear tests, the top surface wear track microscopic images of the coatings, 3D surface profiles, surface roughness and wear mechanisms were investigated. The microhardnesses of the coatings before and after the heat treatment were also compared. It has been observed that the increase in the angle and duration of the eroder solid particle impacts on the wear loss. The brittle behavior of the coatings, the discontinuities in the coating structure and coating thicknesses played an effective role in the mechanism of wear. It has been found that the effect of heat treatment improves the wear resistance performance due to increased hardness and reduced porosity in the coatings. In this direction chromium oxide coatings have superior resistance to erosive wear compared to alumina, spinel and zirconate based coatings respectively.

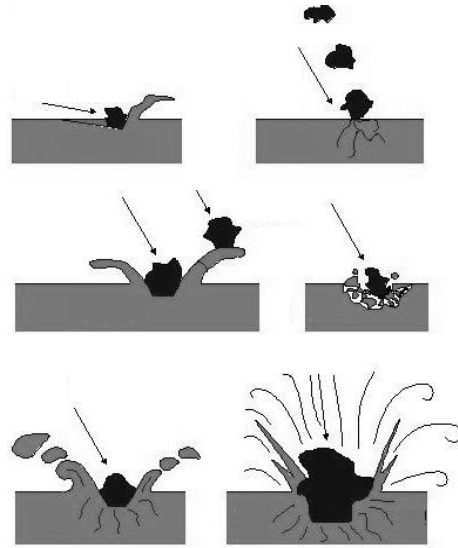
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Termal sprey kaplama teknolojisi ile üretilen termal bariyer kaplamalar, havacılık ve uzay endüstrisinden otomotiv endüstrisine kadar bir çok uygulamada özellikle türbin parçalarında, piston ve manifold gibi ısı tesirine maruz kalan parçalarda kullanım alanı mevcuttur. Yüksek sıcaklıklarda termal ve mekanik gerilmeler yanında korozyon ve erozyon etkiler sonucunda iş parçalarında önemli oranda yüzey kaybı, kalınlık kaybı ve dayanım kaybı söz konusudur. Bu tür hasarları minimize edebilmek amacıyla ısı etkilerine dirençli alaşımlar ve üzerinde koruyucu yüksek performanslı yüzey kaplamalara ihtiyaç sürekli artmaktadır. Çalışma sıcaklık ve sürelerine bağlı olarak çoğunlukla ısıya dirençli alaşımların üzerine seramik esaslı kaplamalar tercih edilmektedir. Bu bağlamda en bilinen yüksek sıcaklığa dirençli kaplamalar zirkonya esaslı termal bariyer kaplamalardır. Saf zirkonyanın faz dönüşümü nedeniyle hacimsel değişimleri yüksek sıcaklıklarda stabilizasyonu zorunlu kılmaktadır. CaO, MgO, Y₂O₃, CeO₂ gibi oksitler ile stabilize zirkonya esaslı termal bariyer kaplamaların kırılma toklukları, termal şok dirençleri ve termal çevrim ömürleri artırılmaktadır. Stabilize zirkonya esaslı kaplamaların dışında ise müllit, spinel ve alümina esaslı kaplamalarda yüksek sıcaklık ortamlarında oksidasyon direnci, erozyon aşınma direnci sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Çoğunlukla plazma sprey tekniği kullanılarak üretilen bu kaplamaların ergime noktası oldukça yüksek olup, plazma enerjisi ile kolaylıkla eritilerek yüksek hızlarda altlık yüzeyine püskürtülebilmektedir. Plazma sprey prosesi arzulanan niteliklerde kaplama mikroyapısı ve özelliklerin elde edilmesinde avantajları olmasına karşın proses maliyetleri ve yatırım maliyetleri açısından kullanımı sınırlayıcı bir etkidir. Termal sprey prosesleri arasında alev sprey prosesi ile de oksit esaslı seramikler uygun yakıt türü ve yakıt/oksijen karışım oranı ile püskürtülebilmektedir. Son yıllarda geliştirilen fleksi kord tipi polimerik bir kılıf içerisinde seramik partiküller içeren kord malzemeler alev sprey prosesi ile plazma sprey proses kalitesine ve yapışma

dayanıma yakın özelliklerde kaplama eldesine imkan vermektedir. Bu tez çalışmasında seramik dolgulu fleksi kord ile üretilen termal sprej kaplamaların katı partikül erozif aşınma davranışları incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda çalışma koşullarına uygun, oksit seramik esaslı kaplamaların yüksek hızlı fleksi kord alev sprej prosesi ile üretimi, ısı işlem şartlarına maruz kalan kaplamaların mikroyapısal özellikleri ve aşınma performansları karşılaştırmalı olarak karakterize edilmiştir. Tezin ikinci bölümü katı partikül erozif aşınma davranışı ve yüksek sıcaklıklarda erozif aşınma davranışına etki eden faktörler irdelenmektedir. Üçüncü, dördüncü bölümünde yüksek sıcaklık etkilerine karşı koruyucu yüzey kaplamalar ve termal bariyer esaslı kaplamalar üzerinde literatür araştırmaları sunulmuştur. Beşinci bölümde ise termal sprej teknikleri ile üretilen farklı termal bariyer esaslı kaplamalarda erozif aşınma davranışları üzerinde yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir. Sonrasında zirkonya, spinel, alümina ve kromya esaslı termal sprej kaplamaların deneysel hazırlık süreci ve test aşamaları detaylı bir şekilde sunulmuştur. En son bölümde ise deneysel sonuçlar tartışılarak karşılaştırmalı sonuçlar irdelenmiştir [1,2].

BÖLÜM 2. KATI PARTİKÜL EROZİF AŞINMA DAVRANIŞI

Katı partikül erozyonu; sıvı veya gaz bir akışkan içerisinde sert ve katı partiküllerin (boyut aralığı: 5-500 μ m) yüksek hızlarda malzeme yüzeyine yüksek hızlarda (10-100m/sn) çarpması sonucu yüzeyden malzeme kopartarak malzeme kaybına, yüzey çatlaklarına, yüzey deformasyonuna ve yüzey morfolojisine olumsuz şekilde etki eden erozif bir aşınma türüdür. Özellikle bir akış halindeki katı partiküllerle temas eden hareketli iş parçası yüzeylerinde mekanik etkileşimler sonucunda sıkça karşılaşılan önemli bir aşınma mekanizmasıdır. Aşınmanın oluşum mekanizması itibarıyla abrazif, kaymalı aşınma ve kavitasyon aşınmasından farklıdır. Bir akışkan içerisindeki farklı kompozisyonlarda, farklı boyutlardaki ve şekillerdeki katı sert partiküllerin yüzeye olan mesafesine, katı partikül akış yoğunluğuna, çarpma hızına ve çarpma açısına bağlı olarak malzeme yüzeyinde önemli ölçüde ağırlık, kesit ve yüzey kaybına neden olmaktadır. Sert partiküllerin yüzey ile etkileşimi çok çeşitli şekillerde hasar oluşumuna neden olabilmektedir. Bu hasarlar malzeme özelliklerine ve erozif aşınma şartlarına ve ortamına bağlı olarak: yüzeyde deformasyon, yüzey ve yüzey altı çatlak oluşumu, çapak oluşturma, kırma, çatlatma, yüzeyi bozma, yüzeye saplanma, yüzeyden parçacık sökme şeklinde gerçekleşebilmektedir (Şekil 2.1.) [3,4].



Şekil 2.1. Eroziyon parçacık-yüzey etkileşim türleri

Eroziyon aşınmanın ileri safhalarında ise yüzeyin önemli oranda bozunmasına ve kesitin incilmesi ile birlikte artan gerilmeler sonucunda mekanik dayanımın kaybolmasına neden olarak önlenmesi oldukça zor hasar oluşumlarına yol açmaktadır. Örneğin bir pompa, valf, bir boru hattı, bir nozul, bir kompresör, bir boiler, bir rotor veya gaz türbin kanatçıkları bu hasarın en çok görüldüğü endüstriyel uygulama alanlarıdır (Şekil 2.2.). İş parçasının çalışma ortamı özellikleri, koroziyon etkileri yanında termal ve mekanik gerilmeler aşınma hızını artırmaktadır. Çalışma sıcaklıklarının değişimi veya ısı işleme koşulları eroziyon aşınma davranışını etkileyen diğer önemli faktörlerdir [3,4].



Şekil 2.2. Eroziyon aşınmaya maruz kalmış parçalar

Katı partikül eroziyon aşınma mekanizmalarını çalışma sıcaklığına bağlı olarak iki gruba ayırmaktayız: 1. oda sıcaklığı eroziyon aşınma ve 2. yüksek sıcaklık eroziyon aşınma şeklindedir.

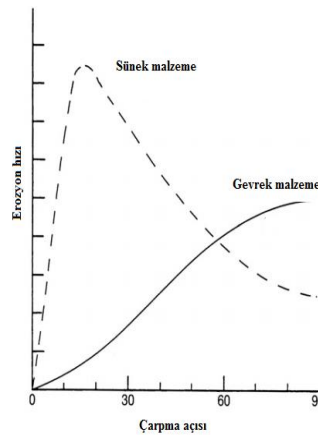
2.1. Oda Sıcaklığı Eroziyon Aşınma

Oda sıcaklığı eroziyon aşınma deneylerinde aşınma hızını birden çok faktör etkileyebilmektedir. Katı partikülün yüzeye çarpma hızı, eroziyon aşınma hızı ($E=E_0V^p$; V: çarpma hızı, p: sabit bir değer) üzerinde en önemli faktördür. Hutchinston'un araştırmalarında p:2.4, diğer araştırmacılar da 2.55 olarak hesaplanmıştır. Seramik gibi gevrek malzemeler için bu değer 3 polimer kompozitler için ise 5 seviyesindedir. Bu değer çarpma açısından ve partikül boyutundan ve şeklinden etkilenmektedir. Çarpma hızının ardından çarpma açısı da oldukça önemli bir faktördür. Sünek malzemelerde özellikle metallerde 15° - 30° arasında eroziyon aşınma en yüksek seviyedeysen seramik, cam gibi kırılabilir malzemelerde ise bu değer açının artışıyla 90° 'de maksimum seviyelerdedir. Üçüncü bir faktör olarak parçacık boyutları da göz önüne alınması gereken bir diğer önemli parametredir. Goodwin ve arkadaşlarının çalışmalarında partikül boyutunun artışının aşınma hızını artırdığı tespit edilmiştir. Partikül boyutunun artışına veya bir eşik seviyeyi aşmasına bağlı olarak bir takım tartışmalar hala devam etmekte ve araştırmalar sürdürülmektedir. Dördüncü önemli bir faktör olarak partikül şekli de birçok araştırmacının ilgisini çeken önemli parametreler arasında olmuştur. Metalik yüzeylerde yapılan çalışmalarda açılı keskin köşeli partiküllerin yuvarlak yüzeyli partiküllere göre daha fazla aşındırıcı etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında partikül türünün de (eroder) erozyon hızı üzerinde önemli farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir. Partikül türüne bağlı olarak değişen sertlikler Wellinger ve arkadaşlarının ilgisini çekmiştir. Partikül sertliği ile hedef yüzey sertliği arası fark çok belirgin olmadığında eroziyon aşınma hızının düştüğü, buna karşın daha kırılabilir partiküllerin daha fazla eroziyon aşınmaya neden olduğu izlenimi söz konusudur. Akış yoğunluğu metalik malzeme yüzeyinde ikincil seviyelerde bir etkiye sahiptir. Akış yoğunluğunu artması partiküller arasında geri tepmelere ve saçılmalara yol açmaktadır, bu durum eroziyon aşınma hızını düşürmektedir. Oda sıcaklığı eroziyon aşınmaya karşı mücadele etmek amacıyla metalik malzemeler için mukavemet artırıcı birçok yöntem incelenmiştir. Bunlar arasında alaşımlama ile mukavemet artırma, alaşımlarda tane inceltme ile tokluk artırma, soğuk deformasyon sertleşmesi, martenzitik dönüşüm, çökelti sertleşmesi bunlardan birkaçıdır. Alaşımlama türü, ikincil sert faz oranı, inter metalik türüne, ısı

işlem türüne ve deformasyon oranına bağlı olarak erozif aşınma hızının değiştiği gözlenmiştir [5].

Erozif aşınmaya maruz kalan metalik malzeme yüzeyinin direnci aşınma hızını etkilemektedir. Sert veya yumuşak yüzeylerdeki aşınma hızı birbirinden farklılık göstermektedir:

- a. Sert malzemelerde erozif aşınma: Örneğin çok sert bir yüzeyin (kırılgan) malzeme içinde aşınma katı partiküller etkisi ile yüzeyde derin çatlak ve kırılma oluşumu söz konusuysen yumuşak bir yüzeyde ise katı partiküller mikro ölçekte yüzeyde kesik izleri, partikül batması ve düşük çevrimli yorulma hasarına yol açmaktadır. Katı partikülün boyutu, hızı, yüzeye çapma açısı, yüzeye ulaşan partikül yoğunluğu ve etki süresi yanında partikülün kompozisyonu aşınmada etkili faktörler arasındadır.
- b. Sünek malzemelerde erozif aşınma: Sünek malzemelerde erozif aşındırıcı düşük açılarda yüzeye ulaşması durumunda aşınma hızı hızla artarken yüzeye dik açılarda aşınma hızı düşmektedir. Sünek malzemelerdeki erozyon davranışı çoğunlukla plastik deformasyon sonucu yüzey bozulması ile sonuçlanır. Buna karşın gevrek malzemelerde ise bu durum tam tersi şekilde gerçekleşmektedir. Gevrek malzemelerde ise plastik deformasyon daha azdır. Düşük açılarda aşınma hızı düşük 90⁰'de en yüksek aşınma hızı gözlenmektedir [5].



Şekil 2.3. Çarpma açısının erozif aşınma hızına etkisi [5].

Erozyon hızı üzerinde en etkin faktör partikül hızıdır. Partikül hızının artması erozif aşınma miktarını da artırmaktadır. Eğer partikül çarpma hızları düşük ise yeterli plastik deformasyon oluşturamayacağı için yüzeyde zamanla yorulma çatlak oluşumuna yol açacaktır. Artan hızlarda yüzeye daha fazla darbe etkisi artacağından tekrarlı darbeler yüzey ve hemen alt bölgelerinde derin çatlak oluşumlarını artıracak, yüzeyde olası kısmi ergime sonucu yüzey direncinin azalması ile hızla gelişen çatlaklar sonucunda da kırılmalara yol açması söz konusudur. Bu durum erozif aşınma hızının artışına etki etmektedir. Sertliği düşük olan yüzeylerde bu etki daha belirgin bir şekilde vuku bulurken, yüksek sertlikteki yüzeylerde nispeten erozif aşınma hızı daha düşüktür [5].

2.2. Yüksek Sıcaklık Eroziyon Aşınma

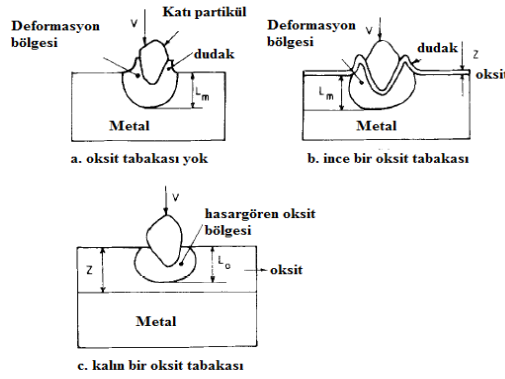
Altlık malzemenin yüzey özellikleri ve çalışma sıcaklığı erozif aşınmayı etkileyen önemli etkenler arasındadır. Akışkan bir ortamda hareketli partiküller belirli bir moment, kinetik enerji ile yüzeye ulaşır ve yüzeye çarpma anı itibaren yüzey ile etkileşime girerek değişken bir termal/mekanik gerilme oluşumuna neden olup yüzey profilini değiştirir, yüzeyi deforme edebilir, kısmi ergime ve yumuşamaya yol açabilir, yüzey morfolojisini değiştirebilir. Yüzeyde çatlak oluşumu sonucu ilerleyen çatlak hızı ile birlikte kırılmalara yol açabilir. Altlığın sıcaklığın artması veya yüksek sıcaklık ortamında çalışılması halinde altlığın yüzey direncine (sertlik) ve kimyasal direncine (oksidasyon) bağlı olarak aşınma hızı değişkenlik gösterir. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında türbin sistemlerinde (Şekil 2.4.), termik santrallerde, yüksek basınçlı kazan sistemlerinde termal etkiler ile birlikte erozif etkiler sistemin çalışma verimini, ömrünü olumsuz etkilemektedir. Eroziyon aşınma nedenli hasarlar yüksek bakım ve tamir maliyetleri ve yenileme maliyetlerine yol açabilmektedir bu nedenle çalışma koşulları kontrol altına alınmadığı takdirde erozif aşınmaya maruz kalan yüzeyin direncini arttırmak ve yüzeyi korumak amacıyla çeşitli yüzey işlemleri ve kaplama teknolojileri uygulanmasını zorunlu kılmaktadır [6].



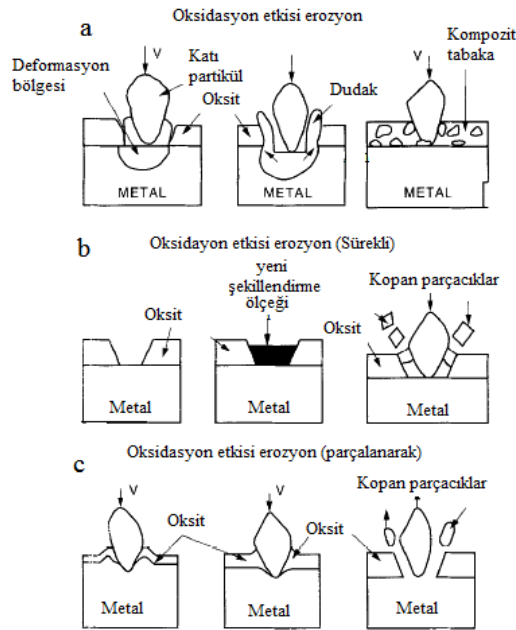
Şekil 2.4. Türbin kanatçıklarında yüksek sıcaklıklarda katı partikül erozyonu sonucu oluşan hasar

Sıcaklık artışının veya ısı işlem koşullarının erozif aşınma davranışı oda sıcaklığı aşınma dayanımından birçok açıdan farklılıklar göstermektedir. Özellikle metalik alaşımlarda oksidasyon, tane irileşmesi, faz dönüşümleri, difüzyonel etkiler ve dayanım azalması yanında seramik esaslı malzemelerde sinterleşme etkisi ile elastik modül artışı gibi faktörler gözönünde tutulmalıdır. Sıcaklığın erozif aşınmaya etkisini araştırmacılar 3 grupta özetlemektedirler. İlk grup; sıcaklığa bağlı olarak erozif aşınmanın başlangıçta düşük veya azalan bir hızda, sonrasında ise artan sıcaklıkla hızlanması durumudur. İkinci grup; kritik bir sıcaklığa kadar sıcaklığın etkisi önemsizdir. Yine artan sıcaklıkla erozif aşınma hızı yükselmektedir. Üçüncü grup; artan sıcaklık ile erozyon hızının doğrudan artışıdır. Yüksek sıcaklıklarda parçacıkların çarpma açısının etkisiyle erozif aşınma hızı oda sıcaklığındakinden farklı bir davranış sergileyebilmektedir. Bunun yanında başlangıçta artan sıcaklıkla erozif aşınma hızla artarken belirli bir süre sonra kimyasal oksidasyon mekanizması etkisi erozif aşınmayı azaltabilmektedir. Sıcaklığın etkisi p katsayısını da $(0,9-2,88)$ değiştirmektedir. Artan sıcaklıkla p katsayısı düşmektedir. Yüksek sıcaklık koşullarında bazı çalışmalarda partikül boyutunun artması erozif aşınmayı artırmaktayken bazılarında ise bağımsızdır. Erozyon oksidasyon etkileşimi yüksek sıcaklıklarda erozyon davranışını belirlemektedir. Bu kapsamda 6 farklı yaklaşım söz konusudur: Natesan ve Liu araştırmalarında partikül kinetik enerjisi düşük olduğunda erozyon davranışı gevrek modda, kinetik enerji yüksek olması halinde ise erozyon davranışı sünek modda ilerlemektedir. Rishel ve Chen gibi araştırmacılar ise oksidasyonun etkisine bağlı olarak artan oksit tabaka kalınlığının erozif aşınmanın davranışını değiştirdiğini vurgulamaktadırlar. Sundararajan ise 5 farklı erozyon modu tanımlamıştır: a.metal erozyonu, b.oksit erozyonu, c.oksidasyon etkili erozyon, d.

sürekli oksidasyon kontrollü erozyon, e.düzensiz kesikli oksidasyon nedenli erozyondur. Bu faktörler yüzeyin oksidasyon kabiliyeti, oksit tabakasının gelişim hızı ve kompozisyonu, oksit tabakasının erozif aşınma davranışın bağlı olarak değişmektedir [6].



Şekil 2.5. Metal erozyonunun şematik görüntüsü a ve b metal erozyonu c. oksit erozyonu [6].



Şekil 2.6. Oksidasyon sonrası oluşan erozyon şematik görüntüsü [6].

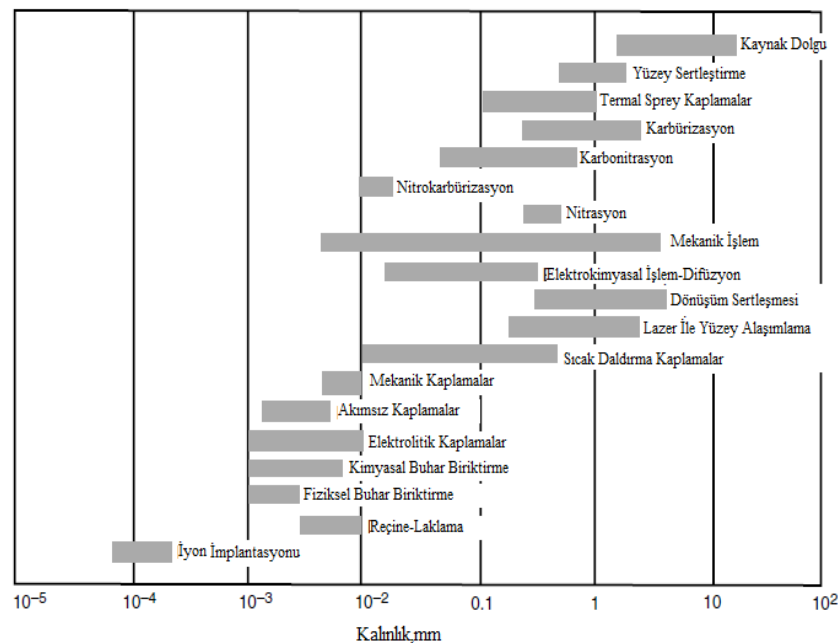
Özetle genel olarak hem oda sıcaklığı hemde yüksek sıcaklık erozif aşınma hasar mekanizmasını etkileyen 3 ana faktör söz konusudur. Bunlar: Katı partikül özellikleri, taşıyıcı atmosfer ve aşınmaya maruz kalan yüzeyin özellikleridir.

- a. Katı partikül özellikleri: partikül türü ve kompozisyonu, partikül geometrisi ve şekli partikül yoğunluğu, partikül sertliği, partikül sıcaklığı, partikül boyut dağılımı.
- b. Taşıyıcı ortam: Akışkanın türü, akışkanın hızı, akışkan sıcaklığı, akışkan içerisindeki partikül yoğunluğu, akışkanın yüzey ile etkileşimi ve süresi, akışkanın korozif özellikleri.
- c. Yüzey özellikleri: Akışım türü, kompozisyonu, yüzey pürüzlülüğü, yüzey direnci, sertliği, deformasyon direnci, yüzey sıcaklığı, yüzey geometrisi [6,7,8,9].

BÖLÜM 3. KORUYUCU KAPLAMA UYGULAMALARI

Katı partikül erozif aşınma direncine karşı altlık malzemenin yüzey direncinin artırılması gerekmektedir. Bunun için uygun alaşımın seçilmesi, alaşıma uygun yüzey sertleştirme ısıl işlemlerinin (indüksiyon, alev, lazer, sementasyon, nitrasyon, borlama ile), yüzeyde basma gerilmeleriyle yüzey direncinin artırılması (bilyalı dövme) veya yüzeyde sert kaplama uygulamaları (vakum altı (PVD, CVD, PECVD) ince film kaplamalar, akımlı, akımsız sert krom/nikel kaplamalar, kaynak sert dolgu, termal sprey) önerilmektedir. Özellikle oda sıcaklığında uygulamalarda erozif aşındırıcının hızına ve yoğunluğuna bağlı olarak aşınma kaybı önemli ölçüde artmaktadır. Sıcaklığın artması, malzemenin çalışma şartlarında yüksek sıcaklık ve atmosferik etkilerine maruz kalması aşınma hızını önemli ölçüde altlık malzemenin sıcaklıktan etkilenme derecesine bağlı olarak değiştirmektedir. Bu durumda yüzeyin ısıl etkilere karşı korunması amacıyla termal bariyer esaslı kaplamalar önerilmektedir. Proses sıcaklığına uygun kaplama türü, kaplama kalınlığı ve kaplama kompozisyonu seçimi gerekmektedir. Aksi takdirde yüksek sıcaklık etkileri aşınma davranışını olumsuz etkileyerek daha hızlı bir erozif aşınmaya neden olabilmektedir. Yüksek sıcaklık koşullarında kaplama yapısının bozulması, faz dönüşümü, kaplamanın yumuşaması veya aniden sertleşmesi, ara yüzey yapışma dayanımının kaybolması, kaplamanın oksidasyon direncinin azalması, ara yüzey oksidasyonu kaplama ömrünü azaltmaktadır. Özellikle türbin sistemleri gibi çok yüksek sıcaklık koşullarında görev yapan hareketli mekanik parçalar, ergime noktasına yakın sıcaklıklarda katı partikül erozyonuna maruz kalabilmektedir. Bu durumda metalik esaslı kaplamalar yerine, seramik esaslı kaplama uygulamaları zorunludur. Kaplama tabakasından hem ısıl etkilere karşı hem de erozif aşınmaya karşı direnç göstermesi istenmektedir. Termal sprey kaplama teknolojisi seramik esaslı kaplamaların üretiminde tercih edilen etkin kaplama yöntemlerinden bir tanesidir. Termal sprey kaplama teknolojisi bir kaplama yöntemleri ailesi olup proseste plazma ark ve alev enerjisi kullanılarak kaplama

üretimine imkan vermektedir. Plazma sprey termal sprey kaplama yöntemleri arasında yüksek enerjili bir proses olup yüksek ergitme kabiliyeti ve yüksek püskürtme hızları nedeni ile seramik esaslı (yüksek ergime noktasına sahip) kaplamaların üretiminde en çok tercih edilen yöntemdir. Toz metalurjik yöntemler ile üretilen seramik esaslı tozlar plazma enerjisi ile ergitilir ve yüksek hızlarda yüzeye püskürtülerek altlık üzerinde hızlı katılaştıran splatlar halinde lamelli, heterojen (poroziteli, mikro çatlaklı vb.) bir kaplama eldesine imkan vermektedir. Özellikle zirkonyum oksit (ZrO_2) esaslı kaplamalar türbin kanatçıkları üzerinde hem termal bariyer amaçlı kullanılmakta hem de katı partikül erozif aşınma davranışına karşı direnç göstermektedir [10,11,12].

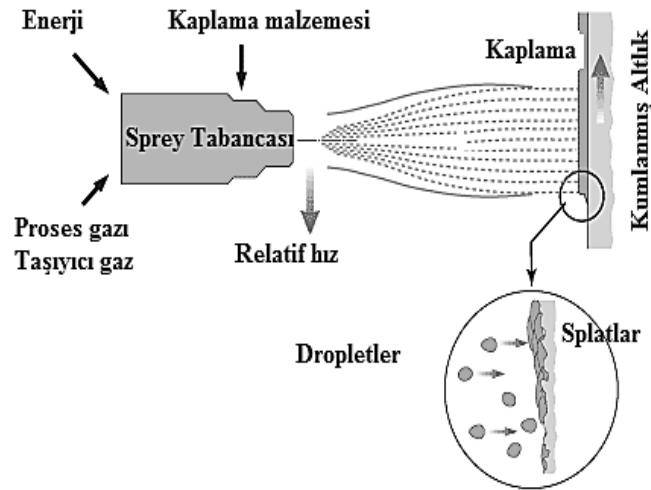


Şekil 3.1. Aşınmaya dirençli yüzey işlem ve kaplama uygulamalarının kalınlık seviyeleri [12].

3.1. Termal Sprey Kaplama Yöntemleri

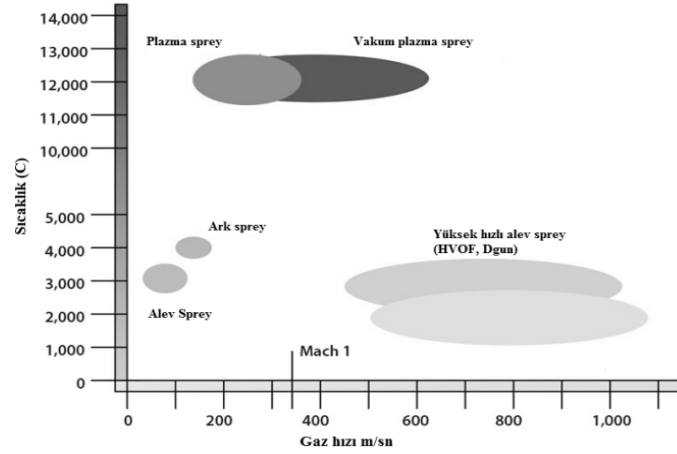
Termal sprey kaplama yöntemleri ailesi farklı ısı girdisine (plazma, ark, alev) bağlı olarak tel/toz/çubuk formundaki kaplama malzemelerinin ergiyik veya yarı ergiyik formda (droplet) püskürtülerek yüzeyde hızlı katılaşması sonucunda splatlar halinde lamelli bir şekilde biriktirilmesi ile elde edilen bir kaplama teknolojisidir. Isı girdisi ve sprey özelliklerine bağlı olarak kaplama özellikleri değişmektedir. Her tür

metalik, seramik ve kompozit malzeme termal sprej yöntemleri ile çok çeşitli altlık yüzeylere kaplanabilmektedir. Püskürtme şartlarına bağlı olarak kaplama dayanımı ve özellikleri değişmektedir. En bilinen termal sprej kaplama yöntemleri: Plazma sprej, ark sprej ve alev sprej yöntemleri ile olup, hızlı gelişen ve yaygınlaşan kaplama sektöründe aşınma, korozyon, termal bariyer amaçlı birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir [13].



Şekil 3.2. Termal sprej kaplama tekniği şematik görünümü

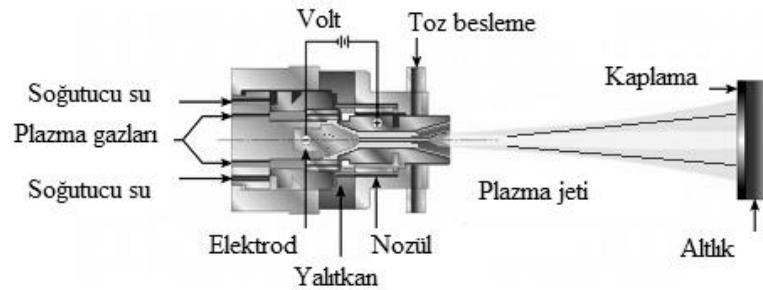
Kaplama işlemi esnasında kaplanacak malzemenin ergitilmesi ve ivmelendirilmesi esasına bağlı termal ve kinetik enerjiyi oluşturan sprej tabancaları çok çeşitlidir. Sprej tabancasının püskürtme kabiliyetini etkileyen birçok parametre söz konusu olup bunlar arasında en önemlileri: tabancanın yüzeye olan mesafesi, gaz basıncı, gaz karışım oranları, akım/voltaj bunlardan bir kaçıdır. Bunun yanında altlık yüzey özellikleri kaplama özellikleri etkileyen bir diğer önemli unsurdur. Kaplama malzemesinin atmosferik şartlardan etkilenmesini azaltmak amacıyla kontrollü atmosfer koşullarında (örneğin koruyucu gaz veya vakum altında) kaplama uygulanabilmektedir. Sprej hızı ve sıcaklığa bağlı olarak şekilde kaplamalar sınıflandırılmıştır. Yüksek ergime noktasına sahip seramik esaslı kaplamaların üretiminde plazma sprej etkin bir yöntemdir. Buna karşın kaplama yapısı oldukça heterojendir. Yoğun ve yüksek sertlikte kaplamaların (karbür esaslı) üretiminde ise yüksek hızlı alev sprej yöntemleri (HVOF) tercih edilmektedir [14].



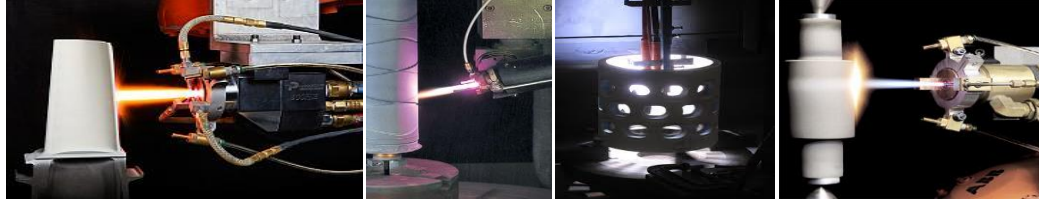
Şekil 3.3. Gaz hızı ve sıcaklığına bağlı termal sprey prosesleri [14].

3.1.1. Plazma sprey kaplamalar

Plazma maddenin 4. hali olup, uygun plazma gazlarının (Ar, H₂, N₂) iyonizasyonu sonucunda ortaya çok yüksek bir ısı (20.000K) açığa çıkmaktadır. Bir plazma tabancası ucunda elde edilen yüksek enerjili bir plazma jetine beslenen toz formundaki kaplama malzemelerinin yüzeye yüksek hızda eriyik halde püskürtülmesi sonucunda seramik esaslı ve yüksek ergimeli malzemelerin yüzeyde kaplama halinde biriktirilmesi sağlanmıştır. 0,2-5mm aralığında kaplama kalınlıklarında önceden yüzeyi pürüzlendirilmiş yüzeylerde oksit esaslı kaplamalar plazma sprey tabancası aracılığıyla biriktirilebilmektedir. Yüksek hızda ve eriyik haldeki dropletler hızlı katılarak yüzeyde iyi bir yapışma sergilemektedir. Plazma sprey prosesi ile Al₂O₃, TiO₂, Cr₂O₃, ZrO₂ gibi oksit seramikler rahatlıkla kaplanabilmektedir [15,16].



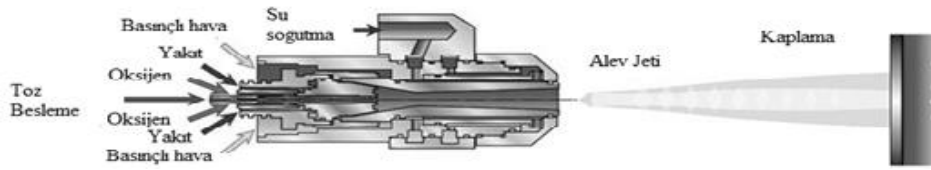
Şekil 3.4. Plazma sprey kaplama prosesi şematik görüntüsü



Şekil 3.5. Plazma sprej prosesi ile kaplama uygulaması örnekleri

3.1.2. HVOF kaplamalar

Sıvı (Kerosen) veya gaz yakıt (H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_3H_6 , C_3H_8) ile oksijenin (O_2) sprej tabancası içerisinde yakılması ve yüksek basınç etkisiyle naval dizayn bir nozül ucunda oluşan alev jetine toz parçacıkların beslenmesi ile yüzeye çok yüksek kinetik enerji ile püskürtülebilmektedir. Yüksek hızda alev sprej prosesi (HVOF) süpersonik hızlarda toz formundaki metalik (CoCr, NiCr, Mo) ve karbür ($WC-CoCr$, TiC, NiCr- Cr_2C_3) esaslı kaplamaların yüzeye püskürtülebildiği yüksek yoğunlukta kaplama eldesine imkan veren bir termal sprej kaplama prosesidir. Günümüzde sert krom kaplamalara alternatif birçok uygulamada öne çıkmış ve havacılık standartlarında yerini almıştır. Plazma sprej prosesine nazaran daha yoğun ve yüksek yapışma dayanımına sahip kaplama üretimine imkan vermektedir. Özellikle aşınma, korozyon direnci gerektiren uygulamalarda yaygın bir kullanım alanına sahiptir [17,18,19,20,21].



Şekil 3.6. HVOF sprej kaplama prosesi şematik görüntüsü

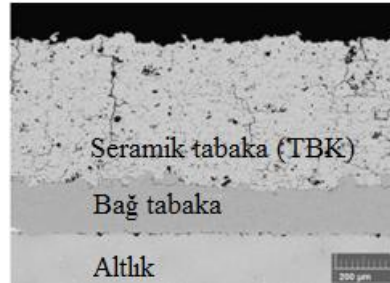


Şekil 3.7. HVOF prosesi ile kaplama uygulamalarına örnekler

BÖLÜM 4. YÜKSEK SICAKLIĞA DİRENÇLİ KAPLAMALAR- DA KATI PARTİKÜL EROZYON DAVRANIŞI

Gaz türbin endüstrisinde gerek uçak motorlarında gerekse enerji santrallerinde türbin verimliliği artırılması, zararlı emisyon gazların azaltılması için türbin giriş sıcaklığının arttırılabilmesi için yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik dayanım sağlayan süper alaşım metalik malzeme yüzeylerine yaygın olarak termal bariyer kaplamalar (TBK) uygulanmaktadır. Sıcak kesit bölgelerinde ısı etkileri azaltmak ve parça ömrünü uzatmak amacıyla uygulanan stabilize zirkonya esaslı bu kaplamalar çoğunlukla termal sprey yöntemleri ile uygulanmaktadır. Kaplama kalınlığı boyunca $1^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$ seviyesinde altlık yüzey sıcaklığı azaltabilmektedir. Bunun anlamı $100\ \mu\text{m}$ ortalama kalınlığında bir kaplama ile 100°C 'lik bir sıcaklık dönüşü sağlanabilmektedir. Termal bariyer kaplamalar genelde iki tabakadan meydana gelmektedir. Altlık yüzeyine ilk olarak $75\text{-}150\ \mu\text{m}$ kalınlık aralığında MCrALY (M,Ni,Co) esaslı bir bağ tabaka uygulanmaktadır ki bu kaplamanın temel amacı daha sonra kaplanacak olan seramik tabaka ilke metalik tabaka ara yüzey yapışma dayanımını artırmak ve termal genleşme uyumsuzluklarını azaltmaktadır. Üst tabaka $200\text{-}600\ \mu\text{m}$ kalınlık aralığındaki tabaka seramik esaslı termal bariyer görevi yapan stabilize zirkonya esaslı kaplamalardır. Stabilizasyon için çoğunlukla Cao, Y_2O_3 , CeO, MgO gibi çok çeşitli oksit esaslı seramikler kullanılmaktadır. Aksi halde saf zirkonya yüksek sıcaklıklarda faz dönüşümüne uğramakta ve hacimce genişleyerek çatlak oluşum riskini artırmaktadır. Kaplama yapısının; çevrimsel termal gerilmelere karşı dayanım sağlaması, yüksek sıcaklıklarda mikroyapısal kararlılık göstermesi, yabancı partiküllerin yüzeye çarpmasına karşı yeterli yüzey direncine sahip olması arzulanmaktadır. Kaplamaların üretiminde termal bariyer kaplamaların önemli avantajları söz konusudur. Çoğunlukla plazma sprey yöntemi ile üretilen termal bariyer kaplamalar heterojen bir mikroyapıya sahiptir. Kaplama kesiti boyunca mikro çatlaklar, farklı boyutlarda poroziteler, splatlar arası boşluklar mevcuttur.

Kaplamanın performansı bu süreksizlerin varlığı ile doğrudan ilişkilidir. Kaplama kompozisyonu, kalınlığı, porozite oranı ve tipi kaplamanın termal yalıtım kabiliyetini belirlemektedir [22,23,24,25,26,27].

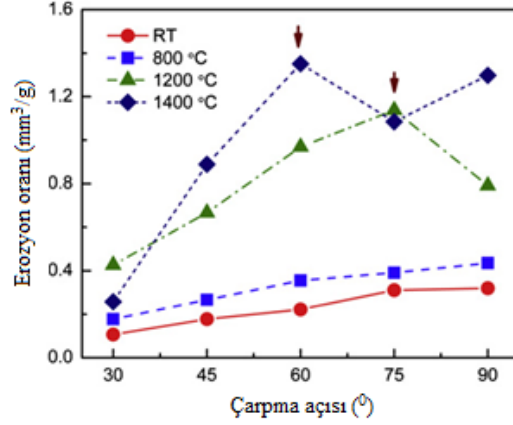


Şekil 4.1. Tipik bir plazma sprey yöntemi ile üretilmiş TBK kaplama mikro yapı kesiti [22].

4.1. Alumina Seramikler

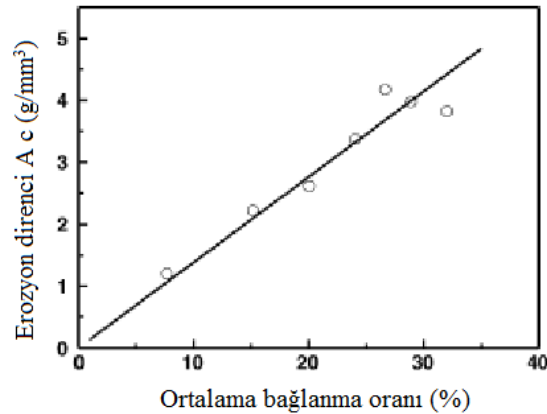
Xiaojun Wang ve arkadaşları (2013); Alümina seramikler en önemli mühendislik seramikleri arasındadır, bir çok uygulamada yüksek sertlikleri, yüksek aşınma dirençleri ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilmektedir. Alümina seramiklerin aşınma davranışları üzerinde çok sayıda çalışma mevcut olup, yüksek sıcaklık erozyon davranışları üzerinde yapılan çalışmalarda sıcaklığın aşınma direncine etkisinin önemli bir faktör olduğu gözlenmektedir. Zhou ve arkadaşlarının çalışmalarında yüksek sıcaklıklarda erozyon hızı oldukça yüksektir. Unutulmamalıdır ki alümina seramikler maksimum 1100°C kadar kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklar da sinterleşme, faz dönüşümü ve oksidasyon etkileri artan sıcaklıklarda alüminanın aşınma davranışını değiştirmektedir. Wang ve arkadaşlarının (2013) yaptıkları çalışmalarda 800°C kadar artan sıcaklıklarda erozif aşınma hızı artış eğiliminde olup 1100°C üzerinde erozyon hızı hızla artmaktadır. Bu erozyon hızının değişiminde alüminanın sinterleşmesi sertliği arttırırken tokluğu düşürmektedir. Katı partiküller yüzeye darbe etkisi oluşturarak aşınma hızının artışına neden olmaktadır. 1100°C üzerinde farklı çarpma açılarında aşınma davranışı farklılık göstermektedir. Özellikle çarpma açısının artışına bağlı olarak gevrek malzemelerde 90° çarpma açısında beklenen maksimum erozif aşınma hızının yerine 1400°C yapılan testlerde 60° çarpma açısında maksimum aşınma hızı göstermektedir. 1100°C üzerinde yapılan testlerde plastik deformasyon gözlenmektedir. Erozyon

aşınma taneler arası klivaj kırılmalar ve tane ayrılmaları sonucunda meydana gelmektedir [28].



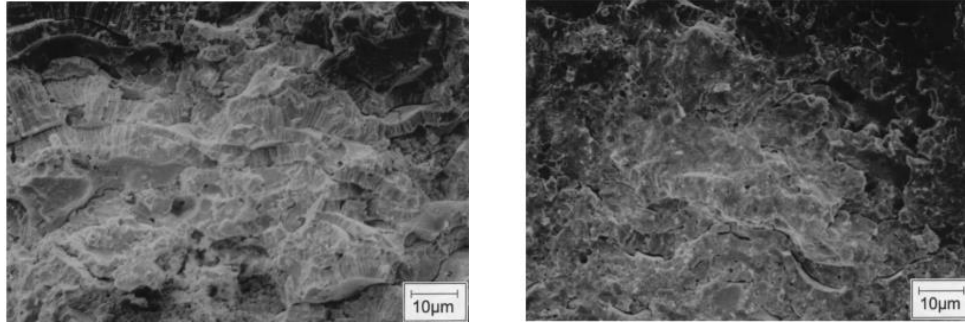
Şekil 4.2. Sıcaklığın erozif aşınma oranına etkisi [28].

Chang-Jiu Li ve arkadaşları (2006); Farklı plazma spray kaplama parametre yöntemleri ile elde edilen kaplamaların mikro yapısının katı partikül erozif aşınma hızına etkisini incelemişlerdir. Özellikle kaplama yapısında lameller arası yapışma özelliklerinin lamel kalınlıklarının erozif aşınma davranışını etkilediği bunun yanında farklı spray mesafelerinde ve farklı plazma güçlerinde püskürtülen alümina esaslı kaplamaların erozif aşınma direnci incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda lamel kalınlıkları ve lameller arası yapışma özelliklerinin malzemenin hem kırılma tokluğunu hem de erozif aşınma direncini kontrol ettiği gözlenmiştir [29].

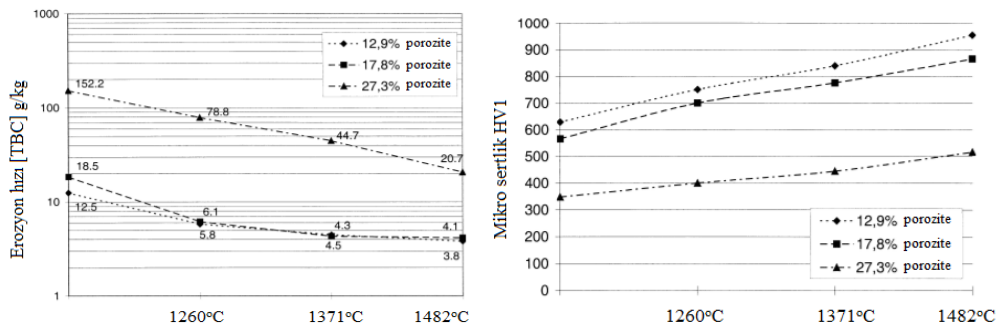


Şekil 4.3. Lameller arası yapışma [29].

Janos ve arkadaşları (1999); Plazma sprey yöntemi ile zirkonya esaslı termal bariyer kaplamalar üzerinde termal yaşlandırma işlemlerinin erozyon direncinin etkisini incelemişlerdir. Farklı parametrelerle farklı porozite oranlarına sahip kaplamalar üzerinde yüksek sıcaklıklarda ısıl yaşlandırma gerçekleştirilerek, ısıl işlem sonrasında aşınma davranışını detaylı bir şekilde incelenmiştir. Genel olarak artan yaşlandırma sıcaklığı etkisi ile erozif aşınma hızı azalan bir eğilim göstermektedir. En yüksek aşınma hızı %27.3 porozite içeren kaplamalarda gözlenmektedir ve %18 altındaki porozite değerine sahip kaplamalarda aşınma hızı %13 poroziteli kaplamalarla benzer şekildedir. Isıl işlem sonrasında yapılan artan ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak sertlikler artış göstermiştir. Porozite oranının termal yaşlandırmaya bağlı olarak azalması sinterleme etkisi ile mukavemet kazandığı görülmektedir [30].



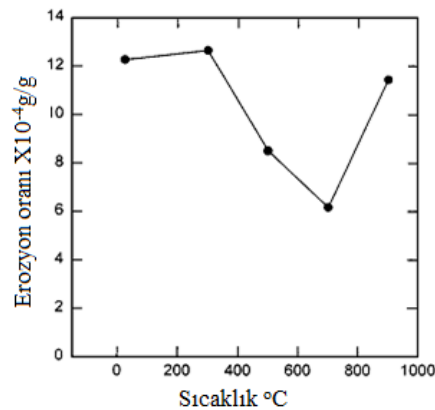
Şekil 4.4. a.% 13 gözenekliliğe sahip kaplamanın, b.16 saat boyunca 1482°C'de yaşlandırma sonrası elektron mikroskobu kırılma yüzey görüntüsü [30].



Şekil 4.5. 16 saat boyunca termal yaşlandırma koşullarında a. Erozyon hızı ve b. Mikro sertlik ölçüm sonuçları [30].

4.2. ZrO₂-MgO Seramikler

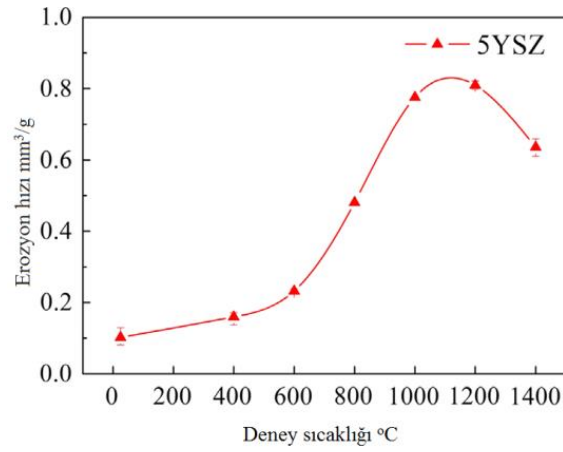
Jong Jip Kim ve arkadaşları (2000); yüksek sıcaklıklarda MgO ile kısmen stabilize edilmiş zirkonyum (Mg-PSZ) yüksek sıcaklıklardaki erozif aşınma davranışını incelemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda bir çok mühendislik seramigi (Al₂O₃, SiC, Si₃N₄) üzerinde erozif aşınma çalışmaları yapılmıştır. Mg-PSZ üzerinde sınırlı çalışma vardır. Bu seramik yüksek kırılma tokluğuna sahiptir ve yüksek sıcaklıklar için oldukça avantajlıdır. Özellikle oda sıcaklığı kırılma tokluğunu (11MPa m^{1/2}) geleneksel seramiklere oranlara oldukça üstündür. Oda sıcaklığından 1000°C kadar 70m/sn hızda sabit çarpma açısı 90° kullanılarak 100 µm ortalama tane boyutuna sahip 50 g SiC esaslı aşındırıcılar ile erozif aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Aşağıda şekilden görüleceği üzere 300° altındaki sıcaklıklarda çok fazla erozyon hızı artışı olmadığı tespit edilmiş olup 300-700°C arasında sıcaklıklarda erozif aşınma hızı çok keskin bir düşüş eğilimi göstermiş ve buna bağlı olarak 700-900°C ye kadar erozif aşınmanın yeniden artış eğilimi saptanmıştır. 700°C aşınma hızı en düşük seviyededir. Kütleli haldeki seramiğin artan sıcaklık ile birlikte 450°C kadar kırılma tokluğu hızlı bir düşüş gösterirken artan sıcaklık ile birlikte bu düşüş hızı azalmaktadır. Seramik malzemedeki sertlikte sıcaklık artışından etkilenmiştir. En yüksek aşınma hızı gevrek malzemelerde beklenildiği üzere 90°de gerçekleşmektedir ve artan çarpma hızı ile birlikte artmaktadır. Oda sıcaklığında aşınma hızı yüksek sıcaklıklardakine nazaran daha fazladır [31].



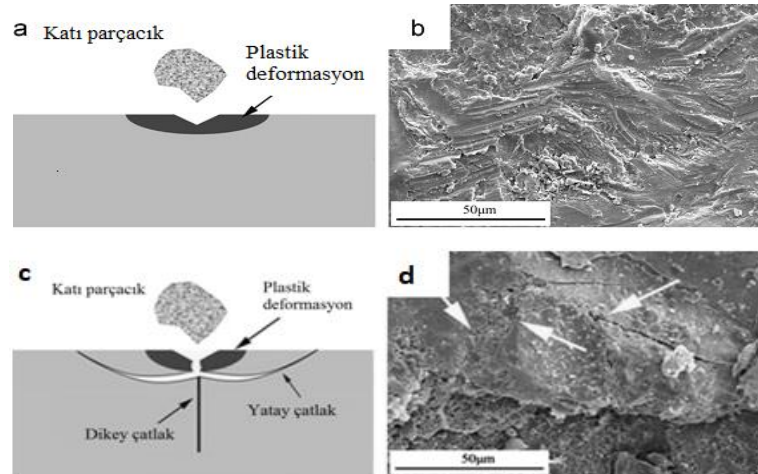
Şekil 4.6. Sıcaklık artışına göre erozyon hızı diyagramı [31].

Minghao Fang(2015); mol %5 Y₂O₃-ZrO₂ esaslı seramiğin erozif aşınma davranışına sıcaklığın etkisi üzerindeki çalışmada sıcaklık artışının erozif aşınma hızını 600°C kadar yavaş bir ivme ile artış , 600°C'den 1200°C'e kadar ise hızlı bir artış

gözlenmektedir. Bu durumda yapılan testlerde belirli bir kritik sıcaklığa kadar erozif aşınmanın arttığı ve sonrasında düştüğü gözlenmektedir. Bu seramik için kırık sıcaklık 1200°C'dir. 1200-1400°C arasında aşınma yeniden düşmüştür. Yapılan incelemelerde şekilden görüleceği üzere erozif aşınma mekanizmasının 400°C'de yüzeyde plastik deformasyon oluşturduğu ve yüzeye hızla çarpan parçacıkların kinetik enerjisinin bu deformasyon etkisi ile absorbe edildiği düşünülmektedir. Partiküller kritik bir hıza eriştiğinde malzemenin yüzey dayanımı direncinin düştüğü dikey ve yatak çatlaklar oluşturarak erozif aşınmaya yol açtığı tespit edilmiştir. Sıcaklığın artması daha fazla çatlağın oluşmasına ve gelişmesine yol açmaktadır [32].



Şekil 4.7. Sıcaklığın 5YSZ hacim erozyon hızlarına etkisi [32].



Şekil 4.8. a. Plastik deformasyon mekanizması b. 400°C gözlenen plastik deformasyon SEM görüntüsü c. Karşılıklı çatlakların şematik mekanizması d. 1400°C yüzeyin karşılıklı çatlak yüzey görüntüsü [32].

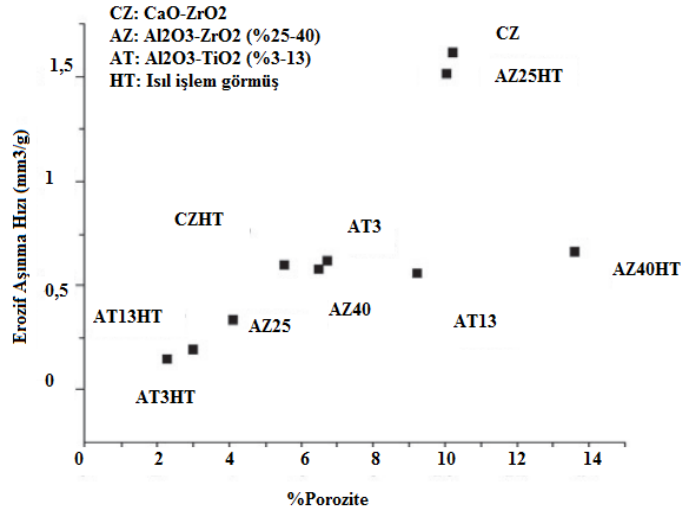
4.3. Spinel (MgO-Al₂O₃) Seramik Kaplamalar

MgO ve Al₂O₃'in karışımının reaksiyonu sonucunda magnezyum aluminat spinel (MgAl₂O₄) oluşmaktadır. MgAl₂O₄'in teorik olarak kompozisyonu ağırlıkça %71.68 Al₂O₃ ve %28.32 MgO içermektedir. Spinel ile MgO'in yoğunluğu ~3.58 g/cm³ olup, ergime sıcaklığı 2135°C'dır. MgO-spinel refrakterler yüksek sıcaklıklarda mukavemet gerektiren alanlarda yüksek ısı şok direnci göstermelerinden dolayı ve ayrıca bazik cüruf, alkali atakları ile ergimiş metal aşındırmalarına karşı gösterdikleri yüksek dirençlerinden dolayı tercih edilmektedirler. MgO-spinel refrakterler, özellikle döner çimento fırınlarında yüksek sıcaklıkların ve şiddetli ısı şokların olduğu bölgede, diğer refrakterlere göre 1,5 ile 2 kat arası daha uzun ömürlüdürler, fakat kırılmaya karşı dirençleri çok düşüktür. Literatür de termal sprej yöntemleriyle üretilmiş spinel (MgO ve Al₂O₃) kaplamaların erozif aşınması üzerinde sınırlı bilgi mevcuttur [33].

Termal bariyer kaplamaların dayanımı ve kullanım ömrü kaplama yöntemi ve kaplama özelliklerinin yanı sıra, çalışma koşullarıyla ilişkili olarak çalışma sıcaklığı, çalışma süresi ve ortam koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak türbin sistemleri gibi yüksek sıcaklık atmosferinde çalışan termal sprej tekniği ile üretilen termal bariyer kaplamalarda meydana gelen hasarlar; termo mekanik yorulma ve termal çevrim nedenli artan gerilmeler etkisi ile, faz dönüşümü sonucu hacimsel değişimler ile, sinterleşme etkisi ile rijitliğin artması ile, ara yüzey oksidasyonu sonucu artan ara yüzey gerilmeleri ile, sıcak korozyon ortamında mikro yapıda stabilizasyonun kaybolması ile artan difüzyonel hareketler ve kimyasal reaksiyonlar ile yapışma özelliklerinin zayıflaması ile, sıcak gaz akışı içerisinde uçuşan katı veya yarı eriyik parçacıkların kaplama yüzeyinde erozif aşınmaya veya darbeye neden olması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu bölümde katı partikül erozif aşınma davranışını etkileyen faktörler ile termal sprej kaplama uygulamalarının erozif aşınma davranışı irdelenmektedir [34].

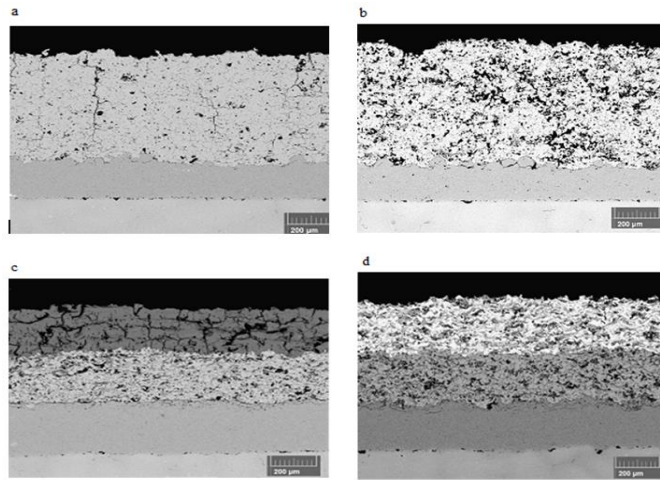
José Roberto Tavares Branco ve arkadaşları (2004); plazma sprej yöntemi ile zirkonya ve alümina/titanya esaslı seramik kaplamaların katı partikül erozyon

davranışına etkisini incelemişlerdir. Farklı seviyelerde porozite içeren, farklı sertlik değerine sahip kaplamalarda erozif aşınma kayıplarını karşılaştırmışlardır. ASTM G76 standardı doğrultusunda 15 mm mesafeden 90° açıyla ortalama tane boyutu 50 µm Alumina sert partiküller eroder olarak yüzeye 70 m/sn hızda 2.2 mm çapta nozül aracılığıyla püskürtülmüştür. Kaplama yapısında porozite oranı artışına bağlı olarak erozif aşınma direnci azaldığı gözlenmiştir. Özellikle ısıtma işlem sonrası kaplama mikro yapısında porozite boyutlarının ve oranının azalması sonucunda erozif aşınma kaybında belirgin bir azalma görülmektedir. Özellikle sert ve gevrek bir yapıya sahip olan kalsiyum oksit ile stabilize zirkonya esaslı kaplamalarda gevrek kırılma modunda bir erozif aşınma şekli tespit edilmiştir. Splatlar arasında ve splatları geçerek ayrılmalar sonucunda dikey ve yatay çatlakların ilerlemesi birleşmesi sonucunda gevrek modda erozif aşınma davranışına yol açmıştır. Bu durum porozite oranına bağlı olarak kaplama yapısında splatlar arası kohezif kuvvetlerin yeterli dayanım sergileyemediğini ortaya koymaktadır. Katı partiküllerin seramik esaslı yüzeye çarpması ile birlikte yüzeyde splatları hasara uğratması erozif aşınmayı artırmıştır, farklı kaplama kompozisyonlarının erozif aşınma davranışları arasında da farklar söz konusudur. Katı partikül çarpma esnasında gerilme konsantrasyon bölgelerinin hasara neden olacağı, kaplama yapısında porozite oranına bağlı deformasyon kabiliyetinin değişmesinin bir etken olabileceği, ve bu durum kaplama kompozisyonunun ve plazma sprey kaplama işlem parametrelerinin önemini ortaya koymaktadır. Bunun yanında kaplamaların ısıtma işlem etkisiyle sinterleme veya faz dönüşümü sonucunda mikro yapısal özelliklerinin veya kristal yapı değişiminin de önemli etkenler arasında olduğu düşünülmektedir [35].



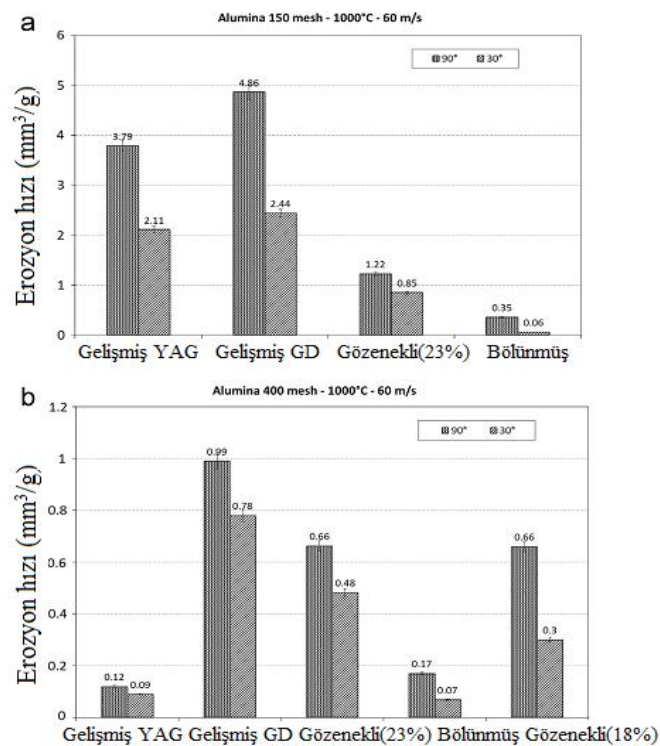
Şekil 4.9. Plazma spray yöntemi ile üretilmiş farklı seramik kaplamaların mikro yapısında porozite oranına bağlı olarak erozif aşınma hızının değişimi [35].

F.Cernuschi ve arkadaşları (2016); nikel esaslı süper alaşım üzerinde MCrAlY esaslı bağ tabakalı standard ve gelişmiş termal bariyer kaplamaların katı partikül erozif aşınma davranışını incelemişlerdir. Deneysel planlarında yüksek poroziteli, segmente çatlak içeren, farklı kompozisyonlarda (YSZ,YSZ+YAG,YSZ+YSZ Gd₂Zr₂O₇) 3 katmanlı kaplamaları düşük ve yüksek sıcaklıklarda, düşük ve yüksek hızlarda, farklı çarpma açılarında test etmişlerdir. Uçak, gaz türbin motorlarında türbin kanatçıkları, yanma odaları 1000°C gibi yüksek sıcaklıklarda yakıt içersindeki, havadaki katı partiküller yanmış küller ile çarpışmakta ve türbin ömrünü olumsuz etkilemektedirler.

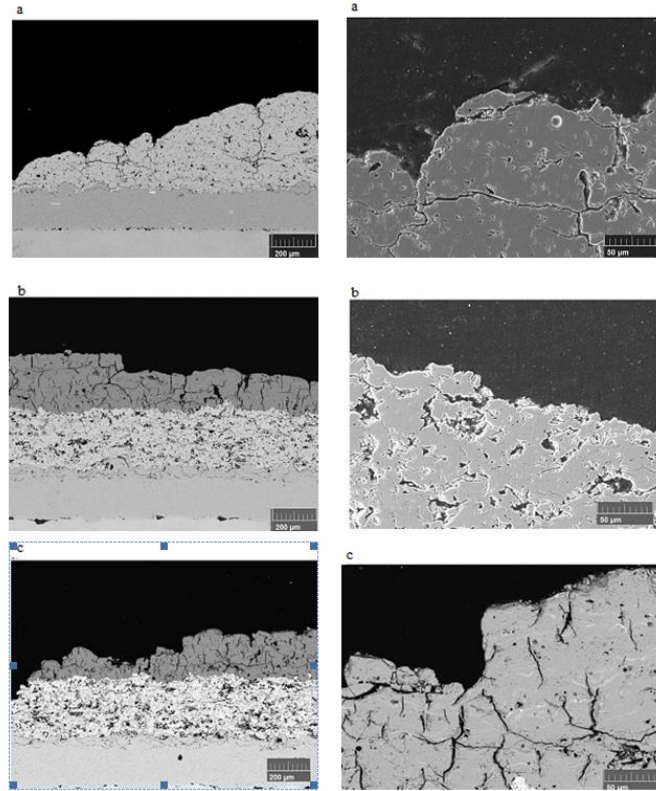


Şekil 4.10. Yüksek sıcaklığa dirençli plazma spray ile üretilmiş termal bariyer kaplama türleri a.Standard düşük poroziteli b. Yüksek poroziteli c. YSZ+YAG d. YSZ+YSZ Gd₂Zr₂O₇ [36].

1000°C yapılan testlerde aşındırıcı partikül boyutunun aşınma hızına etkisi incelendiğinde 150 mesh alümina partiküller kullanılması durumunda poroziteli ve segmente çatlaklı Standard termal bariyer kaplamaların en düşük aşınma kaybı sergilediği gözlenmiştir. 400 mesh alümina partiküller kullanılması durumunda YAG esaslı kaplamalar ile segmente çatlak içeren kaplamalar en düşük aşınma sergilemişlerdir. Düşük parçacık boyutlarında aşınma hızı yüksek partikül boyutlarına göre 2-3 kat daha fazladır. Yapılan incelemelerde 90° açılarda aşınma hızı 30° göre daha fazladır [36].



Şekil 4.11. Farklı termal bariyer kaplamaları 1000°C 150-400 mesh partikül boyutlarında düşük ve yüksek açılarda erozif aşınma test sonuçları [36].



Şekil 4.12. Eroziyon aşınma sonrası kesit mikro yapı görüntüleri a. segmente termal bariyer kaplamanın (60 m/sn 90° 400 mesh) b. YAG esaslı termal bariyer kaplama (60 m/sn 90° 150 mesh) c. YAG esaslı termal bariyer kaplama (60 m/sn 90° 400 mesh) [36].

Yüksek poroziteli, segmente termal bariyer kaplamalarda mikro yapı kesit görüntülerinde altlık yüzeyine paralel çatlaklar oluşarak, dikey çatlaklar ile birleşmekte ve sonrasında splatın ayrılmasına ve splatlar arası delaminasyona yol açmaktadır ve bunun sonucunda aşınma hızlanmaktadır. YAG esaslı termal bariyer kaplamalarda aşındırıcı partikül boyutu aşınma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Partikül hızı ve boyutuna bağlı olarak kaplama yapısında çatlak ve porozitelerin birleşerek bloklar halinde splatların kaplama tabakasından ayrıldığı gözlenmektedir. 150 mesh partikül boyutlarında yapılan testlerde aşınma hızı 400 mesh göre oldukça fazladır, partikül boyutunun artması dikey çatlak oluşumlarını sınırlamış ve çatlak ilerlemesini kısmen engellemiştir ve bunun sonucunda aşınma direnci artmıştır [36].

N. Krishnamurthya ve arkadaşları (2001); kalsiyum oksit ile stabilize zirkonya ve alüminyum oksit esaslı plazma sprey kaplamaların katı partikül eroziyon aşınma davranışını incelemiştir. Deneysel çalışmalarında farklı kompozisyonlarda ve


kalınlıklarda hem bağ tabaka hem de üst seramik tabaka kombinasyonlarını oluşturmuş, ASTM G76 standardına bağlı olarak aşınma davranışını ve aşınma hızlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda kaplama mikro yapısal özelliklerinin (porozite, lamelli yapı, ergimemiş parçacıklar, splatlar arası boşluklar) ve kaplama kalınlıklarının erozif aşınma davranışını etkilediğini tespit etmişlerdir. Özellikle kaplama yapısındaki porozite oranı artışı kaplamada artık gerilme artışına neden olduğu ve bunun sonucunda altlıktan ayrılma, splatlar arası ara yüzey kırılmalarına neden olduğu gözlenmiştir. Üst kaplama tabakasında açık porozite gerek yüzey sertliğinin azalmasına gerek ise aşınmanın hızlanmasına etki etmektedir. Kaplama kompozisyonuna bağlı olarak kaplamaların elastik özelliklerinin de aşınma davranışında etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Termal spreycaplamalarda artan kaplama kalınlığına bağlı olarak iç gerilme artışı kaplama ömrünü sınırlamaktadır. Erozif aşınma testleri 15-90° arasında çarpma açılarında test edilmiştir. Seramik esaslı kaplama tabakaları 90° açılarda en yüksek aşınma kaybı sergilemiştir. Seramik tabakanın aşınması ile birlikte altındaki metalik bağ tabakada aşınma hızı daha azdır. Aşındırıcı partikül hızı erozif aşınma davranışında etkili bir diğer önemli parametredir. Aşınma sonrası her iki kaplama kesit incelemelerinde yatay ve dikey çatlaklar splatlar arası ayrılma gözlenmiştir. Üst yüzey incelemelerinde düşük açılarda erozif aşınma sonrası küçük ve derin yönlendirilmiş yarıklar 90° keskin kraterler ve deformasyon bölgeleri gözlenmektedir. Erozyon hızı başlangıçta oldukça yüksek olup sonrasında kararlı bir rejime girmektedir. Alüminyum oksit esaslı kaplamanın daha fazla poroziteli bir yapıya sahip olması nedeniyle zirkonya esaslı kaplama tabakasına göre daha fazla aşınma kaybı sergilediği tespit edilmiştir. Alümina esaslı kaplamaların sertlikleri zirkonya esaslı göre daha yüksek olmasına karşın aşınma hızının mikro yapısal özelliklere bağlı olarak değiştii görülmektedir. Yapışma testi sonuçlarında zirkonya esaslı kaplamanın mekanik dayanımının daha fazla olduğunu göstermektedir [37,38,39,40].

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Altlık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu, Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Deneysel çalışmada altlık malzeme olarak 321 kalite östenitik paslanmaz çelik alaşımı tercih edilmiştir. Bunun en temel nedeni alaşımın yüksek korozyon, oksidasyon direnci ile birlikte yüksek sıcaklığa maruz kalınan çalışma şartlarında üstün performans göstermesidir. Aşağıda Tablo 1’de 321 paslanmaz çelik malzemesinin kimyasal kompozisyonu ve teknik özellikleri sergilenmektedir. Alaşımın yüksek korozyona dayanımına sahip olmasının sebebi, içeriğindeki Ni, Cr elementlerinin yanı sıra Ti elementini kompozisyonunda bulundurmasıdır. 321 paslanmaz çelik malzemesi genel olarak egzoz sistemleri, kazan kabinleri, kaynaklı basınç kaplar, radyan kızdırıcılar, yağ ve petro kimya rafineleri bağlantı donanımlarında yaygın olarak kullanılmakta ve uçak-uzay endüstrisinde çeşitli iş parçalarında yüksek sıcaklığa direnci (<825°C) nedeniyle tercih edilmektedir.

Tablo 5.1. Altlık Malzemesi 321 paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu ve özellikleri

Altlık malzeme: 321(1.4541) östenitik paslanmaz çelik																															
Kopma Muk.; σ_k	515 ile 700 MPa arası	 <p>Altlık boyutları: 100x100x4mm</p> <table border="1"><thead><tr><th colspan="8">Kimyasal Kompozisyonu ağırlık %</th></tr><tr><th>C</th><th>Mn</th><th>P</th><th>S</th><th>Si</th><th>Cr</th><th>Ni</th><th>Ti</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,08</td><td>2</td><td>0,045</td><td>0,03</td><td>0,75</td><td>19</td><td>12</td><td>(5XC) X0,7</td></tr></tbody></table>						Kimyasal Kompozisyonu ağırlık %								C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Ti	0,08	2	0,045	0,03	0,75	19	12	(5XC) X0,7
Kimyasal Kompozisyonu ağırlık %																															
C	Mn							P	S	Si	Cr	Ni	Ti																		
0,08	2							0,045	0,03	0,75	19	12	(5XC) X0,7																		
Akma Muk.; $\sigma_{0,2}$	Min 205 MPa																														
Sertlik (HRC)	Max 22 HRC																														
Elastisite Mod. (E)	193GPa																														
Yoğunluk; ρ	8,09 (g/cm ³)																														
Termal Genleşme Katsayıları α ; ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$)	19.3 (0 – 649°C) 20.2 (0 – 871°C)																														
Erime sıcaklığı; T_e	1371 – 1399°C																														
Çalışma sıcaklığı, T_ϕ	427-816°C																														

5.2. Altlık malzemenin yüzey hazırlama işlemleri

Kaplama işlemi öncesinde altlık yüzeyleri alkol ile temizlenmiş ve ultrasonik banyoda 10 dk bekletilerek artık kirliliklerden arındırılmıştır. Yüzey temizleme sonrasında kurutma yapılarak yüzeydeki nem uzaklaştırılmıştır. Kaplamaların altlık yüzeyine iyi yapışması için numune yüzeylerine kumlama yapılarak yüzeyde pürüzlülük oluşturulmuştur. Kumlama kabini (Şekil 5.1.) içerisinde kumlama işlemi 3 bar basınç, 75° açı ve 200 mm mesafeden Al_2O_3 (60-80 mesh) ile kumlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kumlama sonrasında yüzeye basınçlı hava püskürtülerek artık parçalar uzaklaştırılmıştır. Kumlanmış altlık yüzeyi aşağıda sergilenmektedir.


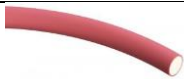





Şekil 5.1. Kumlama kabini ve kumlanmış numune görüntüsü

5.3. Kaplama Malzemelerinin Kimyasal Kompozisyonu ve Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kaplama malzemesi olarak 3 farklı oksit esaslı seramik tercih edilmiştir. Bu seramikler magnezyum zirkonat (ZM: Zr_2O_3 -MgO- Al_2O_3), spinel (AM: Al_2O_3 -MgO), alümina (A: Al_2O_3)'dır. Bu 3 seramik yüksek sıcaklık şartlarında refrakter özellikler taşımaktadır. Yüksek ergime sıcaklığına sahip olmaları yanında oksidasyona karşı direnç göstermektedir. Tablo 5.2.'de kaplama işlemlerinde kullanılan toz malzemelerin kimyasal kompozisyonları ve kaplama sonrası özellikleri sergilenmektedir. Görüleceği üzere toz formundaki farklı boyutlardaki partiküller polimer esaslı bir kılıf içerisinde (Fleksi kord olarak adlandırılmakta) sıkıştırılmıştır. Bu durum kaplama esnasında saçılmaları azaltmakta ve kaplama verimini arttırmaktadır.

Tablo 5.2. Kaplama tabakalarının özellikleri

Kaplama Tabakası	Fleksikord	Kompozisyon (ağ%)	Sertlik (HV)	Pürüzlülük (μm)	Yoğunluk (g/cm^3)
Bağ Tabaka		Ni-Cr % 80, % 20	280±25	1-3	7,25
Seramik Tabaka Zirkonat-ZM		Zr_2O_3 -MgO- Al_2O_3 % 75, % 21, % 4	760±25	10-15	4,3
Seramik Tabaka Spinel-AM		Al_2O_3 -MgO % 70, % 30	730±25	10-20	3,2
Seramik Tabaka Alumina-A		Al_2O_3 -Other % 99,7, % 0,3	700±25	8-12	3,6
Seramik Tabaka Kromoksit-C		Cr_2O_3 % 98	950±25	1-3	5,2


Not: Sprey malzemesi, parametrelerine bağlı sertlik ve yüzey kalitesi değişebilmektedir.

5.4. Kaplama Ünitesi ve Kaplama Parametreleri


Kaplama işlemi termal sprej teknolojisi kapsamında fleksi kord alev sprej tabancası (Saint Gobain, MasterJet) ile gerçekleştirilmiştir (Tablo 5.3.). Geleneksel toz alev sprej yöntemine göre daha yüksek hızlarda ve daha az saçılma gösteren bir kaplama prosesidir. Karşılaştırma yapmak gerekirse kaplama kalitesi açısından plazma sprej ile HVOF prosesi arasında yer alan yeni bir alev sprej kaplama teknolojisidir. Ergitme kabiliyeti açısından plazma spreje, püskürtme kabiliyeti açısından HVOF prosesine benzemektedir. Aşağıda sprej parametreleri ve sprej esnasında bir görüntü sergilenmektedir. Her bir kaplama türü için sprej parametreleri değişmektedir (Tablo 5.4.).

Tablo 5.3. Fleksikord alev sprej tabancası parametreleri

Asetilen	1.4-2 bar	Sprej mesafesi	75-150mm
Oksijen	4-6 bar	Besleme hızı	60-100 cm/min
Hava	4-6 bar		



Sprej tabancası

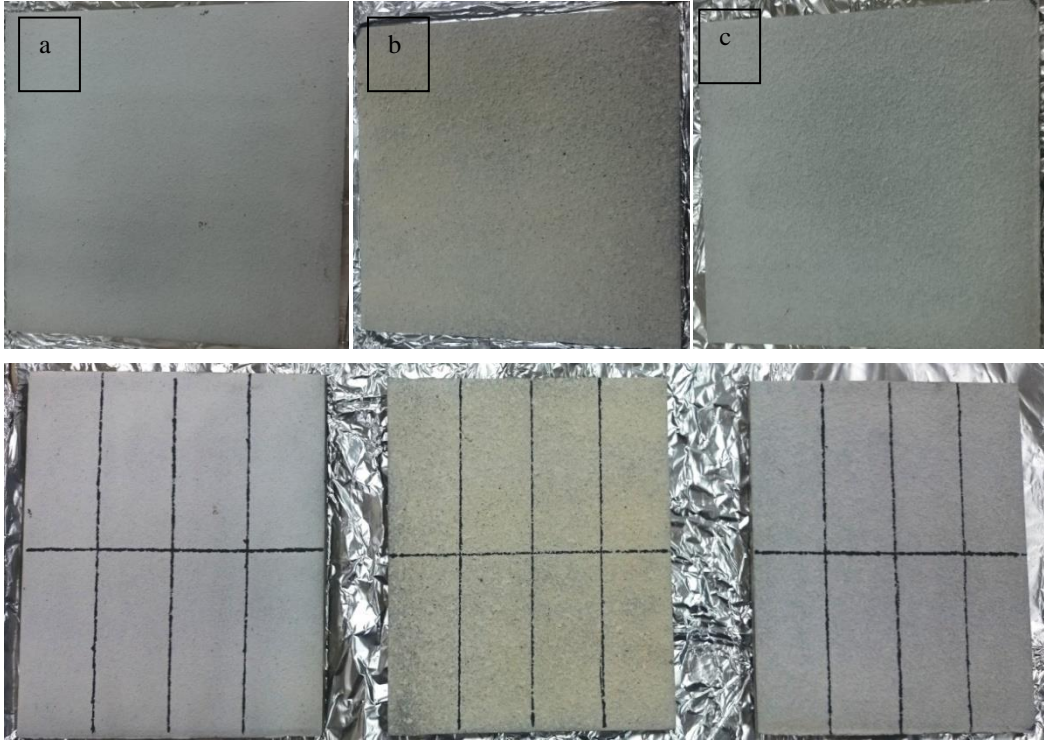


Sprej esnasında bir görüntü

Tablo 5.4. Kaplamaların Üretiminde Optimize Sprey Parametreleri

Sprey Parametreleri						
Kaplama Tabakası	Oksijen basıncı	Gaz basıncı	Hava basıncı	Sprey Mesafe	Besleme Hızı	Birikme Verimi (%)
Bağ Tabaka	4 bar-60 mm	1.2 bar-70 mm	4.5 bar	100-120 mm	100 cm/min	80
Seramik Tabaka; ZM	4 bar-60 mm	1.2 bar-70 mm	4 bar	120 mm	38-45 cm/min	65
Seramik Tabaka; AM	4 bar-60 mm	1.2 bar-75 mm	4-5 bar	110-120 mm	35-45 cm/min	65
Seramik Tabaka; A	4 bar-65 mm	1.2 bar-75 mm	4-4.5 bar	100-130 mm	40-50 cm/min	55
Seramik Tabaka; C	4 bar-60 mm	1.2 bar-75 mm	3,5-4.5 bar	80 mm	40-50 cm/min	25

Aşağıda (Şekil 5.2.)’de kaplama sonrasında üst yüzey makro görüntüleri sergilenmektedir. Alümina esaslı kaplama beyaz renkli, zirkonat esaslı kaplama kirli sarı, spinel esaslı kaplama ise gri tonlarındadır. Yüzey kaliteleri arasında farklar açıkça görülebilmektedir. Deneysel çalışmalar hem oda sıcaklığında hemde yüksek sıcaklıklarda ısıtma işlem sonrasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2. a. Alumina (A: Al_2O_3), b. Zirkonat (ZM: $MgO-Zr_2O_3$) ve c. Spinel (AM: Al_2O_3-MgO) seramik bağ tabaka kaplamaların üst yüzey makro görüntüleri (kaplama işlemi sonrası)

Kaplanmış haldeki test numuneleri ısıtılma fırınında (Nabertherm marka) $700^{\circ}C$ 60 saat atmosferik basınç altında ısıtılma tabii tutulmuştur. Oda sıcaklığına fırın içerisinde soğutulduktan sonra testlere devam edilmiştir. Isıtılma sonrası numune yüzeylerinde renk değişimleri gözlenmiştir. Oksidasyon etkisiyle yüzeyde oksijen konsantrasyonuna bağlı stokiometri değişim göstermiş bunun sonucunda da renk ve ton değişimleri açıkça gözlemlenebilmiştir.



Şekil 5.3. Yüksek sıcaklık fırını ve numune yerleştirme görüntüsü

5.5. Kaplamaların Karakterizasyon Yöntemleri ve Ekipmanları

Üretilen kaplamalara 700°C ve 60 saat açık atmosferde küp tipi fırında ısıl işlem uygulanmış ve oda sıcaklığında ısıl işlem uygulanmamış kaplamalı numuneler ile karşılaştırmalı olarak üst yüzey ve kesit incelemeleri elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Kaplamaların mikro yapı kesit incelemek için metalografik hazırlığı standard numune hazırlama teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Bunlar numune kesme, kalıba alma, kaba ve ince zımparalama (500-800-1200 mesh SiC), kaba ve ince parlatma (9-3 µm elmas) aşamalarıdır. Kaplamaların ısıl işlem sonrası kristal yapısını incelemek amacıyla x ışınları difraksiyon (XRD) yöntemiyle faz analizi gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların sertlik değişimi mikrosertlik ölçümü ile, katı partikül aşınma davranışı ise ASTM G76 standardına bağlı olarak gerçekleştirilmiş, test öncesi ve sonrası yüzey görüntüleri, aşınma izleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

5.5.1. Metalografik numune hazırlama

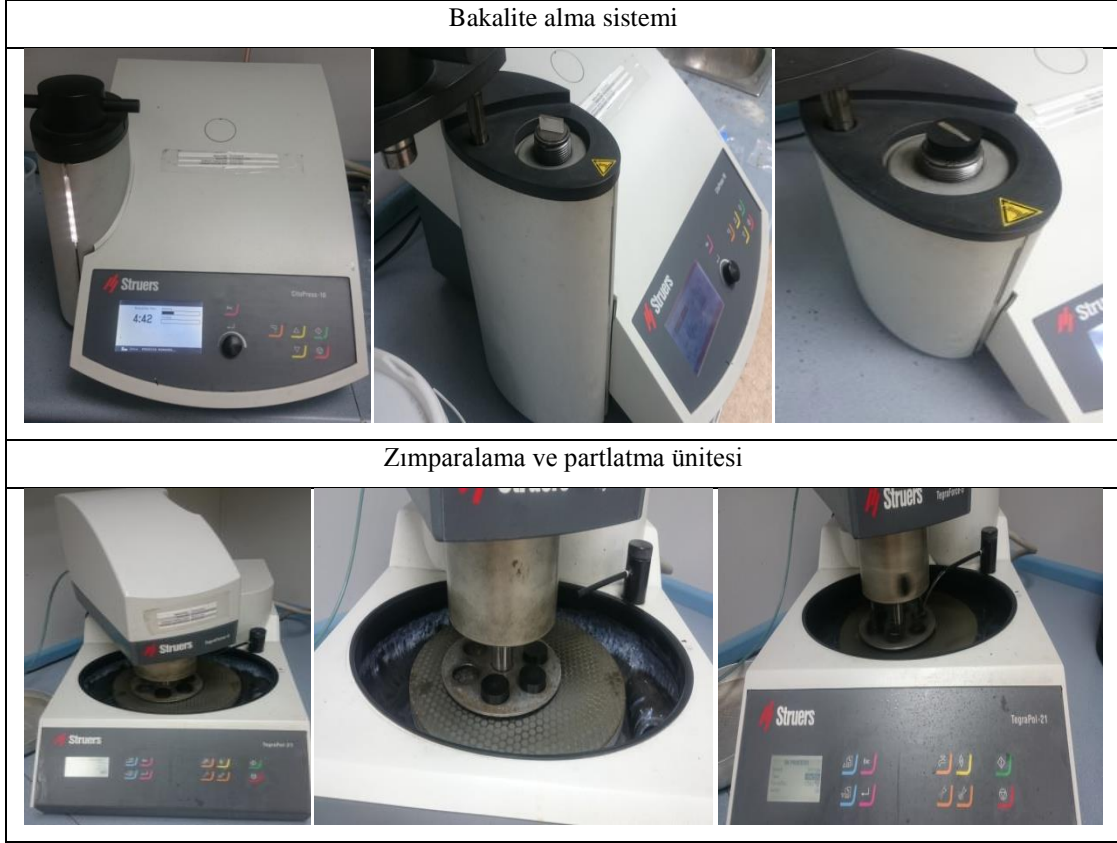
Kaplamalı halde numuneler standard metalografik hazırlık işlemlerine tabi tutulmuştur. Numunelerin küçültülmesi için kesit alma işlemi Struers Labotom-3 cihazı kullanılarak hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4. Hassas malzeme kesme cihazı görüntüsü

Numune bakalite alma: Numune bakalite alma işlemi Struers Citopress-10 cihazı kullanılarak proses parametreleri 180°C 250 bar altında otomatik olarak 3 dk sıcaklık ve 2,5 dk soğutma yaparak bakalite alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Numune

zımparalama ve parlatma sistemleri: Numune zımparalama ve parlatma işlemi Struers TegraPol-21 cihazı kullanılmış olup uygun parametreler Tablo 5.5.'de gösterilmiştir.



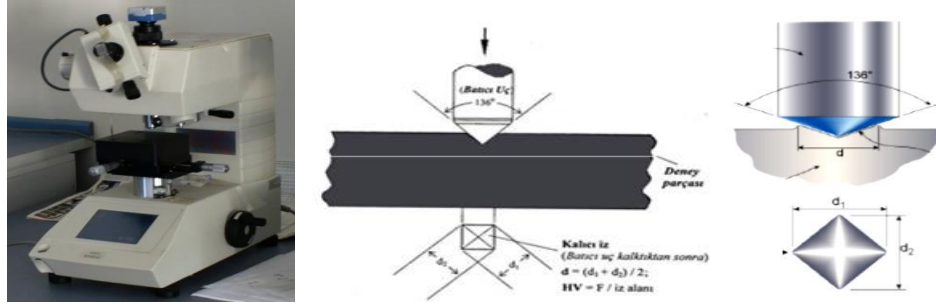
Şekil 5.5. Numuneyi bakalite alma , zımparalama ve parlatma ünitesi

Tablo 5.5. Numune zımparalama ve parlatma parametreleri

Zımparalama Aşaması					
Zımpara (mesh)	Basınç (n/mm ²)	Devir hızı (rpm)	Süre (dk)		
MD Piano 500	20	300	2		
800	20				
1200	20				
Parlatma Aşaması					
Marka (struers)	Kumaş Türü	Elmas Boyutu (µm)	Basınç (n/mm ²)	Hız (rpm)	Süre (dk)
MD Allegro	Dia Pro Allegro	9	30	300	3
MD Dac	Dia Pro Dac	3			2

5.6. Kaplamaların mikro sertlik ölçümleri

Kaplamaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde Shimadzu marka mikrosertlik ünitesinde vickers ucu ile 100 gram yük 10 sn kaplamaların mikro sertlik ($HV_{0,1}$) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her numune için 9 ölçüm alınmış ortalaması hesaplanmıştır (Eşitlik 1). Isıl işlem öncesi ve sonrası bu işlemler tekrarlanmıştır.



Şekil 5.6. Mikro sertlik ölçümü

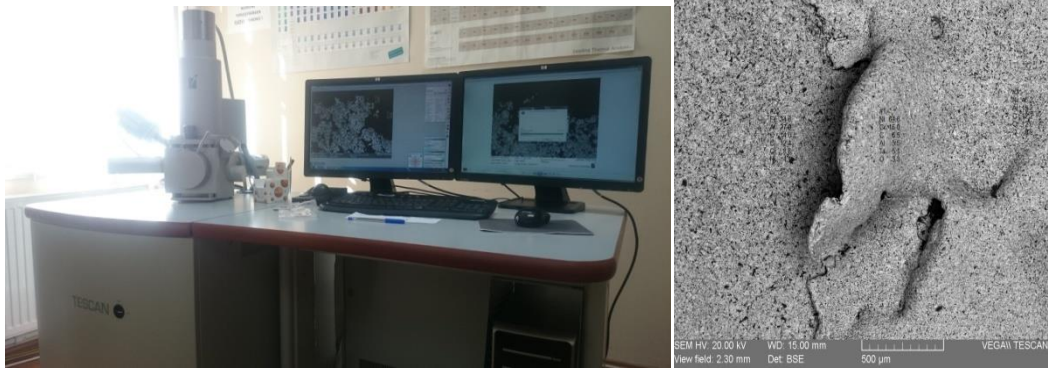
$$VSD = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Eşitlik 1

VSD = Vickers sertlik, kg/mm^2 , F= Yükleme kuvveti, d= Numune üzerindeki izin köşegen boyu, μm .

5.7. Elektron mikroskobu incelemeleri (SEM-EDX)

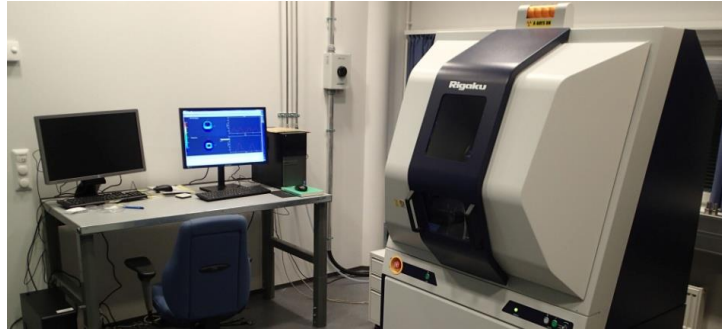
Tescan Markan elektron mikroskobunda kaplamaların farklı büyütmelerde üst yüzey ve kesit incelemeleri BSE ve SE modunda gerçekleştirilmiştir. EDX analizi ile noktasal element değişimleri incelenmiştir. Aşınma izi ve aşınma mekanizması detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.



Şekil 5.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

5.8. X ışınları difraksiyonu ile faz analizi (XRD)

Kaplamaların ısıtılma işlem öncesi ve sonrasında XRD analizi ile kristal faz yapısı analiz edilmiştir. RIGAKU 2200 marka X ışınları difraktometre cihazında $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5408 \text{ \AA}$) ışın kaynağında analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan XRD analiz sonuçlarında ısıtılma sıcaklık ve süresinin faz dönüşümüne etki edecek seviyede olmadığı tespit edilmiştir.



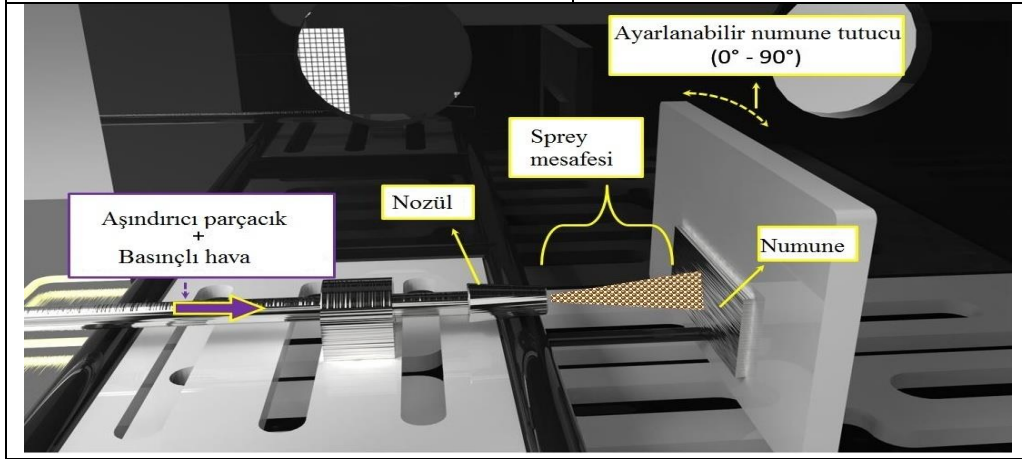
Şekil 5.8. XRD analizi cihazı

5.9. Kaplamaların Eroziyon Aşınma Testi

ASTM G76 standardı bağli olarak aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça ve hacimce aşınma kayıpları hesaplanmış, eroziyon aşınma hızı belirlenmiştir. Aşınma sonrası aşınma izleri elektron mikroskobunda üst yüzeyden alınan görüntüler ile karakterize edilmiştir. Isıtılma işlem öncesi ve sonrasında aşınma izlerinin morfolojisi 3 boyutlu profilometre cihazı ile taranarak analiz edilmiştir. Yüzey pürüzlülükleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir [41].

Tablo 5.6. Katı partikül erozif aşınma test parametreleri

Metod	ASTM G76
Aşındırıcı Tipi	Al ₂ O ₃
Aşındırıcı Boyutu	400 mesh (38-45µm)
Partikül Çarpma Açısı	30°, 45°, 90°
Kumlama Tabanca Basıncı	1.5 bar
Aşındırıcı Kütle Akış Hızı	4 g/sn
Aşındırıcı Hızı	37 m/sn
Nozül	3mm
Test Sıcaklığı	25°C ± 2°C
Test Süresi	10, 20 ve 30 sn
Sprey Mesafesi	20 mm
Çalışma Ortamı (Nem)	50%



$$W_s = \Delta V / \Delta m$$

Eşitlik 2

W_s: Özgül erozif aşınma oranı (hızı)

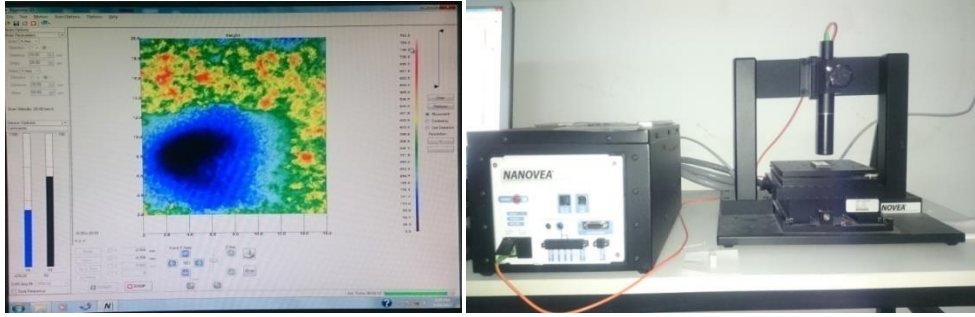
ΔV: Hacimsel kütle kaybı(mg)

Δm: Püskürtülen Partikül miktarı(mg)

Şekil 5.9. Numuneler aşınma öncesi ve sonrası ağırlıkları hassas terazide (±0,0001gr) ölçülmüştür



Şekil 5.10. Aşınma testi kullanılan kabin ve numune bağlama görüntüsü


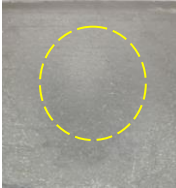
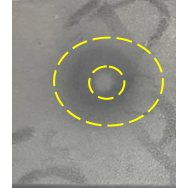


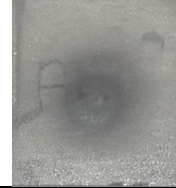

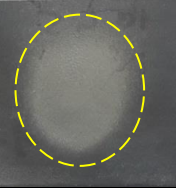
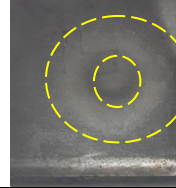
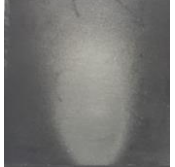




Şekil 5.11. Numunelerin profilometre cihazı ile yüzey tarama anındaki görüntüsü

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Termal sprej yöntemi ile (alev sprej/fleksi kord) 3 farklı oksit esaslı kaplama tabakası paslanmaz çelik altlık üzerinde biriktirilmiştir. Kaplama işlemi sonrasında ısı işlem uygulanarak karşılaştırmalı olarak katı partikül abrazyif aşınma davranışları incelenmiş ve aşağıda deneysel çalışma sonuçları sergilenmiştir. Deneysel çalışmaların başlangıcında paslanmaz çelik altlık üzerinde hem oda sıcaklığında hem de ısı işlem sonrasında katı partikül aşınma testi (farklı süre ve açılar için) gerçekleştirilmiş ve referans alınmıştır. Tablo 6.1. ve 6.2. altlık üzerinde yapılan aşınma testi deneysel çalışma sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 6.1. Altlık malzeme (321 paslanmaz çelik) aşınma sonrası yüzey görüntüsü

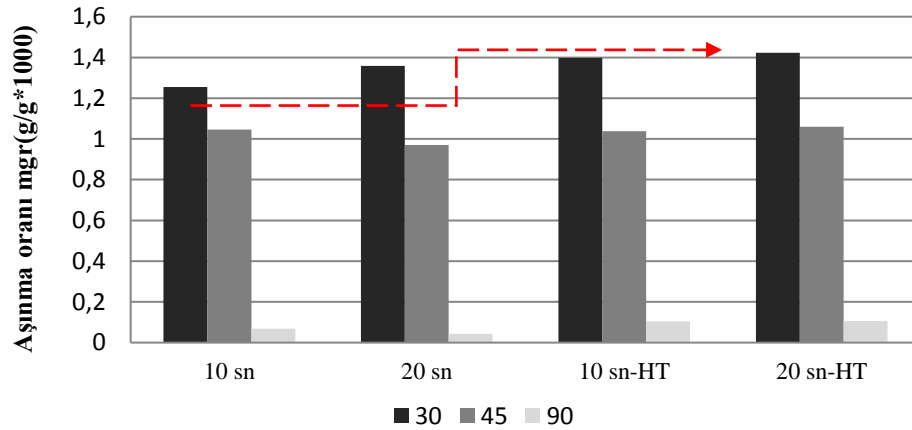
T oda sıcaklığı			
Süre/Açı	30°	45°	90°
10sn			
20sn			
T 700°C 60 saat			
Süre/Açı	30°	45°	90°
10sn			
20sn			

Tablo 6.1.'de görüldüğü üzere 321 paslanmaz çelik altlık malzemesinin oda sıcaklığında katı partikül erozif aşınma testi sonrası yüzey de aşınma izlerinin partikül çarpma açısına bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir. 30° düşük açılı çarpma sonrasında yüzeyde katı partiküllerin aşındırma iz alanı daha geniş ve eliptik bir huzme şeklinde gözlenmektedir. Çarpma açısı artışı ile birlikte dairesel formunda aşınma izleri gözlenmektedir. 90° çarpma açısında ise daha küçük çaplı dairesel formda oyuk şeklinde bir aşınma izi görülmektedir. Aşındırıcı partikül etki süresinin artışı ile (10-20 sn)'de benzer aşınma izi formları gözlenmiştir. Aşındırma süresinin artışı ile birlikte merkez bölgesinde oyuklaşma artmaktadır. Aşınma mekanizması deformasyon esaslıdır. İşlem süresi ve çarpma açısı aşınma hızını kontrol etmektedir.

700°C ve 60 saat ısıtıl işlem sonrasında paslanmaz çelik altlık yüzeyinde aynı test koşullarında katı partikül abrazif aşınma izleri gözlemlendiğinde aşınma izi geometrisinin büyüdüğü ve daha fazla oyuklaşma gösterdiği (kesik çizgiler ile gösterildiği üzere) belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Bu durum ısıtıl işlem sonrasında paslanmaz çelik yüzey direncinin azaldığını ve daha fazla aşınma kaybı oluşturduğunu işaret etmektedir. Tablo 6.2.'de oda sıcaklığında ve ısıtıl işlem sonrasında paslanmaz çelik altlık üzerinde katı partikül abrazif aşınma kaybı test sonuçları sergilenmektedir. Karşılaştırmalı grafikten de görüleceği üzere ısıtıl işlem koşullarında daha fazla kütle kaybı söz konusudur. Oda sıcaklığı sonuçlarına benzer şekilde aşındırma süresi arttıkça aşınma kaybı miktarı da artmaktadır. Düşük açılar da aşınma kaybı en yüksek seviyedeysen yüksek açılarda aşınma kaybı azalmaktadır. Isıtıl işlemli koşulda altlık üzerinde 20 sn 30°'de erozif aşınma testlerinde en yüksek aşınma kaybı 1.4237 mg ölçülmüştür. Isıtıl işlemsiz koşulda 20 sn 30° ise 1,3587 mg ölçülmüştür. Altlık malzemesi ısıtıl işlem sonrasında metalurjik açıdan yüzey dayanımını kaybetmiş ve aşınma hızı artmıştır. Tablo 6.2.'de deneysel sonuçlar incelendiğinde sünek olan altlık malzemesi üzerinde abrazif partikülün aşındırıcı etkisi çarpma açısından yüksek oranda etkilenmektedir. 30°'den 90°'ye çarpma açısının değişimi hem oda sıcaklığı sonuçları için hem de ısıtıl işlem sonrası sonuçları için benzer şekilde aşınma kaybının önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bu sonuç şekil 2.3.'de çarpma açısının aşınma hızına etkisi için verilen grafik ile uyum sağlamaktadır.

Tablo 6.2. Altlık malzeme (321 paslanmaz çelik) aşınma sonrası kütle kaybı sonuçları

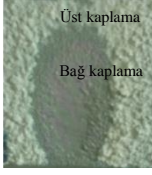









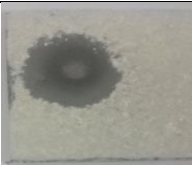

Numune	Aşındırıcı tipi mesh	Süre sn	Açı	m1 (gr)	m2 (gr)	Δm (gr)	Erozyon oranı Mg (mg/g x1000)	
321 paslanmaz çelik	Alumina 400 mesh	10	30°	37,0559	37,0057	0,0502	1,255	
		20		37,0057	36,8970	0,1087	1,3587	
		10	45°	38,7947	38,7529	0,0418	1,045	
		20		38,7529	38,6753	0,0776	0,97	
		10	90°	37,6714	37,6687	0,0027	0,0675	
		20		37,6687	37,6652	0,0035	0,0437	
321 paslanmaz çelik -HT		Alumina 400 mesh	10	30°	36,7275	36,6716	0,0559	1,3975
			20		36,6716	36,5657	0,1059	1,4237
			10	45°	38,3918	38,3503	0,0415	1,0375
			20		38,3503	38,2674	0,0829	1,0592
			10	90°	39,4028	39,3986	0,0042	0,105
			20		39,3986	39,3909	0,0077	0,1062



Çarpma Açısı ve Aşındırma Süresine Bağlı Erozyon Oranı Değişimi

Aşağıda Tablo 6.3., Tablo 6.4. ve Tablo 6.5.'de paslanmazçelik altlık üzerine termal sprey yöntemi ile kaplanmış olan farklı oksit esaslı (ZM: Zr_2O_3 -MgO- Al_2O_3 , A: Al_2O_3 , AM: Al_2O_3 -MgO), kaplamaların ısı işlem öncesi ve sonrası farklı açılarda ve sürelerde katı partikül eroziv aşınma testi sonrası aşınma izleri ve yüzey görüntüleri sırasıyla sergilenmiştir. Tablo 6.3.'de Zirkonat esaslı kaplamaların oda sıcaklığında ve ısı işlem sonrasında katı partikül aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri incelendiğinde aşınma süresi ve çarpma açısına bağlı aşınma izlerinin değiştiği açıkça görülmektedir.

Tablo 6.3. Zirkonat esaslı kaplamaların aşınma sonrası görüntüsü

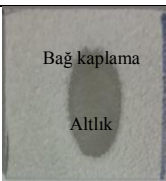
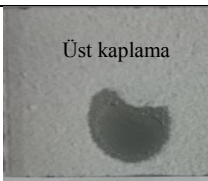




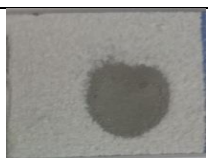

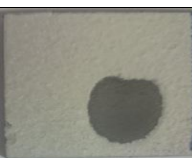



Süre/Açı	T oda sıcaklığı			T 700°C 60 saat	
	30°	45°	90°	45°	90°
10 sn					
20 sn					
30 sn					

Sabit aşındırıcı miktarı ile sabit mesafeden püskürtülen aşındırıcılar (Al_2O_3 , 400 mesh) kaplama yüzeyinde büyük açılarda (45° ve 90°) çok hızlı bir şekilde zirkonat esaslı kaplama tabakasının yüzeyden ayrılmasına neden olmaktadır. Çarpma açısının artması aşınma izi formunu dairesel forma dönüştürmekte ve merkezi bölgede benzer şekilde oyuklaşma oluşturmaktadır. Aşınma bölgesi dairesinin tam merkezinde lokal olarak kaplama tabakası partiküllerin çarpma hızının ve açısının etkisiyle saçılması nedeniyle küçük bir adacık şeklinde kaplamanın arta kalmasına neden olmaktadır. Aşınma süresinin artışı ile birlikte bu adacık ortadan kalkmaktadır. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen testlerde 30° 'den 90° 'ye artan çarpma açılarında eliptik aşınma izi dairesel forma ve yarım ay formuna geçmektedir. Aşındırma süresinin artışı yarım ay formunda merkez bölge etrafını boşaltmakta ve derinleştirmektedir. Isıl işlem koşullarında da benzer bir şekilde aşınma izleri değişimi gözlenmektedir, fakat ısıl işlem sonrası aşınma kaybının kısmen azaldığı görülmektedir. 90° çarpma açısında dairesel aşınma izi merkezinde yuvarlanma etkisi nedeniyle kaplamanın mevcudiyeti gözlenmektedir. Aşınma süresinin artması sonucunda merkez bölge ortadan kalkarak daha geniş ve daha derin bir aşınma izi formu oluşturmuştur. Düşük açılarda aşınma testlerinde kaplama tabakası partikülün geliş açısına bağlı olarak yüzeyden ince bir tabaka halinde kaplamanın kalkmasına neden olurken, büyük açılarda merkez

bölgesinde hızla derinleşen bir aşınma izine yol açmıştır. Aşınma izlerinden kaplama tabakalarının (üst tabaka/ bağ tabaka/ altlık) aşınma sınırları açıkça görülebilmektedir.

Tablo 6.4.'de Alumina esaslı kaplamaların oda sıcaklığında ve ısıtılma işlem sonrasında katı partikül aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri incelendiğinde aşınma süresi ve çarpma açısına bağlı aşınma izlerinin zirkonat esaslı kaplamalara benzer şekilde değiştiği görülmektedir. Zirkonat esaslı kaplama ile karşılaştırıldığında alumina esaslı kaplamaların aşınma izleri daha küçük boyutlardadır. Aşınma izleri incelendiğinde 90° çarpma açısı 20 sn aşındırma süresi sonrası iz formları arasında belirgin bir fark gözlenmektedir. Zirkonat kaplamada aşınma izi dairesel forma ulaşmışken alumina esaslı kaplamada yarım ay formunda aşınma izi gözlenmektedir. Bu durum alumina esaslı kaplamaların zirkonat esaslı kaplamalara göre daha yavaş aşınma hızına sahip olduğunu işaret etmektedir.




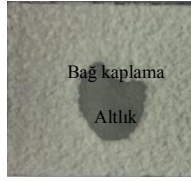

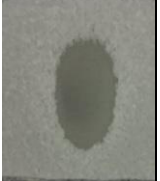






Tablo 6.4. Alumina esaslı kaplamaların aşınma sonrası görüntüsü

Süre/Açı	T oda sıcaklığı			T 700°C 60 saat	
	30°	45°	90°	45°	90°
10 sn					
20 sn					
30 sn					

Tablo 6.5.'de Spinel esaslı kaplamaların oda sıcaklığında ve ısıtılma işlem sonrasında katı partikül aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri incelendiğinde aşınma süresi ve çarpma açısına bağlı aşınma izlerinin hem zirkonat hem de alumina esaslı kaplamaların aşınma davranışına benzer şekilde değiştiği görülmektedir. Spinel esaslı kaplamaların aşınma izleri alumina esaslı kaplamaların aşınma izlerine daha fazla oranda benzerlik göstermektedir. Her 3 kaplamada da ısıtılma işlem sonrasında

aşınma hızının azaldığı dolayısıyla ısı işlem etkisi ile aşınma direncinin arttığı gözlenmektedir. Alumina ve spinel esaslı kaplamalar zirkonat esaslı kaplamalara göre yüksek aşınma direnci sergilemektedir.

Tablo 6.5. Spinel esaslı kaplamaların aşınma sonrası görüntüsü

Süre/Açı	T oda sıcaklığı			T 700°C 60 saat	
	30°	45°	90°	45°	90°
10 sn					
20 sn					
30 sn					

Kaplamaların aşınma davranışları genel olarak ilk aşamada üst tabakanın aşınması, sonrasında bağ tabaka ve artan süre ile birlikte altlığa ulaşılması , açılal değişim ile de aşınma izi formunun değişmesi gözlenmiştir. Aşınma izi ilk olarak düşük açılarda eliptik formlarda sonrasında yarım ay şeklinde artan açıyla birlikte de dairesel forma kavuşmaktadır. Altlığa ulaşılmasıyla birlikte de aşınma dairesi merkez bölgede genişlemekte ve derinleşmektedir.

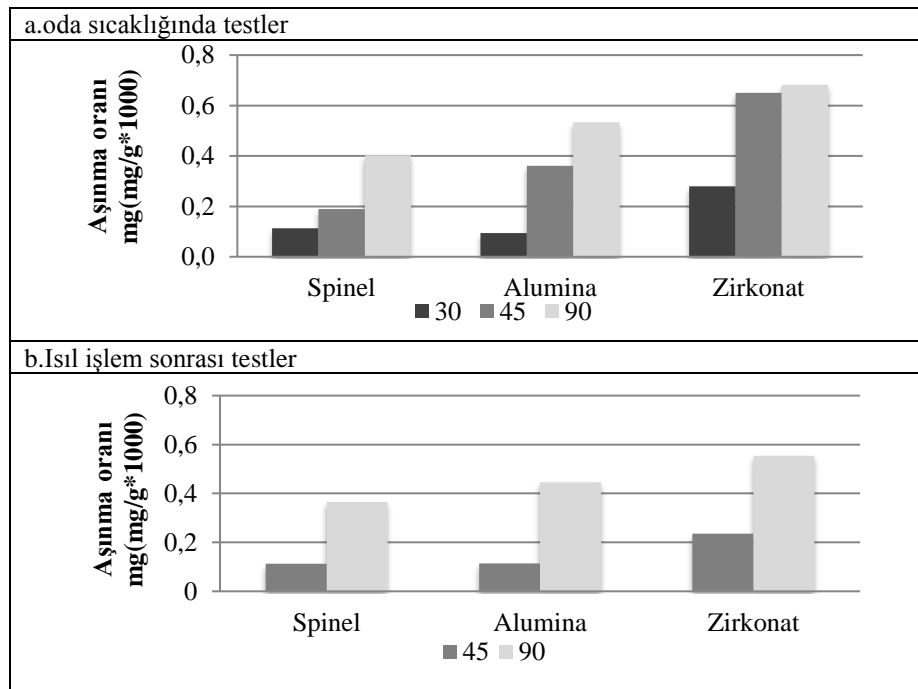
Tablo 6.6.'de aşınma testi sonrasında kaplamaların kütle kayıpları ve aşınma hızları sunulmaktadır. Görüleceği üzere zirkonat esaslı kaplamalarda aşınma kaybı en yüksek seviyelerdedir. Zirkonat esaslı kaplamalar ısı işlem sonrasında aşınma kaybı kısmen azalmaktadır. Alumina esaslı kaplamalar zirkonat esaslı kaplamalara göre hem oda sıcaklığında hem de ısı işlem koşullarında daha yüksek aşınma direnci sağlamıştır. Spinel esaslı kaplamalar hem oda sıcaklığı koşullarında hem de ısı işlem koşullarında yüksek aşınma direnci sergilemiştir.

Tablo 6.6. Kaplamaların aşınma sonrası kütle kayıp sonuçları

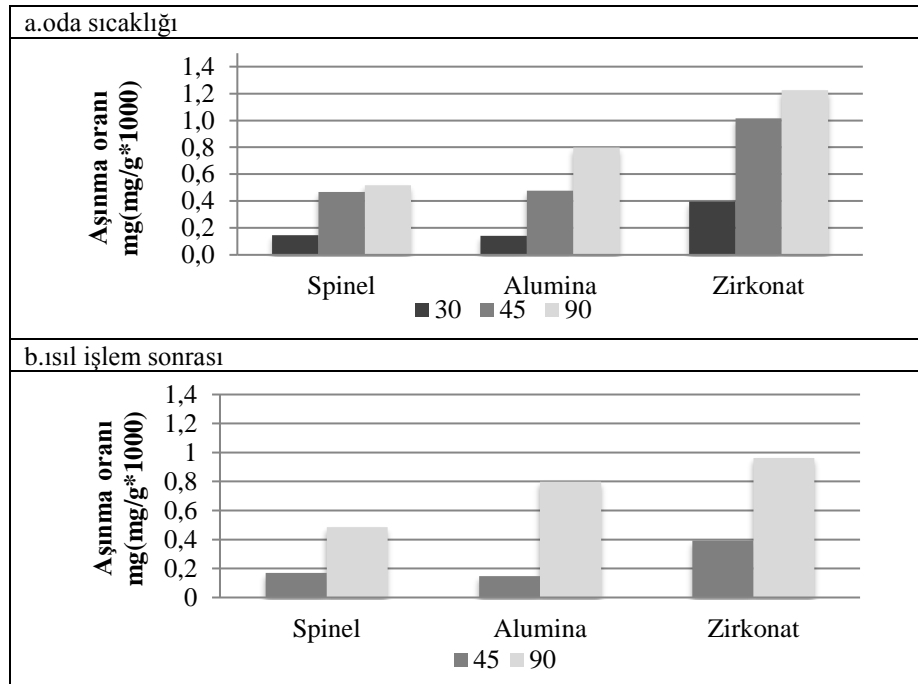
Numune	Aşındırıcı tipi mesh	Süre sn	Açı	m1 (gr)	m2 (gr)	Δm (gr)	Erozyon oranı mg (mg/g x1000)
ZM	Alumina 400 mesh	10	30°	39,4517	39,4405	0,0112	0,28
		20		39,375	39,3432	0,0318	0,3975
		10	45°	39,1546	39,1286	0,0260	0,650
		20		39,2214	39,1402	0,0812	1,015
		10	90°	37,08276	37,0555	0,02726	0,6815
		20		37,94836	37,8504	0,09796	1,2245
ZM-HT		10	45°	38,73171	38,7223	0,009412	0,2353
		20		36,13656	36,1052	0,03136	0,392
		10	90°	38,41342	38,3913	0,02212	0,553
		20		36,26056	36,1836	0,07696	0,962
A	Alumina 400 mesh	10	30°	37,84968	37,8459	0,00378	0,0945
		20		40,16344	40,1522	0,01124	0,1405
		10	45°	37,68593	37,6715	0,014428	0,3607
		20		40,07484	40,0366	0,03824	0,478
		10	90°	39,11304	39,0917	0,02134	0,5335
		20		39,60084	39,537	0,06384	0,798
A-HT		10	45°	39,81205	39,8075	0,004548	0,1137
		20		39,07388	39,062	0,01188	0,1485
		10	90°	38,81209	38,7943	0,017788	0,4447
		20		40,3802	40,3216	0,0586	0,7325
S	Alumina 400 mesh	10	30°	37,73981	37,7353	0,004508	0,1127
		20		35,8195	35,8077	0,01180	0,1475
		10	45°	38,55885	38,5513	0,007548	0,1887
		20		41,21046	41,173	0,037456	0,4682
		10	90°	37,55709	37,541	0,016088	0,4022
		20		35,7456	35,7042	0,04140	0,5175
S-HT		10	45°	36,89818	36,8937	0,00448	0,112
		20		39,2005	39,1869	0,01360	0,170
		10	90°	36,74131	36,7267	0,014608	0,3652
		20		39,2597	39,2209	0,03880	0,485

30°, 45° ve 90°'de zirkonat, spinel ve alumina esaslı kaplamalara göre daha fazla erozif aşınma kaybı oranına sahip olduğu gözlenmektedir. Zirkonat esaslı kaplamanın termal spreyle kaplama yönteminin doğası gereği heterojen mikroyapısal özellikleri gerekse kaba yüzey morfolojisi nedeniyle aşındırıcı partiküller ile etkileşimi sonucunda yüzeyden parçacık ayrılması ve kaplama üst yüzeyinde aşınma izinin derinleşmesi daha hızlı gerçekleşmektedir. En yüksek aşınma oranı büyük

açıda (90°)'de gözlenmekte olup, çarpma açısının 30° olması durumunda aşınma oranı daha azalmaktadır. Özellikle Spinel ve Alümina esaslı kaplamalar ısıtıl işlem sonrasında 10 sn test koşullarında kısmen daha düşük aşınma oranı sergilemiştir. Isıtıl işlem sonrasında üç kaplama içinde ortalama %5-10 arasında aşınma oranında düşüş gözlenmiştir. Aşınma test süresinin artışına bağlı olarak aşınma kaybı değişimlerinde farklılıklara yol açmıştır. Kaplama kompozisyonu, mikroyapı özellikleri ve kaplama kalınlığı gibi faktörler aşınma hızının değişiminde etkin olduğu düşünülmektedir. Kaplamanın yüzeyden ayrılmasıyla birlikte öncelikle bağ tabaka sonrasında ise altlık yüzeyine aşındırıcı partiküllerin ulaşması ve aşınmanın hızlanması aşınma hızının değişiminde etkili olmuştur. Oda sıcaklığında ve ısıtıl işlem sonrasında 30°, 45° ve 90° çarpma açılarında 10 sn süre ile katı partikül erozif aşınma testi sonrası spinel, alumina ve zirkonat esaslı termal spreyl kaplamaların aşınma oranları grafik üzerinde karşılaştırılmıştır (Şekil 6.1.ve 6.2.).



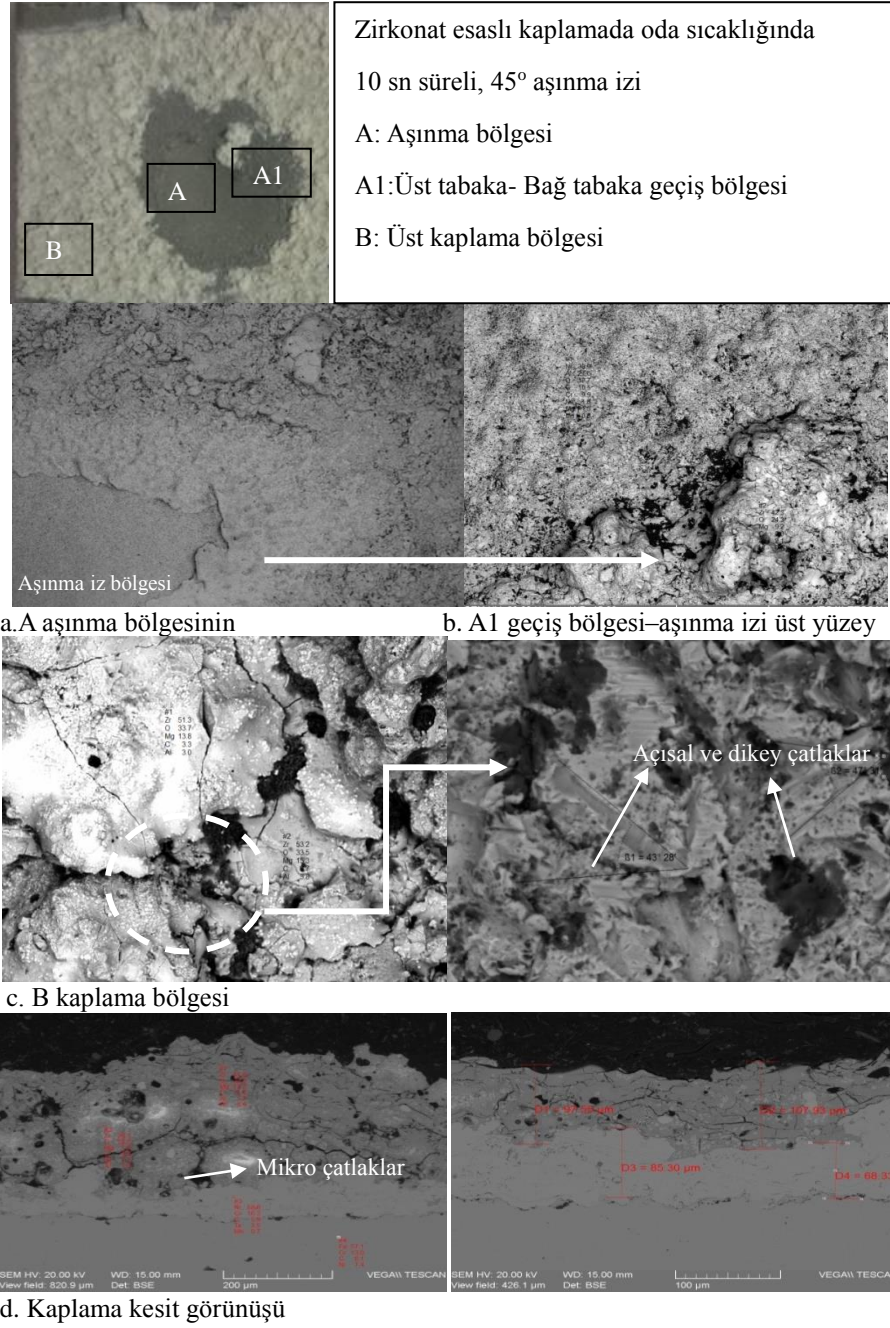
Şekil 6.1. Kaplamaların 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası aşınma oranları karşılaştırması a. Oda sıcaklığı b. Isıtıl işlem sonrasında



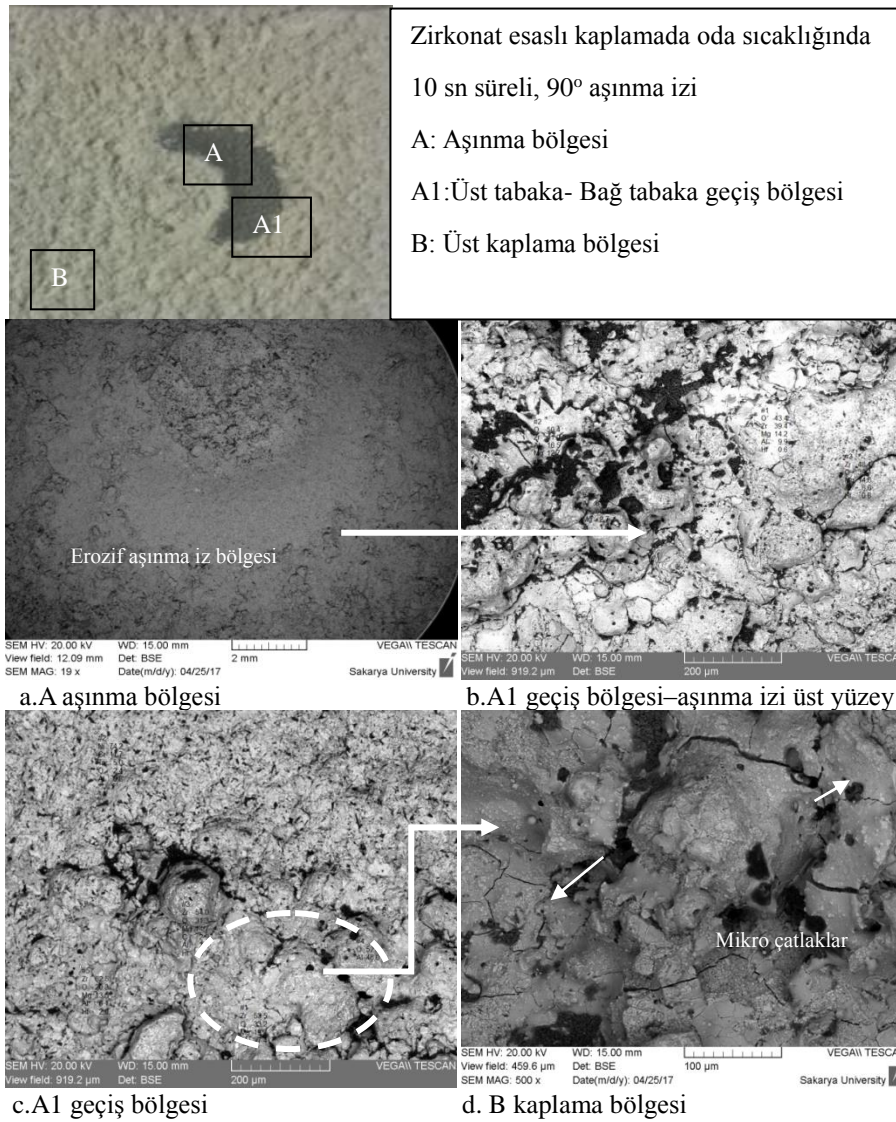
Şekil 6.2. Kaplamaların 20 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası aşınma oranları karşılaştırması a. Oda sıcaklığı b. Isıl işlem sonrasında

Şekil 6.3. ve 6.4.'de zirkonat esaslı kaplama yüzeyinde aşınma izleri farklı çarpma açıları için sergilenmektedir. Kaplama üst yüzeylerinde aşındırıcının çarpma etkisi ile kaplama spatlarında mikro çatlak ağları belirgin bir şekilde gözlenmektedir.

Aşınma mekanizması bu çatlakların oluşumu ve gelişimi ile birlikte spat tabakalarının yüzeyden ayrılması ve altındaki metalik esaslı bağ tabakaya ulaşması ile ilerlemektedir. Toplam kaplama kalınlığı yaklaşık 200 μm 'dur. Heterojen bir mikroyapıya sahip iki tabakalı termal sprej kaplama tabakası mevcuttur.

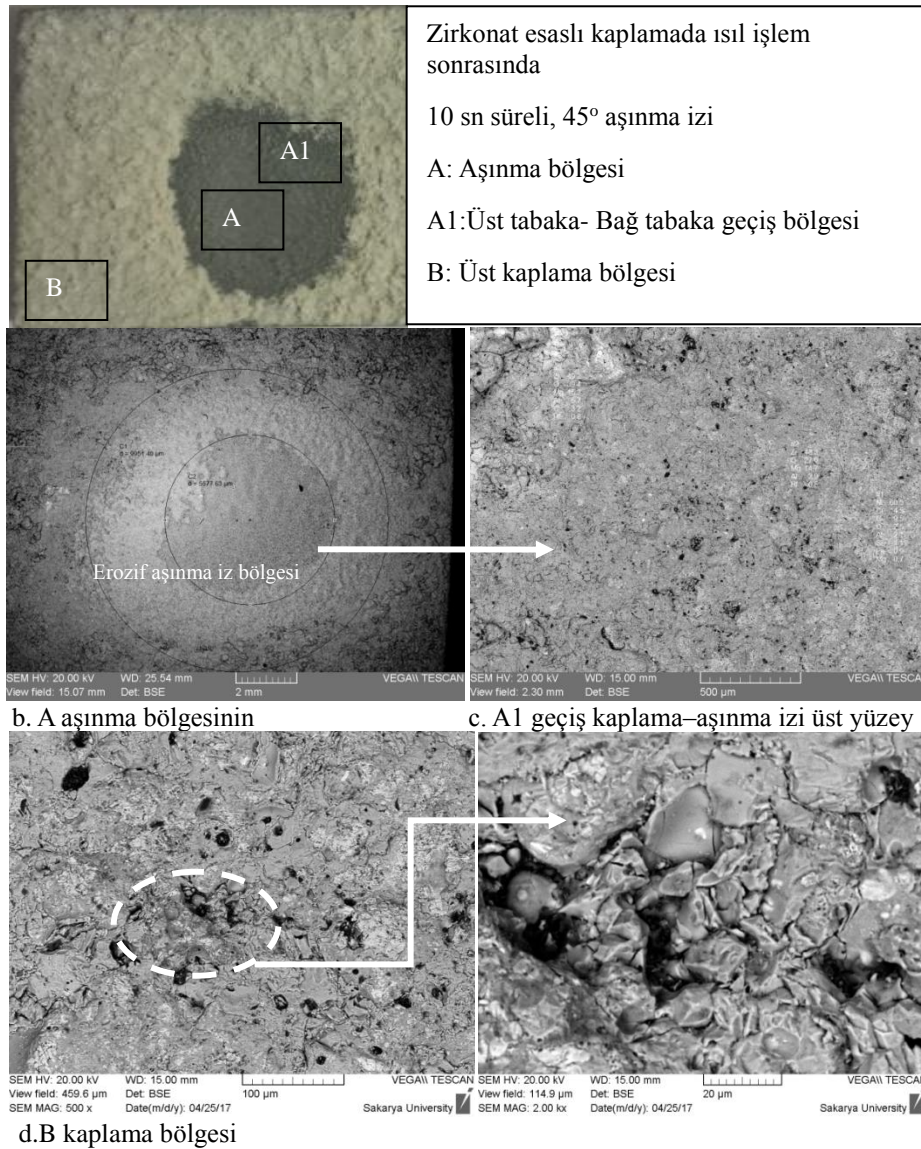


Şekil 6.3. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 45° 10 sn katı partikül eroziv aşınma testi sonrası üst ve kesit görünüş SEM görüntüleri



Şekil 6.4. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 90° 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri

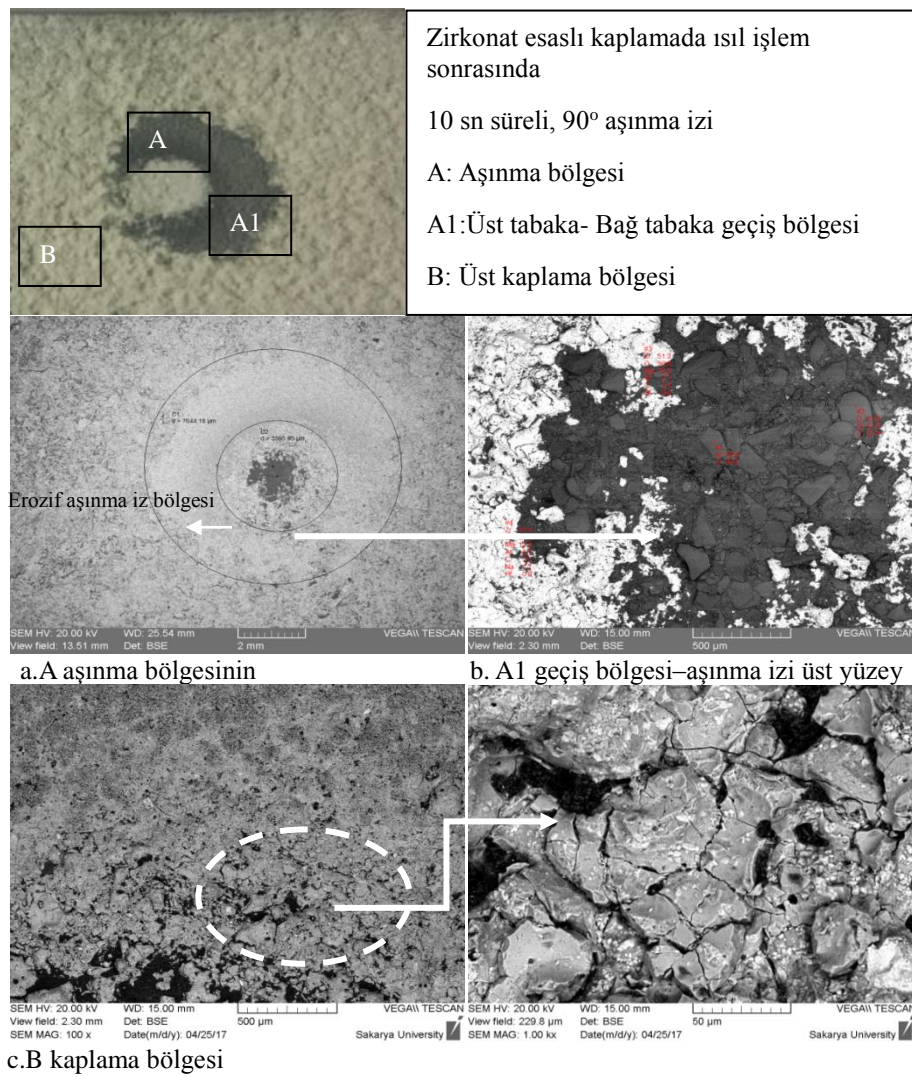
Şekil 6.4.'de görüleceği üzere oda sıcaklığında aşınma testi sonrasında aşınma izi çarpma açısının artması ile yarım ay formundadır. Aşınma izi derinliğinin artırdığı açıkça anlaşılmaktadır. Çarpma açısı arttıkça seramik esaslı malzemelerde aşınma kaybı artmakta ve iz geometrisi boyutu küçülmekte olup daha derinleşen bir aşınma söz konusudur.



Şekil 6.5. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın 700°C 60 saat ısıl işlem tabi olup 45° 10 sn katı partikül eroziv aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri

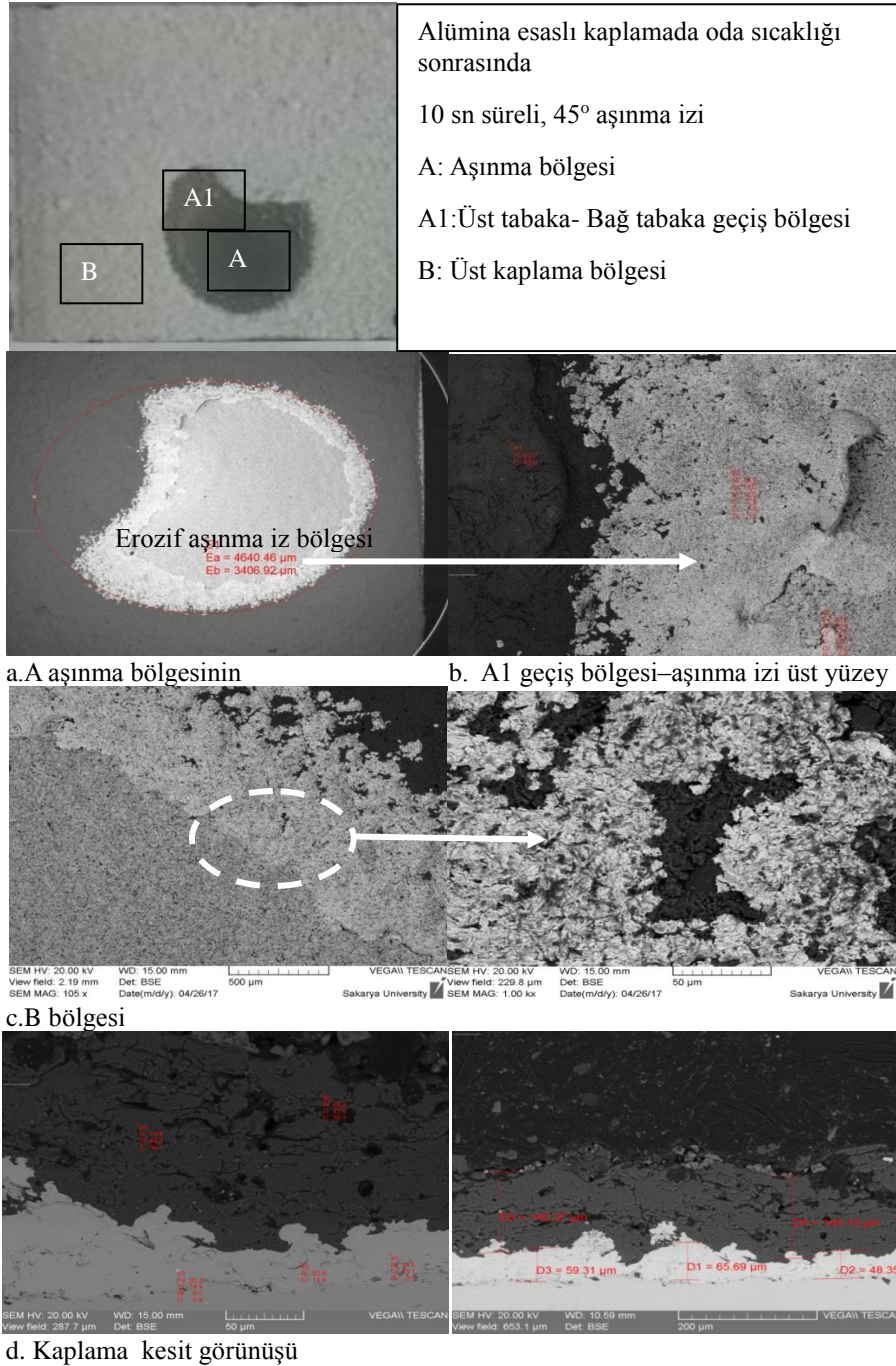
Şekil 6.5.'de ısıl işlem sonrasında zirkonat esaslı kaplama tabakasının 45°'de aşınma izi sergilenmektedir. Aşınma iz bölgesi geometrisinin daha küçük boyutlarda ve kısmen dairesel forma ulaştığı gözlenmektedir. Kaplama aşınma bölgesinde bağ tabakaya kadar aşınmanın gerçekleştiği gözlenmekte olup altlığa ulaşılmamıştır.

Şekil 6.6.'da ısıl işlem sonrasında zirkonat esaslı kaplama tabakasının 90°'de aşınma izi sergilenmektedir. Görüleceği üzere yarım ay formundaki iz bölgesinde daha derinleşen bir aşınma söz konusudur. Aşınma izi formu kaplamanın ısıl işlem sonrasında mekanik dayanım artışına bağlı olarak kısmen küçülmüştür. Benzer şekilde kaplama aşınma mekanizması splat tabakalarının çarpma etkisiyle ilk çatlak oluşumu ve sonrasında bu çatlak ağının artması ile yüzeyden kaplama tabakasının ayrılması şeklindedir. Kısmen aşındırıcıların aşınma izi bölgesinde gömüldüğü gözlenmiştir.



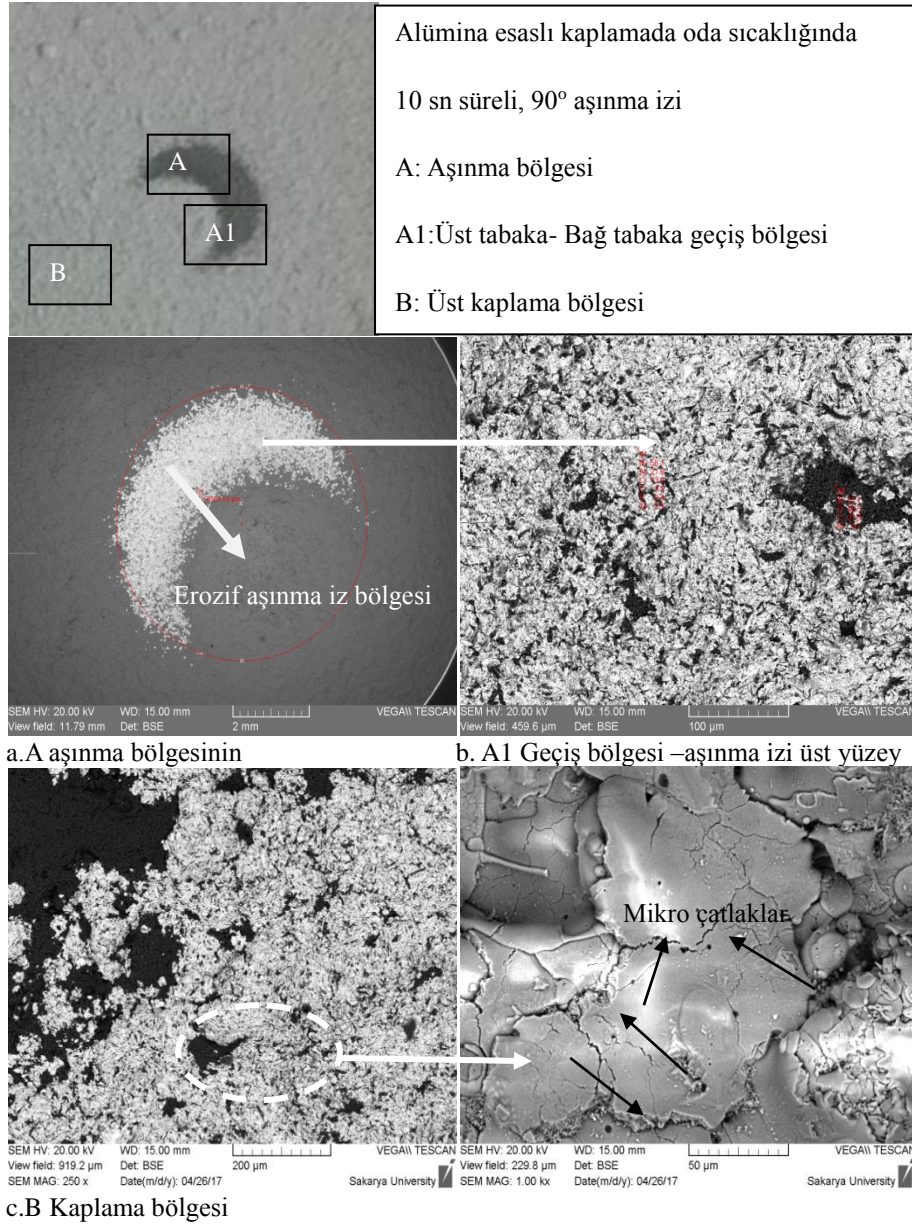
Şekil 6.6. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın 700°C 60 saat ısıl işlem tabi olup 90° 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri

Şekil 6.7.'de alümina esaslı kaplama tabakasının oda sıcaklığında 45° de aşınma testi sonrası üst yüzey mikroskobik aşınma izi incelenmiştir. Kısmen dairesel forma yaklaşan bir aşınma izi gözlenmektedir. Aşınmanın bağ tabakaya kadar nüfuz ettiği görülmektedir. Toplam kaplama kalınlığı yaklaşık 200 µm'dur.



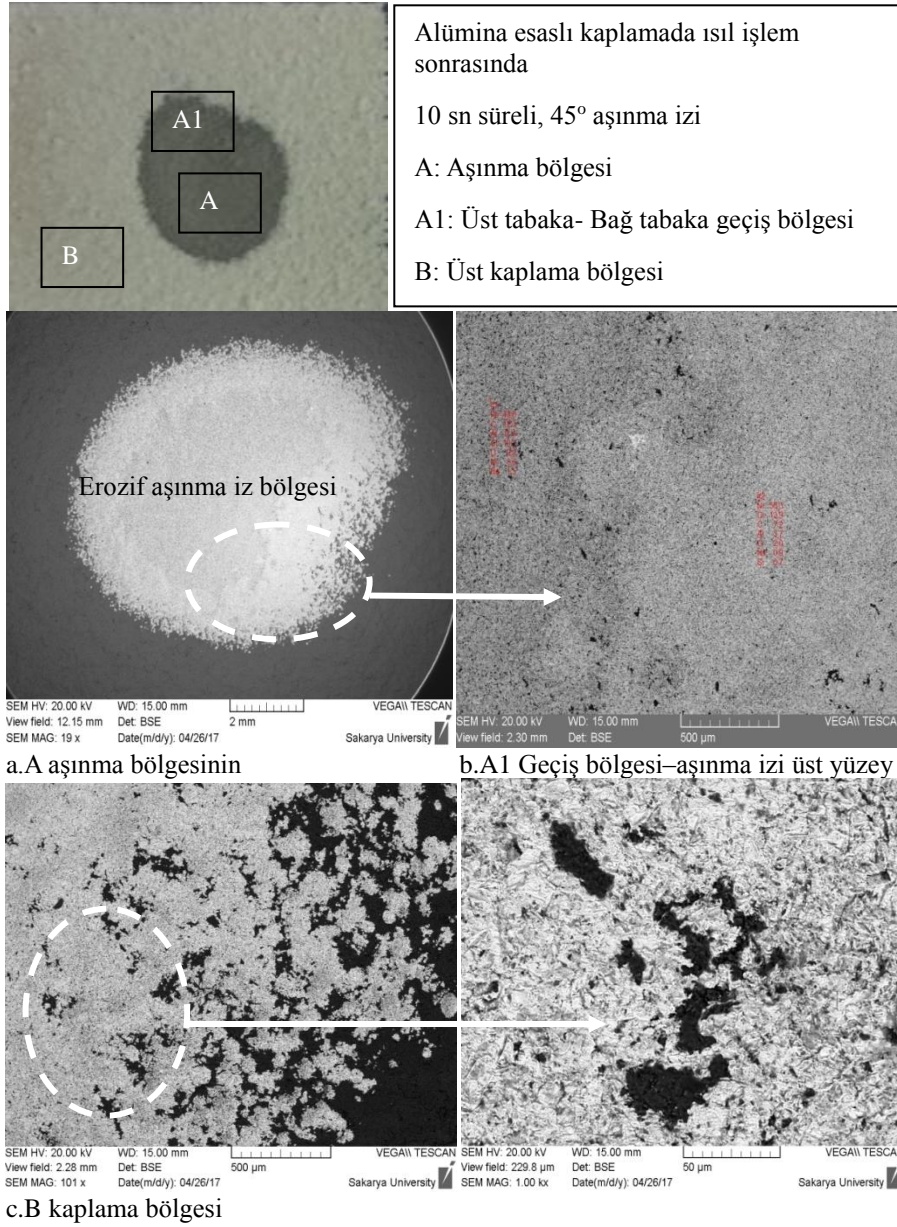
Şekil 6.7. Alumina esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 45° 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüşü SEM görüntüleri

Şekil 6.8.'de alümina esaslı kaplama tabakasının oda sıcaklığında 90° 'de aşınma testi sonrası üst yüzey mikroskobik aşınma izi incelenmiştir. Yarım ay formunda bir aşınma izi gözlenmektedir. Aşınmanın bağ tabakaya ve altlığa kadar nüfuz ettiği görülmektedir. Aşındırıcının dik açıda nüfuziyeti kaplama tabakasında oyuklaşma derinliğini artırmaktadır.



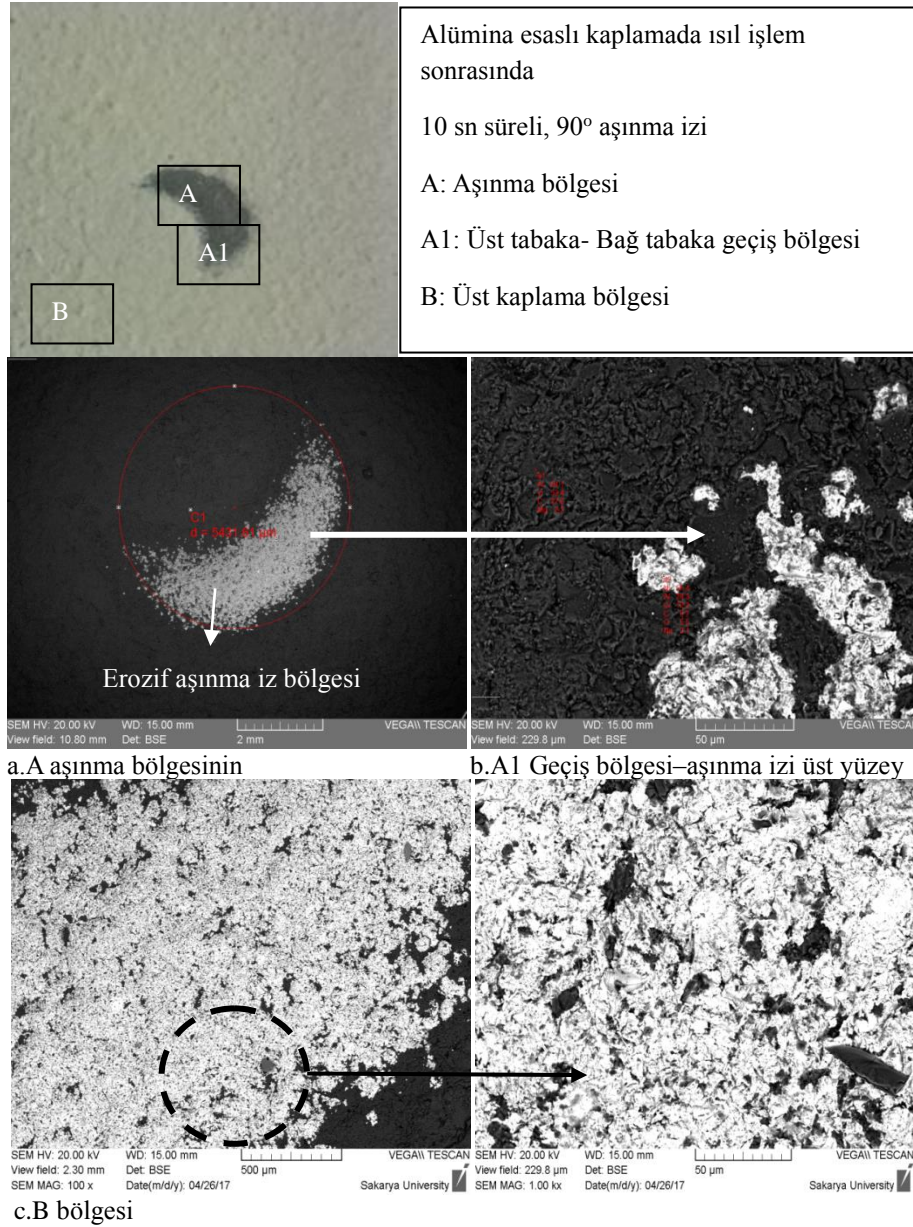
Şekil 6.8. Alumina esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 90° 10 sn katı partikül eroziyon aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri

Şekil 6.9.'de alümina esaslı kaplama tabakasının ısıtıl işlem sonrasında 45° 'de aşınma testi sonrası üst yüzey mikroskobik aşınma izi incelenmiştir. Kısmen dairesel forma yaklaşan bir aşınma izi gözlenmektedir. Aşınma hızının azaldığı tespit edilmiştir. Aşınmanın bağ tabakaya kadar nüfuz ettiği görülmektedir.



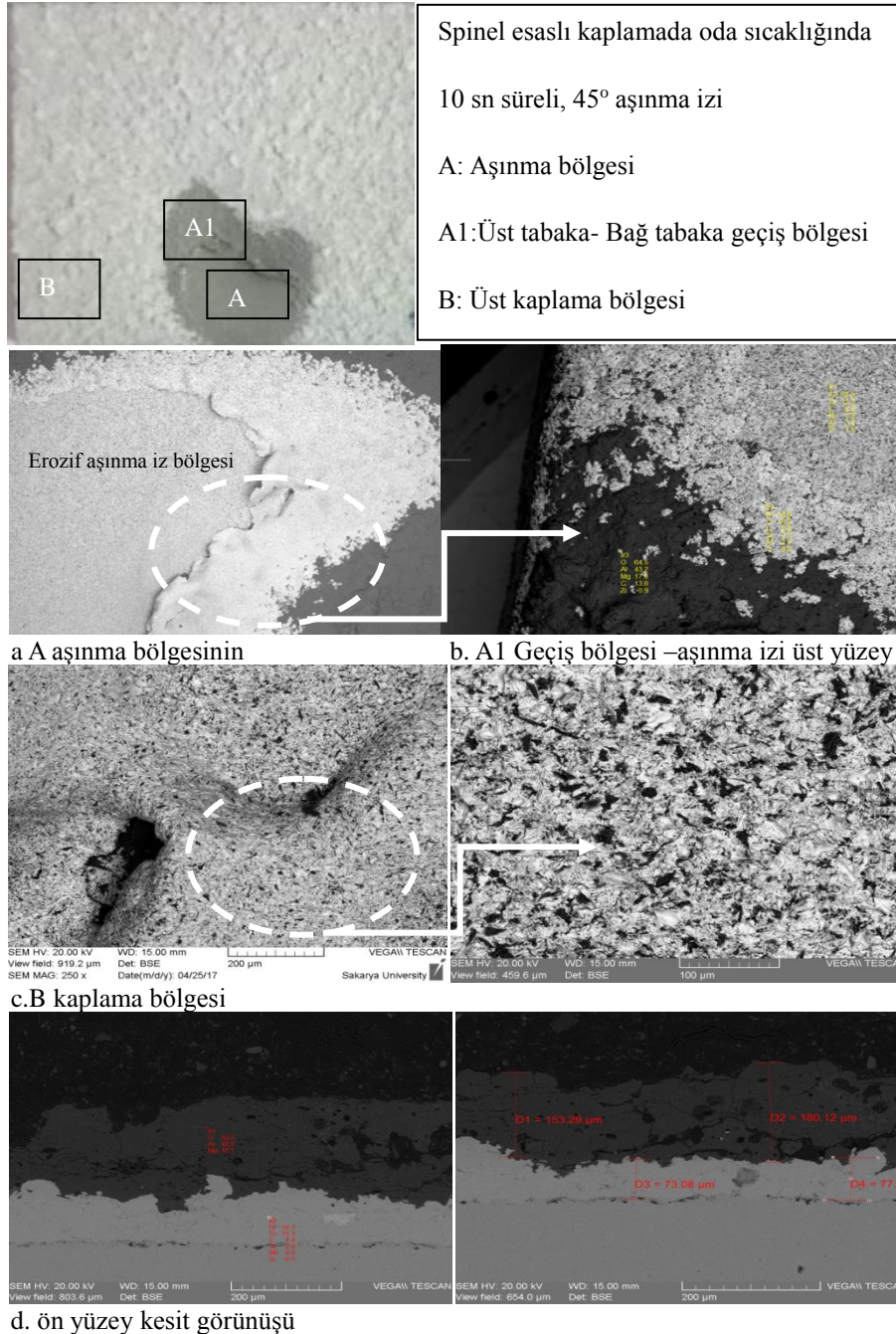
Şekil 6.9. Alumina esaslı seramik kaplamanın 700° 60 saat ısıtıl işlem sonrası 45° 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri

Şekil 6.10.'da alümina esaslı kaplama tabakasının ısıtıl işlem sonrasında 90°de aşınma testi sonrası üst yüzey mikroskobik aşınma izi incelenmiştir. Yarım ay formuna yaklaşan bir aşınma izi gözlenmektedir. Aşınma hızının arttığı tespit edilmiştir. Aşınmanın bağ tabakaya ve altlığa kadar nüfuz ettiği ve derinleştiği görülmektedir.



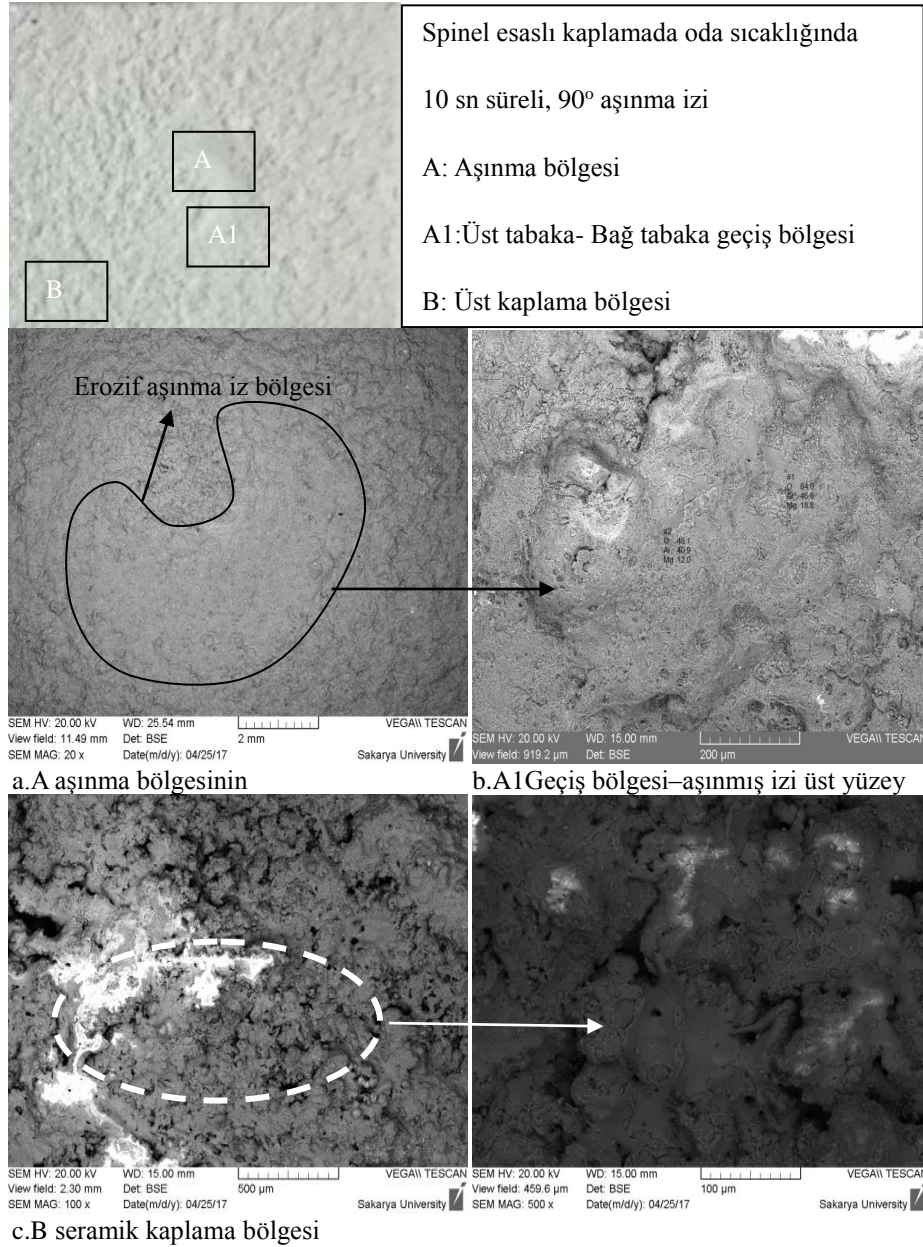
Şekil 6.10. Alumina esaslı seramik kaplamanın 700° 60 saat ısıtıl işlem sonrası 90° 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri

Şekil 6.11.'de spinel esaslı kaplama tabakasının oda sıcaklığında 45°'de aşınma testi sonrası üst yüzey mikroskobik aşınma izi incelenmiştir. Kısmen dairesel forma yaklaşan bir aşınma izi gözlenmekte olup aşınmanın bağ tabakaya ve ardından altlık yüzeyine kadar nüfuz ettiği görülmektedir. Toplam kaplama kalınlığı yaklaşık 260 μm 'dur.



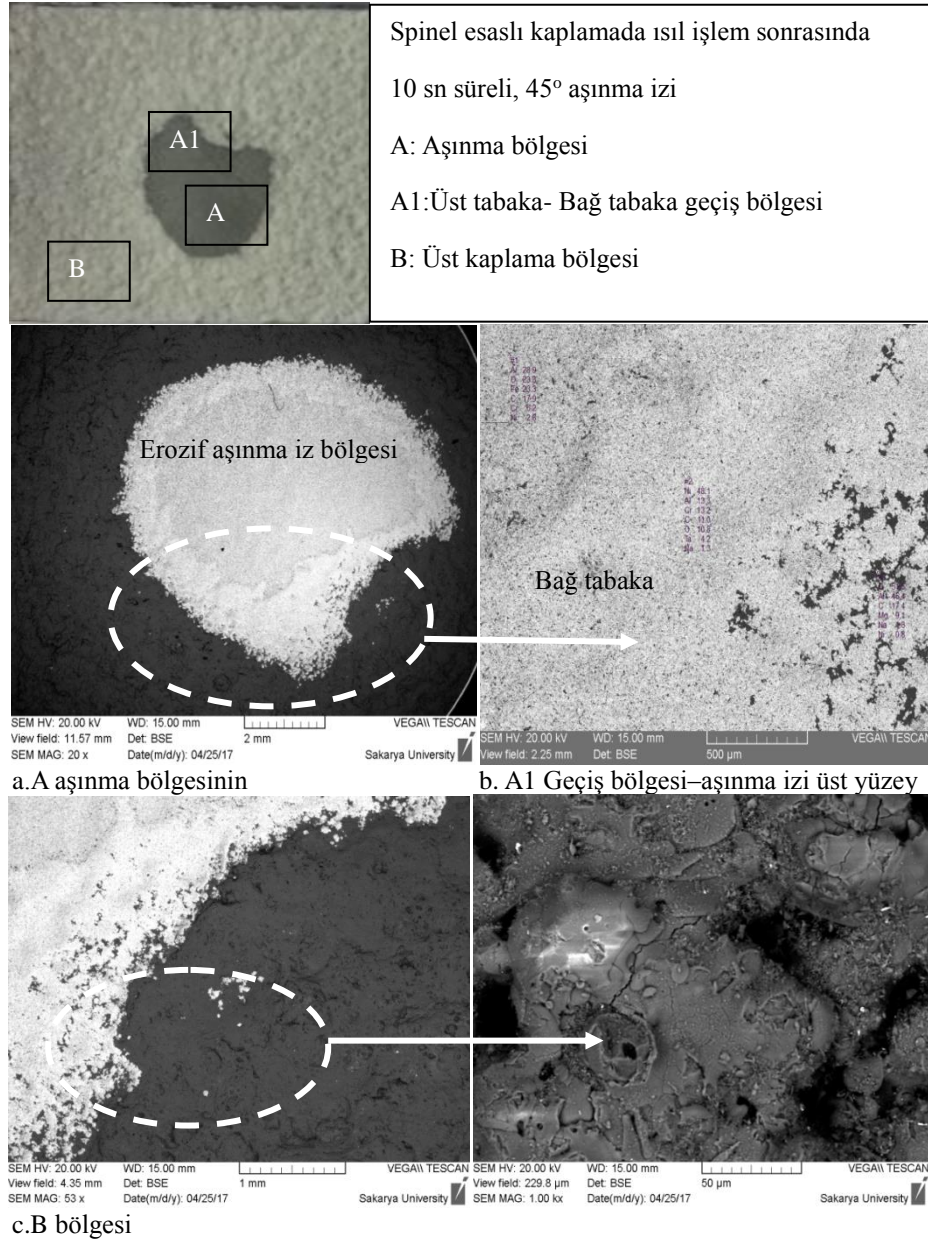
Şekil 6.11. Spinel esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 45° 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüş SEM görüntüleri

Şekil 6.12.'de Spinel esaslı kaplama tabakasının oda sıcaklığında 90°'de aşınma testi sonrası üst yüzey mikroskobik aşınma izi incelenmiştir. Kısmen yarım ay forma yaklaşan bir aşınma izi gözlenmektedir. Splatlar arası boşluğun az olması ve porozite oranının düşük olması aşınmanın boyutunu etkilediği gözlenmekte olup aşınmanın bağ tabakaya nüfuz ettiği görülmektedir.



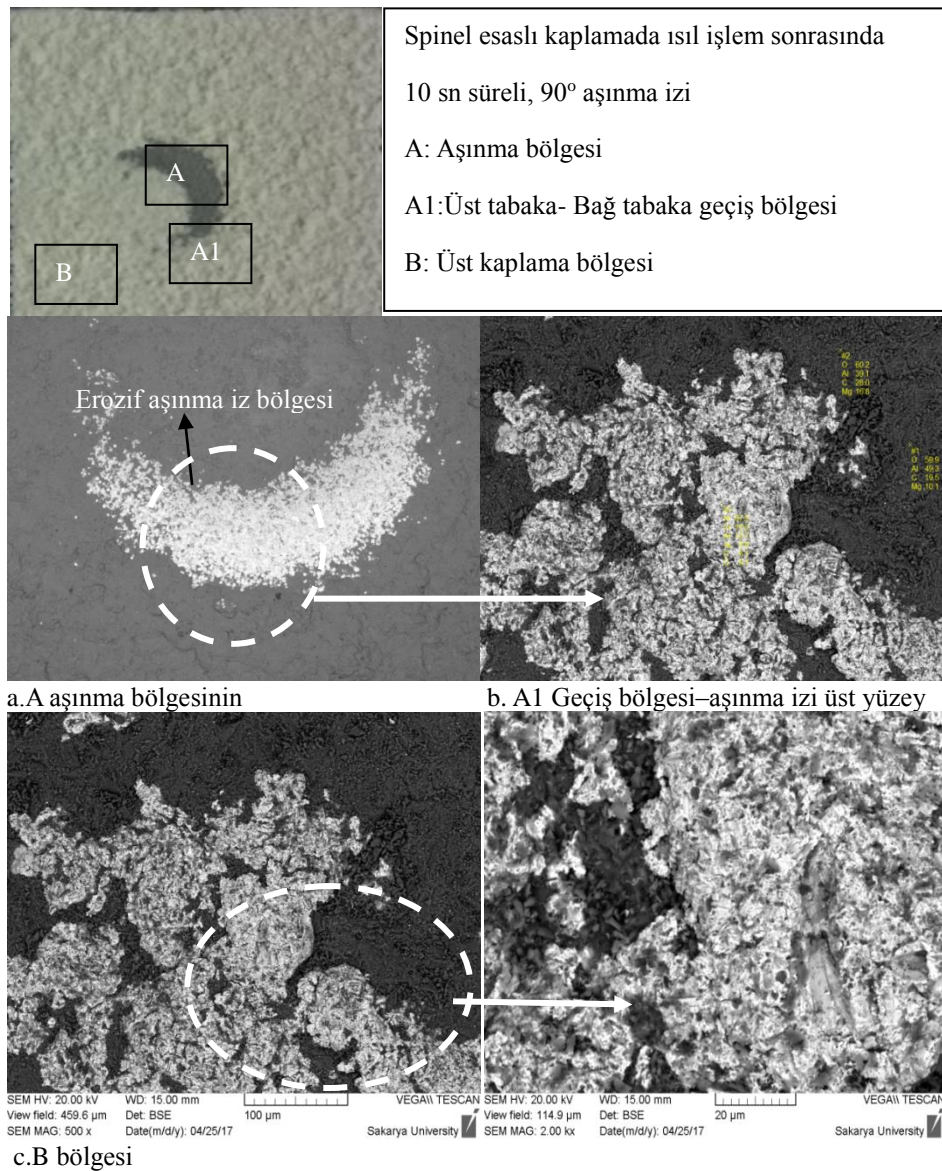
Şekil 6.12. Spinel esaslı seramik kaplamanın oda sıcaklığında 90° 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri

Şekil 6.13.'de ısıl işlem sonrasında spinel esaslı kaplama tabakasının 45°'de aşınma izi sergilenmektedir. Aşınma iz bölgesi geometrisinin daha küçük boyutlarda ve kısmen dairesel forma ulaştığı gözlenmektedir. Kaplama aşınma bölgesinde bağ tabaka ve ardından altlık yüzeyine ulaşarak aşınmanın gerçekleştiği gözlenmektedir.



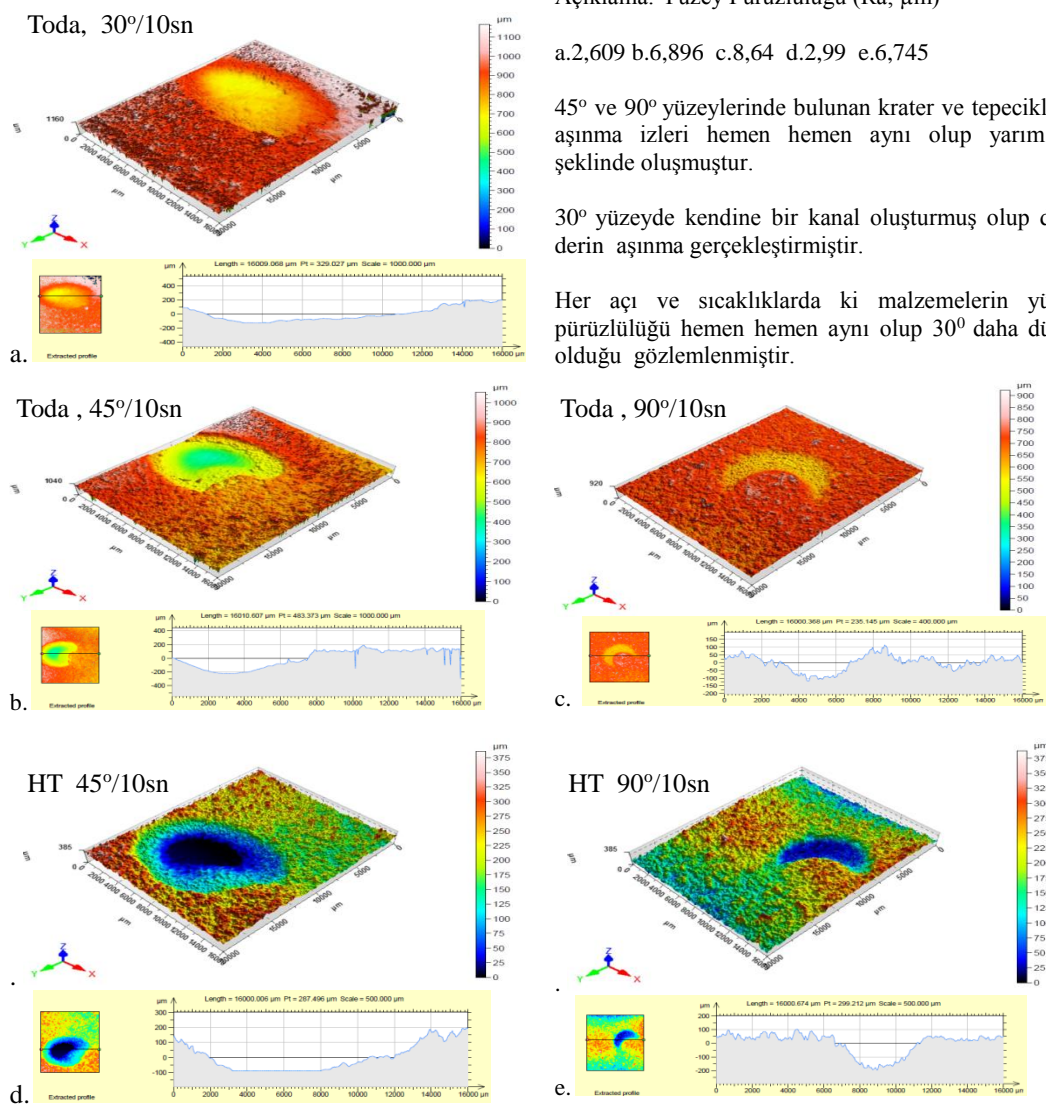
Şekil 6.13. Spinel esaslı seramik kaplamanın 700° 60 saat ısıl işlem sonrası 45° 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri

Şekil 6.14.'de ısıtıl işlem sonrasında spinel esaslı kaplama tabakasının 90°'de aşınma izi sergilenmektedir. Görüleceği üzere yarım ay formundaki iz bölgesinde daha derinleşen bir aşınma söz konusudur. Aşınma izi formu kaplamanın ısıtıl işlem sonrasında mekanik dayanım artışına bağlı olarak kısmen küçülmüştür. Kısmen aşındırıcıların aşınma izi bölgesinde gömüldüğü gözlenmiştir. Çarpma açısı arttıkça seramik esaslı malzemelerde aşınma kaybı artmakta ve iz geometrisi boyutu küçülmekte olup daha derinleşen bir aşınma söz konusudur.



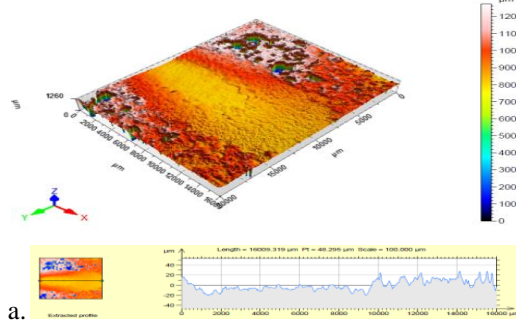
Şekil 6.14. Spinel esaslı seramik kaplamanın 700° 60 saat ısıtıl işlem sonrası 90° 10 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görünüş SEM görüntüleri

Şekil 6.15-6.17. arasında üst yüzeyden alınan görüntülerde aşınma izi profilleri sergilenmektedir. Katı partiküllerin 30°,45°,90° geliş açısında karşılaştırmalı olarak aşınma izi profilleri 3B profilometre ile ölçülmüştür. Yüzeyde gözlenen krater ve tepciklerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi açıkça görülmektedir. Düşük açılarda yüzeyden aşınma oranı büyük açılara göre daha düşük seviyelerde olup yüzey pürüzlülüğü de benzer şekilde düşük seviyededir. Açının artmasına bağlı oyuklaşma artmakta ve yüzey pürüzlülüğü de artış göstermektedir. Özellikle 90°de yapılan testlerde en fazla derinleşme gözlenmiştir.



Şekil 6.15. Alumina esaslı seramik kaplamanın katı partikül eroziv aşınma testi sonrası üst görünüş profilometre görüntüleri

Toda , 30°/10sn

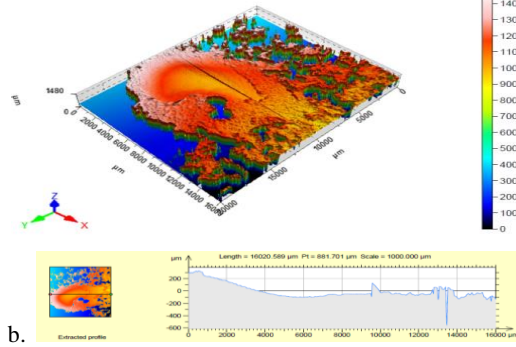


Açıklama: (Ra değerleri μm)

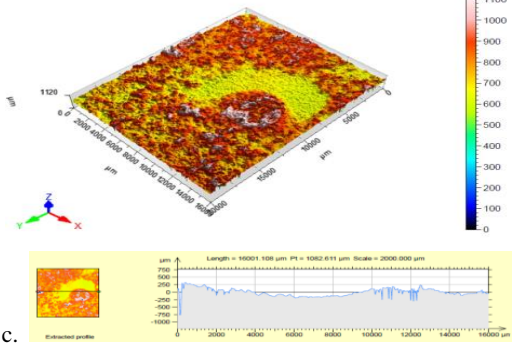
a.2,328 b.10,788 c.20,49 d.5.035 e.10,577

Isıl işlem uygulanmış malzemelerin 30°, 45° ve 90° yüzey pürüzlülükleri yaklaşık %50 oranında düşüş gözlenmiş olup ayrıca max. yüzey pürüzlülükleri Toda ve HT sıcaklıklarında 90° yüzey pürüzlülükleri %50 oranında daha fazla olduğu görülmektedir.

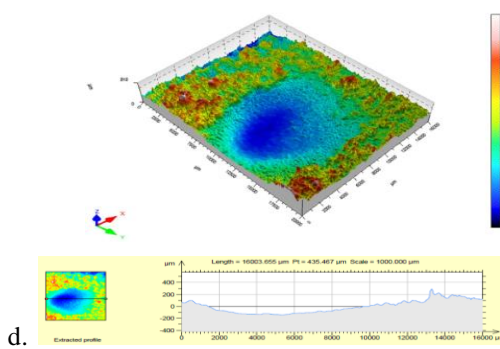
Toda , 45°/10sn



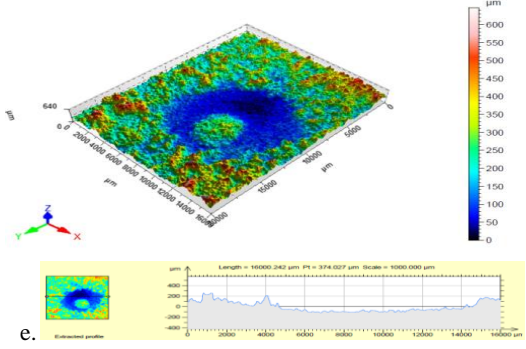
Toda , 90°/10sn



HT , 45°/10sn

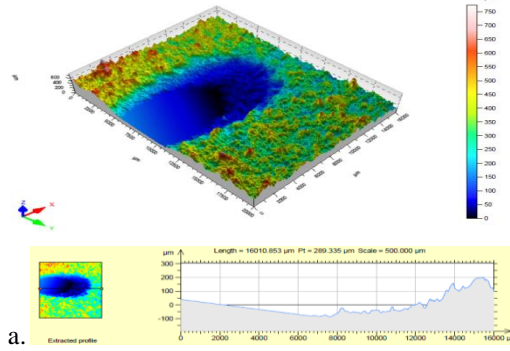


HT , 90°/10sn



Şekil 6.16. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın katı partikül eroziv aşınma testi sonrası üst görünüş profilometre görüntüleri

Toda , 30°/10sn

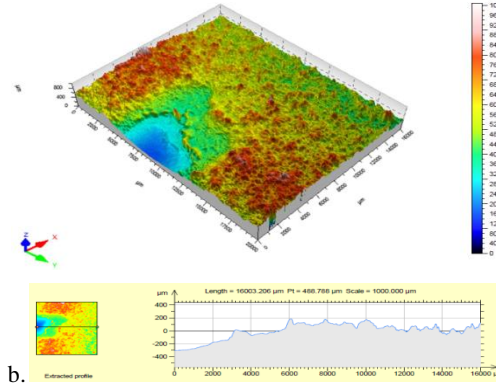


Açıklama: (Ra değerleri μm)

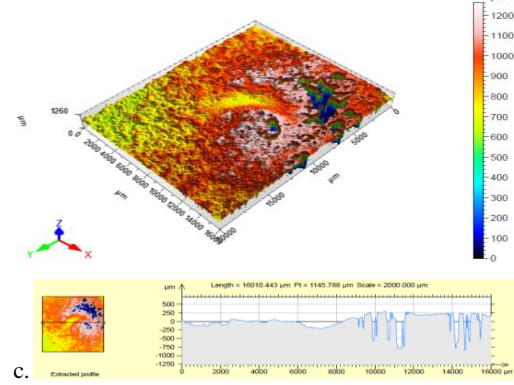
a.3,141 b.9,238 c.12,64 d.4,746 e.9,81

45° ısıt işlem uygulanmış malzemede yüzey pürüzlülüğü Toda ya göre %50 daha az olduğu, 90° oda sıcaklığında tam tersi olmuş olup HT göre yüzey pürüzlülüğü %50 daha az olduğu görülmekte olup 30° ise en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu belirlenmiştir.

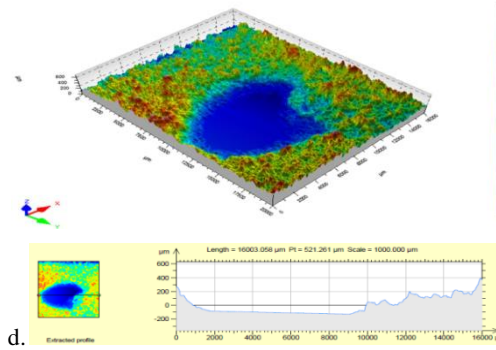
Toda , 45°/10sn



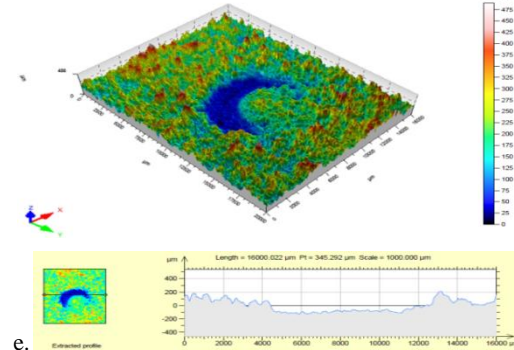
Toda , 90°/10sn



HT , 45°/10sn



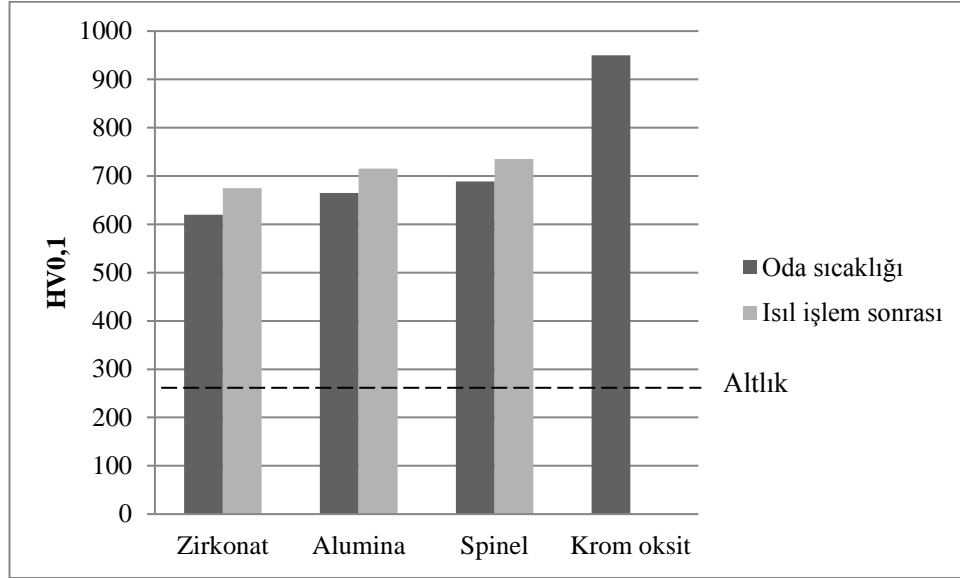
HT , 90°/10sn



Şekil 6.17. Spinel esaslı seramik kaplamanın katı partikül eroziv aşınma testi sonrası üst görünüş profilometre görüntüleri

Aşağıda Şekil 6.18.'de kaplamaların ısıt işlem öncesi ve sonrasında mikrosertlik ölçüm sonuçları sergilenmektedir. Görüleceği üzere kaplamalara uygulanan ısıt işlem kısmen mikro sertlik artışı sağlamıştır. Mikroyapısal süreksizliklerin ısıt işlem esnasında azalması kaplamanın rijtliğini artırdığı ve bunun yanında yüzey direncini iyileştirdiği düşünülmektedir. Aşınma testi sonuçları da benzer şekilde kaplamalara ısıt işlem sonrasında aşınma kayıplarının azalması yönünde bir eğilim sergilemiştir.

Altlık sertliği yaklaşık 270 ± 15 HV olup ısıtılma işlem sonrasında 225 ± 25 HV seviyesine düşmektedir. Bu durum kaplamanın altlığa yüzey direnci sağladığının bir göstergesidir.



Şekil 6.18. Kaplamaların mikro sertlik ölçüm sonuçları

Deneysel çalışmalarda toplamda $200 \mu\text{m}$ kalınlığında kaplamalar ($70\text{-}100 \mu\text{m}$ bağ tabaka $130\text{-}150 \mu\text{m}$ seramik tabaka) üzerinde yapılan test sonuçları yukarıda sergilenmiştir. Kaplama kalınlığının aşınma performansına etkin rol oynaması nedeniyle kaplama kalınlıkları 2-5 kat artırılarak daha kalın kaplamalar ($400\text{-}900 \mu\text{m}$) üzerinde aşınma testleri tekrarlanmış ve sonuçlar aşağıda sergilenmektedir.

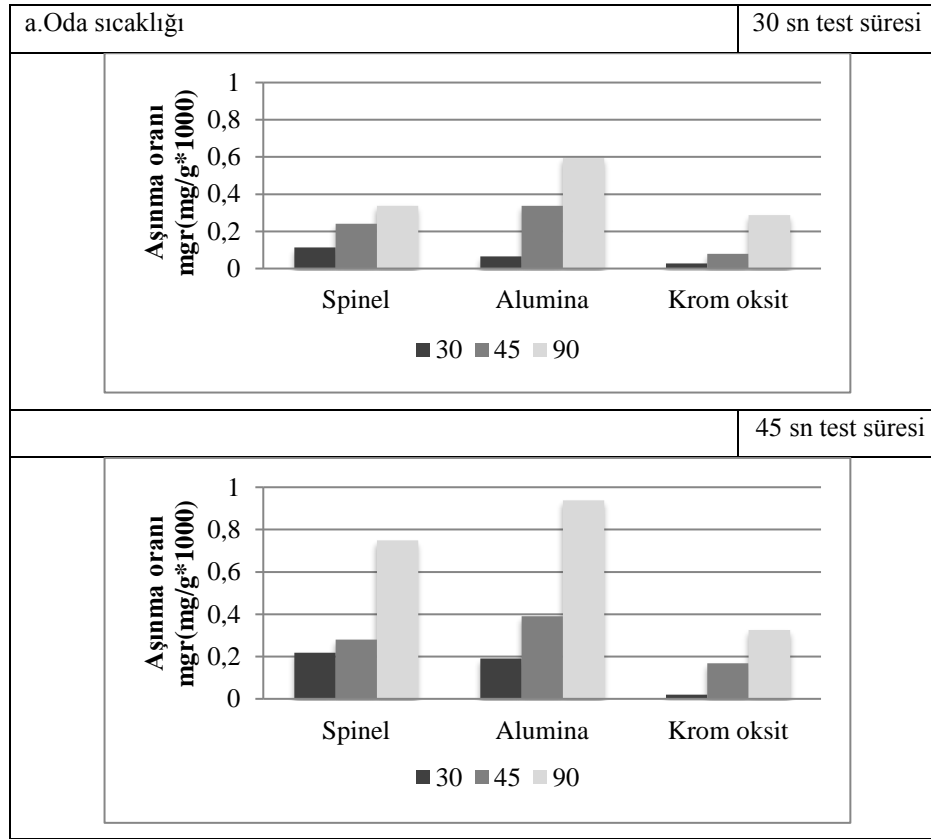
Tablo 6.7. Kalın kaplamaların aşınma testi sonrası sonuçları incelendiğinde görüleceği üzere spinel kaplamalar en düşük aşınma kaybı dolayısıyla en yüksek aşınma direnci sergilemiştir. Karşılaştırma yaptığımızda ince kaplamalara göre kalın kaplamaların ortalama %50-60 oranında daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu gözlenmiştir. Termal bariyer amaçlı kaplamalar ile aşınmaya dirençli krom oksit esaslı ince kaplamalar ile karşılaştırıldığında birbirine yakın sonuçlar gözlenmiştir.

Tablo 6.7. Kalın kaplamaların aşınma sonrası kütle kayıp sonuçları

Numune	Aşındırıcı tipi mesh	Süre sn	Açı	m1 (gr)	m2 (gr)	Δm (gr)	Erozyon oranı mg (mg/g x1000)
S Spinel		30	30°	26,9792	26,9747	0,00454	0,113625
		45		26,8172	26,7998	0,01749	0,218625
		30	45°	20,0599	20,0503	0,00961	0,24025
		45		19,8485	19,8261	0,02242	0,28025
		30	90°	22,8408	22,8395	0,00135	0,3375
		45		23,1101	23,0502	0,05996	0,7495
A Alumina	Alumina 400 mesh	30	30°	22,7906	22,788	0,00262	0,06555
		45		23,8931	23,8855	0,00766	0,1915
		30	45°	24,903	24,8895	0,0135	0,3375
		45		23,7603	23,729	0,0313	0,39125
		30	90°	25,0045	24,957	0,04755	0,594375
		45		22,8095	22,802	0,0075	0,9375
C Kromya		30	30°	19,3973	19,3951	0,00222	0,02775
		45		19,4078	19,4062	0,0016	0,02
		30	45°	23,6315	23,6253	0,00628	0,0785
		45		19,1949	19,1815	0,01348	0,1685
		30	90°	19,0895	19,0665	0,023	0,2875
		45		23,5213	23,4954	0,02598	0,32475

Şekil 6.19. kalın kaplamaların daha uzun aşınma sürelerinde performansları karşılaştırmalı olarak sunulmakta olup farklı açılarda yüzeye püskürtülen aşındırıcıların yüzeyde katı partikül erozif aşınmaya etkileri benzer bir eğilimde aşınma kaybına yola açtığı gözlenmiştir. Çarpma açısının artışı ile aşınma kaybının arttığı anlaşılmaktadır. Seramik kaplama tabakası gevrek bir davranış sergilemesi nedeniyle yüksek açılarda daha fazla aşınmaktadır. Artan süre ile birlikte aşınma hızı






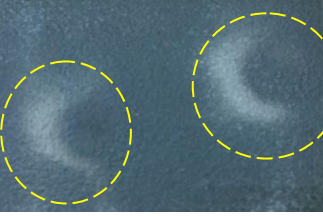
artmıştır. Kaplama kalınlığının homojenliği ve bağ tabaka kalınlığı aşınma performansına etki etmektedir.



Şekil 6.19. Kalın kaplamaların karşılaştırmalı aşınma oranı grafikleri

Şekil 6.20. aşınma testi sonrasında aşınma izleri sergilenmektedir. Görüleceği üzere düşük açılarda eliptik bir aşınma izi formu gözlenirken yüksek açılarda aşınma kaybına ve aşınma süresine bağlı olarak yarım ay veya tam dairesel formda aşınma izleri oluşmaktadır. Kaplama kalınlığının artışı aşınma kaybının azalmasında etkin bir rol oynamıştır. Krom oksit tabakası hem spinel hem de alumina esaslı kalın kaplamalara nazaran yüksek bir aşınma direnci sergilemektedir. Literatür [42] çalışmalarında da plazma sprey ile üretilen krom oksit tabakası altlığa göre üstün bir performans sağlamaktadır. Bu çalışmada da krom oksit tabakası ile spinel kaplamalar oldukça tatmin edici sonuçlar sergilemiştir. Krom oksit tabakası (max. çalışma sıcaklığı 550°C) yüksek sıcaklıklarda tercih edilmemesi nedeniyle termal bariyer kaplama olarak kullanılmamaktadır. Genel olarak yüksek sertlik özellikleri ve

korozyona direnci nedeniyle korozif ve aşınma direnci gerektiren endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Açı	30°		90°	
Süre	45 sn	30 sn	45 sn	30 sn
Spinel (kalın)				
Alumina (kalın)				
Kromya (ince)				

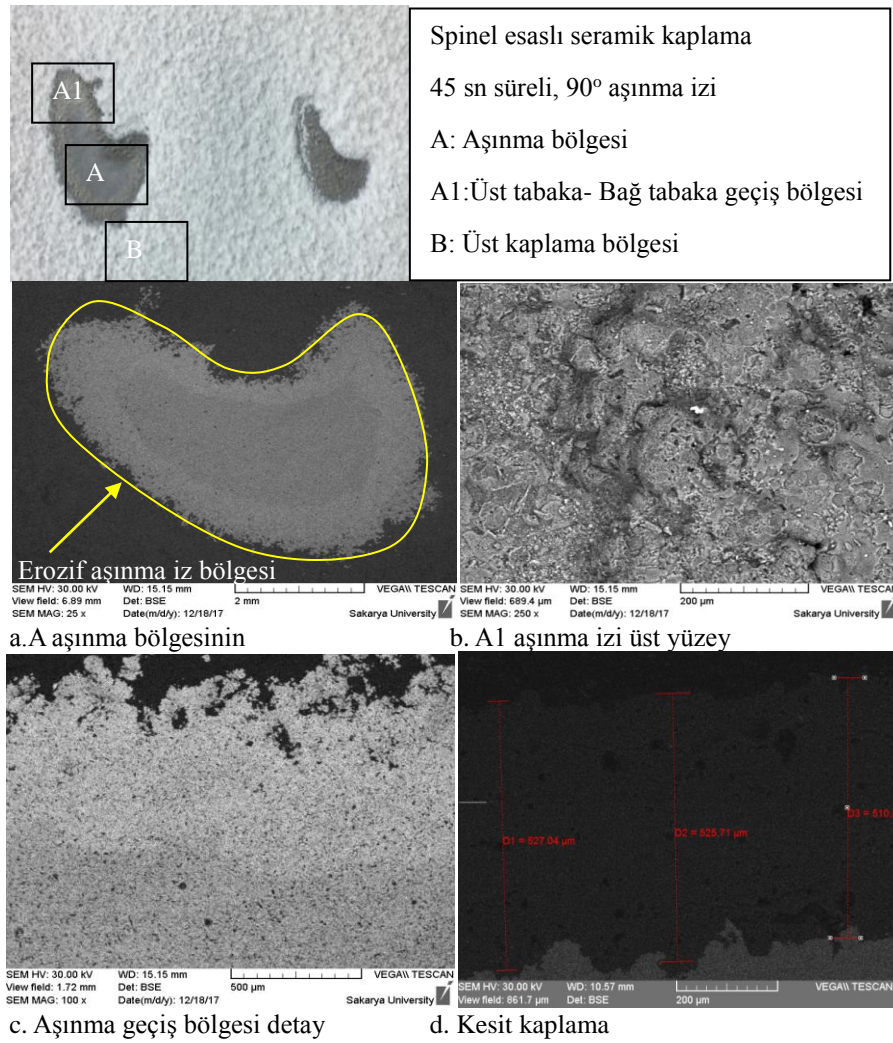
Şekil 6.20. Daha yüksek kalınlıklarda üretilmiş seramik kaplamaların katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst görüşleri

Katı partikül erozif aşınma testlerinde oksit esaslı kaplama tabakalarının aşınma mekanizması genel olarak değerlendirildiğinde kaplamanın kesiti boyunca mevcut süreksizlikler, kaplama kalınlığı ve kaplama kompozisyonu aşınma hızını kontrol etmektedir. Bunun yanında kaplamalarda kullanılan toz boyutları da kaplama yapısını önemli oranda etkilemektedir. İnce toz boyutuna sahip kaplamalar daha yoğun bir tabaka eldesine olanak sağlamaktadır. Daha az porozite ve süreksizlik içeren yoğun kaplamalar ile daha az aşınma oranı elde edilebilmektedir. Kaplamaların ısıl işlemi süreksizlik ve porozitenin azalmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum ısıl işlem sonrası sertlik artışını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda kaplama yapısında sinterleşme etkisi erozif aşınma direncini artırıcı bir etkiye sahiptir. Sertlik artışı ile birlikte artan yüzey direnci katı partikül erozif aşınma direncinin artışına neden olmaktadır. Bu çalışmada 700°C de çalışma şartları için

karşılaştırmalı erozif aşınma performansı gözlemlenmiştir. Artan çalışma sıcaklıklarında yüksek oranda sinterleşme, rijitliğin artması ve faz dönüşümü sonucunda erozif aşınma davranışının olumsuz etkileneceği düşünülmektedir. Kaplamaların genel aşınma mekanizması katı partikülün yüzeye çarpması ile yüzeyden parçacık koparması veya mikro çatlak oluşturması ile başlamakta sonrasında ise kopan bölgeden veya büyüyen mikro çatlaklar daha büyük makro çatlakların oluşumunu tetiklemekte ve bunun sonucunda tabakalar arasında partikül ayrılması veya kopması aşınma artışına neden olduğu düşünülmektedir. Çarpma açısı bu noktada oldukça kritik önem kazanmaktadır. Düşük açılarda yüzeyden mikron ölçekli partikül kopması ile erozif aşınma başlamakta ve aşınma izi eliptik bir formda oluşmakta ve tabaka tabaka kaplamanın ayrılmasına neden olmaktadır. Daha yüksek açılarda ise yüzeye çarpan yüksek enerjili parçacıklar ilk temas anında kısmen saçılmakta yüzeye çarpan partikül yoğunluğu ile birlikte dairesel forma yakın bir aşınma izi oluşturmakta ve bir oyuklaşma başlatmaktadır. Bu oyuklaşma daha fazla aşınma kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle seramik esaslı sert ve gevrek tabakalarda tipik bir şekilde yüksek açılarda daha fazla aşınma gözlenmektedir. Aşınma süresi artışı kaplama tabakası üzerinde aşınma mekanizmasında ve aşınma izi formu oluşumunda etkindir. Sürenin artışı her şekilde aşınma hızını artırmaktadır. Kaplama tabakası kalınlığının artışı kaplamanın erozif aşınma direncini artırmaktadır. Literatür [43] çalışmalarında da artan kaplama kalınlığının ve lamel sayısının kaplamanın basma dayanımını artırdığı ve yüzeye temas eden katı partiküllere karşı direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum kaplamanın aşınma performansının artmasına yol açmaktadır. Kaplama kalınlıklarının hassas kontrolü ve homojen, yoğun bir yapıda kaplama elde edilmesi kaplamanın performansını önemli derecede artırması beklenmektedir.

Şekil 6.21.'de Daha yüksek kalınlıkta üretilmiş yaklaşık 520 µm civarındaki seramik esaslı spinel kaplama tabakasının oda sıcaklığında 90° de 30 sn aşınma testi sonrası üst yüzey mikroskobik aşınma izi incelenmiştir. Kısmen yarım ay forma yaklaşan bir aşınma izi gözlenmektedir olup 90° de 45 sn aşınma testi sonrası kısmen 30 sn sonrası aşınma izi benzer geometriye sahip olup daha derin bir oyuklaşma gözlenmektedir. Kaplama kalınlığının 260 µm 20 sn 90° de aşınma oranı 0,5175

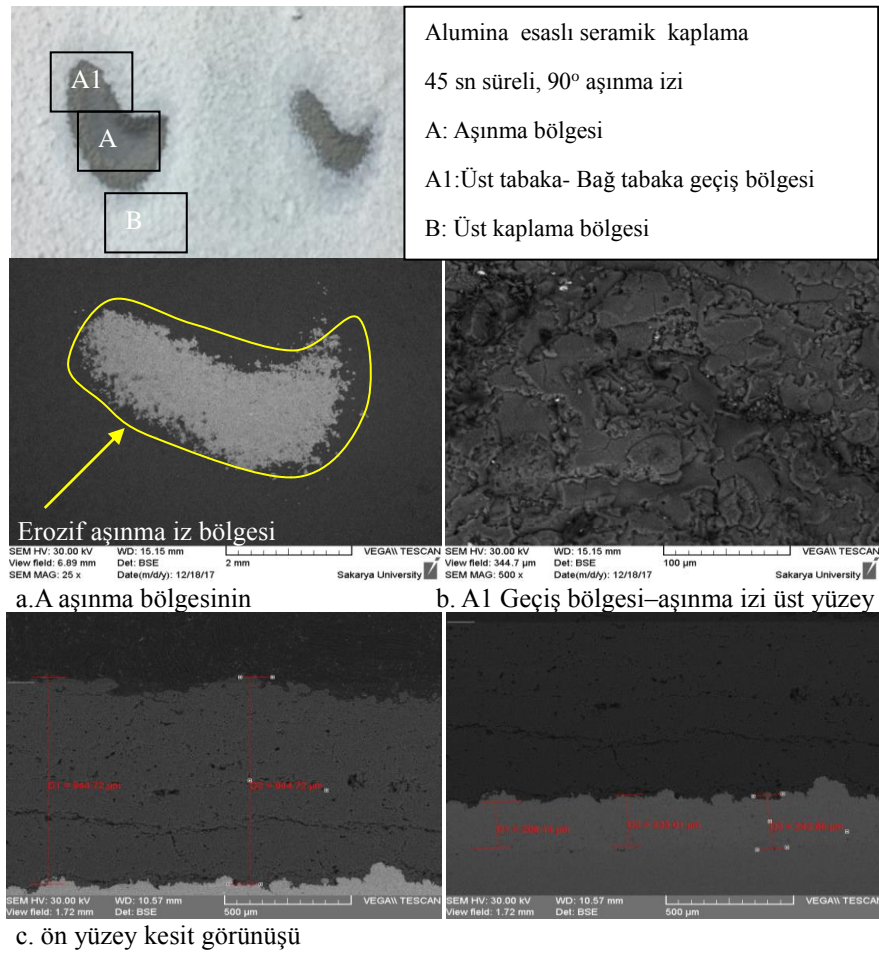
mg/g iken 520 μm kalınlığında 45sn 90°'de ise aşınma oranı 0,7495 mg/g ölçülmüş olup kalın kaplama erozif aşınma testi 45 sn süresini 20 sn test süresine çevrildiği takdirde erozif aşınma oranı 0,3331 mg/g ölçülmüştür. Bu veriler doğrultusunda kaplama kalınlıklarının yaklaşık 2 kat artması aşınma oranlarının yarı yarıya düşüş olduğu gözlenmekte olup kaplamanın kalınlık artışı ile aşınma oranının düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 6.21. Daha yüksek kalınlıkta üretilmiş spinel esaslı seramik kaplamanın 90° katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüş SEM görüntüleri

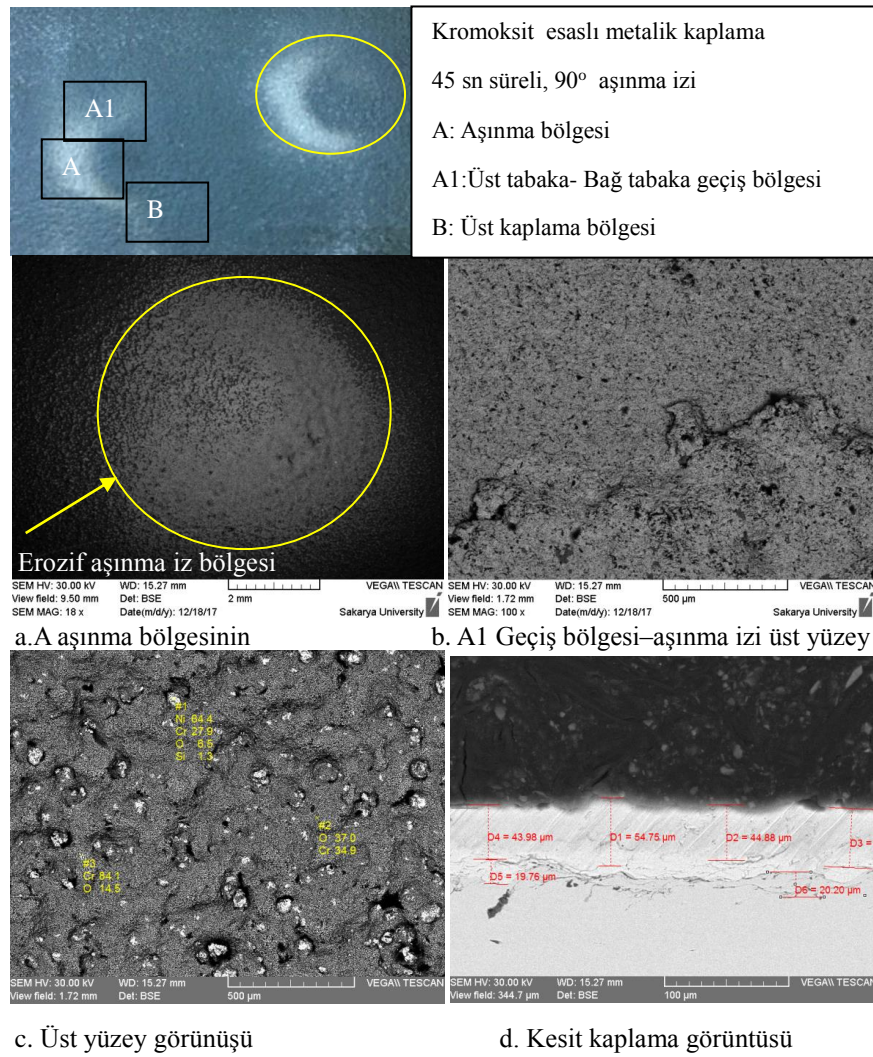
Şekil 6.22.'de Daha yüksek kalınlıkta üretilmiş yaklaşık 1200 μm civarındaki seramik esaslı alumina kaplama tabakasının oda sıcaklığında 90°'de 30 sn aşınma testi sonrası üst yüzey mikroskobik aşınma izi incelenmiştir. Seramik esaslı spinel

kaplama ile aşınma izi benzer geometriye sahip olup daha derin bir oyuklaşma gözlenmektedir. Aşınma mekanizması splat tabakalarının çarpma etkisiyle ilk çatlak oluşumu ve yüzeyden kaplama tabakasının ayrılması şeklinde olup sonrasında aşındırıcı partiküllerin zamana bağlı olarak bağ tabakaya ve devamında yarım ay şeklinde altlık yüzeyine nüfuz ederek aşınma oluşumu gerçekleşmektedir. Kaplama kalınlığının 200 μm 20 sn 90°'de aşınma oranı 0,798 mg/g iken, 1200 μm kalınlığında 45 sn 90°'de ise aşınma oranı 0,9375 mg/g ölçülmüştür. Kalın kaplamanın 45 sn erozif aşınma test süresini, ince kaplama 20 sn erozif aşınma test süresine çevrildiği takdirde erozif aşınma oranınının 0,4166 mg/g ölçülmüş ve yaklaşık kalınlığın 6 kat artırılması erozif aşınma direncini 2 kat arttırmıştır.



Şekil 6.22. Daha yüksek kalınlıkta üretilmiş alumina esaslı seramik kaplamanın 90° katı partikül erozif aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüş SEM görüntüleri

Şekil 6.23.'de 70 µm civarında üretilen seramik esaslı kromoksit kaplama tabakasının oda sıcaklığında 90° 30 sn aşınma testi sonrası üst yüzey mikroskopik aşınma izi incelenmiştir. Aşınma izini incelendiğinde 90° aşınma izi formu yarım ay şeklinde merkeze doğru daha derin bir aşınma olduğu gözlenmiştir. Kromoksit kaplamanın gerek yüzeydeki düşük porozite oranına sahip olması gerek ise kaplamanın homojen olması aşınma oranlarını spinel, alumina ve zirkonat ile kıyasladığımızda daha iyi bir direnç gösterdiği irdelenmiştir.



Şekil 6.23. Kromoksit esaslı seramik kaplamanın 90° katı partikül eroziv aşınma testi sonrası üst ve mikroyapı kesit görünüş SEM görüntüleri

BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 321(1.4541) östenitik paslanmaz çelik altlık malzeme üzerine farklı kompozisyonlarda ve farklı kalınlıklarda oksit esaslı seramik kaplamalar termal sprej (fleksi kord alev sprej) kaplama teknolojisi ile altlık yüzeyinde biriktirilmiştir. Kaplamalar iki katmandan oluşmakta olup altlık ile seramik tabakanın daha iyi bir yapışma sağlaması için öncelikle bir bağ tabaka (NiCr esaslı) uygulanmıştır. Sonrasında uygun proses parametreleri ile oksit esaslı kaplamalar yüzeyde belirli kalınlıklarda biriktirilmiştir. Tüm kaplamalar fleksikord alev sprej (oksijen/ asetilen) tabancası kullanılarak üretilmiştir. Polimerik kılıf (Ø4,75mm) içerisinde sıkıştırılmış toz partiküller belirli bir besleme hızında oluşturulan alev jetine beslenmiştir. Püskürtme esnasında polimerin hızla buharlaşması ile eşzamanlı olarak toz partiküllerin homojen bir şekilde eritilmesi ve yüksek hızda püskürtülerek yüzeyde tutunması sağlanmıştır. Bu proses termal sprej kaplama ailesinde plazma sprej prosesi ile hvof prosesi arasında bir kaplama kalitesine sahip olup, mevcut yöntemlere alternatif ekonomik bir teknolojiye sahip yeni bir termal sprej tabancası yardımı ile kaplamalar üretilebilmektedir. Geleneksel toz, tel ve çubuk alev sprej kaplamalara göre daha yüksek püskürtme hızlarına ve eritme kabiliyetine sahiptir. Bu tez çalışması kapsamında oksit esaslı kaplamalar başarılı bir şekilde paslanmaz çelik altlık yüzeyinde arzulanan kalınlıklarda biriktirebilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan oksit seramikler: magnezyum zirkonat:(Zr₂O₃-MgO-Al₂O₃), spinel (Al₂O₃-MgO), alümina (Al₂O₃) ve krom oksit (Cr₂O₃) olup, kaplama işlemi farklı kalınlıklarda (100-500µm) optimum sprej parametreleri ile manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi sonrasında numunelere 700⁰ C de 60 saat ısıtım uygulanmıştır. Kaplamaların ısıtım sonrası katı paritkül erozif aşınma davranışı oda sıcaklığı sonuçları ile karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Aşınma testleri ASTM G76 standardına bağlı olarak farklı açılarda (30° ,45° ,90°) ve

farklı sürelerde (10-45sn) katı partikül aşınma testleri hem ısılsız işlemli hemde ısılsız işlemli numunelere uygulanmıştır. Aşınma testleri sonrasında numunelerin üst yüzey aşınma izi görüntüleri stereo mikroskop (SM) ve elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Ardından yüzey profilometresi ile yüzey topografisi ve yüzey pürüzlülükleri çıkarılmıştır. Aşınma kaybı hesaplamaları ile karşılaştırmalı olarak aşınma performansları değerlendirilmiş, aşınmaya etki eden faktörler gözlemlenmiştir. Mikrosertlik ölçümleri ile kaplamaların ısılsız işlem sonrasında sertlik değişimleri gözlenmiştir. Elde edilen veriler ve gerçekleştirilen testler sonrasında bulgular literatürde yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu gözlenmiş olup, sonuçlar detaylı bir şekilde aşağıda irdelenmiştir:

Deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama standard ortalama kalınlıklarda (100-250µm) aşınma testlerini içermektedir. Bu aşamada altlık ile aşınma performansları karşılaştırılmıştır. Sonraki aşamada ise kalınlığın aşınma direncine etkisini tespit etmek amacıyla kaplama kalınlıkları (250-750µm) artırılmıştır. Bu aşamada ise aşınmaya yüksek direnç gösteren 100 µm kalınlığında krom oksit tabakası ile karşılaştırma yapılmıştır. Aşağıda deneysel çalışmalar sonucunda katı partikül aşınma test sonuçları her kaplama için ayrı ayrı ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmekte ve tez çalışması kapsamında elde edilen genel sonuçlar sunulmaktadır:

1. 321 kalite (X6CrNiTi18-10) altlık paslanmaz çelik malzemenin erozif aşınma performansı deneysel çalışmalarda referans alınmıştır. Yaygın olarak kullanılan (kimya ve petrokimya tesislerinde, süper ısıtıcılarda, kazan ve borularda vb.) bu alaşımın yüksek sıcaklıklarda aşınma ortamında dayanımını artırmak amaçlanmıştır. ASTM G76 standardına bağlı olarak gerçekleştirilen testlerde aşınma süresinin artışı ile birlikte aşınma (kütle) kaybının arttığı gözlenmiştir. Aşındırıcı partiküllerin yüzeye çarpma açısının da aşınma da etkin bir rol oynadığı tespit edilmiş, küçük açılarda (30-45°) aşınma kaybı fazlayken yüksek açılarda (45°< ve 90°) aşınma kaybı azalmıştır. Bu durum tipik metalik yüzeylerde aşınma davranışını ortaya koymaktadır. Metalik karakterde olan altlığın sünek davranışı aşınma mekanizmasını

belirlemektedir. Bu bağlamda aşındırıcı partiküllere yüzeyde öncelikle mikro deformasyon oluşturmakta ve sonrasında artan süre ile birlikte mikrokesme etkisi ile aşınma hızını artırmaktadır. Isıl işlem sonrasında altlık erozif aşınma performansının azaldığı gözlenmiştir. Altlıktan alınan sertlik ölçümlerinde alaşımın ısıl işlem sonrasında sertliğinde düşüş gözlenmiştir. Benzer şekilde artan sürelerde aşınma kaybı artışı devam etmiştir. 700°C gibi yüksek bir sıcaklıkta kaplamasız halde bu çeliğin erozif aşınmaya maruz kalması halinde kullanım ömrü sınırlanmaktadır. Isıl işlem sonrası %5 oranında aşınma hızı artış göstermiştir. Aşınma izleri gözlendiğinde düşük açılarda eliptik formda aşınma izi yüksek açılarda dairesel forma dönüşmektedir. 90° test sonrası oluşan aşınma izi daha küçük boyutlarda yüzeyde bir oyuklaşma göstermiştir.

2. Seramik esaslı oksit kaplamalar üzerinde katı partikül erozif aşınma testlerinde artan test süresine bağlı olarak aşınma kaybı artmıştır. Sert katı parçacıkların (Alümina aşındırıcı) yüzeye çarpma açısı değişimi aşınma hızını değiştirmiştir. Bu bağlamda altlığa göre daha sert ve gevrek olan üst kaplama tabakası düşük açılarda düşük aşınma gösterirken yüksek açılarda aşınma kaybı artmıştır. Bu sonuçlar literatür verileri ile uyum göstermektedir. Seramik tabakanın erozif aşınması sonrasında sırasıyla bağ tabakaya ve altlığa ulaşılmıştır. Kaplamanın aşınma mekanizmasında aşındırıcının çarpması ile birlikte kaplama yüzeyinde mikro çatlak oluşumu, mikro çatlak ağının artması, splat lamellerinin ayrılması ve kırılmalar ile yüzeyden parçacıkların ayrılması sonucunda aşınma hızlanmaktadır. Bu noktada kaplamanın kalınlığı, kaplama yapısında porozite ve mikro çatlaklar aşınma performansında etkili rol oynadığı tespit edilmiştir.
3. Magnezyum-Zirkonat esaslı seramik kaplama yüksek sıcaklığa dirençli oksit kaplama ailesindedir. Genel olarak termal bariyer kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır. Kaplamanın oda sıcaklığında ve ısıl işlem sonrasında 10, 20 ve 30 sn katı partikül erozif aşınma testi sonrası aşınma oranları karşılaştırıldığında ise düşük sıcaklıklarda kaplama üzerinde en yüksek aşınma oranı kaybı 1,2245 mg/g ölçülmüştür (20 sn-90°). En düşük aşınma

oranı kaybı ise oda sıcaklığı koşullarında 0,28 mg/g ölçülmüştür (10 sn- 30⁰) . Isıl işlem sonrası kaplamanın aşınma kaybında kısmen azalma görülmektedir. Kaplama yapısında sinterleşme etkisi ile porozite azalması kaplamanın sertlik artışına ve yüzey direncinin iyileşmesine katkı sağlamıştır. Bu durum aşınma direncini artırmıştır. Isıl işlemler halinde kaplamalar %10 oranında daha fazla direnç sağlamıştır. Isıl işlem görmüş altlık ile karşılaştırdığımızda altlığın 1,4237 mg/g (20 sn-30⁰) aşınma kaybına karşılık ısıl işlemlerle zirkonat esaslı kaplamada aşınma kaybı oranı 0,962 mg/g ölçülmüştür (20 sn-90⁰). Görüleceği üzere altlığa göre kaplamanın %35-40 oranında daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu görülmektedir.

4. Alümina esaslı seramik kaplamalar hem yüksek sıcaklık uygulamalarında hemde aşınma direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilen kaplamalardır. Fleksi kord alev sprey prosesi ile üretilen kaplamalar hem oda sıcaklığında hemde yüksek sıcaklıklarda ısıl işlem sonrasında farklı süre ve açılarda katı partikül erozif aşınma testine tabi tutulmuş ve aşınma oranları karşılaştırılmıştır. Oda sıcaklığında kaplama üzerinde de erozif aşınma testlerinde en yüksek aşınma kaybı 0,798 mg/g ölçülmüştür (20 sn- 90⁰) . En düşük aşınma kaybı ise oda sıcaklığı koşullarında 0,0945 mg/g ölçülmüştür (10 sn-30⁰). Kaplama malzemesi ısıl işlem sonrasında yüzey direncini arttırmış olup her açı ve test süresi için karşılaştırma yapıldığında yaklaşık olarak aşınma performansında %5-10 oranında artış gözlenmiştir. Isıl işlem görmüş altlık ile karşılaştırıldığında 1,4237mg/g (20 sn 30⁰) aşınma kaybına karşılık ısıl işlemlerle alümina esaslı kaplamada aşınma kaybı oranı en yüksek 0,7325 mg/g ölçülmüştür (20 sn 90⁰). Görüleceği üzere altlığa göre kaplamanın %50-55 oranında daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu görülmektedir.
5. Spinel esaslı seramik kaplamalar hem termal bariyer amaçlı hemde aşınma direnci gerektiren endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Kaplama kompozisyonunda alüminyum oksit yanında magnezyum oksit içeriği bulunmaktadır. Diğer seramik kaplamalarda olduğu gibi artan süre ile aşınma

oranı artmış, yüksek açılarda en yüksek aşınma kaybı gözlenmiştir. Oda sıcaklığında kaplama üzerinde erozif aşınma testlerinde en yüksek aşınma kaybı 0,5175 mg/g ölçülmüştür (20 sn-90⁰). En düşük aşınma kaybı ise oda sıcaklığı koşulunda 0,1127 mg/g ölçülmüştür (10 sn 30⁰). Isıl işlem görmüş altlık ile karşılaştırıldığında 1,4237mg/g (20 sn 30⁰) aşınma kaybına karşılık ısıl işlemlili spinel esaslı kaplamada aşınma kaybı oranı en yüksek 0,485 mg/g ölçülmüştür (20 sn 90⁰). Görüleceği üzere altlığa göre kaplamanın %60-65 oranında daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu görülmektedir. Isıl işlem sonrasında benzer şekilde artan sertlik ile aşınma direncinde de iyileşme gözlenmiştir.

6. Standard kaplama kalınlıklarında (150-300 μm) yapılan aşınma testleri arasında en yüksek aşınma direnci spinel esaslı kaplamalarda sonrasında alümina ve zirkonat esaslı kaplamalardadır. Isıl işlem sonrasında da bu sıralama aynı şekilde devam etmiştir. 700°Cde 60 saat ısıl işlem sonrasında faz dönüşümü gerçekleşmemektedir. Aşınma mekanizması yüzeye çarpan sert parçacıkların yüzeyde mikro çatlak oluşumu ile birlikte yüzeyden parçacık koparması sonrasında mikro çatlak ağının gelişmesi ile devam eden aşınma kraterinin oluşması ve büyümesi sürecini ortaya koymuştur. Gevrek kırılma ve aşınma mekanizması nedeniyle oluşan mikro çatlakların hızla gelişimi aşınmada etkin rol oynamıştır. Kaplama yapısındaki süreksizlikler ve splat kalınlıklarının aşınma performansını belirlediği gözlemlenmiştir. Splat kalınlıklarının artması ile birlikte kaplamaların aşınma performanslarının arttığı gözlenmiştir. Aşağıda daha yüksek kalınlıklarda yapılan kaplamaların test sonuçları sergilenmektedir.
7. Standard kaplamaların aşınma direncini artırmak ve kaplama kalınlığının etkisini gözlemek amacıyla kalın seramik kaplamalar (550-1200 μm) üzerinde katı partikül erozif aşınma testleri tekrarlanmıştır. Kaplama kalınlıkları 2-4 kat oranında artırılmıştır. Kalın alümina ve spinel kaplamalar ile ince (<100 μm) kromoksit kaplama tabakası karşılaştırılmıştır. Özellikle oksit kaplamalar arasında kromoksit en yüksek sertliğe ve aşınma direncine

sahip kaplamalar arasındadır. Bu bağlamda yapılan testlerde kromoksit tabakasını referans alarak testler sürdürülmüştür. Test süreleri artırılarak (45 sn) kaplama performansı izlenmiştir. Elde edilen test sonuçlarında krom oksit üstün bir performans göstermiştir. Sertlik testi sonuçlarında (kaplama sertlikleri (600-740HV arasındadır) ısıtılma sonrasında kaplamaların sertliklerinde %10-15 oranında artış gözlenmiştir. Bu artışa rağmen elde edilen sertlikler 1000 HV'nin altındadır. Krom oksit kaplama en yüksek sertlik (950±25 HV) değerine sahiptir. Altlık sertliği 300 HV 'in altında olup kaplama sonucunda aşınma direncinin arttığı gözlenmiştir.

8. Yaklaşık 1200±20 µm kalınlığındaki alümina esaslı kalın seramik kaplamanın en yüksek aşınma oranı 0,9375 mg/g (45 sn, 90°)'dir. Bu değer yaklaşık 200 µm ince kaplanmış alümina için en yüksek aşınma oranı 0.798 mg/g ölçülmüştür (20 sn 90°). Kalın kaplamanın 45sn erozif aşınma test süresini, ince kaplama 20 sn erozif aşınma test süresine çevrildiği takdirde erozif aşınma oranının 0,4166 mg/g olmuştur. Yaklaşık kalınlığın 6 kat artırılması erozif aşınma direncini 2 kat arttırmış olup kaplama kalınlıklarının artışı kaplamaların uzun süreli (45sn) katı partikül erozif aşınma performansını artırmıştır.
9. Yaklaşık 550±25 µm kalınlığındaki spinel esaslı kalın seramik kaplamanın en yüksek aşınma oranı 0,7495 mg/g (45 sn 90°)'dir. Bu değer yaklaşık 250 µm ince kaplanmış spinel için en yüksek aşınma oranı 0.5175 mg/g ölçülmüştür (20 sn 90°). Kalın kaplamanın 45sn erozif aşınma test süresini, ince kaplama 20 sn erozif aşınma test süresine çevrildiği takdirde erozif aşınma oranının 0,3331 mg/g olmuştur. Yaklaşık kalınlığın 2 kat artırılması erozif aşınma direncini 2 kat arttırmış olup kaplama kalınlıklarının artışı kaplamaların uzun süreli (45 sn) katı partikül erozif aşınma performansını artırmıştır.
10. Yüzey pürüzlülükleri (Ra, Rz) değerleri incelendiğinde zirkonat esaslı kaplamanın spinel, alumina ve kromoksit esaslı kaplamalara göre yüzey pürüzlülüğü daha fazla olduğu bu durumun zirkonat esaslı kaplamanın gerek

heterojen mikroyapısal özellikleri gerekse kaba toz boyut ve morfolojisi nedeniyle aşındırıcı partiküller ile etkileşimi sonucunda yüzeyden parçacık ayrılması ve kaplama üst yüzeyinde aşınma izinin derinleşmesi daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu durum tipik seramik esaslı malzemelerde aşındırıcı partikülün yüzeye çarpma açısı ve sürerinin artışına bağlı olarak aşınma direncinin azalmasıyla uyumlu bir ilişki göstermektedir.

11. Alümina esaslı seramik kaplamanın profilometre görüntüleri incelendiğinde en yüksek yüzey pürüzlülüğü oda sıcaklığında Ra: 8,64 μm ve Rz: 29.783 μm (10 sn 90°) ve en düşük yüzey pürüzlülüğü 2,609 μm ölçülmüştür (10 sn 30°). Isıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüğü Ra: 6,745 μm ve Rz: 30.228 μm 90° değerlerinde olup ısıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüklerinde düşüş gözlenmiştir.
12. Zirkonat esaslı seramik kaplamanın profilometre görüntüleri incelendiğinde en yüksek yüzey pürüzlülüğü oda sıcaklığında Ra:20,49 μm ve Rz: 115.809 μm (10 sn 90°) ve en düşük yüzey pürüzlülüğü Ra:2,328 μm ölçülmüştür (10 sn 30°). Isıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüğü Ra: 10,577 μm ve Rz:50.682 μm 90° değerlerinde olup ısıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüklerinde benzer şekilde düşüş gözlenmiştir.
13. Spinel esaslı seramik kaplamanın aşınma sonrası profilometre görüntüleri incelendiğinde en yüksek yüzey pürüzlülüğü oda sıcaklığında Ra: 12,64 μm ve Rz:297.796 μm (10 sn 90°) ve en düşük yüzey pürüzlülüğü Ra:3,141 μm ölçülmüştür (10 sn 30°). Yüzey pürüzlülükleri oda sıcaklığı sırasıyla 700° 60 saat ısıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüğü Ra:9,81 μm ve Rz:40.318 μm 90° değerlerinde olup ısıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüklerinde %40-50 oranında düşüş gözlenmiştir.
14. 90° çarpma açısında maksimum katı partikül erozyon oranı ortaya çıkmış olup çarpma açısının artışı ile erozyon oranı artma eğilimi göstermiştir. Bu durum ise literatürde tipik seramik esaslı gevrek davranış gösteren kaplamaların

aşındırıcı partikülün yüzeye çarpma açısının artışına bağlı olarak aşınma oranı artmasıyla uyumlu bir ilişki göstermektedir. Isıl işlem sonrasında ortalama %5-10 arasında erozif aşınma oranında düşüş görülmüştür.

15. Sonuç olarak termal spreyci kaplama teknolojisi ile üretilen seramik kaplamalar ile altlığın aşınma performansı hem oda sıcaklığı koşullarında hemde ısıl işlem sonrasında önemli oranda artırılabilirdiği tespit edilmiştir. Yüksek korozyon direncine sahip 321 kalite paslanmaz çeliklere krom oksit esaslı kaplama uygulanması halinde katı partikül erozif aşınma direncinin artırılabilirdiği tespit edilmiştir.

Gelecek çalışmalar kapsamında önerilerimiz: Kaplamaların tekrarlanabilir kalite üretimi için robotik olarak uygulanması önerilmektedir. Bu sayede kaplama kalınlığı daha homojen bir şekilde elde edilebilecektir. Kaplama esnasında püskürtülen partikül hızlarının ölçülmesi proses parametrelerinin optimizasyon çalışmalarına katkı sağlayacaktır. Tezde kullanılan test çalışma aralıklarının genişletilerek testlerin tekrarlanması bu kaplamalar için kullanım alt ve üst sınırlarının belirlenmesinde yardımcı olacaktır. Test öncesinde kaplama yüzey pürüzlülüklerinin eşdeğer seviyelerde tutularak testlerin tekrarlanması önerilmektedir. Kaplamalara yapışma testi yapılması altlık yüzey pürüzlülüğüne bağlı yapışma özellikleri ile aşınma performansı ilişkisi kurulması kaplama performansının değerlendirilmesi açısından fayda sağlayacaktır. Kaplama kesiti boyunca porozite oranı ile kaplamanın aşınma kaybı ilişkisi çalışmaların daha derinlemesine bir bilgi oluşmasına katkı sağlayacaktır. Bunun yanında seramik tabakada splat kırılması ve mikro çatlak morfolojisinin daha detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Isıl işlem sıcaklık ve süresinin artırılarak kaplamaların daha uzun süreli yüksek sıcaklıklara maruz kalması halinde faz dönüşümü irdelenerek aşınma performansına etkisi incelenebilir.

Bu çalışma endüstriyel anlamda birçok paslanmaz çelik esaslı mekanik parçanın erozif aşınma koşullarında performansının ve kullanım ömrünün artırılmasına katkı sağlamış olup, kullanıcılar için gerekli karşılaştırma olanağı sağlamıştır. Bunun yanında uygun kaplama türü, ısıl işlem etkisi ve kaplama kalınlığı etkisi ile kaplama direncinin artırılabilirdiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Altuncu, E.,“YSZ ve CSZ esaslı termal bariyer kaplamaların üretimi, karakterizasyonu ve termal çevrim performanslarının karşılaştırılması”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 2011.
- [2] Davis, J.R., Introduction to thermal spray technology and surface science, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International Materials Park, 06994G, 1-14, 2004.
- [3] Hutchings, I. M., Tribology Friction and Wear of Engineering Materials, London,1992.
- [4] Kleis, I., Kulu, P., Solid Particle Erosion, Occurrence, Prediction and Control, Springer-Verlag London Limited 2008.
- [5] Juan, R., Camacho, L., Vite-Torres, M., and Gallardo-Hernández, E.A., Vera-Cárdenas E.E., Solid Particle Erosion on Different Metallic Materials; Tribology in Engineering: Chapter 5, InTech,2013.
- [6] Sundararajan, G., Roy,M., Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures, Tribology International, 339-359, 1997.
- [7] Shimizu, K., Xinba, Y., Araya, S., Solid particle erosion and mechanical properties of stainless steels at elevated temperature, 1357– 1364, 2011.
- [8] Shimizu, K., Xinba,Y., Ishida, M., Kato, T., High temperature erosion characteristics of surface treated SUS410 stainless steel, 271, 1349– 1356, 2011.
- [9] Chen, X., He, M.Y., Spitsberg, I., Fleck, N.A., Hutchinson, J.W., Evans, A.G., Mechanisms governing the high temperature erosion of thermal barrier coatings, 735–746, 2004.
- [10] Fauchais P., Vardelle A., Dussoubs, B., ‘Quo vadis thermal spraying’, J. Thermal Spray Technol., 10, 44–66, 2001.
- [11] Mellor, B.G., Surface coatings for protection against wear Woodhead Publishing, 2006.

- [12] ASM International Introduction to Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, 2001.
- [13] Pawlowski, L., Wiley, J., The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, New York, 1995.
- [14] Ružić, J., Vilotijević, M., Božić, D., Raić, K., Understanding Plasma Spraying Process and Characteristics of Dc-Arc Plasma Gun Metall. Mater.,18, 273-282, 2012.
- [15] Fauchais, P., Phys, J., Understanding plasma spraying, 86–108, 2004.
- [16] Modeling and Control of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray A Tutorial Review Mingheng Li and Panagiotis D. Christofides; Journal of Thermal Spray Technology, 753-768, 2009.
- [17] Lima, R.S., Moreau, C., Marple, B.R., HVOF-Sprayed Coatings Engineered from Mixtures of Nanostructured and Submicron Al₂O₃-TiO₂ Powders, An Enhanced Wear Performance, J. Therm. Spray Technol., 866-872, 2007.
- [18] Marple, B.R., Voyer, Bisson, J.F., Moreau, C., Thermal Spraying of Nanostructured Cermet Coatings, J. Mater. Process. Technol., 117, 418-423, 2001.
- [19] Kulu, P., Hussainova, I., Veinthal, R., Solid particle erosion of thermal sprayed coatings, 258, 488–496, 2005.
- [20] Ramanujam, N., Nakamura, T., Erosion mechanisms of thermally sprayed coatings with multiple phases, 204, 42–53, 2009.
- [21] Ramesh, M.R., Prakash, S., Nath, S.K., Sapra, P.K., Venkataraman, B., Solid particle erosion of HVOF sprayed WC-Co/NiCrFeSiB coatings, 269, 197–205, 2010.
- [22] Cernuschi, F., Guardamagna, C., Capelli, S., Lorenzoni, L., Mack, D.E., Moscatelli, A., Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings, 348-349, 43–51, 2016.
- [23] Clarke DR., Oechsner M., Padture NP. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines, 37,891–8, 2012.
- [24] Evans AG., Mumm DR., Hutchinson JW., Meier GH., Pettit FS., Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings, Prog Mater Sci, 46, 505–53, 2001.
- [25] Bousser, E., Martinu, L., Klemberg-Sapieha, J.E., Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications, Surface & Coatings Technology 257, 165–181, 2014.

- [26] Shaw, L., Jordan, E.H., Gell, M., Sohn, Y.H., Goberman, D., Jiang, S., Wang, M., Xiao, T.D., Wang, Y., Strutt, P. 'Fabrication and evaluation of plasma sprayed nanostructured alumina–titania coatings with superior properties', *Mater. Sci. Engng*, 301, 80–89, 2001.
- [27] Chena, X., Spitsberg, I., Fleck, N.A., Hutchinson, J.W., Evans Mechanisms governing the high temperature erosion of thermal barrier coatings *Wear* 256, 735–746, 2004.
- [28] Wang X., Fang M., Zhang L.C., Ding H., Liu Y.G., Huang Z., Huang S., Yang J.b Solid particle erosion of alumina ceramics at elevated temperature 139,765-769, 2013.
- [29] Chang-Jiu, L., Guan-Jun, Y., Ohmorib, A., Relationship between particle erosion and lamellar microstructure for plasma-sprayed alumina coatings 260, 1166–1172, 2006.
- [30] Janos, B.Z., Lugscheider, E*, Remer, P., Effect of thermal aging on the erosion resistance of air plasma sprayed zirconia thermal barrier coating 113, 278–285, 1999.
- [31] Kim, J.J., Kim, D.J., Cho, S.J., Materials Evaluation Center, Korea Research Institute of Standards and Science, TaeJeon 305-606, Korea 20, 427–429, 2001.
- [32] Fang, M., Liu, F., Min, X., Huang, Z., Liu, Y., Wu, X., Tang, C., Zhang, L., Peng, F., Effect of temperature on solid particle impact erosion wear mechanism of 5 mol% Ytria Stabilized Zirconia ceramics 41, 6807–6811, 2015.
- [33] Raymond P.R., Robert W., Andreas Buhr Magnesium Aluminate Spinel Raw Materials for High Performance Refractories for Steel Ladles *J.Ceram Sci. Tecb* 125-130,2014.
- [34] Wellman R.G., Nicholls, J.R., A review of the erosion of thermal barrier coatings, 40, R293–R305, 2007.
- [35] Brancoa, J.R.T., Gansert, R., Sampath, S., Christopher C.B., Herman, H., Solid Particle Erosion of Plasma Sprayed Ceramic Coatings, *Materials Research*, 147-153, 2004.
- [36] Cernuschi, F., Guardamagna, C., Capelli, S., Lorenzoni, L., Mack, D.E., Moscatelli. A., Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings, 348-349, 43–51, 2016.
- [37] Krishnamurthy, N., Murali, M.S., Venkataraman, B., Mukunda, P.G., Characterization and solid particle erosion behavior of plasma sprayed alumina and calcia-stabilized zirconia coatings on Al-6061, 274– 275, 15– 2, 2012.

- [38] Racher, R.P., McConnell, R.W., Buhr, A., Magnesium Aluminate Spinel Raw Materials for High Performance Refractories for Steel Ladles, Usa, 1505-1269, 2009.
- [39] Pokhmurska, H., Wielage, B., Lampke, T., Grund, T., Chervinska. N., Post-treatment of thermal spray coatings on magnesium, 202, 4515–4524, 2008.
- [40] Oka, Y. I., Olmogi, H., Hosokawa, T., Matsumura, M., The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact, 203, 573-579, 1997.
- [41] ASTM G76-13, Standard test method for conducting erosion test by solid particle impingement using gas jet, 2013.
- [42] Sreenivas Rao KV., Girisha KG. , Eswar S., A comparative study on solid particle erosion behavior of plasma sprayed Cr₂ O₃ coatings on 410 grade steel, Materials Science and Engineering 149, 1-5, 2016.
- [43] A Pourkamali Anaraki, J Kadkhodapour, N Kangarani Farahani, Study of solid particle impact effects and coating thickness on the erosion damage, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 228/16, 2861-2870, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Kudret GÜZEL 06/02/1991 Adapazarı doğunludur. İlk,orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamlamıştır. 2009 yılında Sakarya Teknik Lisesi Makine Bölümünden mezun olduktan sonra, 2009-2013 yılları arasında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Bölümü Öğretmenliği'nden lisans eğitimini tamamlamıştır. 2013 yılından beri 1.Ana Bakım Fabrika Müdürlüğünde gövde-kule talaşlı imalat bölümünde çalışmaktadır. 2015 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Bölümünde Lisansüstü çalışmalarına Yrd. Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU'nun danışmanlığında devam etmiştir.