



**TERMOKİMYASAL İŞLEMLE YÜZEY KATMANI OLUŞTURULMUŞ
TÜRBİN KANADI MALZEMESİNDE YAPISAL VE FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Murat KAYAALP

**YÜKSEK LİSANS
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2020

Murat KAYAALP tarafından hazırlanan “TERMOKİMYASAL İŞLEMLE YÜZEY KATMANI OLUŞTURULMUŞ TÜRBİN KANADI MALZEMESİNDE YAPISAL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan HASIRCI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Kubilay KARACİF

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hitit Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 13/01/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat KAYAALP

13/01/2020

TERMOKİMYASAL İŞLEMLE YÜZEY KATMANI OLUŞTURULMUŞ TÜRBİN
KANADI MALZEMESİNDE YAPISAL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİN

DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat KAYAALP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Termal kaplama, malzeme yüzeyine uygulanan tabaka sayesinde ana malzemeden daha iyi mekanik ve termal özelliklere sahip bir yüzey elde edilerek servis ömrünün ve verimliliğinin artırılması işlemidir. Bu işlem için çok maliyetli işlemler olan özel püskürtme teknikleri ve özel cihazlar kullanılmaktadır. Ancak, bu tez çalışmasında, sıradan termal kaplamaların aksine püskürtme cihazları ve teknikleri kullanılmadan düşük maliyetli basit bir ısıtma işlemi fırını ve kaplama malzemeleri kullanılarak, kaplama yapılabiliğinin tespiti ile mekanik ve termal özelliklerin artırılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada, farklı ısıtma sürelerine ve farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip numuneler üretilmiş ve hiç kaplama yapılmamış paslanmaz çelik numuneler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan kaplamanın ardından numuneler üzerinde testler yapılarak, mekanik, termal ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma ile yapılan metalografik incelemeler neticesinde, kaplama tabakalarının altlığa paralel tabakalar halinde, inceleme yüzeyi boyunca sürekli bir halde ve kaplamada kullanılan malzemelerin tümünü içeren katlardan oluşan bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Kaplama yapılmış numunelerde, işlem sürelerinin de artmasıyla difüzyon artmış ve mekanik özelliklerde belirgin bir artış ve ısıtma iletiminde ciddi boyutta bir düşme sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 91510
Anahtar Kelimeler : Termal Bariyer Kaplama, Termokimyasal İşlem, Türbin Kanadı, Yapısal Özellikler, Fiziksel Özellikler, Termal İletim
Sayfa Adedi : 85
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Hasan HASIRCI

EVALUATION OF STRUCTURAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF TURBINE
BLADE MATERIAL OF WHICH SURFACE LAYER FORMED BY
THERMOCHEMICAL PROCESSING

(M. Sc. Thesis)

Murat KAYAALP

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

Thermal coating is the process of increasing the service life and efficiency by obtaining a surface with better mechanical and thermal properties than the main material thanks to the layer applied on the material surface. Special spraying techniques and special devices are used for this process. However, in this thesis, in contrast to ordinary thermal barrier coatings it is targeted to improve mechanical features, thermal features and determining of coating availability with using a simple low cost heat treatment and coating materials without the use of spray devices and techniques. For this purpose, tests were performed on the samples after thermal barrier coating. In this study, we used turbine blade material samples that two different types of surface roughness and two different times of heat treatment steel and non-coated samples were compared in terms of physical, structural and thermal properties. In the consequence of the metallographic investigations performed with this study, according to this investigations, coating layers consisted of layers parallel to the main material, along the examination surface and consisted of all the materials used in the coating. In the coated samples, diffusion increased with the increase of the heat treatment durations. We obtained significant increase in the mechanical properties and a significant decrease in the thermal conduction were achieved.

Science Code : 91510
Key Words : Thermal Barrier Coating, Thermochemical Processing, Turbine Blade,
Structural Properties, Mechanical Properties, Thermal Conduction
Page Number : 85
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Hasan HASIRCI

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada her türlü yardımı esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hasan HASIRCI'ya ve tüm Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Öğretim Elemanlarına çalışmamda verdikleri destek için teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen eşim Bilgen KAYAALP ve moral kaynağım olan canım oğlum Ali KAYAALP'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAPLAMA TEKNİKLERİ VE TERMAL BARIYER KAPLAMA	3
2.1. Kaplama ve Amacı.....	3
2.2. Kaplama Üretim Teknikleri	3
2.2.1. Plazma sprej (PS) kaplamalar	3
2.2.2. Yüksek hızlı-oksi alev (YHOA) kaplama yöntemi.....	6
2.2.3. Soğuk gaz dinamik sprej (SGDS) yöntemi	7
2.2.4. Elektron demetiyle fiziksel buhar biriktirme (ED-FBB) yöntemi	9
2.3. Termal Bariyer Kaplama (TBK)	10
2.3.1. Termal bariyer kaplama sistematığı	11
2.3.2. Termal bariyer kaplama seçiminde etkili faktörler	13
2.3.3. Türbin kanadı termal bariyer kaplama uygulamaları	15
2.4. Katman Malzemeleri ve Seçimi	17
2.4.1. Katman malzemeleri	18

Sayfa

2.5. Diğer Katman Katkı Elementleri.....	20
2.5.1. Alüminyum (Al).....	20
2.5.2. Titanyum (Ti).....	21
2.6. Kaplamaları Etkileyen Parametreler	22
2.6.1. Kaplama bağlanma mekanizmaları	22
3. ALTLIK MALZEMESİ VE ÖZELLİKLERİ	25
3.1. Paslanmaz Çelikler.....	25
3.2. Türlerine Göre Paslanmaz Çelikler	25
3.2.1. Östenitik paslanmaz çelikler	26
3.2.2. Ferritik paslanmaz çelikler	28
3.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler	29
3.2.4. Ferritik - östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler.....	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
4.1. Kullanılan Malzemeler.....	31
4.1.1. Altlık malzemesi	31
4.1.2. Kaplama malzemeleri.....	33
4.2. Kaplama Ön Hazırlıkları	33
4.3. Kaplama İşlemleri	34
4.4. Yapısal İncelemeler.....	36
4.4.1. Makro ve Mikro Yapısal İnceleme	36
4.4.2. SEM analizleri.....	36
4.4.3. XRD analizleri	37
4.5. Mekanik İncelemeler.....	37
4.5.1. Çekme testleri.....	37

Sayfa

4.5.2. Sertlik testleri	38
4.6. Termal İncelemeler	39
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
5.1. Termokimyasal Kaplama İşleminin Yapısal Özelliklere Etkilerinin Değerlendirilmesi.....	43
5.1.1. Kaplama/altlık optik inceleme sonuçları.....	43
5.1.2. SEM-EDS analizleri.....	47
5.1.3. XRD analizleri	64
5.2. Kaplama İşleminin Mekanik Özelliklere Etkileri	65
5.3. Kaplama İşleminin Termal Özelliklere Etkileri	73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
6.1. Sonuçlar.....	77
6.2. Öneriler	78
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Aşınmaya karşı dayanımlı kaplama türleri ve kullanım alanları	17
Çizelge 2.2. B ₄ C Fiziksel değerleri.....	20
Çizelge 2.3. Alüminyum ve titanyumun temel fiziksel değerleri	21
Çizelge 3.1. AISI 304L paslanmaz çelik mekanik değerleri	27
Çizelge 3.2. Östenitik paslanmaz çelik türleri ve kullanım alanları	27
Çizelge 4.1. AISI 304L altlık malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)	32
Çizelge 4.2. Numune kodları ve işlem durumları	33
Çizelge 4.3. Kullanılan kaplama tozunun özellikleri.....	33
Çizelge 5.1. Çekme ve sertlik numunelerine ait test sonuçları	66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. PS tabancası prosesi.....	4
Şekil 2.2. PS ile kaplanmış malzeme katmanları	5
Şekil 2.3. APS sistemi iç proses şeması.....	6
Şekil 2.4. VPS sistemi proses şeması; 1) gaz giriş ağzı, 2) blok, 3) havası alınmış bölge, 4) alev kaynağı, 5) kaplama toz ağzı, 6) plazma kaynağı	6
Şekil 2.5. SGDS sistemi proses şeması.....	8
Şekil 2.6. ED-FBB proses şeması.....	9
Şekil 2.7. Çalışma sıcaklığına TBK etkisi	10
Şekil 2.8. TBK'nın çalışma sistematığı	12
Şekil 2.9. Türbin kanadındaki TBK'ların yapısı.....	13
Şekil 2.10. Kaplamaların termal iletkenlikleri	14
Şekil 2.11. Kaplama malzemesinin seçim parametreleri	18
Şekil 2.12. Kaplama proses parametreleri	22
Şekil 2.13. Metalik katmanın yüzeye bağlanmasının şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.14. Yapışma dayanımına aşındırmanın etkisi	24
Şekil 3.1. Nükleer santral ana ekipmanları ve malzemeleri.....	28
Şekil 4.1. Kullanılan numuneler ve yapılan testler	31
Şekil 4.2. TS EN 6892-1 standardına uygun çekme test numune ölçüleri	37
Şekil 4.3. Isı iletkenlik numune boyutları	39
Şekil 4.4. Isı iletim katsayısı ölçüm sisteminin şematik gösterimi	41
Şekil 5.1. D,E,F,G numunelerine ait kaplama yüzeyi XRD analiz sonuçları	64
Şekil 5.2. Numunelerin çekme dayanımlarındaki değişim	67

Şekil	Sayfa
Şekil 5.3. Numunelerin akma dayanımlarındaki değişim	67
Şekil 5.4. Numunelerin % uzamalarındaki değişim.....	68
Şekil 5.5. Numunelerin sertliklerindeki değişim	68
Şekil 5.6. İşlemsiz (A), 4 saat süre ısıtılmış (B), kaba yüzeyli (D) ve ince yüzeyli (E) numunelerinde mekanik özelliklerin değişimi	69
Şekil 5.7. İşlemsiz (A), 8 saat süre ısıtılmış (C), kaba yüzeyli (F) ve ince yüzeyli (G) numunelerinde mekanik özelliklerin değişimi	69
Şekil 5.8. 10W güçte ısı iletim katsayılarının değişimi	74
Şekil 5.9. 15W güçte ısı iletim katsayılarının değişimi	75
Şekil 5.10. Termokimyasal işlem süresine bağlı olarak ısı iletiminin değişimi	76

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. YHOA prosesinin gösterimi	7
Resim 2.2. Erozyona uğramış kanat seti	16
Resim 2.3. Hasara uğramış kanat.....	16
Resim 2.4. Gaz türbin kanadı.....	16
Resim 2.5. Gaz türbini rotoru	17
Resim 3.1. Paslanmaz çeliklerin mikroyapı görüntüleri	26
Resim 4.1. Çalışmalarda kullanılan numunelerin görüntüsü	32
Resim 4.2. Numunelerin yüzeyine toz karışımı ve bağlayıcı kaplama uygulanması	34
Resim 4.3. Kaplama karışımı uygulanmış yapısal analiz numuneleri ve ısı iletim numuneleri	35
Resim 4.4. Kaplama karışımının uygulandığı çekme numuneleri	35
Resim 4.5. Tünel tipi ısıtma işlem fırını	35
Resim 4.6. Optik ve tarama elektron mikroskopunda kullanılan yapısal inceleme numuneleri	36
Resim 4.7. INSTRON 3369 çekme test cihazı	38
Resim 4.8. EMCO Test Duravision 2000 sertlik test cihazı	38
Resim 4.9. VOUGA CW 6284 D üniversal torna tezgahı	40
Resim 4.10. PA HİLTON Heat Conduction Unit H920 ısı iletim test cihazı	40
Resim 5.1. Kaplanmış yüzey/matris ara yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri, a) D, b) E, c) F ve d) G numunesi	46
Resim 5.2. D numunesine ait SEM görüntüsü	48
Resim 5.3. E numunesine ait SEM görüntüsü	48
Resim 5.4. F numunesine ait SEM görüntüsü	49

Resim	Sayfa
Resim 5.5. G numunesine ait SEM görüntüsü	49
Resim 5.6. D numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan bölgeler.....	51
Resim 5.7. D numunesinde a) kaplama, b) arayüzey geçiş bölgesi ve c) altlık malzemedeki nokta element analizi	52
Resim 5.8. D numunesinde kaplama/altlık arayüzeyinde bölgesel element geçiş analizi ...	53
Resim 5.9. E numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan bölgeler	54
Resim 5.10. E numunesinde a) kaplama, b) arayüzey geçiş bölgesi ve c) altlık malzemedeki nokta element analizi	55
Resim 5.11. E numunesinde kaplama/altlık arayüzeyinde bölgesel element geçiş analizi .	56
Resim 5.12. F numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan bölgeler	58
Resim 5.13. F numunesinde a) kaplama, b) arayüzey geçiş bölgesi ve c) altlık malzemedeki nokta element analizi	59
Resim 5.14. F numunesinde kaplama/altlık arayüzeyinde bölgesel element geçiş analizi	60
Resim 5.15. G numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan bölgeler.....	61
Resim 5.16. G numunesinde a) kaplama, b) arayüzey geçiş bölgesi ve c) altlık malzemedeki nokta element analizi	62
Resim 5.17. G numunesinde kaplama/altlık arayüzeyinde bölgesel element geçiş analizi .	63
Resim 5.18. A numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)	70
Resim 5.19. B numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c).....	70
Resim 5.20. C numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c).....	71
Resim 5.21. D numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)	71
Resim 5.22. E numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c).....	71
Resim 5.23. F numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)	71
Resim 5.24. G numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simge ve kısaltmalar, geçen kısaltma ve simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan
J	Joule
K	Kelvin
k	Isı İletim Katsayısı
μm	Mikrometre
N	Newton
Q	Isı
Ra	Yüzey Pürüzlülük Değeri
W	Watt
Δx	Uzaklık Farkı
ΔT	İki Nokta Sıcaklık Değişimi
α	Termal Genleşme Katsayısı
γ	Gama
δ	Sigma
$^{\circ}\text{C}$	Derece Santigrat
$\varnothing$	Çap

Kısaltmalar	Açıklamalar
Al₂O₃	Alüminyum oksit
APS	Atmosferik Plazma Sprey
B₄C	Bor Karbür
CGDS	Soğuk Gaz Dinamik Sprey
EB-PVD	Elektron Demetiyle Fiziksel Buhar Biriktirme
EDS	Enerji Dağılım Spektrometre Analizi
HVOF	Yüksek Hızlı-Oksi Alev
MgO	Magnezyum oksit
TBK	Termal Bariyer Kaplama
TGO	Termal Büyüyen Oksit
VPS	Vakum Plazma Sprey
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
YSZ	Yttria ile Dengeli Zirkonyum Oksit
Y₂O₃	İttriyum oksit
ZrO₂	Zirkonyum oksit
ZrSiO₄	Zirkon

1. GİRİŞ

Yüzeysel özellikler malzeme performansını etkileyen önemli ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden de yüzey özelliğinde oluşabilecek değişim, malzemenin birçok parametresine etkide bulunmaktadır. Malzemeler, yüzeylerinin etkileşim halinde olduğu korozyif ortamlardan dolayı zarar görebilirler. Malzeme özelliklerinin tamamını iyileştirmek yerine, yalnızca yüzey özellikleri geliştirilerek, farklı malzeme kullanmadan aynı oranda iyileştirme sağlanabilir. Yüzey özelliklerini inceleyen bilim dalı tribolojinin önemi her geçen gün artmaktadır. Yüzeye uygulanacak olan işlemlerde demir ve demir esaslı ürünler en yaygın kullanım alanını oluşturmaktadır. Malzeme yüzeyine uygulanan işlemleri kaplama ve yapısal değişim işlemleri olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür. Kaplama bir maddenin/bileşiklerin malzeme yüzeyinde tabaka oluşturacak şekilde, ana malzemeyi zararlı etkilerden koruyarak, iyileştirilmesi istenilen fonksiyonları arttırabilme işlemidir. Yapısal değişim işleminde ise, malzeme yüzey içyapısının değiştirilmesi söz konusudur. Yüzeye yapılacak işlemler genellikle fiziksel özellikleri (sertlik, süneklik, yorulma, aşınma, korozyon, sıcaklık) geliştirmek ve malzeme imalat fiyatlarını düşürmek amacıyla uygulanmaktadır.

Malzeme ömrünün etkin ve verimli kullanılmasını temin eden iki önemli parametre, darbe ve korozyon dayanımıdır. Bu iki parametrenin arttırılması malzemenin kullanıldığı servis koşullarında ömür ve verimlilik açısından çok önemlidir. Yapılan kaplamaların malzeme özelliklerini iyileştirerek uzun süre dayanım sağlaması, enerji ve havacılık sektöründe çok ciddi tasarruflar elde edilmesine imkân sağlamıştır.

Bu bağlamda yakıt tasarrufu yapan yeni gaz türbinlerinde türbin giriş sıcaklığını arttırabilmek ve yüksek sıcaklarda çalışmasına imkân vermesi için taban malzemelerinin ısı yalıtımı zorunluluk halini almıştır. Özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan ekipmanlar için genellikle Termal Bariyer Kaplamalar (TBK) kullanılmaktadır. Bu kaplamaların esas amacı sıcaklığın yoğun olduğu servis koşullarında çalışan ekipmanların zarar görmesini önlemek

veya geciktirmektir. Termal bariyer kaplamalar, kaplama kalınlığı oranları ve termal özelliklerle değişmekle birlikte; malzemenin maruz kaldığı servis sıcaklığını belirgin oranlarda azaltmaktadır. Kaplama yapılan malzemeye etkiyen sıcaklığının düşürülmesi sistemin verimini önemli ölçüde arttırmakta ve işletmede ekonomik açıdan da büyük avantajlar sağlamaktadır. Termal Bariyer Kaplamalar (TBK'lar) genellikle, altlık malzemesini korumak ve termal kayıpları azaltmak için alt katman üzerinde biriken refrakter metal bileşiklerinden oluşmaktadır.

Bu çalışmada, türbin kanadı malzemesi olarak da kullanılan AISI 304L paslanmaz çelik malzeme yüzeyinin seramik ile kaplanmasında, çok düşük maliyetli olan termokimyasal yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, basit bir ısıtım işlem fırını ve yüzeye uygulanacak malzeme yeterli olmaktadır. Düşük maliyet ve düşük teknoloji kullanılan bu termokimyasal yöntemle, seramik kaplamanın yapılabilirliği, mekanik özelliklerde iyileşme ve ısıtım iletimin düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla, farklı yüzey pürüzlülükleri ve farklı ısıtım işlem sürelerine sahip ve hiç kaplama uygulanmamış numuneler üzerinde, yapısal incelemeler, mekanik testler ve termal analizler yapılarak sonuçlar irdelenmiştir.

2. KAPLAMA TEKNİKLERİ VE TERMAL BARIYER KAPLAMA

2.1. Kaplama ve Amacı

Yüzey, malzemenin havayla sınırı anlamına gelmektedir. Bu sınır, dış ortamdan her türlü etkinin yaşandığı yüzeydir. Bu yüzden de malzemenin yüzey özellikleri çok önemlidir.

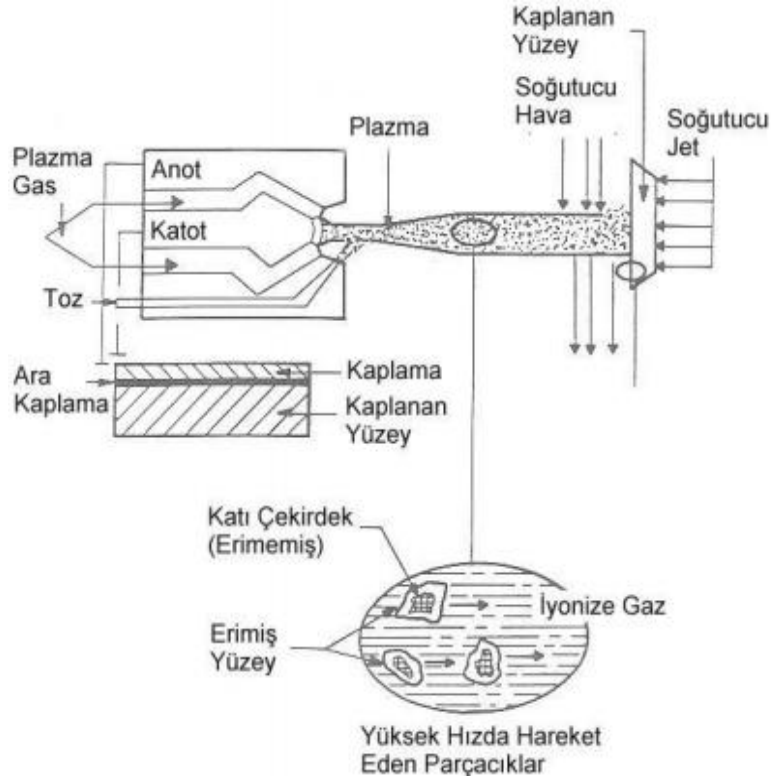
Yüzey özelliklerinden aşınma dayanımının artırılması, yalnızca yüzeye değil tüm malzemeye aynı özelliği kazandırmaktadır. Yüksek maliyetli malzemeleri kullanmak yerine yüzey özellikleri geliştirilmiş fiyatı makul malzemeler kullanmanın yarattığı tasarruf endüstride çok ciddi boyutlara ulaşmıştır. Örneğin; kullanacağınız malzeme yüzeyinde, yüksek sertlik iç kısmının da tok olmasını isterseniz, imalattan bu şartlara sahip malzeme almak yerine yüzeyine kaplama uygulanmış tok bir malzeme seçimi yeterli olacaktır. Bu durum ciddi üretim ekonomisi sağlamaktadır.

Malzemenin servis koşullarında verimliliği ve ömrünü arttırmak için birçok yüzey kaplama tekniği ve kaplama malzemesi bileşikleri geliştirilmiştir. Bu yüzey kaplama teknikleri eritme yöntemleri, elektrokimyasal yöntemler, kimyasal yöntemler, termokimyasal yöntemler ve mekanik yöntemler gibi sınıflandırabiliriz [1].

2.2. Kaplama Üretim Teknikleri

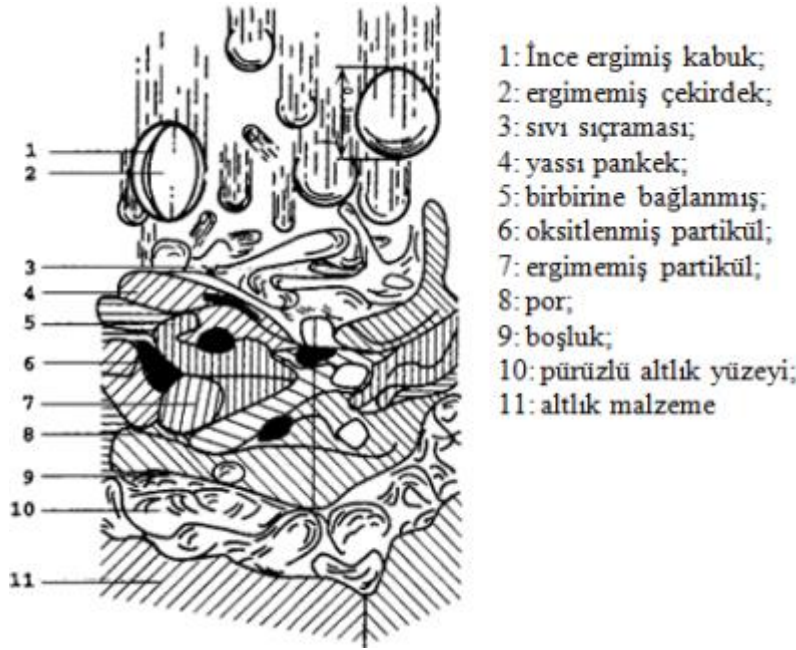
2.2.1. Plazma sprej (PS) kaplamalar

Bu tip kaplamada asıl amaç, kaplanacak malzemede, proses şartlarına uygun bir yüzey meydana getirmektir. Bu işlemde, uygulanacak olan kaplama malzemesi gaz havuzunda ergitilir ve sprej şeklinde malzeme yüzeyine dağıtılır. Bu uygulama ile aşınma kabiliyeti ve elastisitesi yüksek bir malzeme elde edilir. Böylece zorlu servis koşullarında (yüksek sıcaklık, korozyon ortam vb.) malzemelerin çalışmasına imkân sağlar. Şekil 2.1.'de PS tabancası prosesinin gösterimi verilmiştir [2].



Şekil 2.1. PS tabancası prosesi [3]

Plazma arkında eritilmiş mikron ve altı boyuta sahip seramik parçacıkların ana malzeme üzerine yüksek hızda püskürtülerek, malzeme yüzeyine tutunmasını sağlar. Malzeme yüzeyi vakum altında tutularak yüzeyde oluşabilecek oksidasyon önlenir. Şekil 2.2.'de PS yöntemiyle oluşturulan tabakanın katmanları gösterilmektedir.



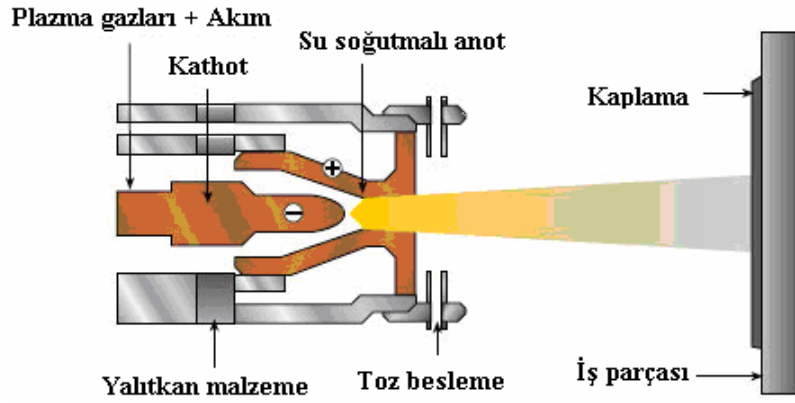
Şekil 2.2. PS ile kaplanmış malzeme katmanları [4]

Termal bariyer kaplamada sıklıkla kullanılan 2 tür PS metodu bulunmaktadır.

Atmosferik plazma sprej (APS) kaplama yöntemi

Endüstride sıklıkla kullanılan kaplama yöntemidir. Kaplama atmosfere açık bir ortamda gerçekleşir. Atmosfer ortamında yapılabilmesinden dolayı diğer tekniklerle karşılaştırıldığında, maliyeti daha düşüktür [5]. Bu yöntemde, bir plazma arkında partiküller ertilir. Argon veya helyum gazı ile plazma üretilir. Bu işlemde, inert gaz ısısı, ısı üretici olarak kullanılmaktadır. Argon gazı plazmada en çok kullanılan inert gazdır. Plazma büyük oranda akım gerektiği için argona ek olarak hidrojen de ilave edilmektedir. Plazma ark akımı yüksek olduğundan, ertime derecesi yüksek malzemeler için, kaplama malzemesi olarak tercih edilmektedir [5,6].

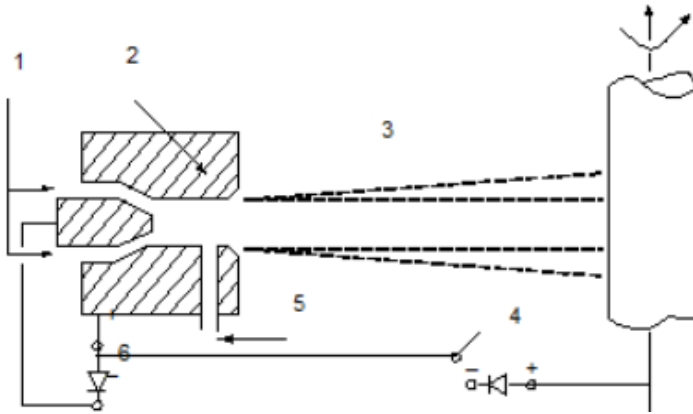
Tipik atmosferik plazma sprej (APS) sistemi iç proses şeması Şekil 2.3.'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere toz giriş ağzından, toz halindeki partiküller girerek, plazma arkıyla birlikte dış ortama açık şekilde uygulanır [6].



Şekil 2.3. APS sistemi iç proses şeması [6]

Vakum plazma sprej (VPS) kaplama yöntemi

Bu teknik, korozyona karşı dayanım istenilen malzemelerde tercih edilmiştir. Bu teknik ile çok ince toz kaplaması yapılabildiğinden, birçok metoda göre tercih sebebi olmuştur. VPS sistemi proses şeması Şekil 2.4.'de gösterilmiştir [7].

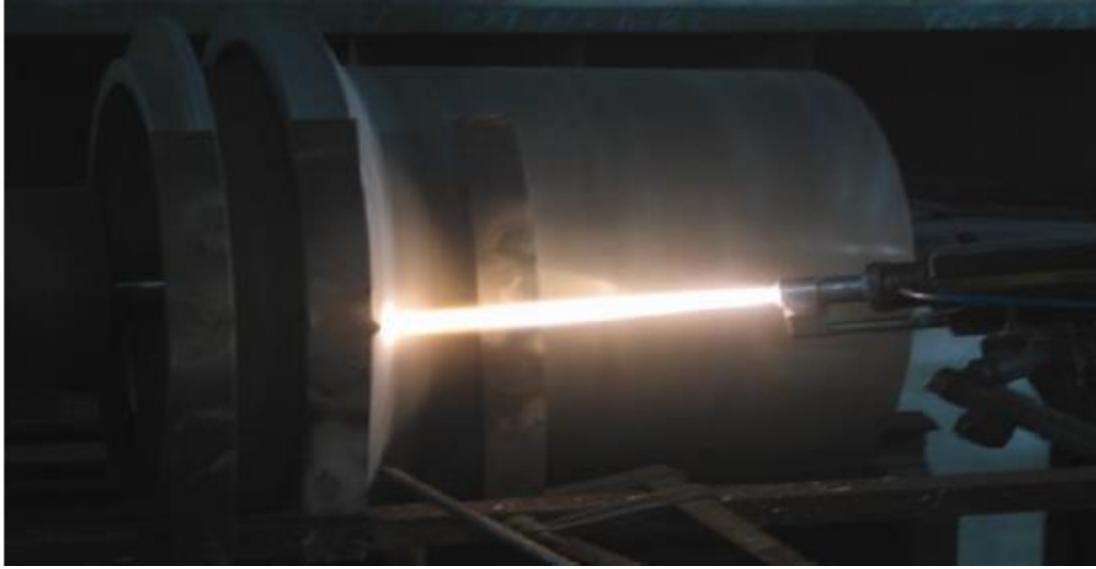


Şekil 2.4. VPS sistemi proses şeması; 1) gaz giriş ağzı, 2) blok, 3) havası alınmış bölge, 4) alev kaynağı, 5) kaplama toz ağzı, 6) plazma kaynağı [7]

2.2.2. Yüksek hızlı-oksi alev (YHOA) kaplama yöntemi

Bu teknikte propan ve hidrojen vb. gazlar, basıncı yükseltilmiş ortamda yakılır. Bu yöntemde en fazla 3000 K ergime derecesine sahip malzemeler, kaplama olarak tercih edilebilir. Süpersonik hızda alev hızına sahip bu teknik, bu özelliğinden dolayı, diğer tekniklere göre

bazı avantajlar oluşturmaktadır. Bu yöntemde, H_2 , O_2 ve N_2 gazları proses gazları olarak tercih edilmektedir. Çok düşük gözenek oranı, kaplama yoğunluğunun yüksekliği ve alev hızının yüksekliği bu tekniğin sağladığı önemli avantajlardır. Bu teknik maliyetli bir tekniktir. Kaplamada sertlik ve kaplamanın yoğun olması isteniyorsa, genellikle bu teknik tercih edilir. Bu teknikte yüksek sıcaklık ana malzemede bazı dezavantajlar sağladığından, ergime derecesi düşük malzemeler için uygun değildir. Resim 2.1.'de bir YHOA kaplama yöntemi resmi gösterilmektedir [6,8].



Resim 2.1. YHOA prosesinin gösterimi [8]

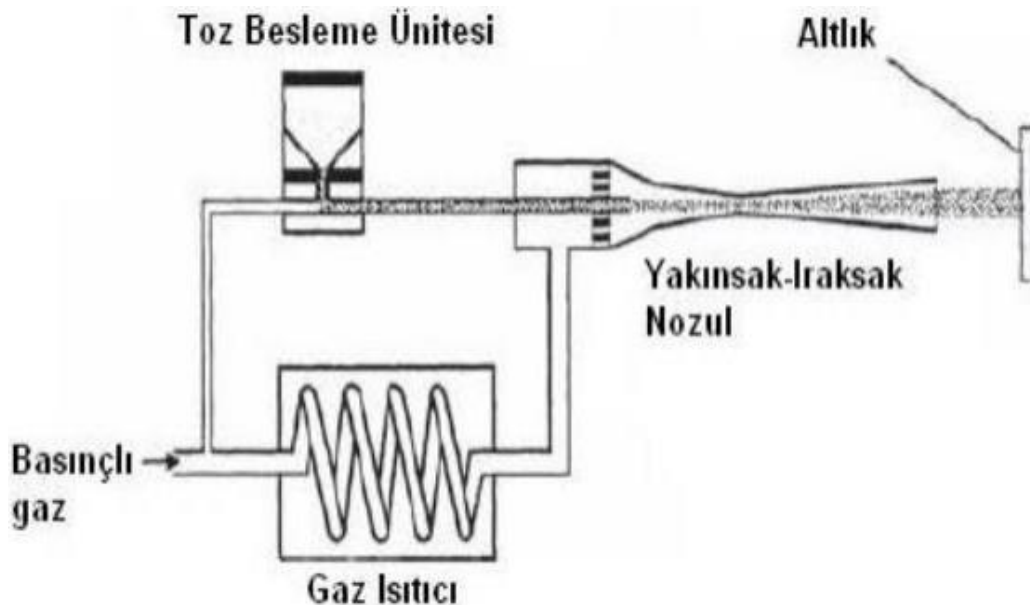
Bu yöntem yüksek sıcaklığa sahip servis koşulları olan süper alaşım türbin kanatlarının kullanıldığı havacılık ve enerji alanında sıklıkla kullanılır [8].

2.2.3. Soğuk gaz dinamik sprey (SGDS) yöntemi

Bu teknik, toz partiküllerin ergitilmeden ana malzeme yüzeyine hızlı bir şekilde fırlatılmasıyla, yüzeyde biriktirilmesi temelinde çalışır. Rüzgâr tüneli içerisinde gaz+kati fazlarının aktığı bir yöntemdir (Şekil 2.12). Bu metot da yüksek sıcaklık ortamında çalışılmadığından oksitlenme düşük düzeydedir. Bu teknik son yıllarda ortaya çıkmış bir tekniktir. Bu yöntemde proses sıcaklığı düşük olduğundan, sıcaklığa duyarlı malzemeler,

ana malzeme olarak kullanılabilir. Bu durumun dezavantajı ise, seramik gibi sert malzemelerin kaplanmasında uygun değildir. Bu yöntemde porozite oranı düşük ve kaplama tabakası yoğunluğu yüksektir. Oksitlenme çok düşük olduğu için kaplama yüzeylerinin pürüzlülüğü çok düşüktür. Fakat partiküller yüzeye çok yüksek hızlarda çarptırıldığından, kaplamalarda darbe dayanımını düşürmektedir. Sıcaklığın düşük olması ise toz partiküllerinin kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik oluşturmamaktadır. Bu yöntemde sertliği yüksek olmayan malzemeler, altlık malzemesi olarak kullanılmaktadır [8].

CGDS sistemi proses şeması Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Sistemde gaz olarak kullanılan azot ve helyum gazı ön ısıtmaya tabi tutularak partiküllerin termal enerjisi artırılır. Gazların ısıtılmasıyla uzak ve yakın nozullara aktararak, kısa sürede büyük bir hacim artması yaratılarak hızlandırma sağlanır. Hacim artması nedeniyle gaz-partikül arası ısı iletimi sağlanmadığından, gaz sıcaklıkları hızlı bir şekilde düşme gösterir. Bu teknikte çoğunlukla 15-65 μm boyutundaki kaplama tozları kullanılır [8].

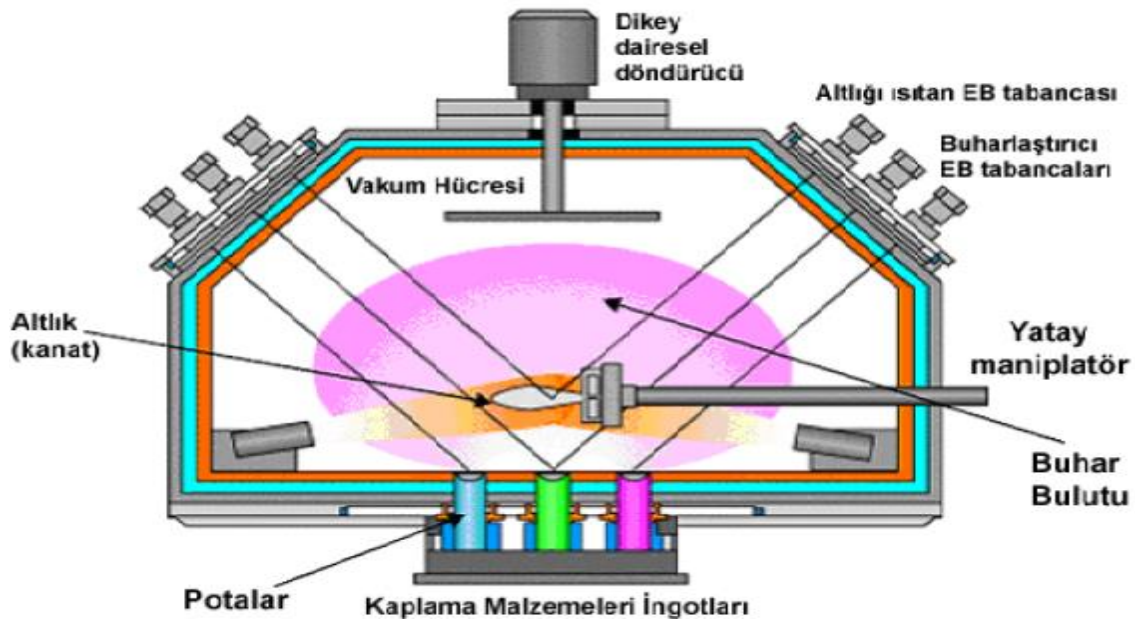


Şekil 2.5. SGDS sistemi proses şeması [7].

2.2.4. Elektron demetiyle fiziksel buhar biriktirme (ED-FBB) yöntemi

ED-FBB, yüksek sıcaklığa sahip servis koşullarında kullanılır. Bu teknikte, kaplama yapılacak malzeme sıvı faza geçirilerek ve havası alınmış ortamda gaz haline geçiş sağlanarak, malzemenin yüzeyinde toplanması sağlanır. Bu teknik, yüksek sıcaklığa karşı gösterdiği dayanım sebebiyle, sıklıkla başvurulanan bir tekniktir. Bu teknikte, malzeme üzerinde toplanma hızı ve miktarının düzenlenmesi ile tane yapısı her yerde eşit bir kaplama tasarımlanabilir. Bu teknikle ani ısı yükselmeleri ve aşınma dayanımları çok iyi düzeydedir [9]. ED-FBB tekniği prosesi Şekil 2.6’da verilmiştir.

Bu teknikle yapılmış kaplamalar, yüksek sıcaklığa, oksitlenmeye ve aşınma dayanımlarına sahip olmaları nedeniyle, enerji santrali ve havacılık ekipmanlarında sıklıkla kullanılmaktadır [9].

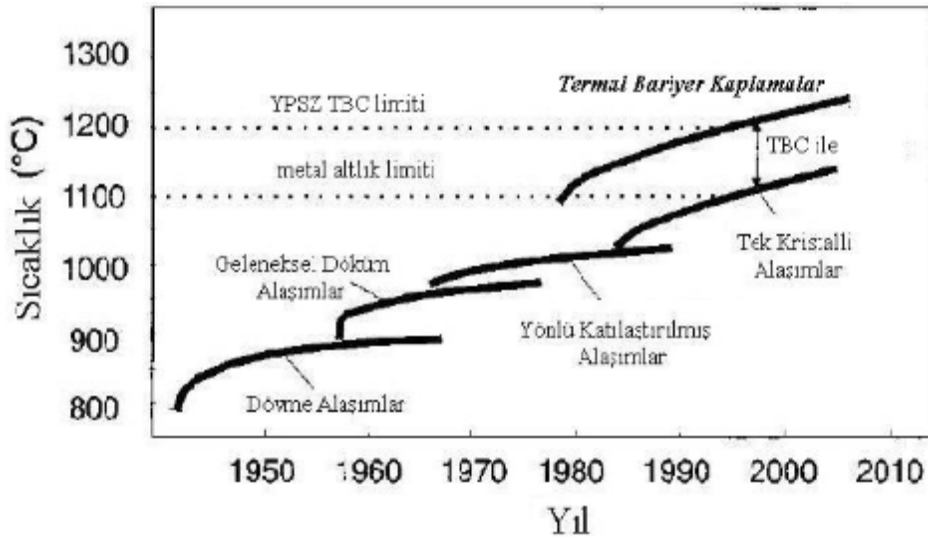


Şekil 2.6. ED-FBB prosesi şeması [10].

2.3. Termal Bariyer Kaplama (TBK)

Termal bariyer kaplamalar, kaplaması yapılacak bir ana malzeme ve bu malzeme yüzeyinde çoğunlukla ısı iletimi düşürmek için oluşturulmuş tabakadan oluşmaktadır. Ayrıca bu tabakayı ana malzemeye bütünleştiren ve ana malzemede oksidasyona karşı koruyucu görevi gören bağ kaplamadan ve uygulama prosesi süresince oluşan termal büyüyen oksitten (TBO) oluşur [11].

Bu kaplamalar sayesinde, malzemenin işletme esnasında daha az soğutulmasına ihtiyaç duyulduğu gibi, aynı zamanda malzemenin yüksek sıcaklıklarda çalışmasına imkân sağlar. Şekil 2.7’de son 60 yılda kullanılan malzemeler ile çalışma sıcaklığına etkisi TBK kıyaslamasıyla gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Çalışma sıcaklığına TBK etkisi [11]

TBK sayesinde ana malzeme yüksek sıcaklıklarda çalışabileceğinden, ciddi oranda verim artışı da sağlamaktadır. Ekipmanın çalıştığı ortamın servis sıcaklıklarının arttırılması ve aynı oranda soğutucu görevi gören havanın düşürülmesiyle ciddi oranda enerji tasarrufu yapılmaktadır. Örneğin doğalgaz kombine çevrim santrallerinin türbinlerinde bu kaplamalar sayesinde yüksek ısıya maruz kalan ekipmanların ve santralin verimi arttırılmakla kalmaz,

aynı zamanda emisyon oranlarında da ciddi düşme sağlar. Ayrıca bu kaplamalar sayesinde ana malzeme sıcaklığı düşürüldüğü gibi, aşınmaya, oksidasyona ve koroziye ortamlara karşı malzemeyi korur [11].

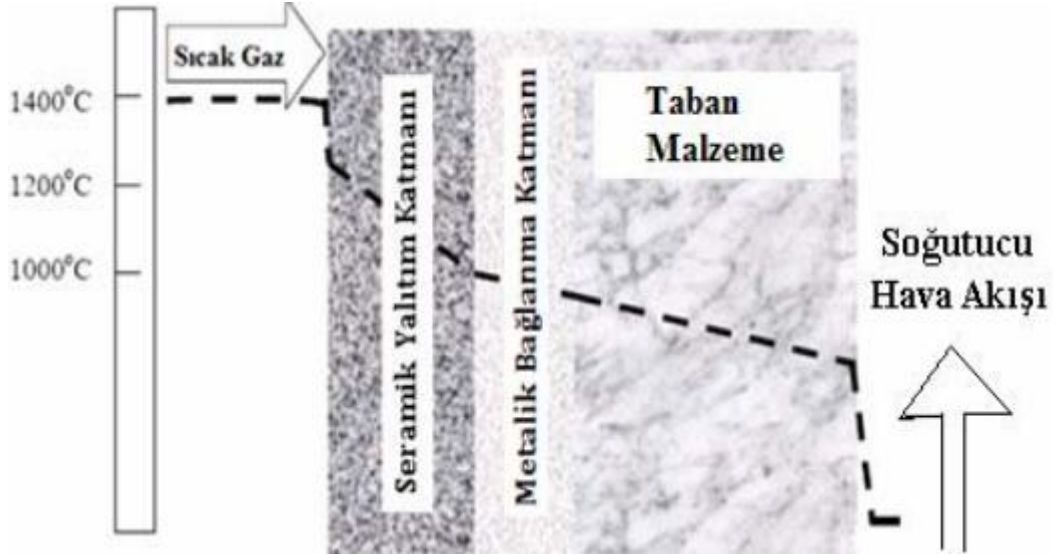
2.3.1. Termal bariyer kaplama sistematığı

Yüksek sıcaklıklarda çalışan metalik malzemelerin yüzeylerini koruyan termal bariyer kaplamalarda, taban malzeme olarak da adlandırdığımız ana malzeme kaplama yapılarak yüksek sıcaklık ve korozyona karşı dirençli hale getirmeye çalıştığımız altlık malzemesidir. Bağlanma katmanı, kaplama yapılacak üst tabakanın hemen altında yer alarak, ana malzeme ile üst tabakanın büyük farklılıklara sahip ısı iletim oranları arasında, yumuşak geçiş sağlamaktadır. Üst kaplama gibi, bağlayıcı katman olarak görev yapan kısmında koroziye ortam ve oksitlenmeye karşı dirençli olması gerekmektedir [12, 13,14].

Şekil 2.8’de şematik gösterimi yapılan, TBK sistematığına göre bu kaplamaların asıl amacı, malzemenin maruz kaldığı çalışma sıcaklığını düşürerek verimini arttırmaktır. Bu kaplamaların özellikleri;

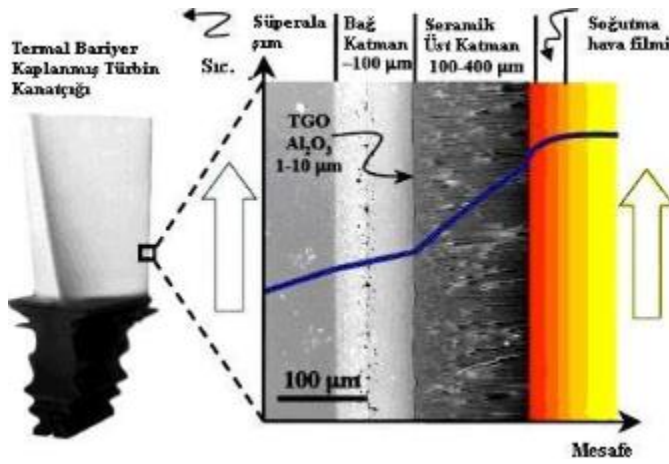
- Yüksek erime noktası
- Mikroyapının sıcaklığa bağımlı olmaması, faz kararlılığı,
- Isıl iletimi azaltma
- Oksidasyon ve koroziye ortama dayanım
- Aşınma dayanımı,
- Erozyon dayanımı,
- Ekonomiklik,
- % Uzama düşüklüğü,
- Altlık malzemesi ile ısı iletim uyumu
- Altlık malzemesi yüzeyine oluşturulan tabaka kapasitesi
- Gözenekli yapının porlu kısmında düşük sinterleme oranı

- Isıyı yansıtma özelliğinin yüksek olması
 - Termodinamik kararlılık
 - Korozyon ve oksidasyon direncinin yüksekliği
- şeklinde sıralanabilir [14,15].



Şekil 2.8. TBK'nın çalışma sistematığı [12]

Şekil 2.9'da gösterildiği üzere, türbin kanadı üzerinde yapılan termal bariyer kaplamada, bağ kaplama ana malzeme ile seramik katman arasına konumlandırılarak, en üst seramik katmanın taban malzemeye direkt temasını önleme görevi yapmaktadır. Bağ kaplama ile seramik katman arasında asıl bağlayıcı görevi gören, alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan TBO'dur [16,17].



Şekil 2.9. Türbin kanadındaki TBK'ların yapısı [17]

2.3.2. Termal bariyer kaplama seçiminde etkili faktörler

Bir termal bariyer kaplamada ısı yalıtımını asıl sağlayan katman seramik katmandır. Bu nedenle bu katmanı meydana getiren bileşenlerin seçiminde bir çok kriter göz önünde bulundurulur.

Ergime sıcaklığı

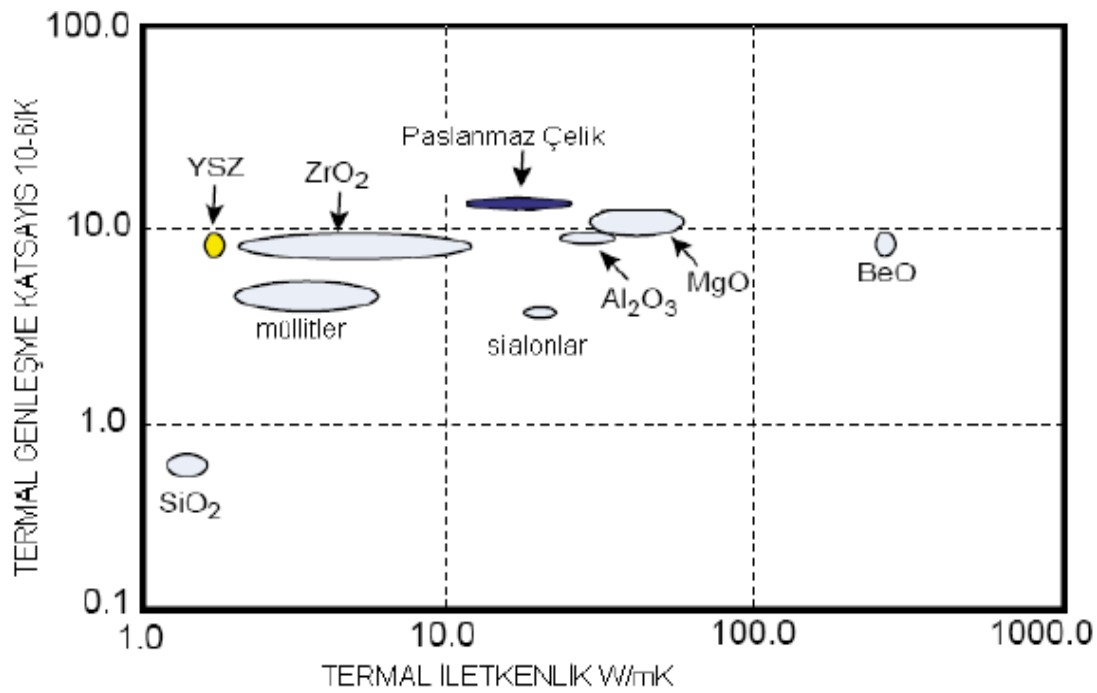
Çalışma koşullarına bağlı olarak değişmekle birlikte termal bariyer kaplamalar çok yüksek sıcaklıktaki servis koşullarındaki (1650°C) çalışan ekipmanlar için uygundur. Bu sıcaklıklara dayanabilecek malzemeler de buna uygun seçilmesi gerekmektedir [18].

Termal iletkenlik

Termal iletkenlik, malzemenin sıcaklık etkisiyle ters orantılıdır. Malzemenin sıcaklıktan etkilenmesini minimuma indirmek için, ısı iletim katsayısı küçük malzemeler kullanılmalıdır. Isıl iletim hem altlık malzeme hem de kullanılan kaplama ile doğrudan ilişkilidir [18].

Termal genleşme katsayısı

Termal bariyer kaplamalar, bağlayıcı katman ve yalıtkanlığı sağlayacak üst katmandan oluşmaktadır. Bu nedenle de kullanılacak kaplamanın termal dayanıklılığının yüksek olabilmesi için, kaplamayı oluşturan bileşenlerin termal genleşme katsayıları birbiri ile uyumlu olmalıdır [18]. Şekil 2.10'da bazı kaplama bileşenlerinin termal iletkenlikleri verilmiştir.



Şekil 2.10. Kaplamaların termal iletkenlikleri [18]

Faz Kararlılığı

Kaplamada faz değişikliğinin meydana gelmesi ile birlikte hacim değişmesi de yaratacağından, bu durum sakıncalıdır. Kaplamanın böyle bir durumda korunması için seçilen malzemenin sıcaklığının işletme şartlarına göre belirlenen değerin üzerine çıkmayarak faz kararlılığı göstermesi önemlidir [18].

Oksitlenme direnci

Çalışma koşulları açısından TBK'lar uygun olmakla birlikte, oksitlenmenin yaratacağı ömür kısalması ile karşılaşmamak için seçilen malzemenin oksijen ilgisi düşük olmalıdır [18].

Gözenekli veya poroziteli yapı

Üst yalıtkan tabakanın yapısı, izolasyon sağlayabilmesi açısından gözenekli veya poroziteli bir yapıya sahip olması, kaplamanın amacına uygun çalışabilmesi açısından önemlidir. Bu gözenekli ve poroziteli yapının korunabilmesi sinterlenmedeki düşüklüğe de bağlıdır [18].

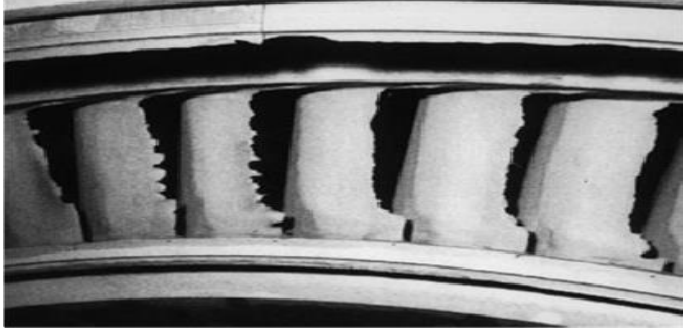
Korozyon direnci

TBK'ların çalışma koşulları koroziv ortamlardır. Yapılan kaplamaların uzun ömürlü olabilmesi için korozyon direncinin yüksek olması gerekmektedir [18].

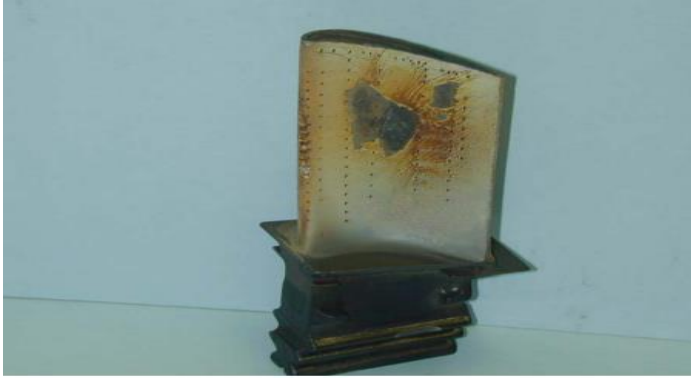
2.3.3. Türbin kanadı termal bariyer kaplama uygulamaları

Türbin kanatlarının çalışma ömrünü arttırmak hem ekonomik açıdan hem de sistemin sürekliliği açısından önem arz etmektedir. Özellikle gaz türbinlerinde kullanılan süper alaşım kanatlar, yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışmalarından dolayı çok özel üretim teknikleriyle (hassas döküm, yönlü katılaşma, tek kristal) imal edilmektedir. Resim 2.2 ve 2.3 'den görüldüğü gibi türbin kanatlarında, çalışma ömürleri boyunca çalıştığı ortamdaki yüksek sıcaklık ve basıncın etkisiyle birtakım fiziksel bozulmalar meydana gelmektedir. Oluşan bozulmalar genelde çatlak, çukurcuk ve erozyon olarak kendini göstermektedir. Resim 2.5'te görüldüğü gibi türbin kanatlarının bir rotor üzerinde set olarak bir kapalı hacimde yüksek devirde yüksek sıcaklık ve basınçta döndüğü düşünüldüğünde, rotor üzerindeki herhangi bir kanadın zayıflığı aslında tüm rotorun zayıflığı olarak kabul edilebilir. Herhangi bir kanat hasar gördüğünde kırılma veya kopma olmadan değiştirilmez ise yüksek devir ve basıncın etkisiyle diğer kanatlar üzerinde de çok ciddi tahribata neden

olabilir. Türbin kanatlarının (Resim 2.4) maliyetlerinin çok yüksek olması, yapılacak bakımların ve malzeme dayanımının ne derece önemli olduğunu bize göstermektedir.



Resim 2.2. Erozyona uğramış kanat seti



Resim 2.3. Hasara uğramış kanat [11]



Resim 2.4. Gaz türbin kanadı [11]



Resim 2.5. Gaz türbini rotoru [19]

2.4. Katman Malzemeleri ve Seçimi

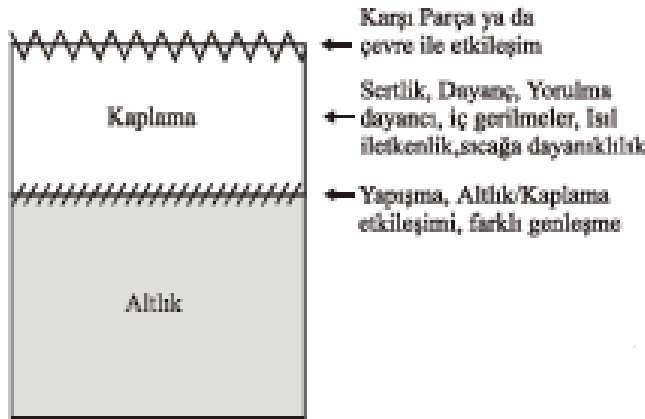
Termal bariyer kaplamalarda kullanılan tozlar genellikle %8 Y_2O_3 (yttria) ve ZrO_2 (%8 YSZ) karışımıdır. YSZ ısı iletim katsayısındaki düşüklüğü, termal genleşme katsayısının yüksekliği, stabilize faz ve kırılma tokluğunun yüksekliği ile TBK için kullanışlı bir kaplama metodudur. Ancak, yaklaşık 1200 °C yüzey sıcaklığından sonra ZrO_2 'de meydana gelen yapı ve boyut değişimleri ve sıcaklığın yükselmesi ile termal oksit tabakası oluşumuna bağlı olarak, bu kaplamalarda bazı bozulmalar oluşmaktadır. Bu yüzden daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı farklı katman tozları araştırılmaktadır. TBK hangi servis şartlarına tabii olacaksa buna uygun bir seçim yapılmalıdır. Çizelge 2.1'de aşınmaya karşı dayanımlı kaplama türleri ve kullanım alanları verilmiştir [12].

Çizelge 2.1. Aşınmaya karşı dayanımlı kaplama türleri ve kullanım alanları [20]

Kullanım alanları	Kaplanan parça	Kaplama malzemesi
Otomotiv	Sekmanlar, supaplar, yanma odaları	ZrO_2 -MgO, Al_2O_3 - ZrO_2 , Al_2O_3 - TiO_2 - Y_2O_3
Kimya	Şaftlar, yatak yüzeyleri, borular, brülörler	Al_2O_3 - TiO_2 , $ZrSiO_4$, Cr_2O_3
Kağıt Matbaacılık	Kağıt kurutma silindirleri, elekler, filtreler	Cr_2O_3 , MnO_2 , Al_2O_3 - TiO_2
Türbinler ve yardımcı ekipmanları	Türbin kanatları,- ve paleleri, yataklar	Al_2O_3 , Al_2O_3 - TiO_2
Metalurji	Pistonlar, kalıplar, elektrotlar, merdaneler	Al_2O_3 , MgO- ZrO_2 , $ZrSiO_4$, Al_2O_3 - TiO_2

Kaplama malzemelerinin seçiminde önemli parametreler Şekil 2.11'de şematize edilerek verilmiştir. Birbirinden bağımsız özellikler sergileyen kaplama sistemi üç kısımda incelenebilir.

Birinci kısım ana malzeme ile kaplama yüzeyi arasında, genellikle yapışma, sıcaklıkla birlikte oluşan genleşme kaynaklı yüzey gerilmeleri gibi özellikler bu bölgeye özeldir. İkinci kısım kaplama malzemesi, kaplamanın sertliği, gerilme dayanımı, tokluğu, termal kararlılığı bu kısım ile alakalıdır. Üçüncü kısım olan kaplama yüzeyi ise, kaplanan malzeme ile arasındaki sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülük oranı, korozyon ortamlara karşı dayanım gibi özelliklerde bu kısım ile ilgilidir [21].



Şekil 2.11. Kaplama malzemesinin seçim parametreleri [21]

2.4.1. Katman malzemeleri

Kaplama malzemeleri korozyon ortamlara karşı dayanıklılık, yüksek sıcaklığa karşı termal iletkenlik, gerilmelere karşı dayanım gibi temel özelliklere sahip olmalıdır. Bu kapsamda endüstride sıklıkla kullanılan, bizimde çalışmamızda kullandığımız bazı katman malzemelerinin özelliklerinden aşağıda kısa kısa bilgiler verilmiştir.

Yttria ile dengeli zirkonyum oksit (YSZ)

Termal kaplamalar için, düşük termal iletkenliğe sahip seramik malzemeler, mekanik özelliklerin yüksekliği ve ani sıcaklık yükselmesi durumunda sahip oldukları direnç nedeniyle, YSZ seramik toz karışımı endüstride sık kullanım alanına sahiptir. Bunlara ilaveten YSZ, PS tekniği ile uygulanabilen sınırlı tozlardan biridir. 1473 K'den daha yüksek

sıcaklıklarda uzun süreli uygulamalarda, faz dönüşümü gerçekleşeceğinden, YSZ uygun değildir [18].

Zirkonyum oksit (ZrO_2)

Zirkonyum oksit, ergime noktası yüksek ve düşük ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle termal bariyer kaplamalarda kullanılmaktadır. Bu özelliklerinin dışında zirkonyum, taban malzeme olarak enerji ve havacılıkta kullanılan paslanmaz çeliklere ve süper alaşımlara yakın bir ısı iletim katsayısına sahiptir. Ayrıca zirkonyumun ana TBK malzemelerinden olmasının bir nedeni de, yüksek sıcaklıklarda ısı iletkenlik değerinin büyük ölçüde değişmemesidir [14,15].

Zirkonyum çeşitli dengeleyiciler (Y_2O_3 vb.) ile birleştirilerek kullanılır. Bunun nedeni farklı ısı iletim katsayısına sahip yapı geçişlerinde meydana gelen hacim büyümesinden kaynaklı süreksizliklerin oluşumu ile kaplamanın bozulmasına neden olmasıdır [11].

Alüminyum oksit (Al_2O_3)

Bütün alüminyum oksitler arasında sadece $\alpha-Al_2O_3$ fazı karardır. $\alpha-Al_2O_3$ son derece sert ve inerttir. Kaplamanın tokluğunu değıştirmeden kaplamanın sertliğini ve bağı mukavemetini arttırabilmek için YSZ kaplamalara belirli miktarlarda koyulması gerekmektedir. Fakat, ısı sirkülasyon süresince karardlı bazı fazlar α fazına geçiş yaparlar, bu nedenle de hacim artışları yaşanır. Al_2O_3 karardlı yttrium zirkonyum oksitle birleştirildiğinde, kaplamada sertlik ve altlık malzemesinde oksidasyona karşı dayanımı geliştirmektedir [11].

Silika (SiO_2)

Silika çok amaçlı bir malzemedir. Farklı uygulamalar için kaplama üretiminde kullanılabilir. Diğer partiküller arasında, sertliğinin yüksek oluşu, su itici yüzey yapısı ve uygun fiyatı ile

öne çıkmaktadır. Çizilme ve aşınma direnci yüksek, şeffaf ve maliyeti düşük kaplamaların elde edilmesini sağlamaktadır [22].

Bor karbür (B₄C)

Bor karbür mekanik özellikleri yüksek, düşük yoğunluklu, kimyasal direnci yüksek ve nükleer özellikleri gibi avantajlara sahiptir. Diğer taraftan kırılma tokluğunun düşüklüğü ve yüksek yoğunluklu malzeme üretimi için sinterleme koşullarının çok zor olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. B₄C Rombohedral kristal yapısına sahiptir. Bor karbürün fiziksel parametreleri aşağıda Çizelge 2.2.'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. B₄C Fiziksel değerleri [23]

Parametre	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm ³	2,49
Sertlik	Kgf/mm ²	2950-3600
Tane Kristal Yapısı		Rombohedral
Erime Noktası	°C	2450
Termal Hacim Büyümesi	°c'	0,5x10 ⁻⁷
İletkenlik	Ω ⁻¹ m ⁻¹	140

Bor karbürün sertliği, ergime noktası ve mukavemet/yoğunluk gibi mekanik özellikleri, birçok malzemeye göre daha caziptir. Bor karbür kimyasal olarak bilinen en kararlı bileşiklerdendir. Oluşum entalpisi 9,3-17,1 kcal/mol arasındadır. Asit ve bazlarla kolaylıkla reaksiyona girmez [23,24].

2.5. Diğer Katman Katkı Elementleri

2.5.1. Alüminyum (Al)

Alüminyum düşük yoğunluğa sahiptir. Yoğunluğun düşük olmasından dolayı, ağırlığın dezavantaj olduğu ekipmanlarda tercih edilen bir elementtir. Alüminyum yüzeye uygulanan oksit katmanı ile korozyon çalışma koşullarında kullanılabilir. Saf haldeki Al fiziksel özellikleri düşük olduğu için, genelde bileşik halinde kullanımı uygundur.

Al, kaplama özellikleri üzerine ciddi önem arz eden etkileri olup, bazı iyileştirmeler sağlarlar. Bu iyileştirmelere örnek vermek gerekirse, alüminyum kaplama yüzeyin parlak görünümünü sağlar. %0.005 -0,02 Aralığında değişen oranlarda alüminyum dahi bu etkiyi sağlamaya yeterlidir. Bunun sebebi Al ile O₂'nin birleşmeye ve Al₂O₃ oluşturmaya eğilimli olmasındandır. Ayrıca korozyon direncini arttırmak için Al ilave edilir [25].

2.5.2. Titanyum (Ti)

Korozif ortamlarda sağladığı dayanıklılık, düşük yoğunluk oranı, yüksek mukavemet gibi özelliklere sahiptir. Titanyum, aşınmanın yoğun olduğu kullanım alanları için uygun değildir. Yoğunluğu düşük olmasından kaynaklı plastik şekil değiştirmesi de yüksektir. Alüminyuma ve titanyuma ait bazı temel fiziksel değerler Çizelge 2.3.'de verilmiştir. Titanyumun ergime sıcaklığındaki yükseklik, yüksek sıcaklığa sahip servis koşullarında avantaj sağlamaktadır.

Çizelge 2.3. Alüminyum ve titanyumun temel fiziksel değerleri [26]

Değerler	Al	Ti
Yoğunluk (g/cm ³)	2,7	4,53
Kristal tane yapısı	YMK	SPH
Ergime (°C)	662	1668
Plastik şekil değiştirme (GPa)	71	115

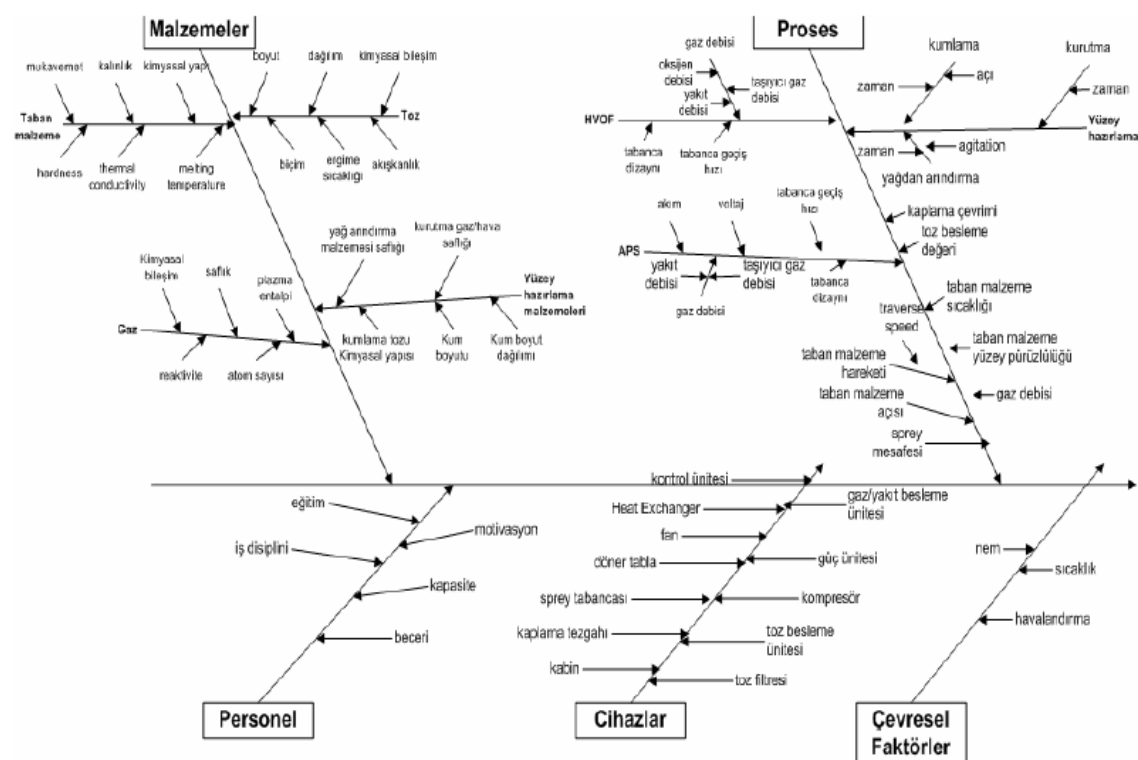
Titanyumun oksijene karşı duyarlılığı yüksektir. Düşük sıcaklıkta dahi titanyum-oksit (TiO₂) oluşturabilir. Bu element özellikle sıcaklık arttıkça, oksitlenmeye başlamaktadır [10-12]. Fakat bu oksit katmanı kararlı değildir. Bu katman, oksidasyon ve korozif ortamlara karşı dayanım sağlarken, aşınma dayanımını düşürmektedir. Titanyum farklı bir elementle karşılaştığında, yüzeydeki oksit katmanı basit bir şekilde ayrılabilir. Ayrılan bu tabakanın arasında kalan kısımlarda ise yine oksit tabakaları oluşarak yüzeyden ayrılmaktadır. Ayrılan tabakanın olduğu bölgeden çıkan ana malzeme yine oksit tabakası

oluşturarak bu çevrimin devam etmesini sağlar. Bu özelliğinden dolayı titanyumun aşınma dayanımı kötüdür [26].

2.6. Kaplamaları Etkileyen Parametreler

Kaplamaların uygulama proseslerindeki tüm parametreler Şekil 2.12’de gösterilmektedir.

Bu parametrelerin değişen oranlarda kaplama üzerine etkileri vardır.



Şekil 2.12. Kaplama proses parametreleri [11]

2.6.1. Kaplama bağlanma mekanizmaları

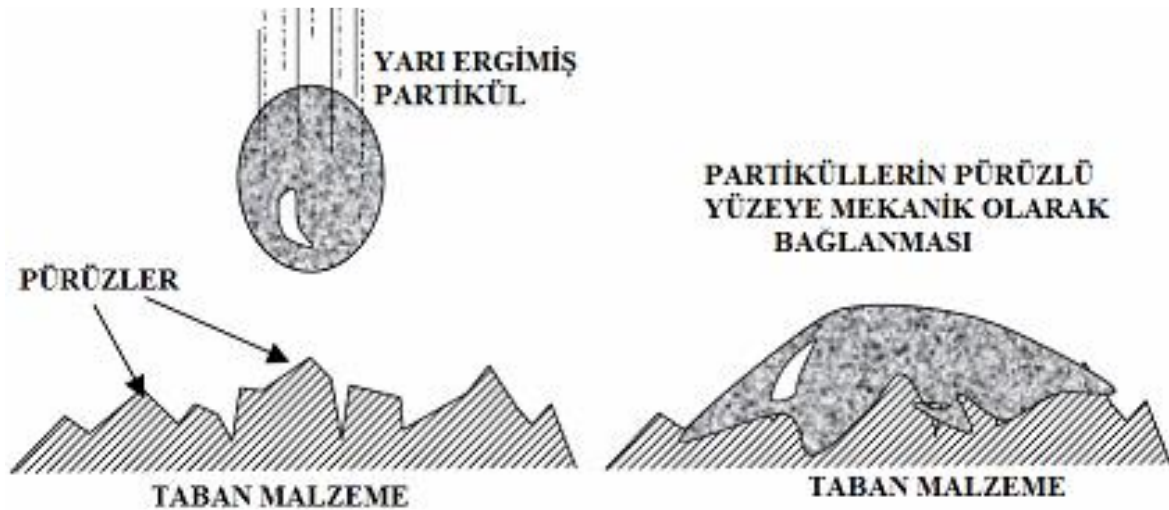
Difüzyon

Difüzyon, bir tetikleyici vasıtasıyla (sıcaklık, enerji vb.) moleküllerin gelişi güzel yönlennemeleriyle oluşan saçılma hareketi olarak tanımlanabilir. Difüzyon sürecinde yüksek enerjiye sahip atomlar bulundukları bölgeden, daha düşük enerjiye sahip atomların

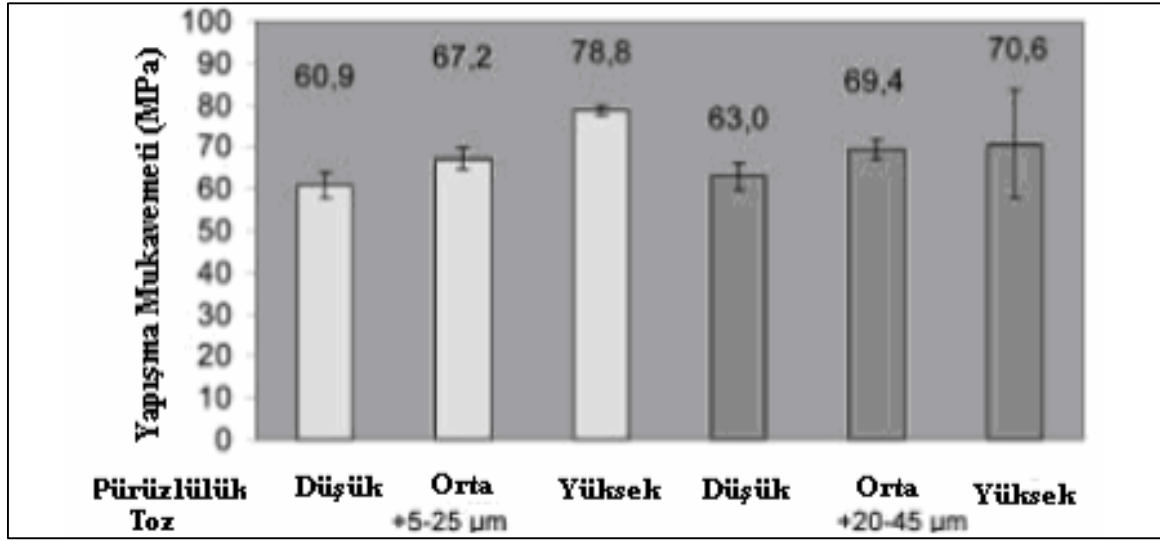
bulunduğu bölgeye doğru hareket ederler. Difüzyon sıvı ve katılarda daha yavaş iken, gazlarda daha hızlıdır. Katılarda, atomların titreşim hareketi vasıtasıyla boş bölgelere doğru hareketi ile difüzyon oluşur. Difüzyonu etkileyen en önemli parametre sıcaklıktır. Sıcaklığa bağlı olarak difüzyonda o oranda artar. Katılarda, genellikle darbeye bağlı olarak oluşan martenzitik yapı hariç, tüm değişimler ve dönüşümlerde difüzyon ile olmaktadır. Sıcaklık, zaman, basınç, metalurjik faktörler, difüzyonu etkileyen parametrelerin başında gelmektedir [27].

Mekanik yapışma

Ana malzeme ile kaplanacak tozların yapışması kaplamanın tokluğu ve dayanımı açısından, çok önemlidir.]. Şekil 2.13’de gösterildiği gibi mekanik bağlanma, termal bariyer kaplamalardaki uygulanan etkin bağlanma mekanizmalarından biridir [28]. Yüzey pürüzlülüğünün artırılması yapışma mukavemetini artırır [29]. Yapışma dayanımı kaplamanın kullanım süresi açısından önemlidir. Fakat kaplama yapılacak yüzeyin aşındırmasının çok kaba yapılması, yapışma dayanımını arttırmaz. Şekil 2.14’te görüldüğü gibi yapışma dayanımı belirli bir aşındırma değerine geldikten sonra düşer [30].



Şekil 2.13. Metalik katmanın yüzeye bağlanmasının şematik gösterimi [28]



Şekil 2.14. Yapışma dayanımına aşındırmanın etkisi [29]

Isı İletimi

Isı, farklı sıcaklıklara sahip iki noktada stabilizasyonun sağlandığı durumlarda, bir değerden ötekine aktarılan enerjidir. Stabilizasyon sürecinin sağlandığı proseste, iletilen enerjinin miktarının belirlenmesi ısı iletimi olarak tanımlanmaktadır. Isı iletimi, sıcaklığı yüksek olan değerden alçak olan değere doğru sağlanmakta, sıcaklıklar her iki değerinde de eşitlendiğinde, iletim son bulmaktadır. Isı iletimi iletim, taşınım ve ışıınım olmak üzere 3 yolla sağlanmaktadır. İletim, birbiri ile etki halinde bulunan partiküllerin, birbirine enerji aktarması olarak tanımlanabilir. Isı iletimi gaz ve sıvılarda taneler arası boşluklar büyük olduğu için, bu tanelerin birbiri ile etkileşimine bağlı olarak aktarılmaktadır. Katılarda ise taneler arası boşlukların azlığı nedeniyle iletim çoğunlukla titreşimler ile sağlanmaktadır.

Fourier ısı iletimi denklemi Eş. 2.1’de verilmiştir. Buna göre k ısı iletim katsayısı, A yüzey alanı, Δx mesafe ve Δt sıcaklık farkı olarak tanımlanmaktadır. [31,32].

$$\dot{Q}_{\text{iletim}} = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (\text{Eş. 2.1})$$

3. ALTLIK MALZEMESİ VE ÖZELLİKLERİ

3.1. Paslanmaz Çelikler

İçerisinde en az %11 krom bulunduran bir çelik grubu paslanmaz çelik olarak adlandırılmaktadır. Paslanmaz çeliklerde yüzeyde bulunan, sünek, saydam, ince ve yoğun bir oksit tabakası korozyona karşı mükemmel bir direnç sağlamaktadır. Bu yapı, her türlü servis koşulunda karşılaşılabilecek korozyona karşı dayanım sağlamaktadır.

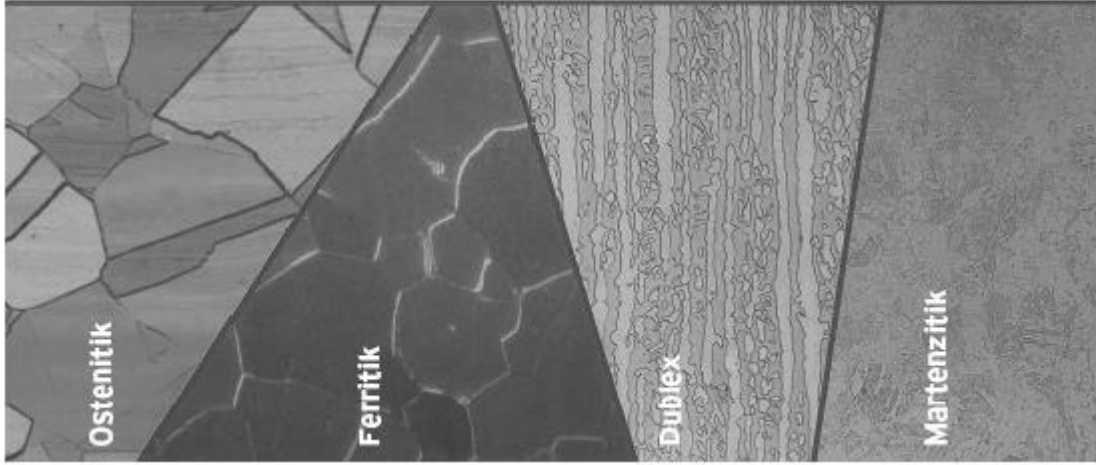
Alaşım içeriği düşük olan paslanmaz çelikler koroziif ortama, alaşım içeriği yüksek olanlar ise çok yüksek koroziif ve aşındırıcı koşullara karşı dirençlidirler. Servis koşullarının yüksek sıcaklık ve basınç gerektirdiği durumlarda kullanılabilirler.

Talaşlı imalat, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme, kaynak, kabiliyetleri sayesinde paslanmaz çelikler kolaylıkla biçimlendirilebilirler. Paslanmaz çelikler, çoğunlukla soğuk şekillendirme ile pekleştirilerek dayanımları geliştirilir. Bu durum ise yüksek oranda fayda/maliyet avantajı sağlamaktadır [33,34].

Paslanmaz çeliklerin imalat proseslerinin de üzerinde belirli etkileri olduğu yüzeylerindeki oksit yapı sayesinde, koroziif ortamlara karşı dayanımları yüksektir. Yüzeyde bulunan yapı üzerinde herhangi bir bozulma olması durumunda, malzeme bozulma oranında korozyona karşı dirençsiz hale gelir. Paslanmaz çeliklerde korozyona bağlı hasarlar; genel korozyon, aralık korozyonu, taneler arası korozyon, noktasal korozyon ve gerilmeli korozyon biçiminde gerçekleşir [34,35].

3.2. Türlerine Göre Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çeliklerin yaygın olarak kullanılan türleri ferritik, östenitik, martenzitik ve dubleks çeliklerdir. Resim 3.1'de östenitik, ferritik, dublex ve martenzitik paslanmaz çeliklerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Resim 3.1. Paslanmaz çeliklerin mikroyapı görüntüleri [34]

Türbin kanat malzemesi olarak da kullanılan 304L kalite paslanmaz çelikten imal edilen numuneler üzerinde bu çalışmanın deneysel çalışmalarımızı yürütüldüğünden burada östenitik paslanmaz çeliklere daha fazla değinilmiştir.

3.2.1. Östenitik paslanmaz çelikler

Bu malzemeler, bileşim kaliteleri ve kullanım alanları bakımından paslanmaz çelikler arasında en zengin gruptur. Ferromanyetik olmayan bu çelikler hem düşük hem de yüksek sıcaklığın bulunduğu servis koşullarında, YMK östenitik yapıları değişmediğinden, ısıtılarda normalleştirme ve sertleştirme yapılamaz. Tavlama sonrası bile, sıcak soğuk şekillendirilebilmeleri, toklukları, süneklikleri, servis koşullarının düşük sıcaklığa sahip olması durumunda dahi çok iyidir. Yalnızca soğuk şekil değiştirme yapılarak mukavemetleri geliştirilebilir. Krom oranı %16-26, nikel oranı maksimum %36 ve maksimum %20 oranında mangana sahiptirler. Östeniti oluşturan temel elementler Ni ve Mn'dır. En az alaşıma sahip türleri 301 ve 304 kaliteleridir. 304 Kalite östenitik çelik, şekillendirilebildiği, sünekliği ve çok iyi korozyon dayanımı ile endüstride sıklıkla kullanılan bir paslanmaz çelik türüdür. Korozyona karşı dayanım sağlayan ve ferrit yapıcı etki sağlayan krom, östenit yapıcı alaşım elementleri ilave edilerek dengelenir [34]. 1.4301 Kalite paslanmaz olarak da adlandırılan bu çelik 304L paslanmaz çeliğinin mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. AISI 304L paslanmaz çelik mekanik değerleri [34]

Mekanik Özellikler	Değerler
Çekme dayanımı	501-701 MPa
Akma dayanımı	≥ 191 MPa
Sertlik, HB	≤ 214

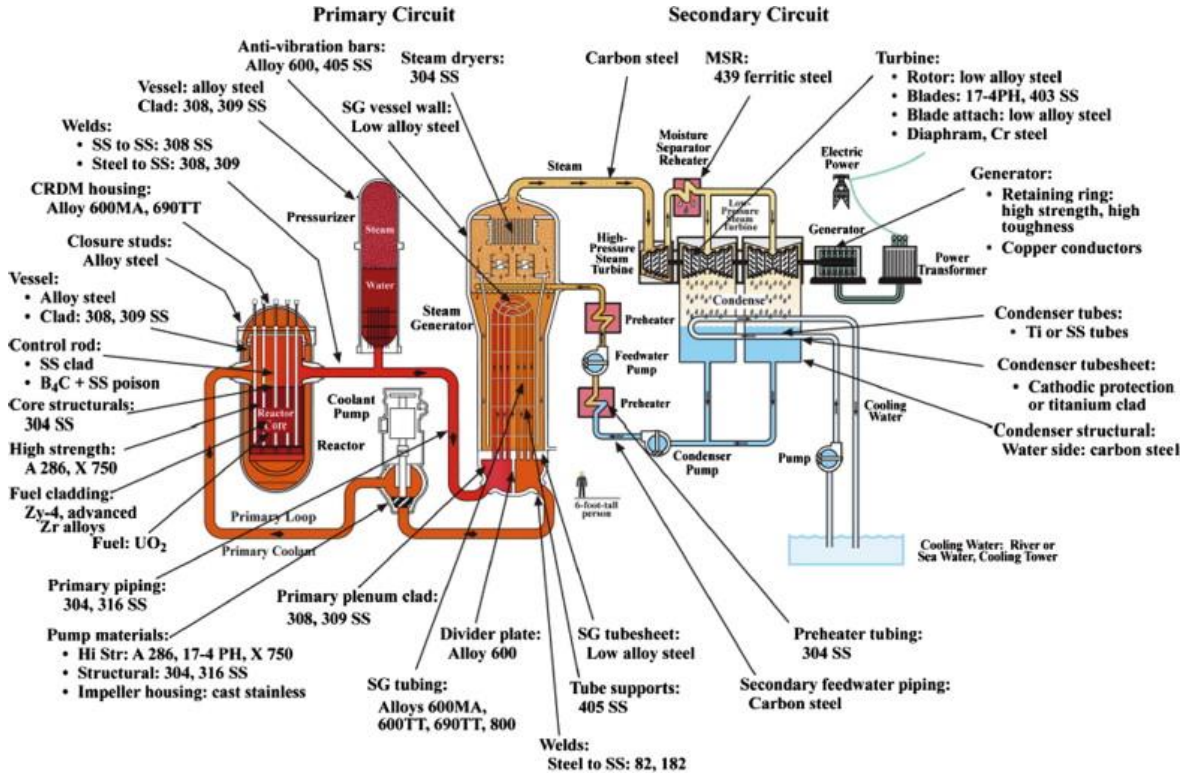
AISI 304L paslanmazlar; endüstriyel mutfaklar, petrokimya tesisleri, enerji, havacılık, otomotiv, gıda endüstrisi vb. kullanım alanlarına sahiptir [35,36]. Östenitik paslanmaz çelik türleri ve kullanım alanları aşağıda Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2’de belirtilen kullanım alanlarının yanı sıra enerji alanında özellikle termik ve nükleer santral ekipmanlarında sıklıkla östenitik paslanmaz çelikler kullanılmaktadır.

Şekil 3.1’de tipik bir nükleer santral reaktör adası ve konvansiyonel adasına ait ekipmanlar ve malzemeleri gösterilmektedir. Özellikle basınçlı kaplar, kızdırıcı borular, kontrol çubukları mekanizma malzemeleri, türbin kanatları, pompalar, reaktör basınç kabı vb. birçok ekipmanda östenitik paslanmaz çelikler kullanılmaktadır.

Çizelge 3.2. Östenitik paslanmaz çelik türleri ve kullanım alanları [34]

AISI kalite	Kullanım alanları
301	Raylı sistem araçları, enerji santralleri, otomotiv sanayii
302	Gıda taşıma donanımları, petrokimya tesislerinin donanımları
304	Pompa parçalarında, borulamada, soğuk kaplar, sac kaplama
314L	Enerji santralleri, türbin ve yardımcı ekipmanlar basınçlı tanklar,
309	Enerji santrali basınçlı kaplarında, eşanjörlerde, uçak ısıtıcıları, yüksek sıcaklıkta çalışan ekipmanlar
310	Doğalgaz kombine çevrim santralleri türbin ve yardımcı ekipmanlar, ısı değiştiricileri
316	Basınçlı kap, kızdırıcı borular, kaynak fiçileri, maya tüplerinin üretiminde kullanılır.
316L	Kaynak prosesinin fazla kullanıldığı alanlarda



Şekil 3.1. Nükleer santral ana ekipmanları ve malzemeleri [36].

3.2.2. Ferritik paslanmaz çelikler

İçeriğinde % 13-31 krom içeren alaşımlardır. Mikroyapıları çoğunlukla ferritik olduğundan, bu yüzden de ferritik paslanmaz çelik olarak adlandırılırlar. Korozif ortamlara ve yüksek sıcaklığa karşı dayanım gerektiğinde, bu çelikler tercih edilir. Nikel içeren paslanmaz çeliklerle aynı oranda korozyon direncine sahip bu çeliklerde, nikel kullanılmadığı için ekonomiktirler. Bunların yanında, kaynaklanabilme kabiliyetlerinin düşüklüğü, sünekliklerinin azlığı, çentik hassaslıkları nedeniyle, östenitik paslanmaz çeliklere göre daha az kullanım alanına sahiptir. Bu çeliklerde bulunan süneklik sorununun çözülmesi ihtiyacından dolayı, çok düşük miktarda C ve N'a sahip ferritik paslanmaz çelikler geliştirilmiştir. Bu güncel ferritik çelikler korozif ortamlara karşı çok daha iyi bir dayanıma ve kaynaklanabilirliğe sahiptirler [37].

3.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler

Çeliğin türüne göre östenitleme sıcaklığı 900-1000°C arasında değişmektedir. Bahsi geçen sıcaklıklara çıkılarak su verme yapıldığında, içyapı martenzitik olarak elde edilir. Mekanik dayanım ve sertlik karbon yüzdesi ile birlikte artar. Martenzitik çelikler tavllanmış veya ıslah edilmiş şekilde kullanılır. Tavllanmış martenzitik çelikler şekillendirildikten sonra, su verme ve sonrasında temperleme işlemi uygulanır. Temperleme sıcaklığı değiştirilerek farklı özellikler elde edilebilir. Korozyon dayanımı çok iyi seviyede istenirse, önerilen ısı işlem prosedürlerine uyulması önemlidir [33,35].

Martenzitik paslanmaz çelikler, çoğunlukla su verme işlemi yapılmış ve tavlama ısı işlemi yapılmış halde kullanılırlar. Çok yavaş soğuma hızlarında ve normal hava koşullarında dahi bu malzemede martenzit yapı oluşuna neden olur. Düşük ve orta derecedeki sıcaklıklarda martenzitik yapıya sahip malzemelerin korozyon ortamına karşı dayanımları yüksektir. Paslanmazlık özelliklerini 815°C'ye kadar korurlar. Yüksek sıcaklıklarda uzun süre kalırlarsa korozyon başlayabilir. Bu yüzden 700°C ve üzeri sıcaklıklarda kullanımı uygun değildir. Nb, Mo ve W'nin değişen oranlarda (en fazla %3) ilave edilmesi sonucunda, mekanik özellikler daha da geliştirilmektedir [33,35].

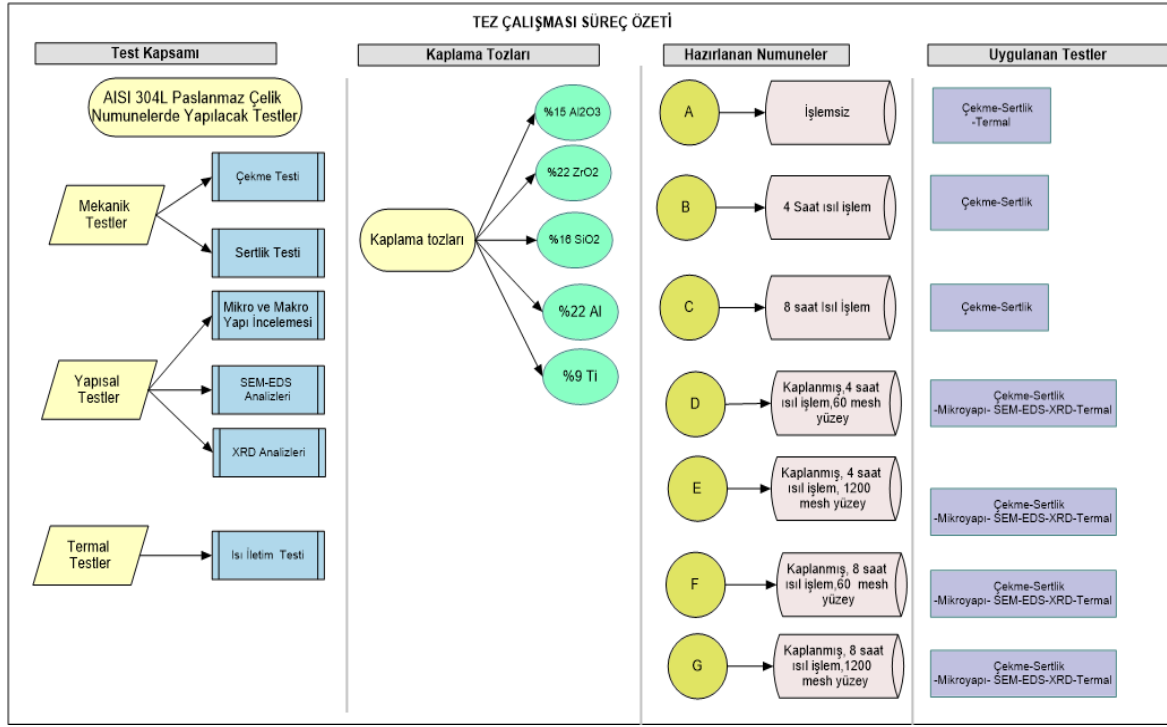
3.2.4. Ferritik - östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler

Yapısında ferrit ve östenit fazını birlikte bulunduran bu çelikler dubleks paslanmaz çelikler olarak da adlandırılmaktadır. Bu çift fazlı yapısı nedeniyle, hem östenitik hem de ferritik paslanmaz çeliklerin özellikleri aynı malzemede elde edilmektedir. Bu yüzden; çok iyi gerilme korozyonu dayanımı, tokluk düzeyinin iyi bir seviyede olması ve süneklik gibi özelliklere sahiptirler.

Çoğunlukla ısı değiştiricilerinde, termik santral ve nükleer santral ekipmanlarında, deniz petrol arama platformlarında, deniz araçları ekipmanlarında, fiziksel ve kimyasal koruyucu ekipman imalatında kullanım alanına sahiptirler [33,35].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, numuneler üzerinde yapılan işlemler ve testler Şekil 4.1’de kısaca özetlenmiştir.



Şekil 4.1. Kullanılan numuneler ve yapılan testler

4.1. Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Altlık malzemesi

Yapılan çalışmada AISI 304L östenitik paslanmaz çelik malzemedan imal edilmiş altlık numuneler kullanılmıştır. Optik emisyon spektroskopisi ile elde edilmiş AISI 304L paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

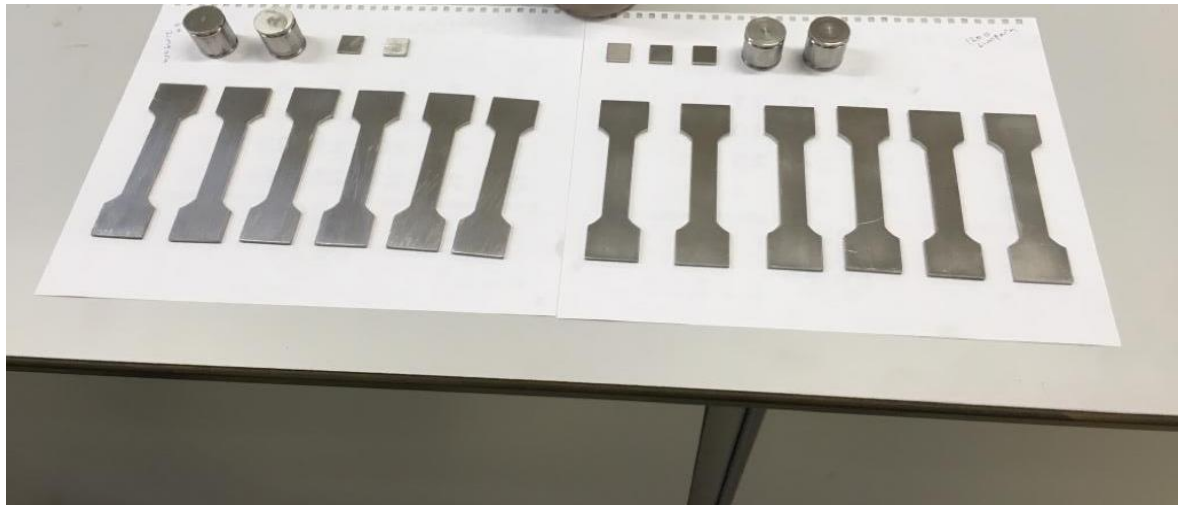
Bu çalışma için numuneler 3 mm kalınlıkta AISI 304L östenitik paslanmaz çelik sacdan lazer kesme ile ilave talaşlı imalata gerek duymadan istenilen ölçülerde kesilmiştir. Isıl iletim numuneleri ise 25 mm çapında silindirik malzemedan 30 mm boyunda kesilip, torna

tezgâhında işlemesi yapılarak ölçümü yapılacak cihaza girecek boyutlara getirilmiştir. Tüm numuneler kaplama işlemi öncesinde, yüzeyleri hem mekanik hem de kimyasal olarak temizlenmiştir. Kaplama uygulanmamış tüm altlık numuneleri ve yedekleri Resim 4.1’de gösterilmiştir. Kaba yüzeyli D ve F kodlu numuneler mekanik olarak 60 mesh zımpara (R_a , 3-5 μm) ve daha sonra kimyasal olarak temizlenmiştir. İnce yüzeyli E ve G numuneleri ise mekanik olarak 1200 mesh zımpara (R_a , 0.2-0.5 μm) ve daha sonra kimyasal olarak temizlenmiştir.

Çizelge 4.1. AISI 304L altlık malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0,045	1,15	0,35	0,005	0,003	18,7	12,3

Yapılan çalışmada kullanılan numuneler ısıtıl işlem süreleri, yüzey durumları ve kaplama durumlarına göre kodlanarak Çizelge 4.2’de belirtilmiştir. Hazırlanan numuneler (B,C,D,E,F,G) 1200 °C sıcaklıkta 4 ve 8 saatlik sürelerde ısıtıl işlem tabi tutulmuştur. Numunelerin ısıtıl işlemlerinin yapıldığı tünel tipi ısıtıl işlem fırını kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerden ısı iletim numunelerinin ısı kaynağından girişteki kaplama performansının ölçülmesi amacıyla yalnızca bir yüzeyine kaplama uygulanırken (D,E,F,G) mikroyapı ve mekanik analiz numunelerinde ise her iki yüzeyine de kaplama işlemi uygulanmıştır.



Resim 4.1. Çalışmalarda kullanılan numunelerin görüntüsü

Çizelge 4.2. Numune kodları ve işlem durumları

Numune Kodu	Isıl İşlem Süresi	Kaplama Durumu	Yüzey Aşındırması
A	Yok	Yok	Yok
B	4 Saat	Yok	Yok
C	8 Saat	Yok	Yok
D	4 Saat	Var	Kaba Yüzeyli
E	4 Saat	Var	İnce Yüzeyli
F	8 Saat	Var	Kaba Yüzeyli
G	8 Saat	Var	İnce Yüzeyli

4.1.2. Kaplama malzemeleri

Kaplama malzemeleri olarak Zirkonyum oksit (Zr_2O_3), Alüminyum oksit (Al_2O_3), Silisyum dioksit (SiO_2), Bor karbür (B_4C), Alüminyum (Al) ve Titanyum (Ti) kullanılmıştır. Çizelge 4.3'te kaplama işlemlerinde kullanılan tozların karışım oranları ve boyutsal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Kullanılan kaplama tozunun özellikleri

Toz Cinsi	Toz Karışım Oranı (%)	Tane Boyutu (μm)
Alüminyumoksit	15	50-110
Zirkonyumoksit	23	
Silisyum	16	
Alüminyum	22	
Titanyum	9	
Borkarbür	15	

4.2. Kaplama Ön Hazırlıkları

Öncelikle kaplanacak numunelerin tüm yüzeyleri mekanik ve kimyasal olarak temizlenmiştir. Kaplamanın yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişiminin tespiti amacıyla, bazı numunelerin yüzeyleri zımparalanmıştır. Yüzeyleri temizlenen numunelerden bir kısmının kaplanacak yüzeylerine, pürüzlendirmek amacıyla 60 veya 1200 mesh zımpara

uygulanmıştır. Toz kaplama malzemeleri öncelikle homojen dağılım olacak şekilde kuru halde karıştırılarak bir toz karışımı elde edilmiştir. Bu karışım numune yüzeylerine bir katman halinde serilmiştir. Serilen bu tozların yüzeyde tutunmalarını sağlamak amacıyla bir bağlayıcı kaplama uygulanmıştır.

4.3. Kaplama İşlemleri

Bu çalışmada kullanılan bağlayıcı karışım Resim 4.2 gösterilmiştir. Toz karışımı numune yüzeylerine bir seperatör kullanılarak eşit süreyle serme şeklinde uygulanmıştır. Yüzeyine toz yayılan numunelere bağlayıcı kaplama uygulaması düşük basınçta püskürtme şeklinde yapılmıştır.



Resim 4.2. Numunelerin yüzeyine toz karışımı ve bağlayıcı kaplama uygulanması

Isı iletimi ölçümü yapılacak numunelerde tek yönlü ısı akışının sağlanması için bir yüzeye kaplama uygulanırken (Resim 4.3), yapısal inceleme ve mekanik test yapılacak numunelerin her tüm yüzeylerine hazırlanan kaplama uygulanmıştır (Resim 4.4). Muffel tipi fırında 100°C sıcaklıkta 5 saat süre ile kurutulan numuneler (B,C,D,E,F,G) normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Atmosfer kontrolsüz tüp fırında (Resim 4.5) 1200°C sıcaklığa çıkarılmış, bu sıcaklıkta 4 ve 8 saat süreyle bekletilmiştir. Bekletme sonunda her bir numune normal havada oda sıcaklığına soğutulmuştur.



Resim 4.3. Kaplama karışımı uygulanmış yapısal analiz numuneleri ve ısı iletim numuneleri



Resim 4.4. Kaplama karışımının uygulandığı çekme numuneleri



Resim 4.5. Tünel tipi ısıt işlem fırını

4.4. Yapısal İncelemeler

4.4.1. Makro ve Mikro Yapısal İnceleme

Bu çalışmada, mikroyapı incelemesi için 3 mm kalınlıktaki AISI 304L paslanmaz çelik sac malzemeden 3x10x10 mm ölçülerinde numuneler (A-G) hazırlanmıştır. Bu çalışma kapsamında sadece altlık ile kaplama ara yüzeyi incelenmiştir. Isıl işlem şartlarının paslanmaz çelik malzeme yapısında meydana getirdiği değişimler incelenmemiştir. Yapısal inceleme numuneleri bakalite gömme işlemini takiben, 220-1200 mesh zımparalar ve daha sonra 3 µm elmas pasta solüsyonlu keçelerde parlatma işlemi uygulanarak hazırlanmıştır. Hazırlanmış numunelerin mikroyapı görüntüleri Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarı'nda "LEICA DM 4000M Metal Optik Mikroskop" kullanılarak farklı büyütmelerde görüntüleri elde edilmiştir.

4.4.2. SEM analizleri

Hazırlanan yapısal inceleme numuneleri (Resim 4.6) Gazi Üniversitesi SEM Laboratuvarı'nda JEOL JEM 6060 LV Tarama Elektron Mikroskobu kullanılarak SEM görüntüleri alınmış ve aynı zamanda kaplama/geçiş bölgesi/altlık malzeme arasında element geçişlerin tespiti amacıyla EDS analizleri yapılmıştır. Son olarak bu element geçişlerin alansal dağılımının gösterilmesi için haritalama işlemi de yapılmıştır.



Resim 4.6. Optik ve tarama elektron mikroskobunda kullanılan yapısal inceleme numuneleri

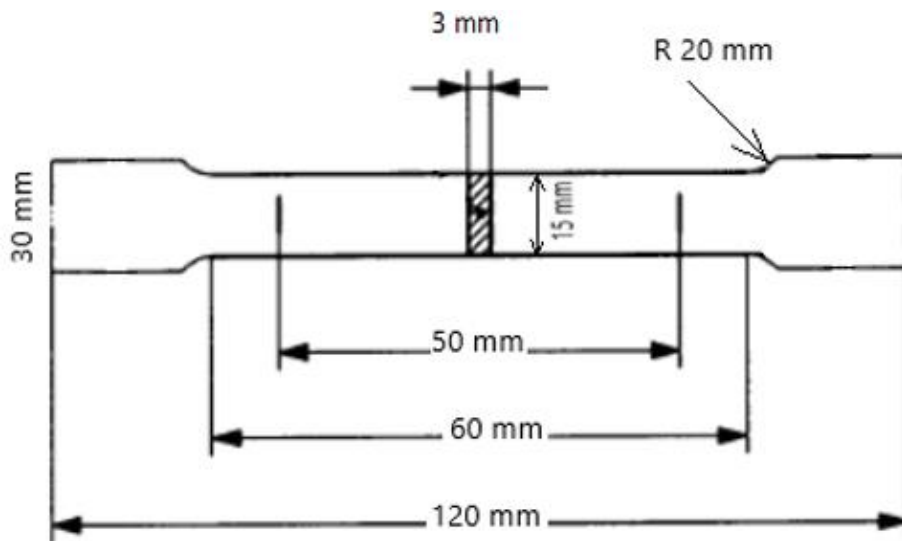
4.4.3. XRD analizleri

Kaplanmış numunelerin yüzeyinde kullanılan kaplama tozları ve uygulanan işlemler meydana gelebilecek yeni oluşumların tespiti amacıyla XRD (X Işınları Kırınımı) Cihazı kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizler sırasında numunelerin tüm yüzeyleri taranarak geniş alandaki değişimler incelenmiştir.

4.5. Mekanik İncelemeler

4.5.1. Çekme testleri

Üretilen numunelerde kaplama ve ısı işlemin etkisini incelemek (A,B,C,D,E,F,G numuneleri) üzere çekme testi uygulanmıştır. Çekme testleri 3 mm kalınlıkta AISI 304 paslanmaz çelik sacdan TS EN 6892-1 standardına uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 4.2). Hazırlanan numuneler INSTRON 3369 çekme test cihazında (Resim 4.7) 1 mm/dakika hızda oda sıcaklığında teste tabi tutulmuştur. % uzama değişimleri ekstansometre kullanılarak tespit edilmiştir. Test sonuçlarının değişimi ortalama $\pm 8,3$ oranındadır.



Şekil 4.2. TS EN 6892-1 standardına uygun çekme test numune ölçüleri



Resim 4.7. INSTRON 3369 çekme test cihazı

4.5.2. Sertlik testleri

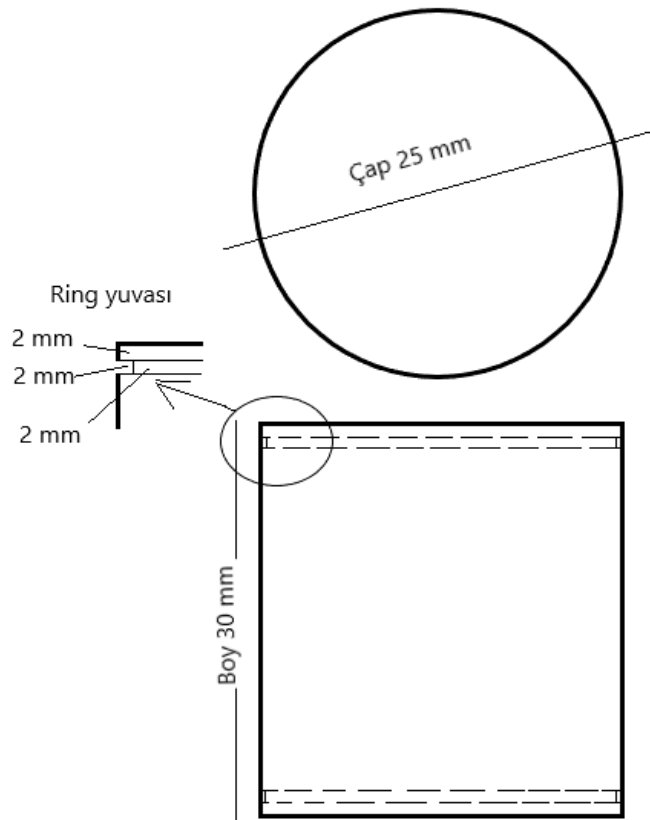
Üretilen numunelerde kaplama ve ısı işlemin etkisini incelemek (A,B,C,D,E,F,G numuneleri) üzere, mikro yapı numuneleri kullanılarak sertlik testi uygulanmıştır. Sertlik testleri Vickers metoduyla 10 kg yük uygulanarak EMCO Test Duravision 2000 sertlik cihazında (Resim 4.8) gerçekleştirilmiştir. Her numunede 6 farklı ölçüm yapılmış ve sonuçlar bölümünde ortalaması verilmiştir. Test sonuçlarının değişimi ortalama $\pm 5,3$ oranındadır.



Resim 4.8. EMCO Test Duravision 2000 sertlik test cihazı

4.6. Termal İncelemeler

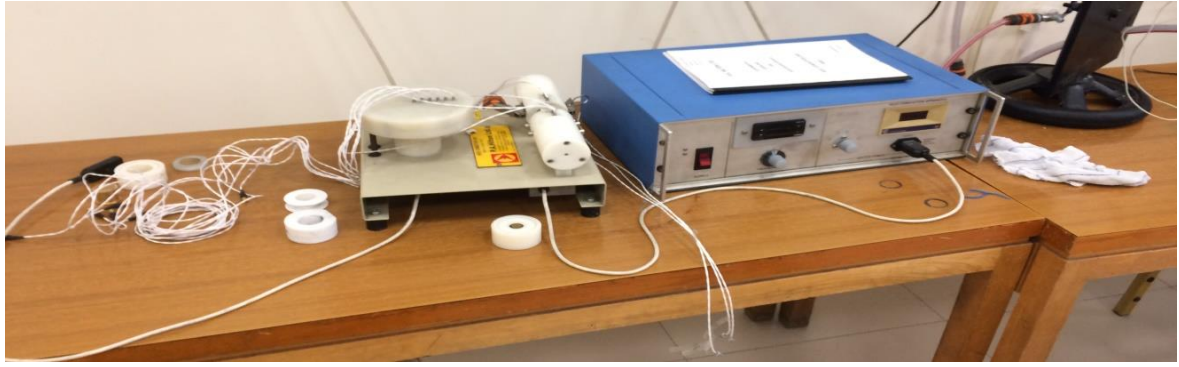
Çalışma kapsamında yapılan kaplamaların ısı iletimine etkilerini incelemek amacıyla; Resim 4.9’da verilen torna tezgahında (boyutları Şekil 4.3’te verilen numuneler) hazırlanmış ve PA HİLTON Heat Conduction Unit H920 cihazında (Resim 4.10) ısı iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde kaplama yapılmış numunelerin karşılaştırılması amacıyla ısı iletkenlik ve yüzey işlemi uygulanmamış A numunesi ile kaplama yapılmış D,E,F ve G numuneleri kullanılmıştır. Uygulanan işlemler neticesinde önemli oranda yapısal değişimin olması ve özellikle kaplamanın etkisinin incelenmesi nedeniyle sadece ısı iletkenlik uygulanmış B ve C numunelerine ısı iletkenlik testleri uygulanmamıştır.



Şekil 4.3. Isı iletkenlik numune boyutları



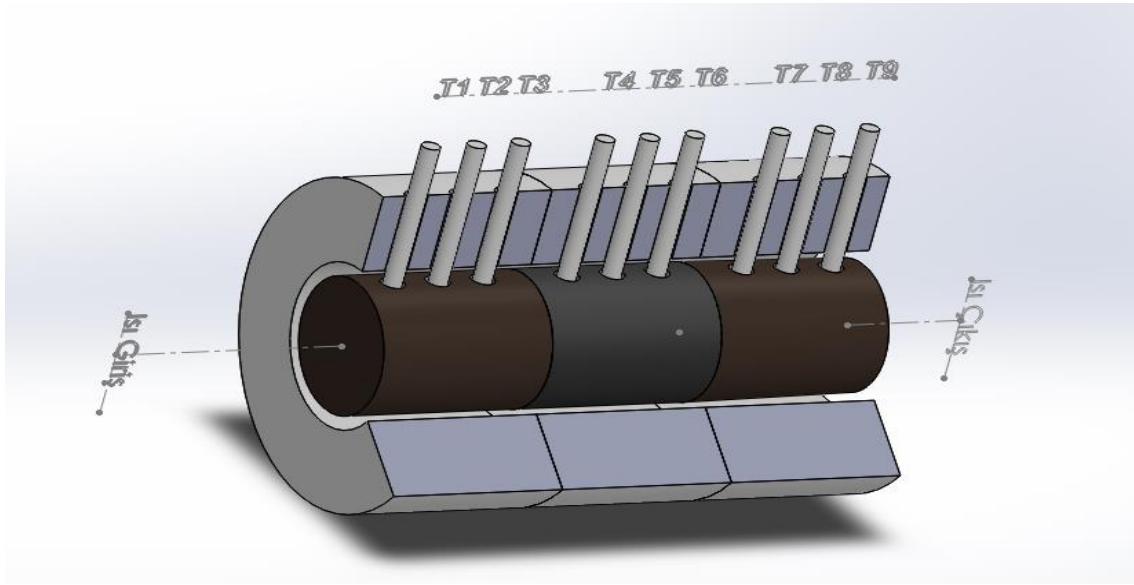
Resim 4.9. VOUGA CW 6284 D üniversal torna tezgahı



Resim 4.10. PA HILTON Heat Conduction Unit H920 ısı iletim test cihazı

Testlere başlanmadan önce alınan ölçümlerin stabilizasyonu ve doğrulaması işlemleri kalibrasyon numunesi ile yapılmıştır. Daha sonra ise 10 ve 15 W olmak üzere iki farklı güç kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Isı iletim cihazı ve ölçüm sistemi Şekil 4.4’de kesit görüntü olarak şematize edilmiştir. Kaynağında üretilen ısı önce ilk pirinç bloğu ısıtmakta, buradaki ısı asıl test numunesine (orta kısımda) iletilmekte ve en son olarak diğer tarafındaki pirinç bloğa doğru aktarmaktadır. Pirinç bloklardan birincisi referans sıcak blok, diğeri ise soğuk referans blok olarak adlandırılmaktadır. Test süresince ısıtılan sıcak referans bloktan, ölçümü yapılması istenen numune ve soğuk bloğa kadar sürekli sıcaklıklar $^{\circ}\text{C}$ cinsinden toplam 9 adet ısıl çift kullanılarak ölçülmektedir. Bu ısıl çiftler her bölge için 3’er adet olacak şekilde ve eşit mesafelerde konumlandırılmıştır.

Teste başlandıktan ısı sıcak pirinç numunenin direnç tarafındaki ilk sıcaklık ölçümü stabilize olana kadar devam ettirilmiştir. Sıcaklık değerleri belirli bir noktada dengelendiğinde, cihazdaki tüm ölçüm noktalarından alınan sıcaklık değerleri kayıt edilmiştir. Bu işlem 10-15W değerinde ayrı ayrı tüm numuneler için tekrarlanmıştır. Böylelikle farklı gerilim değerlerinde de ısı iletim katsayılarının benzerliği tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Isı iletim katsayısı ölçüm sisteminin şematik gösterimi

Isıl çiftlerden okunan veriler Fourier Isı İletim Kanunu'na göre aşağıda verilen Eş. 4.1 kullanılarak “k” ısı iletim katsayısı W/mK cinsinden hesaplanmıştır. Bu denklemdeki $\Delta T/\Delta x$, sıcaklık gradyanı olarak adlandırılmakta ve T sıcaklığının x'e göre değişim hızını ifade etmektedir.

$$k = - \frac{\dot{Q}_{iletim}}{A} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (Eş. 4.1)$$

İki farklı yüzey kalitesi (60 ve 1200 Mesh), iki farklı ısıl işlem prosesi (4 ve 8 saat termokimyasal ısıl işlem süresi) uygulanmış ve hiçbir ısıl işleme maruz kalmamış numune olmak üzere toplam beş farklı numune kullanılarak, iki farklı güç skalasında (10 ve 15 Watt)

yapılan testler 3'er tekrar halinde gerçekleştirilmiş ve aynı sonuçlar alındığında test doğru olarak kabul edilmiştir.

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular; uygulanan işlemlerin yapısal, mekanik ve ısı iletim özelliklerine etkileri olarak ayrı başlıklar halinde değerlendirilmiştir.

5.1. Termokimyasal Kaplama İşleminin Yapısal Özelliklere Etkilerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında 1200 °C’de 4 ve 8 saat süreyle uygulanan termokimyasal işlemin kaplama katmanı, geçiş bölgesi ve altlık malzemesi bakımından yapısal etkilerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçlarla; optik, SEM-EDS ve XRD analizleri olarak ayrı ayrı başlıklar halinde ele alınmıştır.

5.1.1. Kaplama/altlık optik inceleme sonuçları

Paslanmaz çelik malzemeler türbin kanadı olarak kullanılmaktadır. Bu malzemenin kimyasal olarak doymuş ve yüzeyde kararlı bir krom oksit tabakasının bulunması nedeniyle özellikle difüzyona bağlı bir kaplamanın zor olacağı düşüncesiyle altlık olarak seçilmiştir.

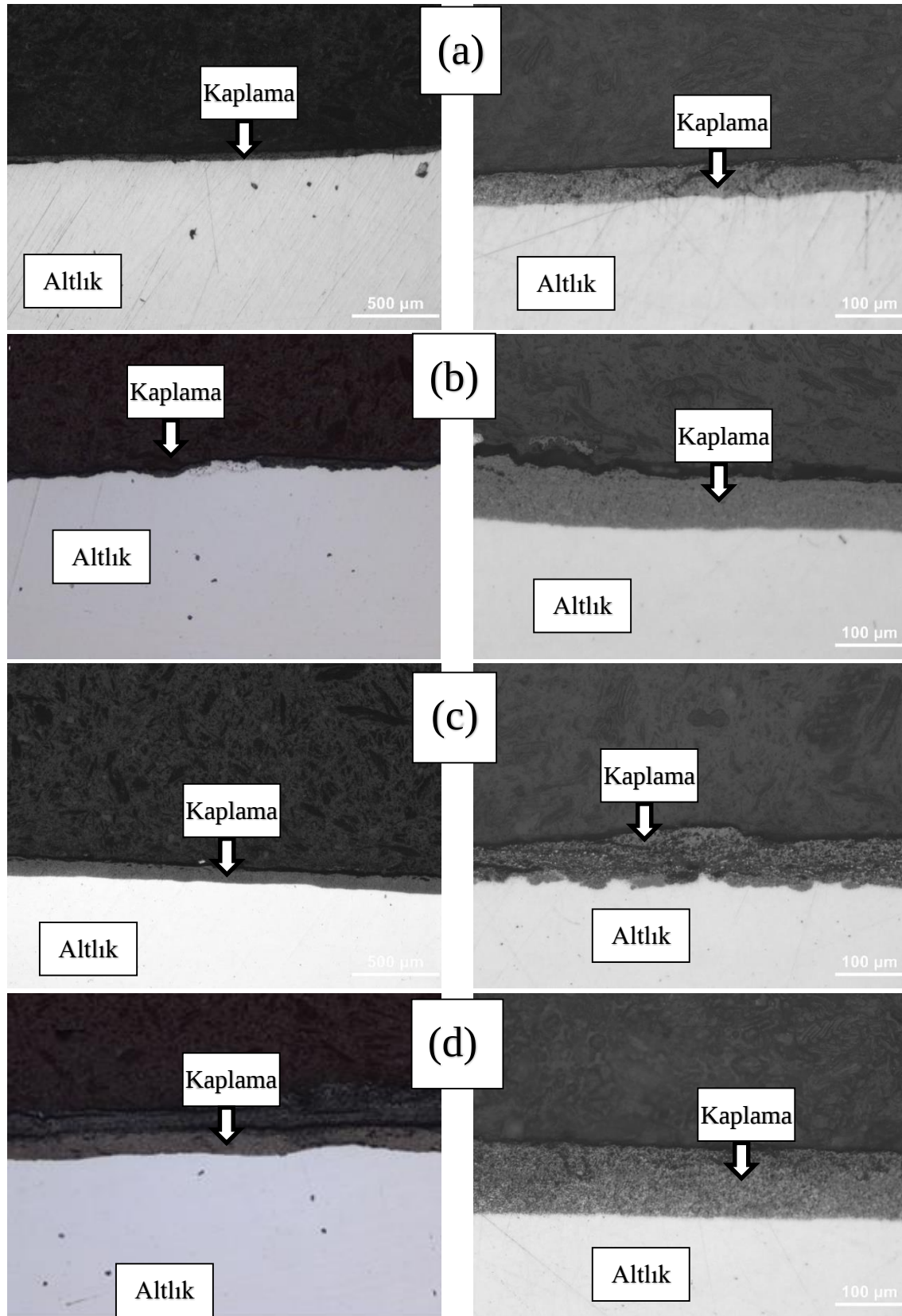
Çalışmada öncelikli konu uygulanan termokimyasal işlem şartlarına bağlı olarak; kaplama ve altlık ilişkileri, kaplama/altlık arasındaki element geçişlerinin tespiti ve altlık yüzey pürüzlülüğü, arayüzey morfolojisi, kaplama kalınlığı, kaplama sürekliliği, kaplama yapısındaki değişimleri tespitinin yapılmasıdır. Dolayısıyla bu ve ilerleyen bölümlerde verilen sonuçlar ve yapılan yorumların bu bakımdan ele alınması daha uygun olacaktır.

Yapılan termokimyasal işlemler sonucunda kaplama/altlık arayüzey görüntülerindeki değişimler Resim 5.1’de verilmiştir. Resimler incelendiğinde kaba yüzeyli (60 mesh) D ve F numunelerinde, ince yüzeyli (1200 mesh) E ve G numunelerine kıyasla daha girinti çıkıntılı (zipzaglı) bir arayüzey meydana gelmiştir. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün kaplama yapılabilirliğe ve elde edilen sonuçlara etkileri de incelenmiştir. Genel olarak

bakıldığında; kaba ve ince yüzeyli numunelerin her ikisinde de termokimyasal işlem sonucunda altlık yüzeyinin tümüyle kaplanabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, işlem süresinin 4 saat'ten 8 saat'e uzamasıyla katman kalınlığının arttığı, ancak bu artışın ince yüzeyli numunede daha fazla olduğu görülmüştür. Kaba yüzeyli D numunesinde ortalama $\cong 17 \mu\text{m}$ olan katman kalınlığı, sürenin artmasıyla birlikte F numunesinde ortalama olarak $\cong 64 \mu\text{m}$ 'a kadar artarken, ince yüzeyli E numunesinde ortalama $\cong 18 \mu\text{m}$ olan katman kalınlığı, sürenin artmasıyla birlikte G numunesinde ortalama olarak $\cong 73 \mu\text{m}$ 'a kadar artmıştır. Kaba zımpara ile yüzeyi mekanik olarak hazırlanan numunelerin (D ve F) yüzeylerinde daha derin çizikler meydana gelmektedir. Kaplama malzemesi serimi süre ve kaplama malzeme miktarı bakımından tüm numunelerde eşit uygulanmıştır. Dolayısıyla aynı miktarda kaplama malzemesi serimi yapılan kaba yüzeyli numunelerde çizikler içerisine dolan kaplama malzemeleri daha ince kaplama oluşmasına neden olmuştur. Bunun nedeni, her ne kadar yüzey pürüzlülüğü artıkça kaplamanın yapışma (tutunma) kabiliyeti daha iyi olduğu bilinse de, yüzey pürüzlülüğünün belirli bir değerden sonra artmasının da tam ters bir etki yarattığı literatürde belirtilmektedir [29,30]. Bu durumdan hareketle bizim çalışmamızda da yüzey pürüzlendirilmeleri 60 ve 1200 mesh ile yapıldığından kaba yüzey ile ince yüzey kıyaslandığında bu ters etkinin yarattığı durumdan olduğu düşünülmektedir.

Termokimyasal işlem süresindeki artış, difüzyonun sağlanabilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. D numunesinde arayüzeyde çizikler içerisinde kaplama ve altlık karışımı az olurken, F numunesinde bu durum artmıştır. Sürenin artmasıyla kaba yüzeyli numunelerde arayüzeyin daha düz bir görünüme sahip olduğu görülmektedir. Kaba yüzeyli numunelerde yüzey alanının artmasıyla difüzyon oluşumu teşvik edildiğinden dolayı ara yüzeyde daha fazla bir değişim meydana gelmiştir. İnce yüzeyli numuneler incelendiğinde E numunesi ile G numunesinde oluşan altlık/kaplama arayüzey morfolojisinin çok fazla bir değişim göstermediği görülmektedir. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün kaplama işlemlerinde önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Oluşan kaplamalar incelendiğinde; metal ve bileşiklerin karışımından meydana geldikleri ve yer yer gözeneklerin bulunduğu görülmektedir. Bu çalışma için kaplama tozu seçimi yapılırken, metalik ve seramik tozların birlikte kullanımı tercih edilmiştir. Seramik kaplamalar, genellikle mekanik zorlamalar karşısında esneklik göstermemekte ve kolaylıkla çatlak oluşup kırılma meydana gelmektedir. Diğer yandan seramik kaplama ile metal altlık arasında ıslatma ve dolayısıyla kaplama yapılabilirlik açısından sıkıntılar olabilmektedir. İşte bu nedenlerle bu çalışmada farklı metal ve seramik tozları birlikte kullanılmış, metal tozlarının kaplama içerisinde esneklik ve ıslatma kabiliyetini geliştirmesi hedeflenmiştir. Bununla ilgili sonuçlar ileride mekanik özellikler kısmında geniş bir biçimde ele alınacaktır. Ancak burada ifade edilmesi gereken en önemli husus termokimyasal işlem sonunda metal ve seramik tozlarının birlikte başarıyla kullanılabileceği, bir kaplama yapılabilceği görülmüştür. Metal tozları kimyasal ve fiziksel açıdan katkılar sağlaması amacıyla kaplama toz karışımına ilave edilmiştir. Bu metal tozlarından düşük sıcaklıkta eriyebilen Al tozunun gözenek miktarının azaltılmasında ve altlık ile daha iyi bir ıslatma ve bağ oluşturmada bakımından fayda sağladığı düşünülmektedir.

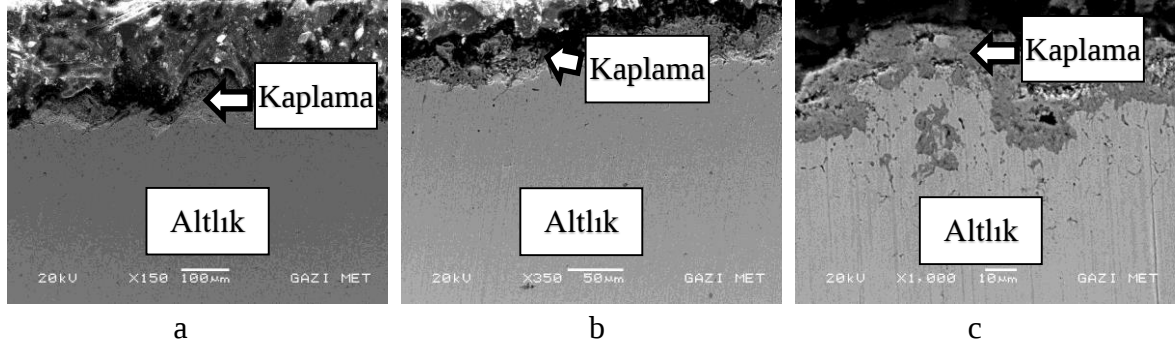


Resim 5.1. Kaplanmış yüzey/matris ara yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri, a) D, b) E, c) F ve d) G numunesi

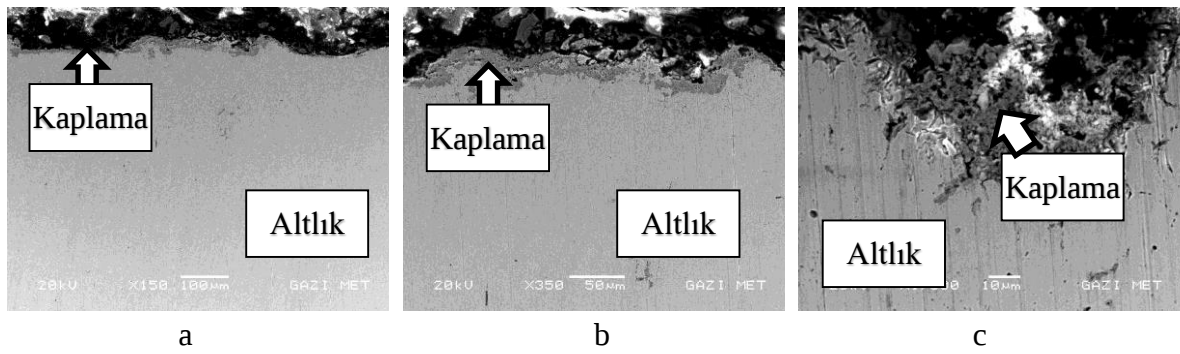
5.1.2. SEM-EDS analizleri

Üretilen numunelerdeki altlık/kaplama arayüzeyinin oluşumu, morfolojisi, element geçişi gibi durumların daha detaylı olarak incelenmesi amacıyla yapılan SEM görüntüleme sonuçları Resim 5.2-5’de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde meydana gelen kaplamanın kalınlığındaki ve yapısında meydana gelen değişim optik mikroskopla alınan görüntülere göre daha net görülmektedir. Termokimyasal işlem süresi ve buna bağlı difüzyon arttıkça kaplama kalınlığı da artmıştır.

Kaplama/altlık arayüzeyleri incelendiğinde; kaba yüzeyli D numunesinde (Resim 5.2) termokimyasal işlem sürenin kısa olması (4 saat) nedeniyle yüzeydeki çiziklerin kaplama ile tamamen doldurulamamış olduğu, özellikle çiziklerin dip bölümlerinde boşlukların bulunduğu ve buna bağlı olarak daha gözenekli olduğu görülmektedir. Buna karşın, aynı süre işlem uygulanan ince yüzeyli E numunesinde (Resim 5.3) ise altlık ile kaplama arasında gözenek miktarının daha az olduğu, arayüzeyin genel olarak daha bağlanmış (yapışmış) görülmektedir. Literatürde, gözenek miktarının azalması ile sertlik, dayanım ve dinamik yüklere karşı tepkide artış meydana geldiği belirtilmektedir [37]. Bizim çalışmamızda da gözenek miktarının azalması ile yapısal değişimler olumlu yönde değişmiştir. Fiziksel değişimlerin de aynı oranda değiştiği mekanik incelemeler bölümünde verilmiştir. Al_2O_3 , kaplamadaki yapışma dayanımını, aşınma dayanımı ve gözenek miktarını ciddi oranda azalttığı daha önceki yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır [38,39]. Yine bu arayüzeyin daha bağlanmış olması nedeniyle karşılıklı olarak difüzyon meydana geldiği kaplama/altlık arasındaki geçiş bölgesinin genişlemesinden açıkça görülmektedir.



Resim 5.2. D numunesine ait SEM görüntüsü

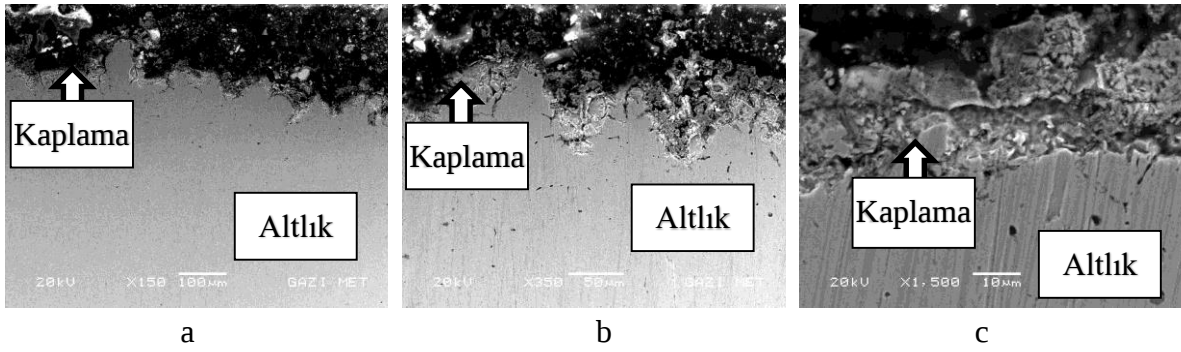


Resim 5.3. E numunesine ait SEM görüntüsü

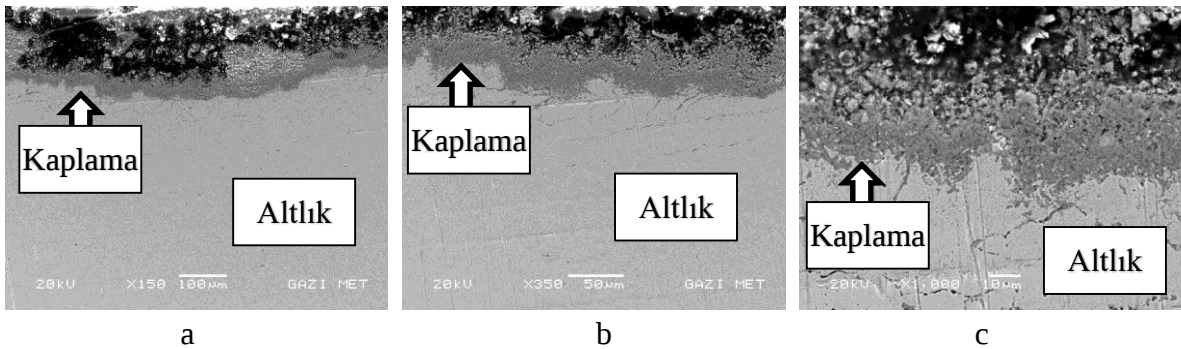
Termokimyasal işlem süresinin uzamasıyla (8 saat) birlikte hem kaba yüzeyli F numunesi (Resim 5.4) hem de ince yüzeyli G numunesinde (Resim 5.5) kaplama kalınlığı artmış, altlık/kaplama arayüzeyinde daha az gözenek olduğu görülmüştür. Çoğunlukla 380°C sıcaklık geçildiğinde, kaplamaya ait yapı kristalize hale dönüşmektedir [40,41]. Kaplamanın yapısında meydana gelen bu değişimlerin ısı işleme bağlı olduğu ve bileşimindeki bor miktarından da etkilendiği literatürde belirtilmektedir [42]. Aynı zamanda altlık/kaplama arayüzeyinde difüzyon miktarının arttığı ve altlık malzeme yüzeyinde dönüşümlerin de meydana geldiği tespit edilmiştir.

Termokimyasal işlem süresinin artması neticesinde kaplama malzemesinin özellikle kaba yüzeyli F numunesinde gözenekleri kısa işlem süresine kıyasla daha iyi doldurduğu ve gözeneklerin azaldığı açıkça görülmektedir. İnce yüzeyli malzemede ise zaten kısa sürede dahi iyi olan bu durum daha da gelişmiştir. Kaplama malzemesi ile altlığın etkileşim süresinin artması gözenek miktarını olduğu kadar şeklini de etkilemektedir. Kısa işlem

sürelerinde kaba olan gözenekler küçülmüş ve homojen olarak dağılmıştır. Tüm bu sonuçların yansımaları mekanik ve ısı iletim özelliklerinde de görülecektir. İşlem süresin artması ile meydana gelen yüksek oranda difüzyon ve geçiş bölgesindeki genişlemeye bağlı olarak arayüzey bağı artmaktadır.



Resim 5.4. F numunesine ait SEM görüntüsü

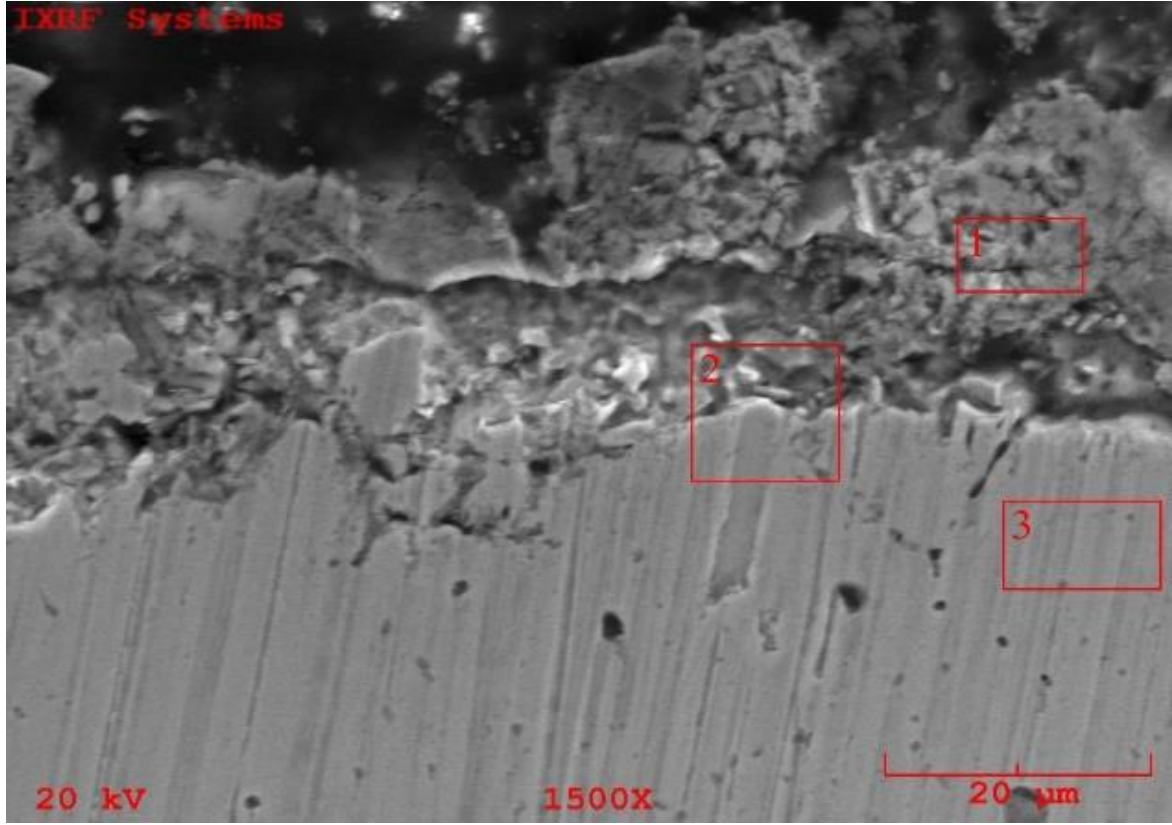


Resim 5.5. G numunesine ait SEM görüntüsü

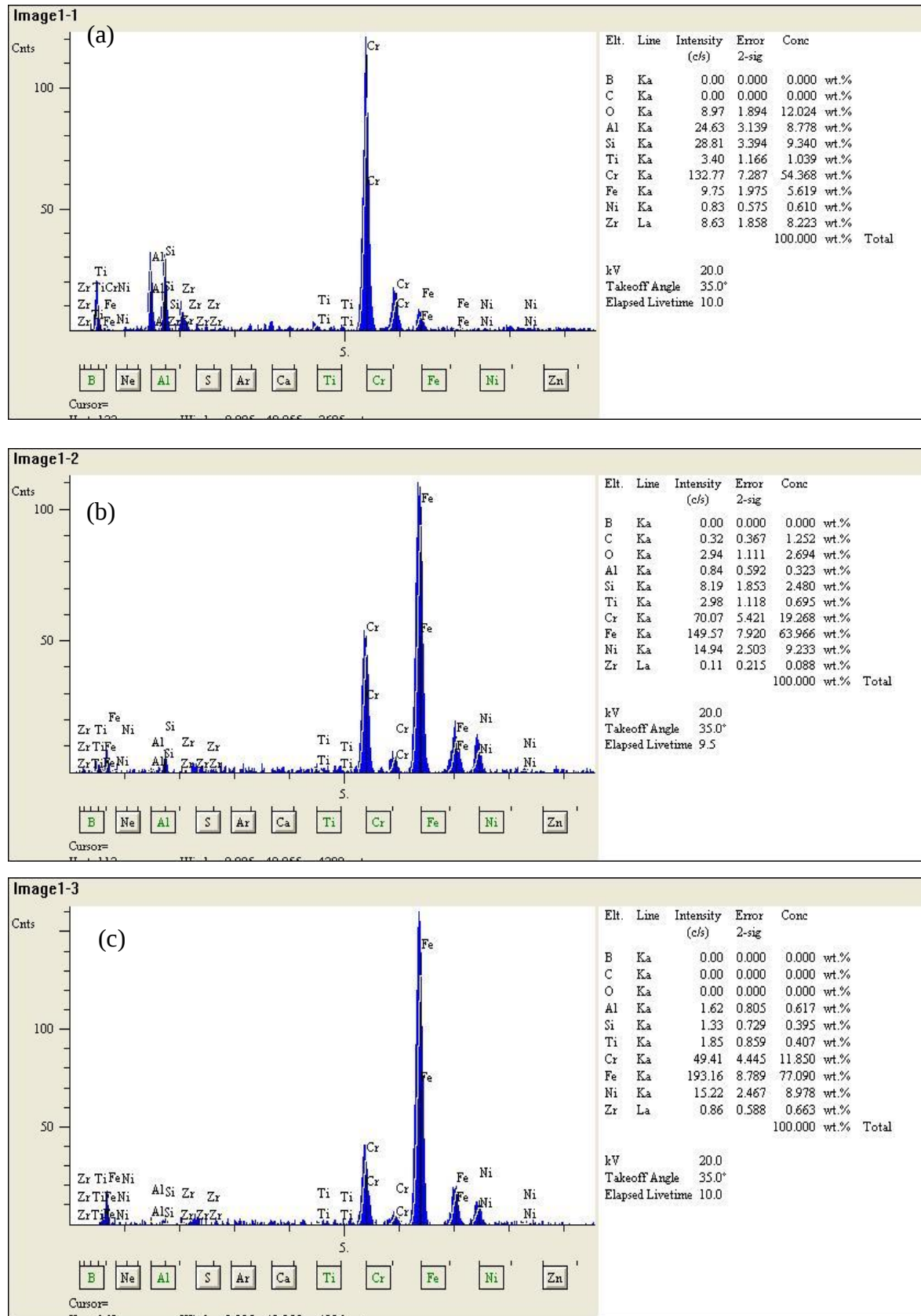
Optik görüntülerdeki bu değişimlerin daha da detaylı olarak incelenmesi için SEM incelemeleri de yapılmış ve elde edilen görüntüler, EDS (IXRF) analizleri ve kaplama/altlık arayüzey bölgesindeki element geçişlerinin haritaları Resim 5.6-17’de verilmiştir. Analizler tüm numunelerde 3 bölgeden alınmıştır. 1’inci kaplama, 2’nci geçiş bölgesi ve 3’üncü ise altlık malzemesidir. Tüm kaplama yapılan numunelerde ortak nokta olarak aynı malzeme karışımıyla kaplama yapıldığından dolayı kaplamada Zi, B, C, Al, Ti, O gibi elementler ve bunların bileşikler bulunmektedir.

Diğer yandan altlık malzemede ise Cr, Ni, Mn ve Si elementleri ve krom oksit gibi bileşikler öne çıkmaktadır. Numunelerin tümüne bakıldığında altlık içerisinde fazlaca bulunan Fe, Cr, Ni, Si gibi elementlerin ara bölge ve hiç bulunmadıkları kaplamaya doğru yayındıkları görülmektedir. Diğer yandan kaplama içerisinde zengin oranda bulunan Zr, Al, Ti, O gibi elementlerin ise arayüzey geçiş bölgesi ve hiç bulunmadıkları altlığa doğru yayındıkları tespit edilmiştir. Bu karşılıklı geçişler nedeniyle genel olarak; numunelerin yüzeylerinde kaplama tabakasının oluşturulabildiği, altlık malzeme yüzeyindeki kararlı krom oksit tabakasının kısmen veya tamamen bozulabildiğini, buna bağlı olarak termokimyasal işlemin başarıyla gerçekleştiğini, özellikle arayüzeyde kimyasal bağlanmanın başarılabildiğini göstermektedir.

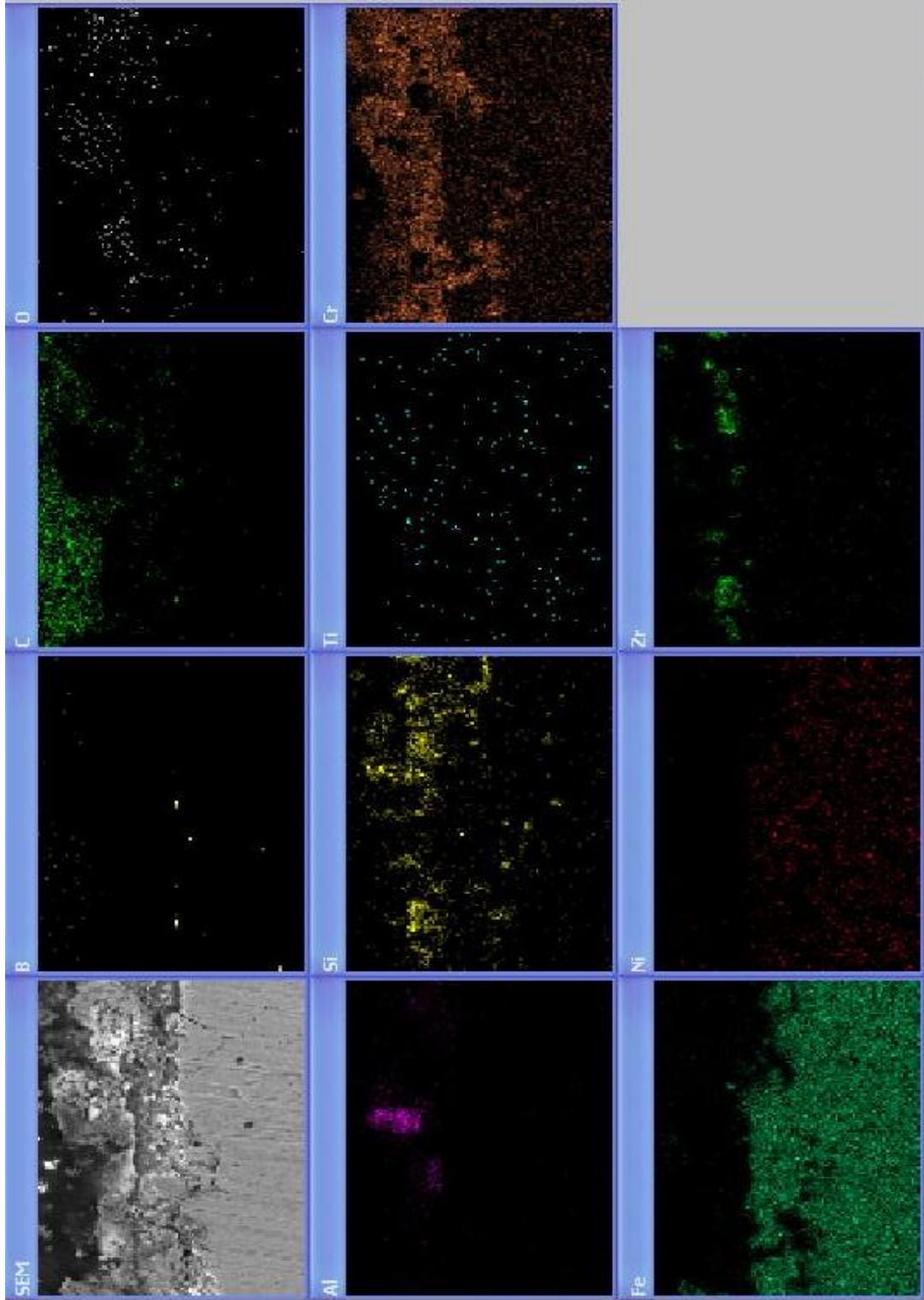
Numune bazında incelendiğinde; kısa süre (4 saat) termokimyasal işlem görmüş kaba yüzeyli D numunesi (Resim 5.6-8) ile ince yüzeyli E numunesinde (Resim 5.9-11) oluşan yayınma karşılaştırıldığında; ince yüzeyli numunede temas yüzey alanda altlık ile kaplama malzemesinin tam bir yapışma yapması söz konusudur. Ayrıca EDS sonuçları incelendiğinde, E numunesinde daha az gözenek bulunması gibi nedenlerle kaplama-altlık arasında daha fazla karşılıklı yayınma meydana gelmiştir. Ayrıca E numunesinde temasın ve yayının varlığı tane sınırlarından başlayan yapısal dönüşümlerle de kanıtlanmaktadır. Çünkü bir metalik malzeme yapısında en kararsız bölgelerden biriside tane sınırlarıdır. Bu nedenle gerekli şartlar oluşturulduğunda, tane sınırlarında kolaylıkla dönüşüm meydana gelebilmektedir. Bu nedenle E numunesinde geçiş bölgesinde kısıtlı da olsa tane sınırlarında yapısal dönüşümler başlamıştır.



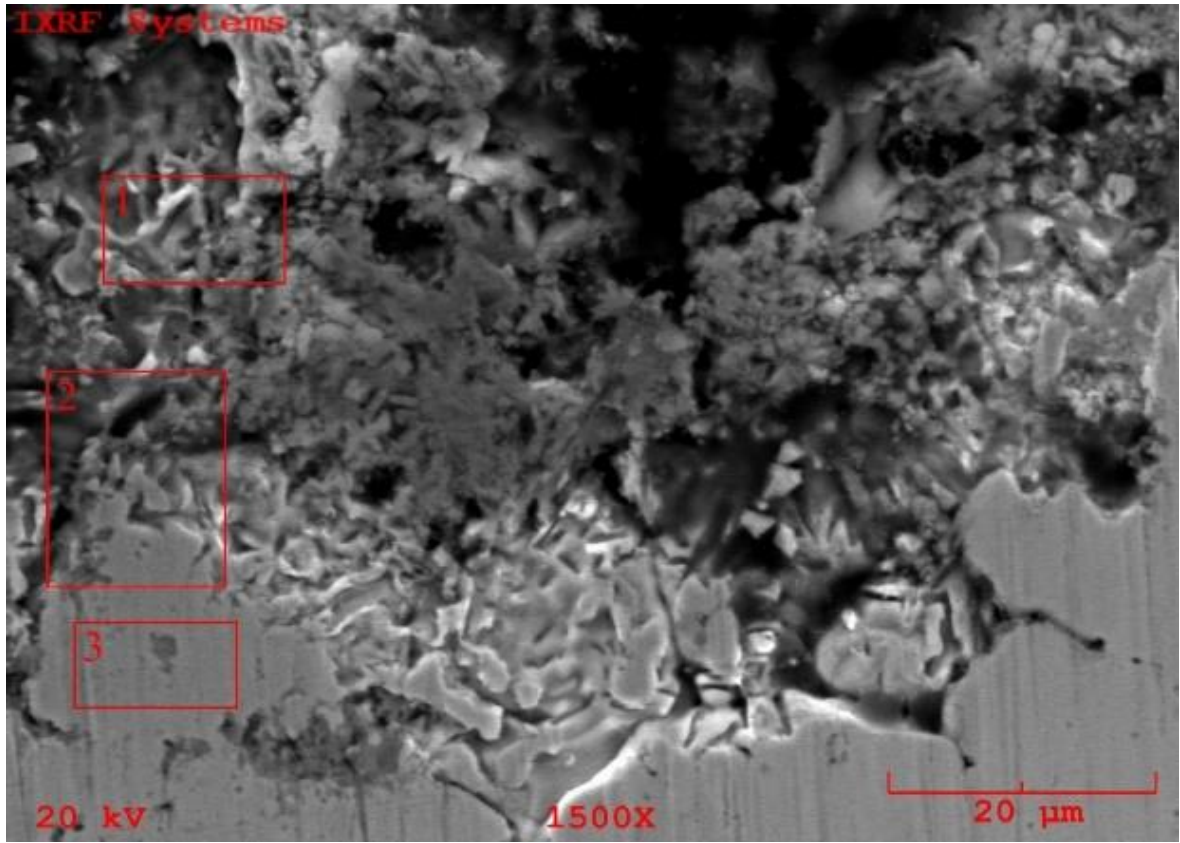
Resim 5.6. D numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan bölgeler



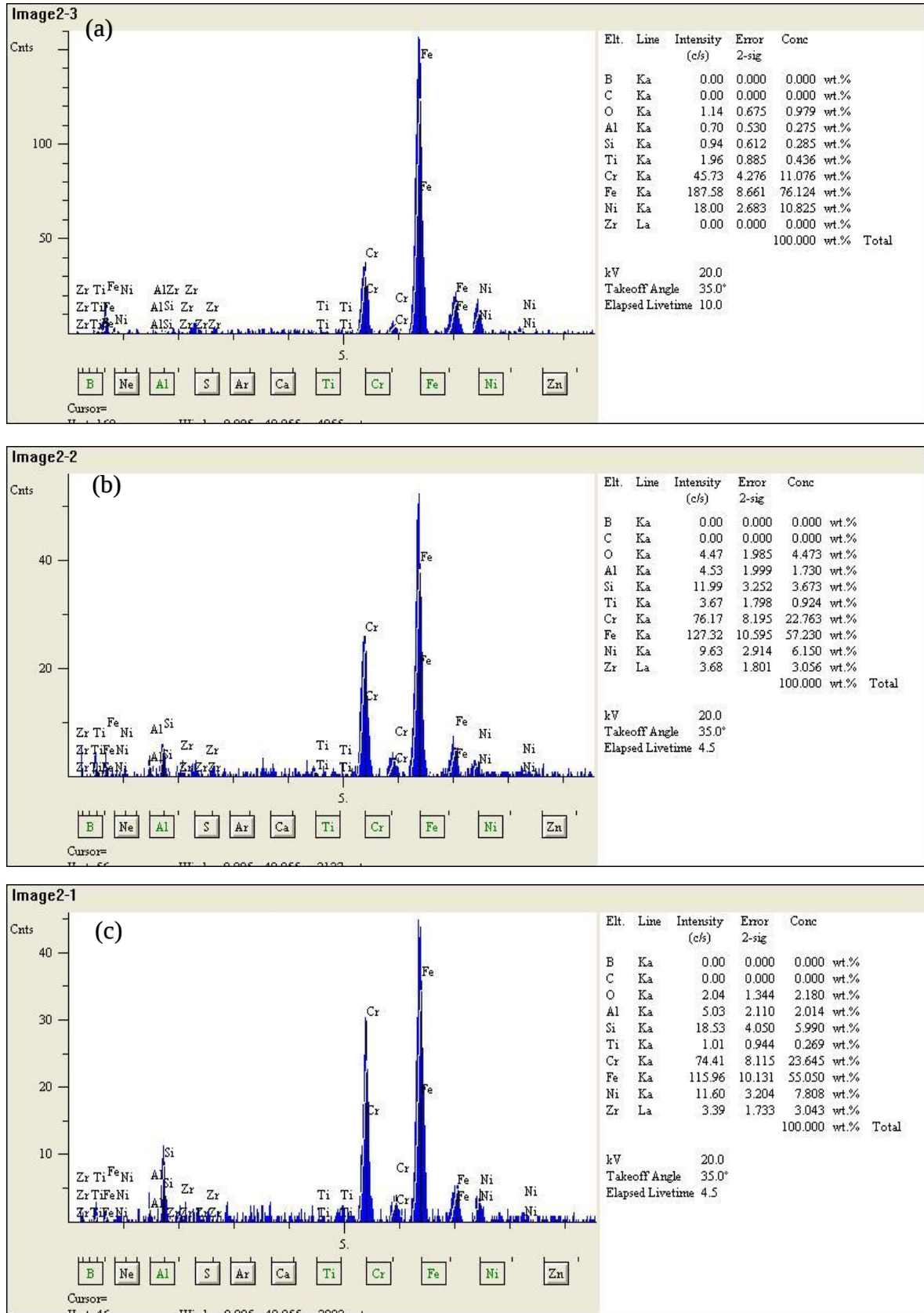
Resim 5.7. D numunesinde a) kaplama, b) arayüzey geçiş bölgesi ve c) altlık malzemedeki nokta element analizi



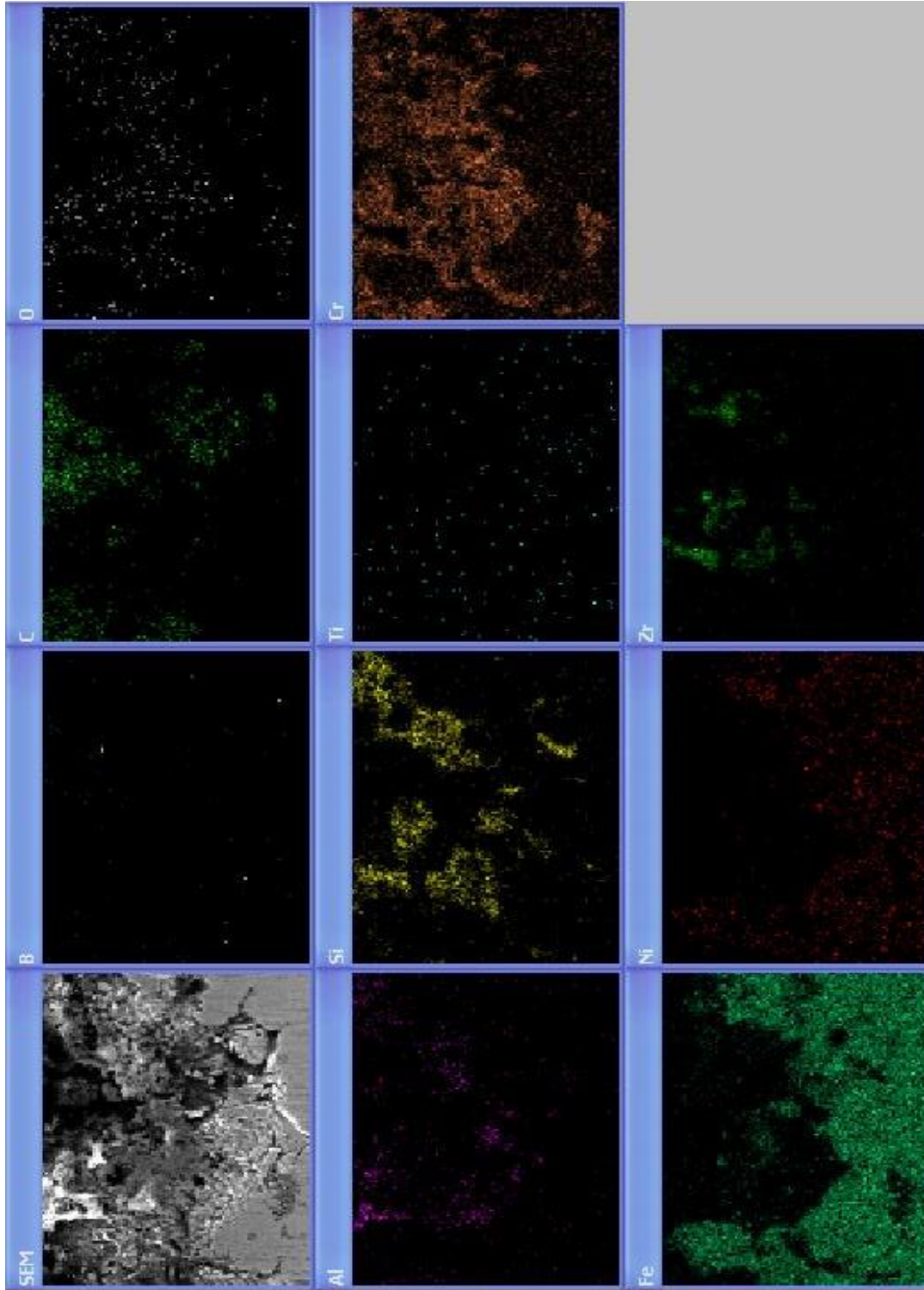
Resim 5.8. D numunesinde kaplama/altlık arayüzeyinde bölgesel element geçiş analizi



Resim 5.9. E numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan bölgeler



Resim 5.10. E numunesinde a) kaplama, b) arayüzey geçiş bölgesi ve c) altlık malzemedeki nokta element analizi



Resim 5.11. E numunesinde kaplama/altlık arayüzeyinde bölgesel element geçiş analizi

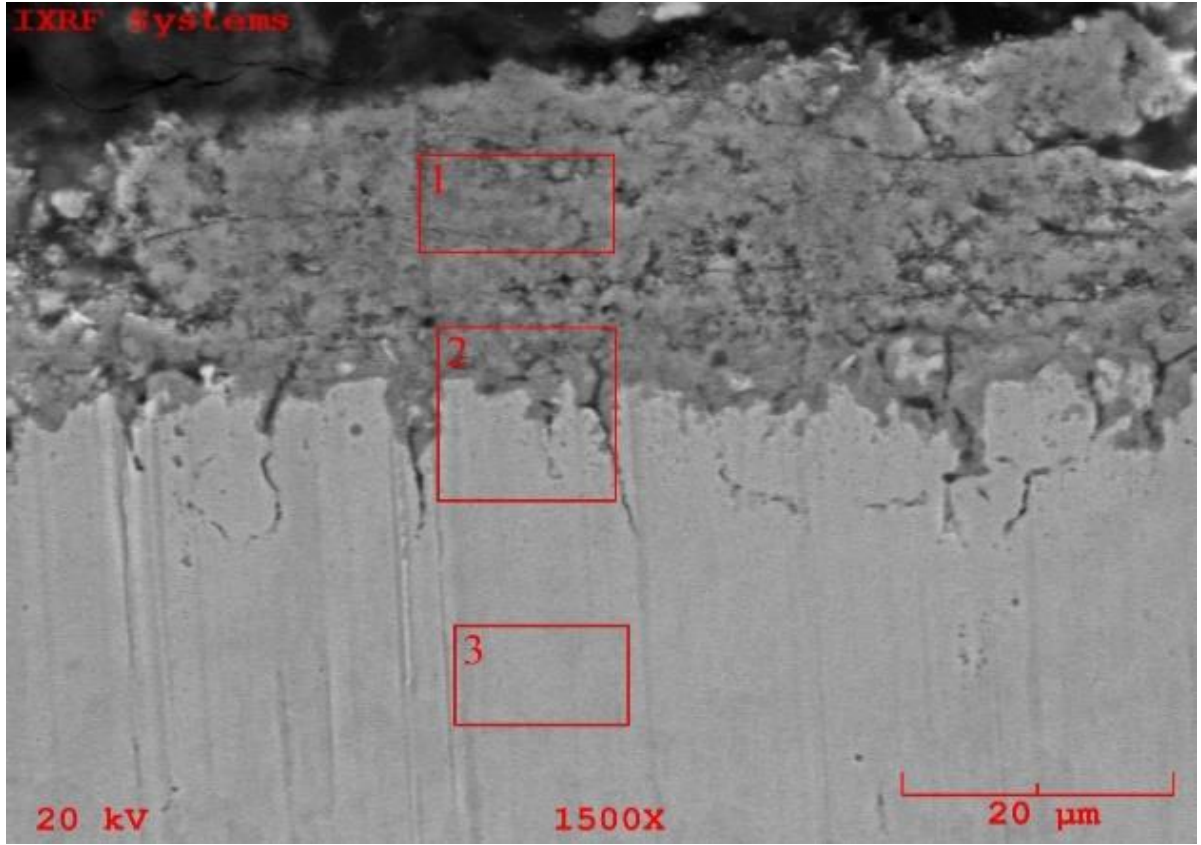
Diğer yandan daha uzun süre (8 saat) termokimyasal işlem görmüş kaba yüzeli F numunesi (Resim 5.12-14) ile ince yüzeyli G numunesinde (Resim 5.5-17) oluşan yayınma karşılaştırıldığında; genel olarak her iki numunede de kısa süre işlem uygulanan numunelere

kıyasla (D ve E) altlık ile kaplama arasında karşılıklı olarak yayınmada artış meydana gelmiştir. Kaba ve ince yüzeyli numuneler bazında değerlendirildiğinde, kısa işlem süresinde olduğu gibi yine ince yüzeyli G numunesinde daha fazla bir yayınmanın olduğu görülmektedir. Ancak farklı olarak sürenin uzamasıyla kaba numune yüzeyine kaplama malzemesi daha az gözenek kalacak şekilde doldurmuş ve daha fazla temas yüzey alanının oluşmasına yol açmıştır. Dolayısıyla temas alanının artması yayınmayı teşvik etmiştir.

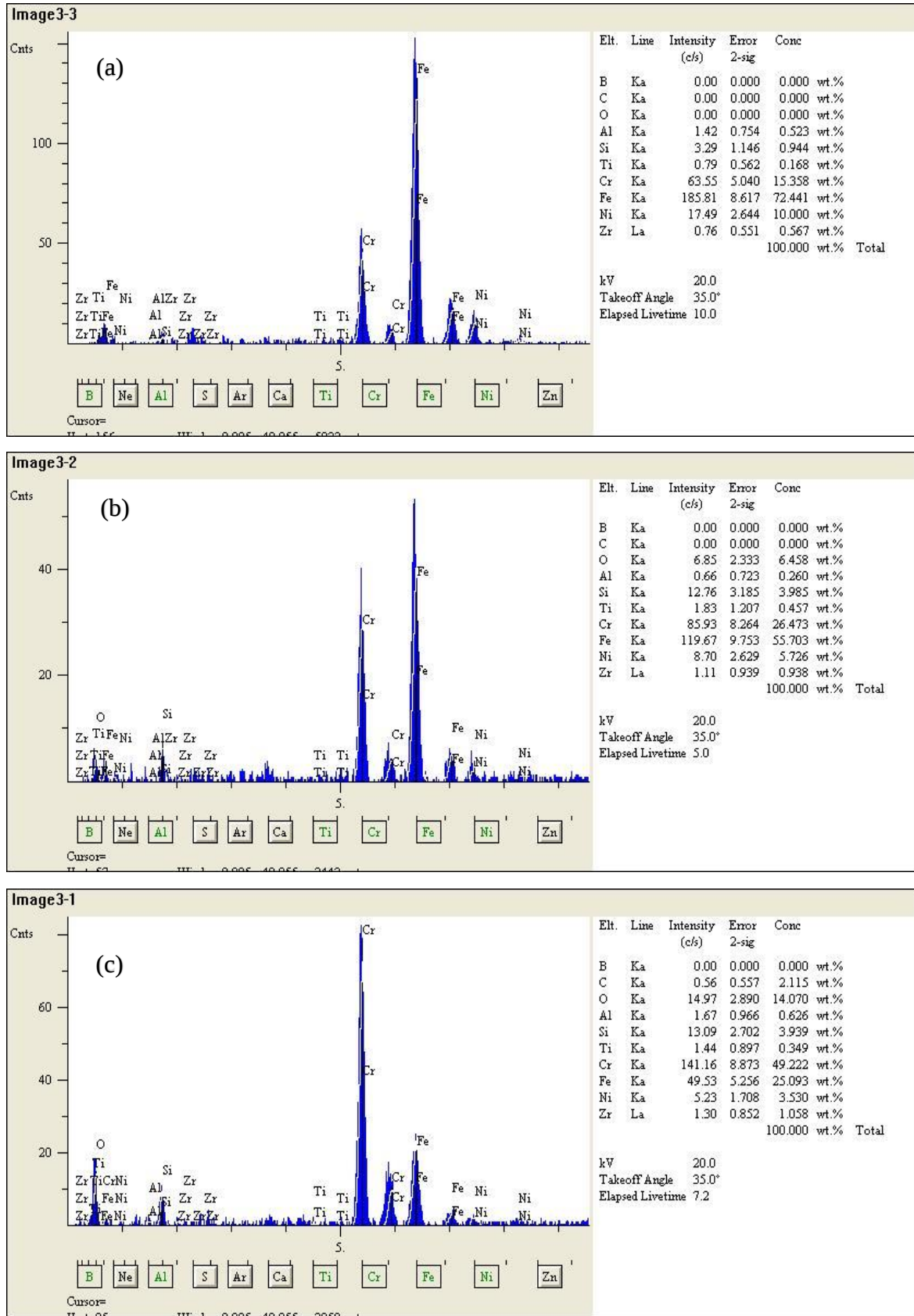
Yayınmanın göstergelerinden birisi EDS analiz sonuçları olduğu kadar, daha öncede ifade edildiği gibi özellikle tane sınırlarından başlayan dönüşümlerin varlığının artmasıdır. Bakıldığında genel olarak sürenin artmasıyla her iki numunede de ara bölgede yapısal dönüşüm varlığı artmıştır. Meydana gelen dönüşmüş alanlar daha belirgin ve fazladır. Bu değişimlerin mekanik ve fiziksel özelliklere de yansması beklenmektedir.

Yayınmanın olabilmesi için birkaç şartın var olması gerekmektedir. Bunlar; sıcaklık, zaman, sürekli (kesintisiz) temas yüzeyi, bileşim farkı (gradyant), yüzeydeki kimyasal olarak kararlı yapıların varlığı, yüzey biçimi ve alanı olarak sayılabilir. Bu çalışmada sıcaklık değişimi yapılmamış, sabit tutulmuştur. Ayrıca bu sıcaklık yapıda meydana gelebilecek ve paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen sigma fazının oluşmayacağı için seçilmiştir. Aynı şekilde bu termokimyasal işlem ile bu tür çeliklere genellikle uygulanan normalizasyon işlemi de yapılmış olacaktır. Diğer bir ifadeyle, hem ısı işlem yapılacak hem de termokimyasal kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olacaktır.

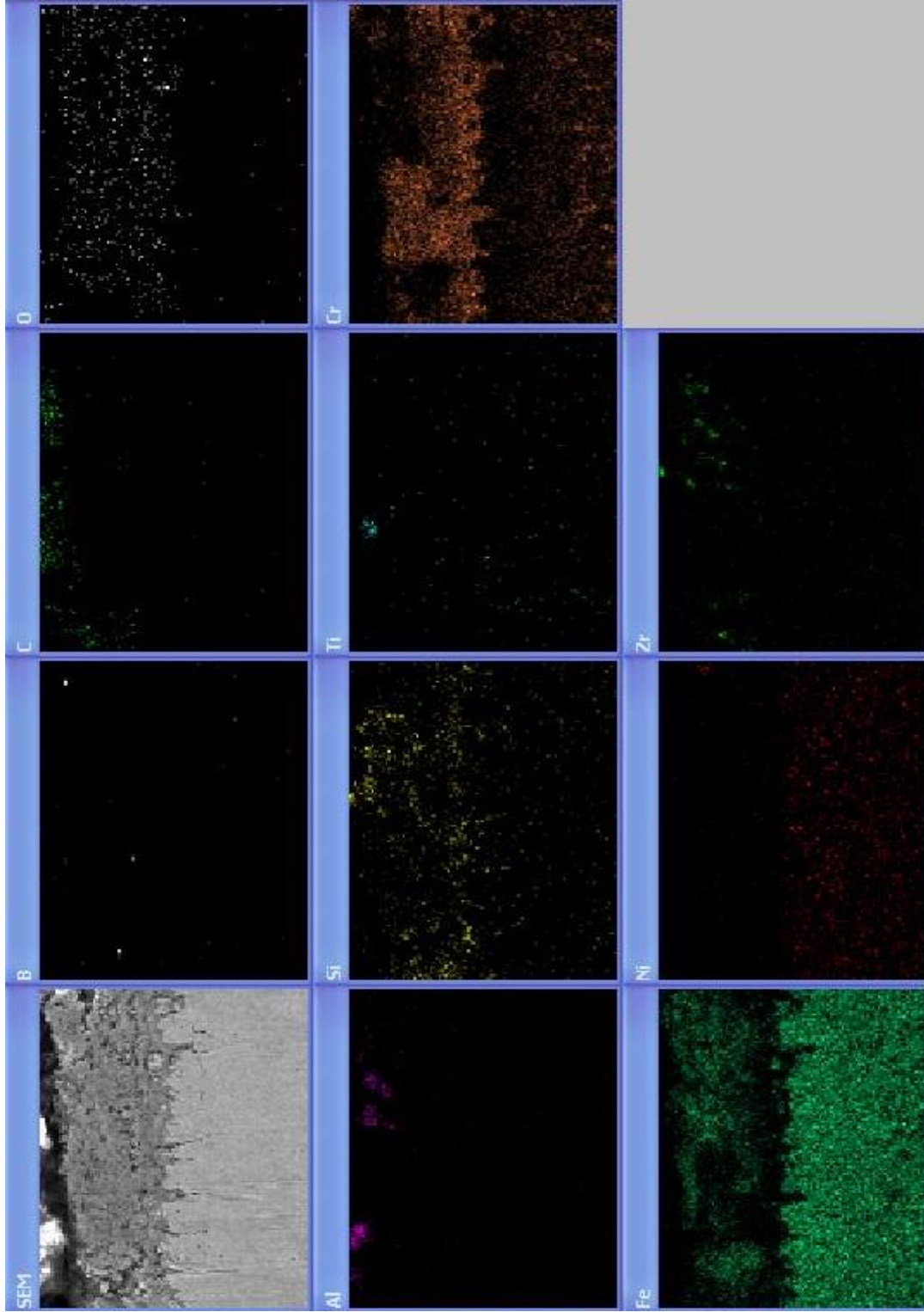
Yüzeydeki kimyasal kararlılığı yüksek yapılar hariç, diğerlerinin tamamı arttıkça yayınma teşvik edilir. Bu çalışmadaki numunelerde bu bakımdan incelendiğinde, olumlu katkı yapan unsurların varlığı ince yüzeyli numunelerde yayınmayı teşvik etmiştir. Bunun sonucunda; kaplama kalınlığı, altlık/kaplama arasında karşılıklı kimyasal yayınma, altlık ile kaplamanın kimyasal olarak bağlanma kuvveti artmış, kaplama içinde ve arayüzeyde oluşan gözenekler ise azalmıştır.



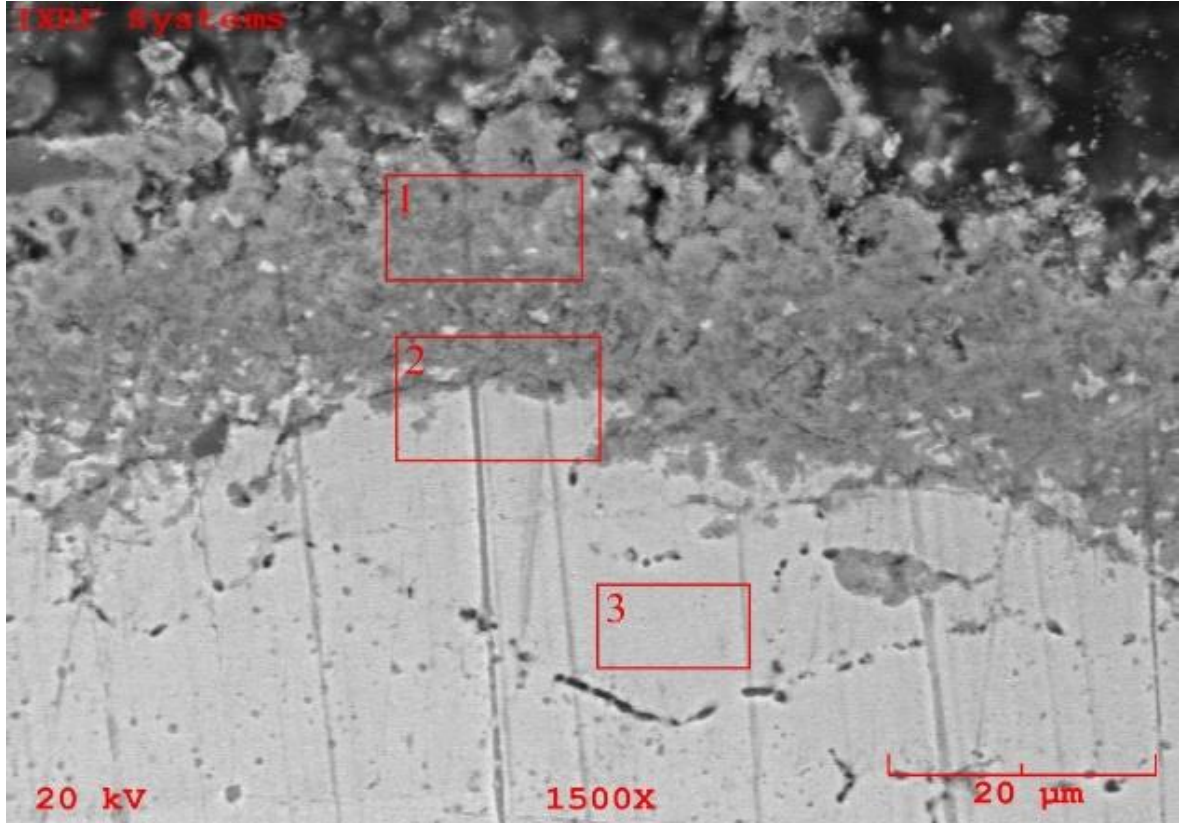
Resim 5.12. F numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan bölgeler



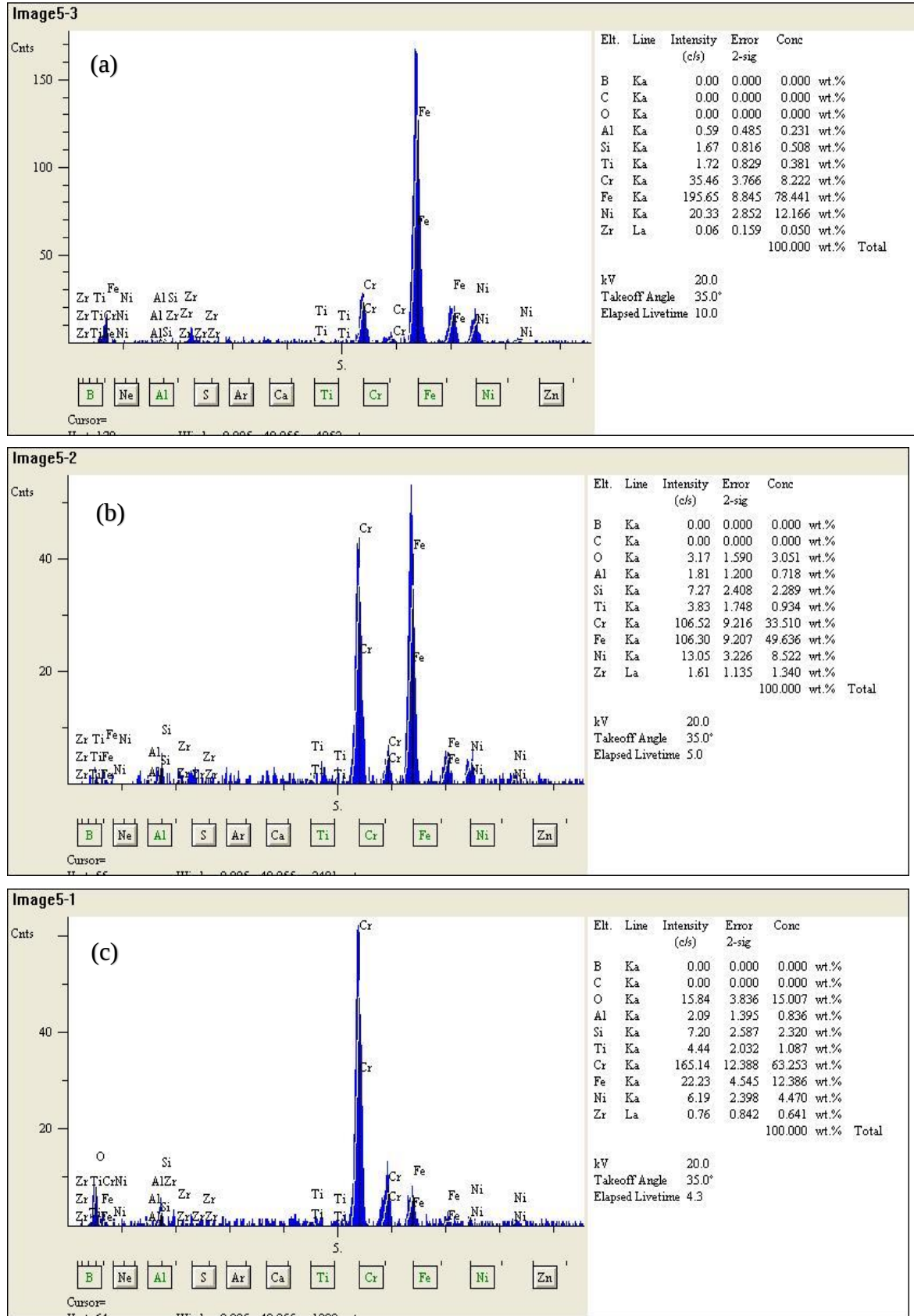
Resim 5.13. F numunesinde a) kaplama, b) arayüzey geçiş bölgesi ve c) altlık malzemedeki nokta element analizi



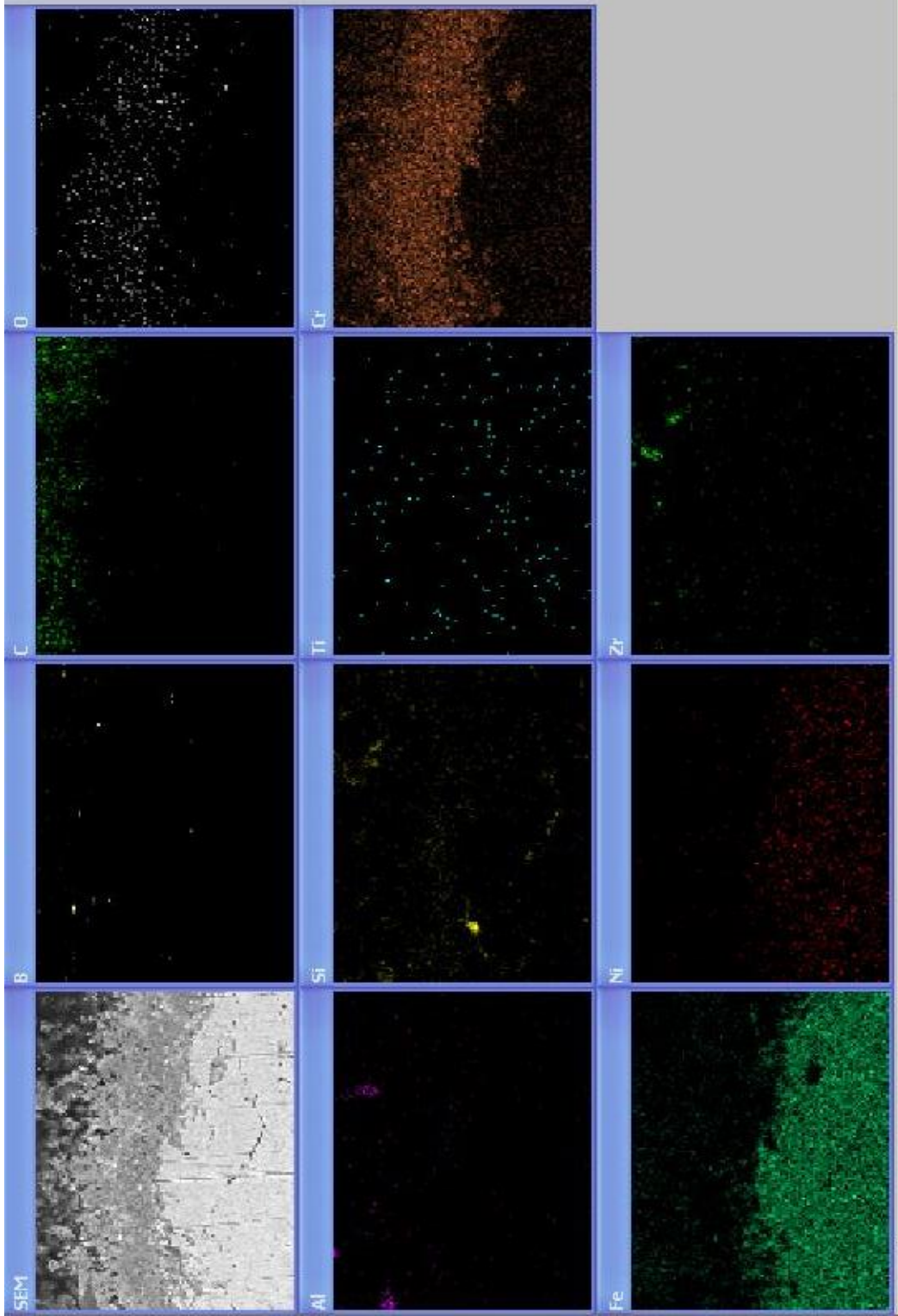
Resim 5.14. F numunesinde kaplama/altlık arayüzeyinde bölgesel element geçiş analizi



Resim 5.15. G numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan bölgeler



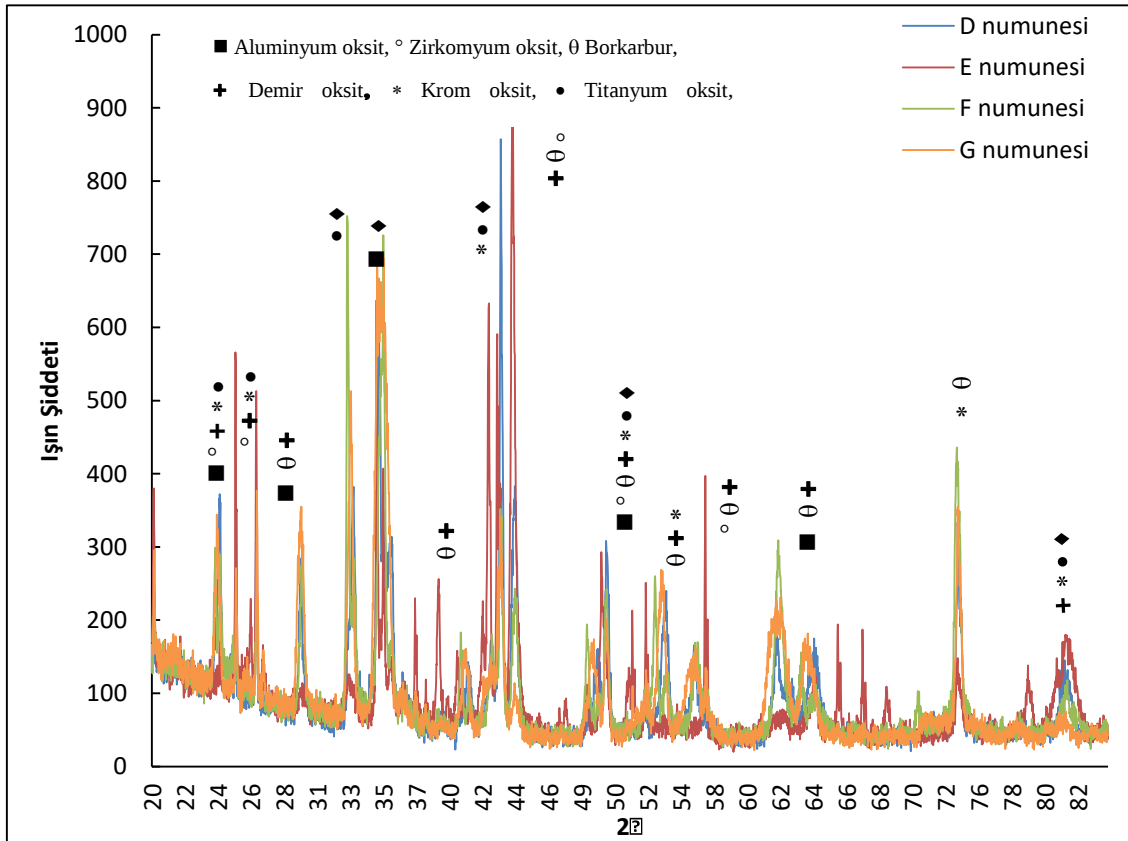
Resim 5.16. G numunesinde a) kaplama, b) arayüzey geçiş bölgesi ve c) altlık malzemedeki nokta element analizi



Resim 5.17. G numunesinde kaplama/altlık arayüzeyinde bölgesel element geçiş analizi

5.1.3. XRD analizleri

Bu çalışmada kaplama toz karışımında kullanılan zirkon, alümina, silis, borkarbür gibi bileşiklerin varlığını ve yoğunluğunu tespit etmek amacıyla XRD analizleri yapılmış ve Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde; aynı karışım ile yüzeyi kaplanmış tüm numunelerde (D-G) benzer tür ve yoğunlukta bileşenlerin varlığı teyit edilmiştir. Analizler mikro yapı incelemeleri için hazırlanan numunelerin geniş yüzeylerinden yapılmıştır. Numuneler arasında az da olsa değişim meydana gelmiştir. Ancak, meydana gelen değişiklikleri işlem süresine ve yüzey özelliklerine bağlı olarak özellikle toz içerisinde bulunan Al’un alüminaya dönüşmesi neticesinde bu bileşenin yoğunluğu artması, yine toz karışımındaki Ti’un da titanyumoksit’e dönüşmesi nedeniyle olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.1. D,E,F,G numunelerine ait kaplama yüzeyi XRD analiz sonuçları

Bu dönüşümlerin mevcut bileşenlerin varlıklarının aynı olmasına karşın az da olsa yoğunluklarının değişmesine yol açtığı görülmektedir. Ellingham diyagramına bakıldığında zaten ergiyen Al'da, katı fazda da olsa Ti için bu sıcaklıklarda oksit oluşumunun söz konusu olduğu görülecektir. Uygulanan işlem sırasında toz karışımında ve atmosferde oksijen varlığı söz konusudur. Bu nedenlerle bahse konu elementlerin bir kısmının oksitlenmesi doğal bir durumdur. Özellikle uzun süre uygulanan termokimyasal işlemler sonucunda, yüksek sıcaklıkta ve mekanik bakımdan çok kararlı olan Al ve Ti oksitlerin oluşması ayrıca bir kazanım olmuştur. Çünkü türbin kanatları yüksek sıcaklıkta ve zorlu mekanik şartlarda çalışmaktadır. Dolayısıyla üretilen bu kaplamanın da bu şartlara uygun özelliklerde olması avantajlar sağlayacaktır. Özellikle 8 saat süre ile termokimyasal işlem gören F ve G numunesinde bahse konu yeni oluşumlar tespit edilmiştir.

5.2. Kaplama İşleminin Mekanik Özelliklere Etkileri

Tez çalışmasının önceki kısmı olan yapısal analizlerin yapıldığı bölümlerde sadece kaplama yapılmış numuneler (D-G) değerlendirilmiştir. Ancak bu malzemelerin işlemsiz ilk halleri (A), kısa (B) ve uzun (C) süre termal işlem görmüş halleri ile termokimyasal işlem görmüş (D-G) olanların birlikte değerlendirilmesi daha uygundur. Bu numunelerine ait mekanik test sonuçları Çizelge 5.1 ve bu sonuçlara ilişkin grafikler ise Şekil 5.2-5'te verilmiştir. Alınan tüm test sonuçlarına göre, çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik değerleri A numunesinde G numunesine kadar artan bir değişimde ilerlemiştir. Ayrıca Şekil 2.6-7'de süreye bağlı olarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu mekanik özelliklerin oluşumunda etkili olan en önemli faktörlerden birisi olan kaplama işleminin kopma yüzey şekline etkilerinin gösterilmesi amacıyla kırık yüzey görüntüleri Resim 5.18-24'de verilmiştir.

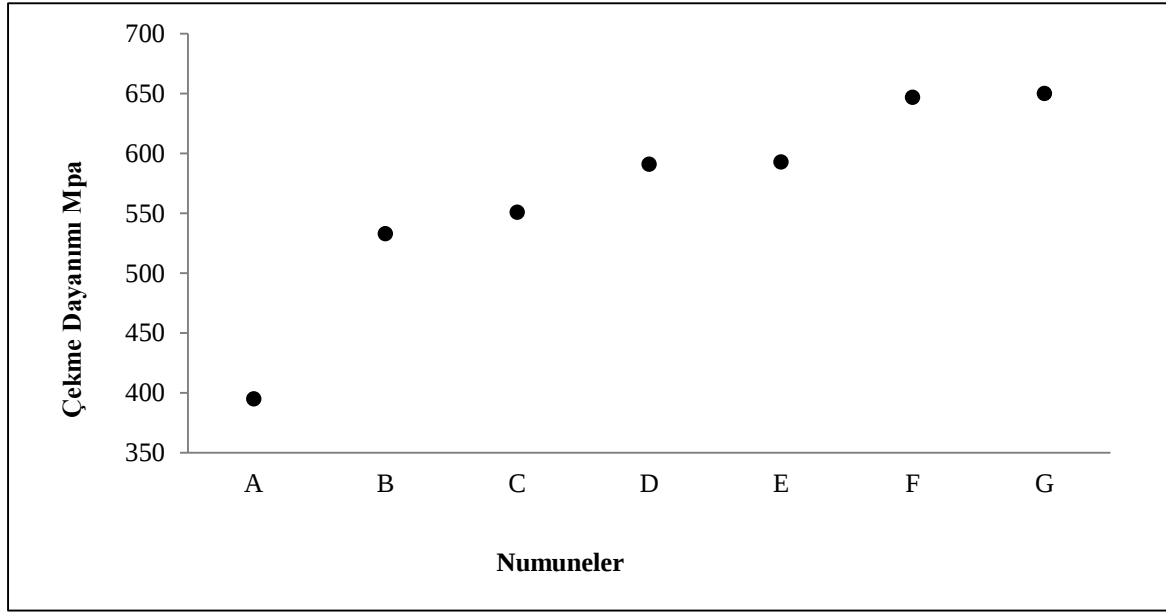
Çekme ve sertlik test sonuçları incelendiğinde (Şekil 5.2-5) işlemsiz numuneye (A) kıyasla, sadece kaplamasız ancak aynı şartlarda ısıtılmış numunelerde (B ve C) dayanım ve sertlikte artış meydana gelirken, uzama miktarında ise azalma olmuştur. Bilindiği üzere dayanım ve sertlik paralel değişirken, uzama tersi yönde davranmaktadır. Dayanım ve

sertliği artıran yapısal dönüşümler malzemelerde sünekliği azalttığından bu tür sonuçlar elde edilmektedir. Kaplamanın etkisi değerlendirildiğinde; hem kısa (D ve E) hemde uzun (F ve G) süreli termokimyasal işlem sonucunda üretilen numunelerin tamamında benzer şartlarda ısıtıl işlem görmüş numunelere (B ve C) kıyasla özelliklerde artış meydana gelmiştir. Bu değişimler çekme dayanımında $\cong 10.8-17.9$, akma dayanımında $\cong 7.4-14.1$, % uzamada $\cong 1.8-7.14$ ve sertlikte ise $\cong 23.4-28$ oranlarındadır. Sonuçlar sadece süre bazında değerlendirildiğinde; hem kaba hem de ince yüzeyli numunelerde de benzer şekilde özellikler gelişmiştir.

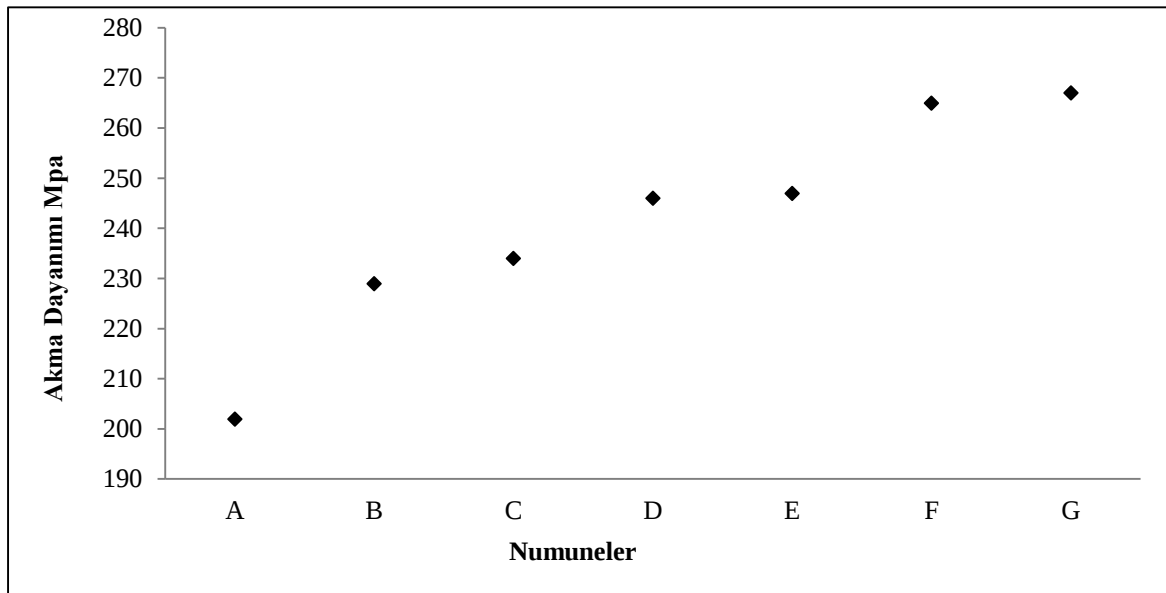
Çizelge 5.1. Çekme ve sertlik numunelerine ait test sonuçları

Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV ₁₀)
A	395	202	58	234
B	533	229	56	277
C	551	234	55	303
D	591	246	60	342
E	593	247	57	345
F	647	265	59	376
G	650	267	56	388

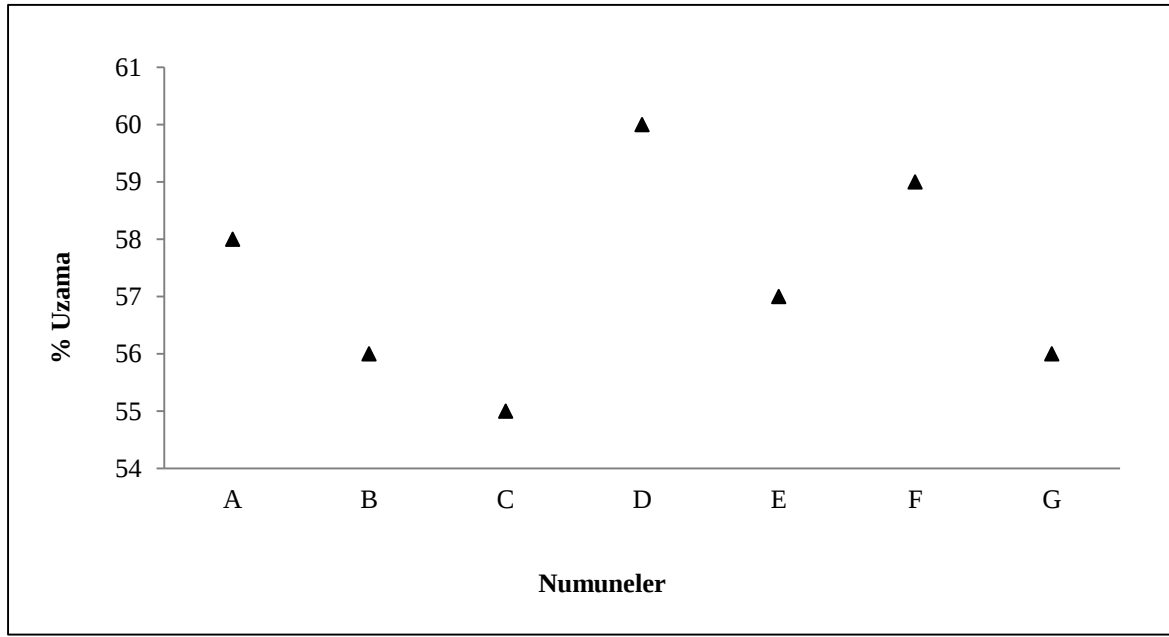
Numunelerin yüzeylerine uygulanan zımparalama işlemi bakımından da bir karşılaştırma yapılması uygun olacaktır. Çünkü bu zımparalama işlemleri kaplamanın tutunması (mekanik bağlanması) açısından fayda sağlasa da, numune yüzeylerinde çentik etkisi oluşturmaktadır. Bilindiği üzere bu çentikler kırılma başlangıcı için çatlak oluşumunu kolaylaştırıcı bir etken olmaktadır. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, uygulanan yüzey pürüzlendirme işlemlerinin kaplama tutunmasında etkili olduğu ve böylece mekanik özelliklerin gelişmesinde katkı sağladığı görülmüştür. Kaba ve ince yüzeyli numunelerin tümünde (D-G) daha iyi özellikler elde edilmiştir. Her bir yüzey kalitesinde de benzer şekilde süre artışına paralel olarak uzama dışındaki özellikler geliştirilmiştir.



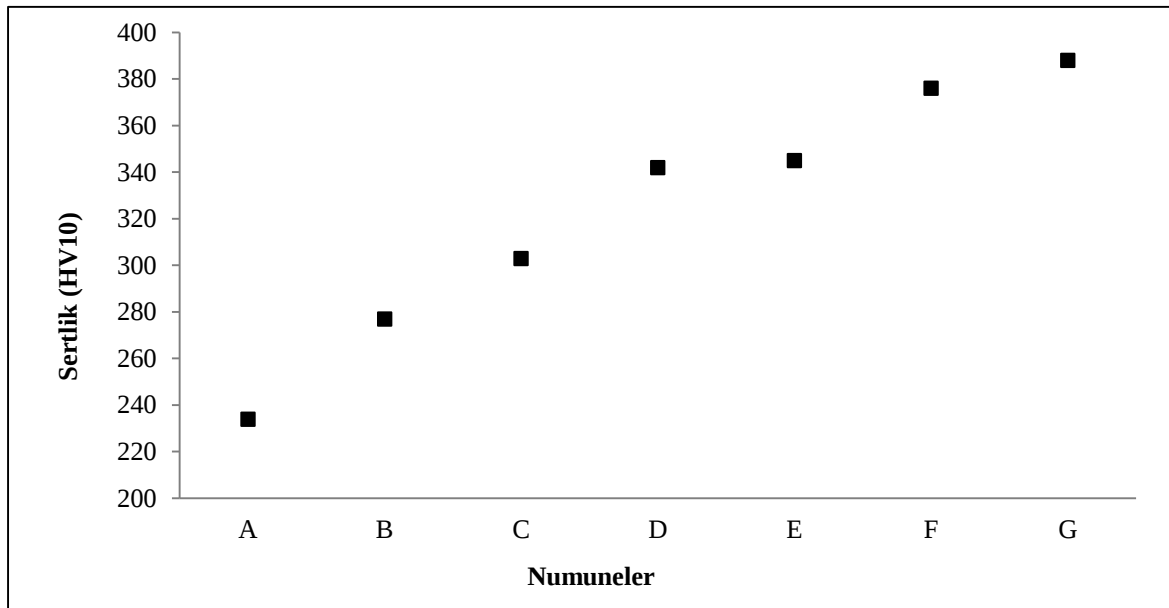
Şekil 5.2. Numunelerin çekme dayanımlarındaki değişim



Şekil 5.3. Numunelerin akma dayanımlarındaki değişim



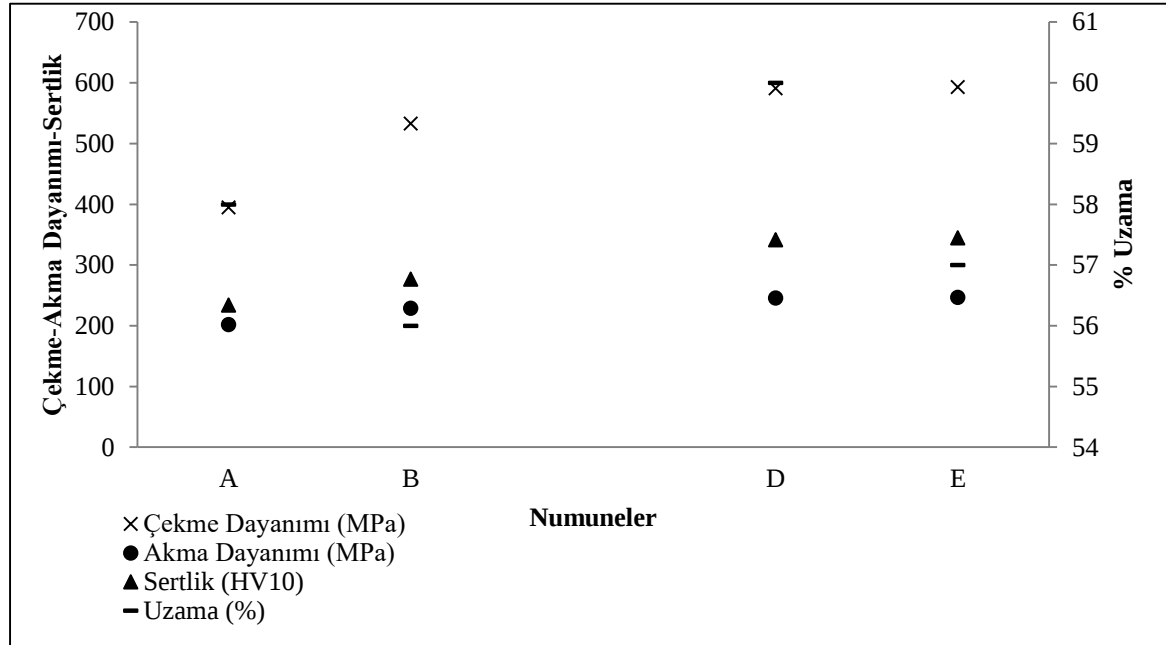
Şekil 5.4. Numunelerin % uzamalarındaki değişim



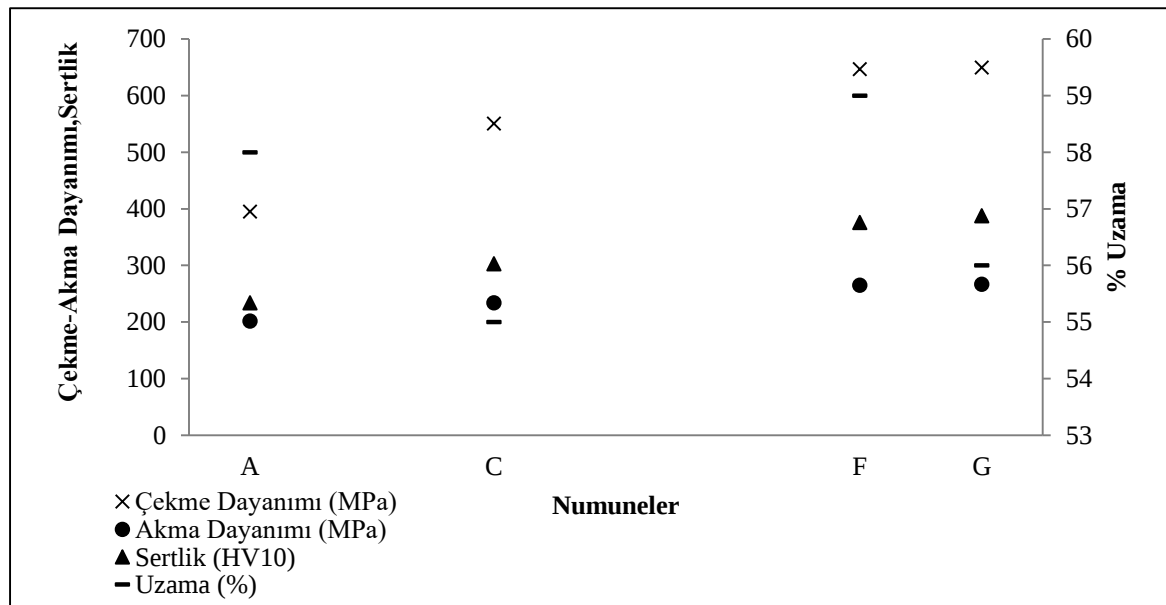
Şekil 5.5. Numunelerin sertliklerindeki değişim

Sonuçlar işlem süresi bakımından değerlendirildiğinde (Şekil 5.6-7); 4 saat işlemler sonunda sırasıyla kaba ve ince yüzeyli numunelerde uzama dışındaki özellikler gelişmektedir. Kaba yüzeyli numuneler (D ve F) ile ince yüzeyli numuneler (E ve G) arasında değişim meydana geldiği, ancak bu değişimin çok fazla olmadığı da tespit edilmiştir. 4 ve 8 saat işlemde kaba ve ince yüzeyli numuneler arasındaki değişim $\cong$ % 1'in (% 0.1-0.9) altında olmuştur. Bu

sonuçlar kaplama öncesi hazırlanan bu farklı yüzey kalitelerinin mekanik özelliklerde fazla bir değişim oluşturmadığını göstermiştir.

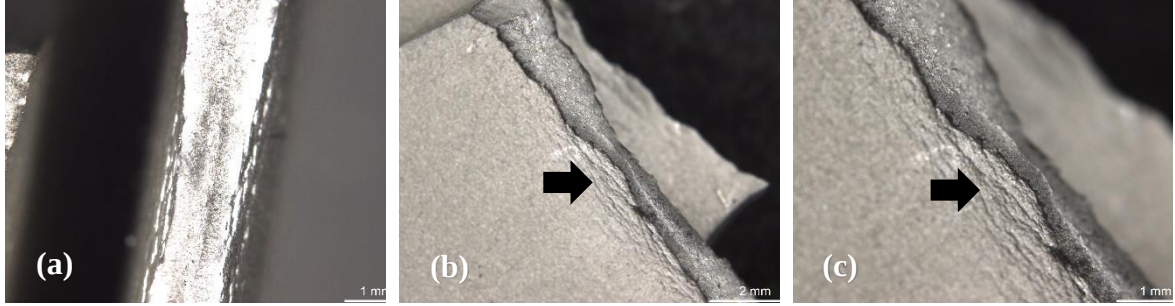


Şekil 5.6. İşlemsiz (A), 4 saat süre ısıtılmış (B), kaba yüzeyli (D) ve ince yüzeyli (E) numunelerinde mekanik özelliklerin değişimi

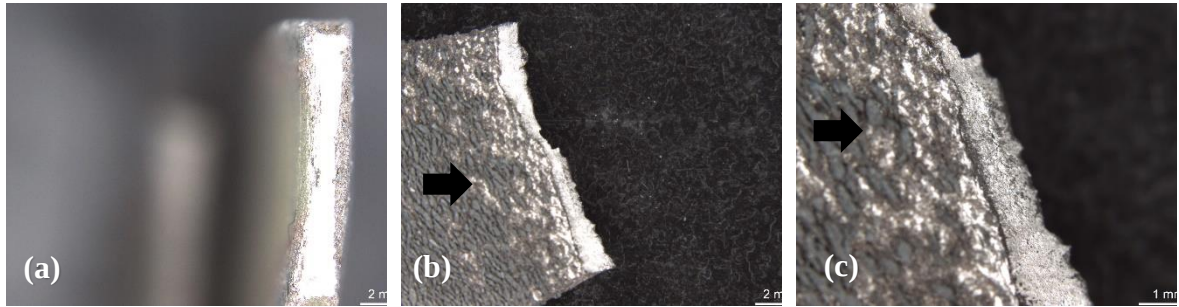


Şekil 5.7. İşlemsiz (A), 8 saat süre ısıtılmış (C), kaba yüzeyli (F) ve ince yüzeyli (G) numunelerinde mekanik özelliklerin değişimi

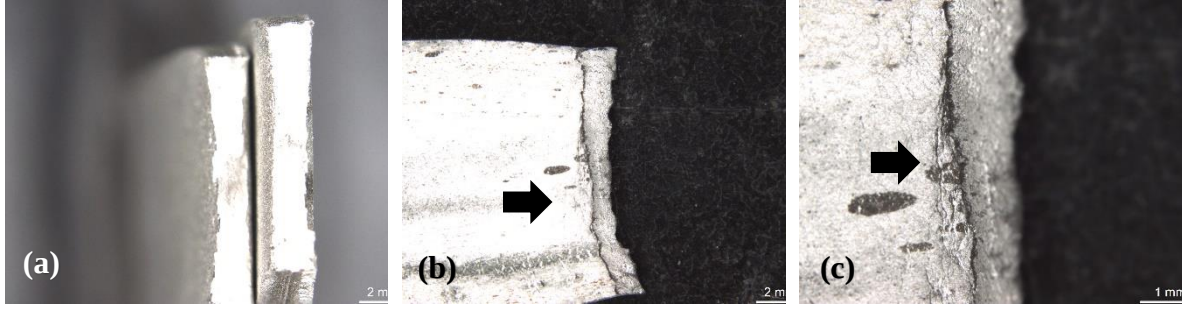
Çekme testi sonucunda numunelerin kopan yüzeyleri incelenmek amacıyla stereo mikroskop ile görüntülenmiş ve Resim 5.18-24'de verilmiştir. Kopma yüzeyleri incelendiğinde, işlemsiz numunede (A) kopma bölgesinde yüksek oranda şekil değişimi (deformasyon) izlerinin olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi 304L paslanmaz çelik malzemelerin süneklikleri oldukça fazladır. Bu nedenle şekil değişimi miktarı fazla olmaktadır. Kısa ve uzun süre sadece ısıtıl işlem görmüş (kaplanmamış) B ve C numunelerinde de benzer şekilde kopma bölgesinde şekil değişimi izleri görülmüştür. Fakat uygulanan ısıtıl işlem nedeniyle dayanım ve sertliği artan malzemelerde süneklik bir miktar azaldığından dolayı şekil değişim izleri nispeten daha azdır.



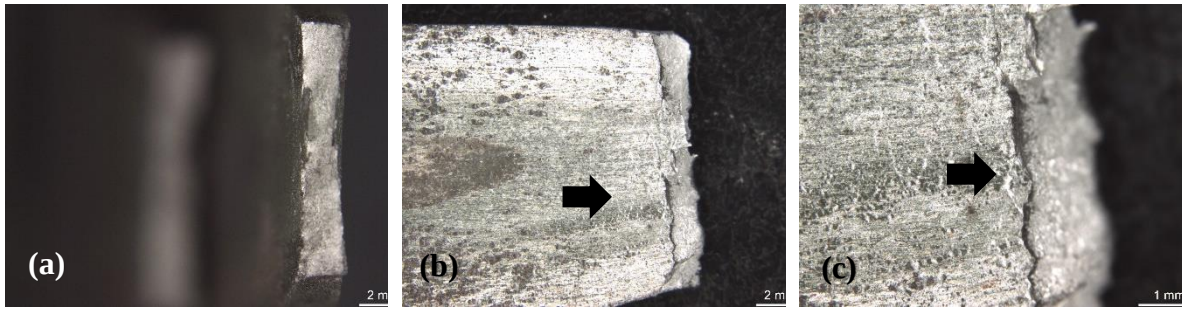
Resim 5.18. A numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)



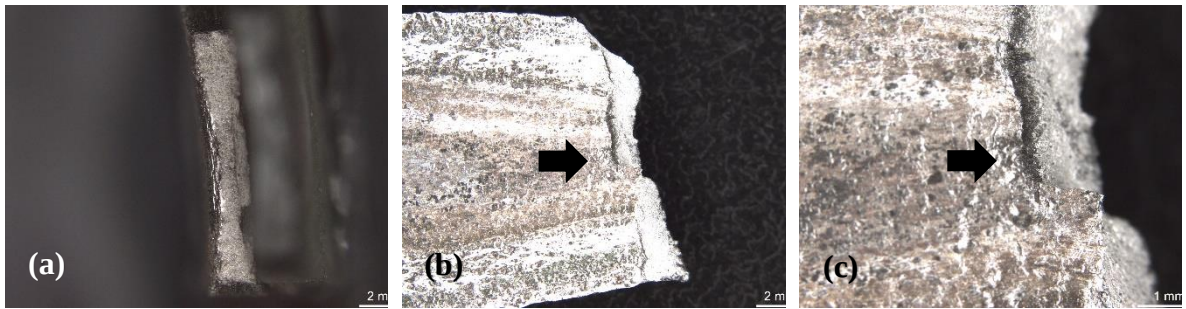
Resim 5.19. B numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)



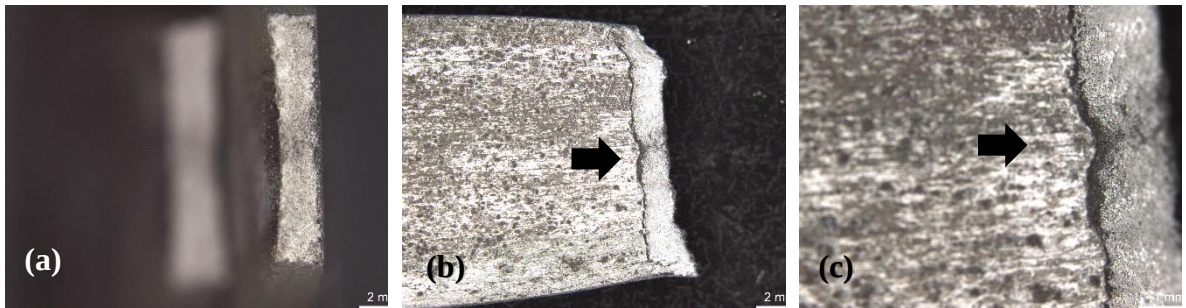
Resim 5.20. C numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)



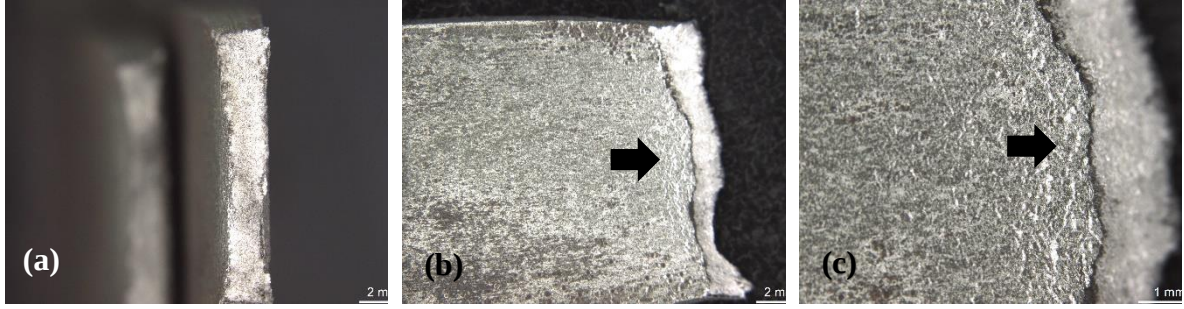
Resim 5.21. D numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)



Resim 5.22. E numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)



Resim 5.23. F numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)



Resim 5.24. G numunesi kopma yüzey görüntüleri a), b) ve c)

Termokimyasal işlemle kaplama işlemi uygulanmış D,E,F,G numunelerinde yüzeydeki kaplama ve kaplamanın şekil değişimi olmuş hali açıkça görülmektedir. Altlık malzemesinin ısı işlem etkilerine rağmen iyi derecede sünek olması nedeniyle bu numunelerde de yüksek oranda şekil değişimi meydana gelmektedir. D-G numunelerindeki kopma bölgelerine bakıldığında, kopma bölgesine yakın kısımlarda yüksek oranda şekil değişimine bağlı olarak kaplamanın da zorunluluktan dolayı parçalandığı görülmektedir. Ancak oluşturulan kaplamaların altlık malzemesi ile aynı derecede olmasa da bir miktar esnek olmasına bağlı olarak yüksek şekil değişimine uyum sağlayabildiği görülmüştür. Oysa oluşan kaplama seramik esaslıdır. Seramik esaslı malzemeler sünek değil kırılgeçiricilerdir. Bu nedenle şekil değişim kabiliyetleri çok azdır. Ancak bu çalışmada farklı olarak kaplama altlık ile paralel olarak davranış göstermiş ve şekil değişimine uğramıştır. Bunun iki nedenle olduğu düşünülmektedir. Bunlardan birincisi, altlık ile kaplamanın iyi bir şekilde bağlanmasıdır. Ayrıca kaplamada kullanılan metalik tozlardan Al'un kaplama yapışma mukavemetine etkisi, seramik tozlara göre daha fazladır [43]. Bundan dolayı da Al'un yüzeye çok iyi tutunması, hem ana malzemede hem de kaplamada benzer özellikler göstermesine neden olmuştur. İkinci olarak, geleneksel seramik esaslı kaplamalarda kaplama katmanı sadece seramik malzemelerden meydana gelmektedir. Al ve Ti düşük yoğunluğa sahiptir ve süneklikleri seramik tozlara göre fazladır. Bu çalışmada seramik tozların yanında Al ve Ti gibi metal tozları da katılmıştır. Bu metal tozlarının ilavesiyle hem ekzotermik reaksiyon oluşumu sağlanmış hem de seramik tozları arasında daha esnek davranış gösterebilecek metalik bir bölge oluşturulmuştur. Böylece seramik kaplamanın daha esnek olması sağlanmış ve altlık malzeme ile benzer şekilde sünek bir davranış göstererek yüksek oranda

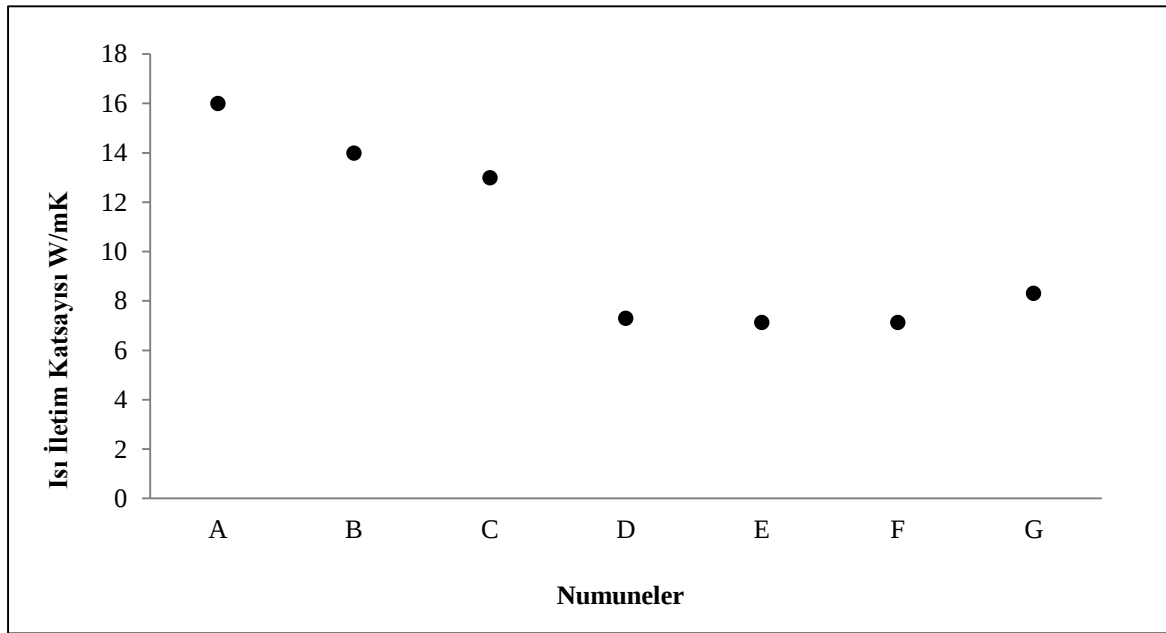
şekil değişimi meydana gelmiştir. Bundan dolayı termokimyasal işlem gören ve yüzeylerinde seramik esaslı bir kaplama oluşan D-G numunelerinde hem dayanım ve sertlik artmış hem de sünek davranış sağlanabilmiştir.

5.3. Kaplama İşleminin Termal Özelliklere Etkileri

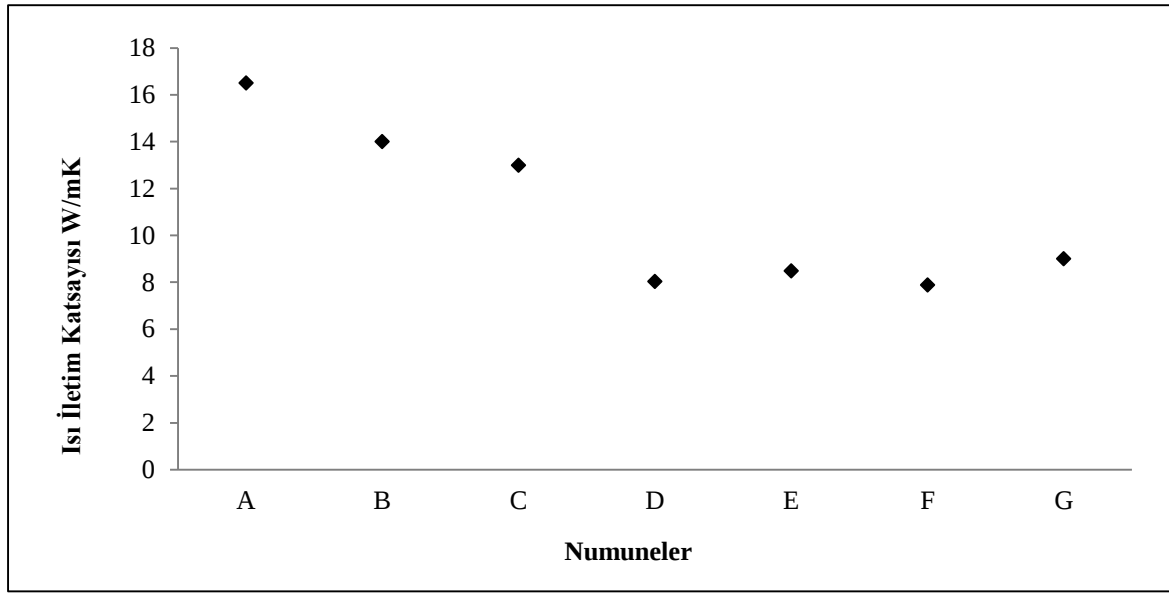
İşlemsiz (A), 4 ve 8 saat süre ile termokimyasal işlem uygulanmış (D-G) numunelerde termal iletkenlik ölçümleri yapılmış ve Şekil 8-9'da verilmiştir. 10 ve 15 W enerji düzeylerindeki iletimler incelenmiştir. Yapılan testlerde laboratuvar ve cihaz şartları gereğince en fazla 100 °C sıcaklıklara kadar çıkılabilmektedir. Enerji düzeyi arttıkça genel olarak iletim de artmıştır. Kaplama uygulamasının termal iletimi azalttığı tespit edilmiştir. Başlangıçta 16 W/mK olan paslanmaz çeliğin iletim katsayısı $\approx 7.14-9$ W/mK değerlerine kadar azalmıştır. Diğer yandan; bilindiği üzere termal iletim bir enerjinin (sıcaklık) sabit bir yüzeyden belirli bir mesafeye aktarımıdır. Bu aktarımı; incelenen malzeme kimyasal bileşimi, faz yapısı, tane yapısı, üretim şartları, yüzey kalitesi (Ra), kaplama durumu vb. faktörler etkilemektedir. Bu çalışmamızda hiçbir işlem yapılmamış malzeme ile farklı şartlarda kaplanmış numuneler karşılaştırılmıştır. Kaplama yapılan numunelerde ise iki temel farklılık mevcuttur. Birincisi termokimyasal işlem süresi (zaman), ikincisi ise yüzey kalitesidir (Ra).

Günümüzde kaplamaların bir amacı da termal etkinin altlık malzemeye ulaşmadan bir kısmının ya da tamamının yalıtması veya yansıtılmasıdır. Çalışmamızda oluşturulan kaplamanın dolaylı amaçlarından birisi de termal yalıtım veya yansıtma özelliğinin var olmasıdır. Böyle bir özellik ilave avantaj sağlayacaktır. Kaplama çalışmalarında toz halinde zirkon (% 23, $k=1.6$ W/m.K), alümina (% 15, $k=46$ W/m.K), silis (% 16, $k=6.3$ W/m.K), borkarbür (% 15, $k=3$ W/m.K), Al (% 22, $k=236$ W/m.K) ve Ti (% 9, $k=20.4$ W/m.K) kullanılmıştır. Kaplama için kullanılan toz karışımının tam yoğunluklu (gözeneksiz) teorik termal iletkenlik katsayısı yaklaşık 57,6 W/m.K'dir. Özellikle kaba yüzeyli ve ayrıca kısa süre işlem uygulanmış numunelerde (D ve E) kaplama içerisinde ve altlık/kaplama arayüzeyinde gözenekler mevcuttur. Havanın iletim katsayısı çok düşüktür ve yaklaşık 0.026

W/mK'dir. Kaplama ve arayüzeydeki gözenekler ölçülememiştir. Bu nedenle gözeneklerin iletme etkileri değerlik olarak belirlenememiştir. Ancak elde edilen sonuçlarla tam yoğunluktaki kaplama için teorik olarak hesaplanmış iletkenlik katsayısı değeri karşılaştırıldığında, önemli oranda (% 540-706) ısı iletimini azalttığı görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında, bu kaplama bileşenlerinin yeniden ele alınması, içerisindeki metalik kısımların kısmen azaltılması ve özellikle Al malzemesinin oransal olarak daha az kullanılması ile daha fazla bir yalıtım sağlanabileceği açıkça görülmektedir.



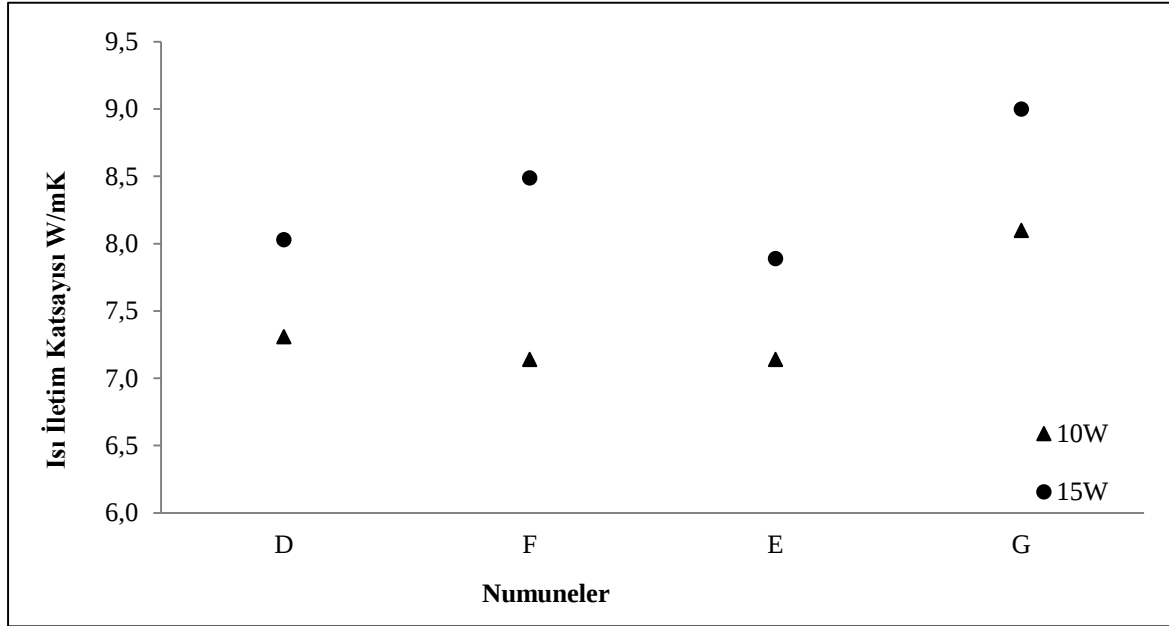
Şekil 5.8. 10W güçte ısı iletim katsayılarının değişimi



Şekil 5.9. 15W güçte ısı iletim katsayılarının değişimi

Sonuçlar işlem süresi bakımından değerlendirildiğinde (Şekil 5.10); 10 W güçte sürenin artmasıyla birlikte kaba yüzeyli numunelerde ısı iletiminde % 5.73'lük artış meydana gelirken, ince yüzeyli numunelerde ise % 14 artış meydana gelmiştir. 15 W güç kullanıldığında, kaba yüzeyli numunelerde % 2.3'lük azalma olurken, ince yüzeyli numunelerde ise % 13.4 artış meydana gelmiştir. Özellikle kaba yüzeyli numunede 10 W güçte daha az iletim olması ve 15 W güçte ise iletimin azalması yüzey pürüzlülüğü ve kaplama davranışı bakımından iyi bir göstergedir. Kaba yüzeyli numunelerde hem altlık/kaplama arayüzeyinde hem de kaplama içerisinde oluşan gözenekler ısı iletimin azaltılması bakımından fayda sağlamıştır. Diğer yandan uygun toz boyutu seçimi ve sürenin uzamasıyla kaplamanın daha da kalınlaşacağı ve daha yalıtkan bir yüzey elde edilebileceği düşünülmektedir. Buradan hareketle, kaba yüzeyli numunelerde toz karışım oranlarının değiştirilmesi, toz boyutlarının daha uygun olması ve daha uzun sürelerin kullanılmasıyla daha iyi sonuçların elde edilebileceği düşünülmektedir. Ancak mekanik özellikler ile ısı iletimi birlikte değerlendirildiğinde ise, ince yüzeyli numunelerin oransal olarak (mekanik/ısı özellik) daha fazla avantaj sağladığı görülmektedir.

Yapılan bu tez çalışması, ısıtım işlem tarzı termokimyasal çalışma olması bakımından yeni bir yaklaşımdır. Bu nedenle birçok bilinmezlik söz konusudur. Bu nedenle ayrıca iki yüzey kalitesi (Ra) arasında bir değeri tespiti yapıp termokimyasal işlemle kaplama çalışmalarının yapılması daha da iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir.



Şekil 5.10. Termokimyasal işlem süresine bağılı olarak ısı iletiminin değışimi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, ısıtım işlem uygulaması sırasında termokimyasal işlem ile altlık malzeme yüzeyinde seramik+metal içerikli bir kaplama tabakası oluşturulması, bu kaplamanın yapısal, mekanik ve termal analizlerle incelenmesi sonucunda, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Bir metalik malzemeye ısıtım işlem uygulaması (normalizasyon vb) yapılırken aynı zamanda yüzeyinin bir seramik+metal toz karışımı ile termokimyasal olarak başarıyla kaplanabileceği tespit edilmiştir.
- Termokimyasal işlemin, herhangi bir özel cihaz veya püskürtme teknikleri kullanılmadan daha basit ve ucuz bir yöntemle kaplamanın yapılabilirliği kanıtlanmıştır. Bu yeni yaklaşımın diğer kaplama tekniklerine de bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.
- Isıtım işlem sürelerinin uzamasına paralel olarak altlık/kaplama ara yüzeyinde meydana gelen geçiş bölgesi genişlemektedir. Aynı zamanda altlık ile kaplama malzemeleri arasında kimyasal yayınma da artmaktadır. Bu yayınma artışı daha uyumlu ara yüzeyin oluşumunu teşvik etmektedir. Böylece kaplama ile altlık arasında ilave bir metalik kaplama yapma ihtiyacı ortadan kalkmaktadır.
- Kısa ısıtım işlem süresinde altlık/kaplama ara yüzeyinde ve tabaka içerisinde altlık malzeme yüzeyine paralel ve kaba gözenekler meydana gelirken, sürenin uzamasıyla küresel şekilli ve daha küçük boyutlu poroziteler oluşturmuştur. Bu sayede yapı yoğun ve homojen bir hal almıştır. Porozitelerin küçülmesi ve daha yoğun bir yapı ile kaplama tabakasının mekanik dayanımı arttırmış, ısı yalıtımını ise azaltmıştır.

- Yüzey pürüzlülüğünün kaplama açısından avantajlar sağladığı bilinse de, yüzey pürüzlülüğün çok kaba olması durumunda ters etki yaptığı da ince ve kaba yüzey pürüzlülüklerine sahip numunelerin test sonuçları ile doğrulanmıştır.
- Yapılan kaplama ile akma dayanımı çekme dayanımı ve sertlikte artışlar gözlemlenirken, kaplamanın uzama üzerinde çok fazla bir değişim yapmadığı gözlemlenmiştir.
- Yapılan kaplama ile ısı iletkenliğinde önemli ölçüde düşüş sağlanmıştır. Kaba yüzeyli numunelerde daha az iletim sağlanmıştır. Ancak kaba yüzeyin mekanik özellikleri daha az geliştirdiği düşünüldüğünde, daha uygun yüzey kalitesi (Ra) ile daha iyi mekanik ve ısı yalıtkanlık özelliklerinin elde edilebileceği tespit edilmiştir.
- Bunlara ilave olarak, birçok pahalı ve özel işlem yerine, basit bir ısı işlem sistemiyle uygun şartlar sağlandığında, malzeme yüzeylerinin başarılı bir biçimde kaplanabileceği tespit edilmiştir.

6.2. Öneriler

Yapılan çalışmalar neticesinde ileride yapılabilecek bazı çalışma önerileri aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- Çok yüksek sıcaklıklarda çalışan daha fazla malzeme tipi ve farklı yalıtkan tozlardan oluşan birkaç tip toz karşımı seçilerek mekanik, termal ve yapısal özellikler incelenebilir.
- Farklı kaplama kalınlıkları kullanılarak kalınlığın ısı iletimine etkisi incelenebilir.
- Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin çeşitlendirilerek ısı iletimine etkisi daha ayrıntılı incelenebilir

- Isıl işlem sürelerinin difüzyona etkisi çeşitlendirilerek kısa işlem sürelerinden uzun işlem sürelerine geniş bir varyantta daha detaylı inceleme yapılarak uygun ısıtım işlem sürelerinin tayini incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Keleşoğlu, E. (2011). *Sert Kaplamalar Üretim Teknikleri ve Özellikleri*, 1, İstanbul:Ege basım,1-51,91-107.
2. Özgürlük, Y. (2016). *Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemiyle Üretilen Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın 1-17.
3. Habibi, M. H. (2014). *Hot Corrosion Behaviour of New Candidates For Thermal Barrier Coatings Application In Turbine Simulated Environments*, Degree of Doctor of Philosophy in The Department of Mechanical and Industrial Engineering, 1-107
4. Tafralı, M. (2006). *Tel Püskürtme ile Kaplamada Püskürtme Parametrelerinin Mikroyapı ve Gözenekliliğe Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 96.
5. Altuncu, E. (2011). *YSZ ve CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 258
6. Döleker, M. (2015). *Bilyalı Dövme İşleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı Üzerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 94.
7. Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. (Second Edition). Chichester, John Wiley & Sons, 67-107.
8. Zağlı, M (2010). *Alev Sprey Yöntemiyle Polimer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 72
9. Herman, H. ve Shankar, N. R. (1987). Survivability of thermal barrier coatings. *Materials Science & Engineering*, 88, 69-74.
10. Bernier, J. (2001). Evolution and Characterization of Partially Stabilized Zirconia (7%Y2O3) Thermal Barrier Coatings Deposited By Electronbeam Physical Vapor Deposition, A Master's Thesis Submitted to the faculty of the Worcester Polytechnic Institute.
11. Çiftiyürek, E. (2009) *%8 YSZ (İtriyum İle Stabilize Edilmiş ZrO₂) Termal Bariyer Kaplamaların (TBK) Üretilmesi ve Proses Parametreleri Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, İstanbul, 5-85.

12. Zubacheva, O.A. (2004). *Plasma-Sprayed and Physically Vapor Deposited Thermal Barrier Coatings: Comparative Analysis of Thermoelastic Behavior Based on Curvature Studies*, Masters Thesis, Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 29-46.
13. Khan, A.N., Lu, J., Liao, H. (2003). Effect of residual stresses on air plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 168, 291–299.
14. Geçkinli, E. (1992). *İleri Teknoloji Malzemeleri*.(1.Baskı).İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Basımevi, 288.
15. Cao, X.Q., Vassen, R., Stoeber, D. (2004). Ceramic materials for thermal barrier coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 1-10.
16. Dalkılıç, S. ve Tanatmış A.A. (2009). Termal bariyer kaplama sistemlerinde yüksek sıcaklıkta düşük çevrimli yorulma şartları altında oluşan hasarların incelenmesi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4(2), 15-27.
17. Karabaş, M. ve Bal, E. (2015). Yeni nesil termal bariyer kaplama malzemeleri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12 (1), 57-64.
18. Bengi, T. (2009). *Termal Bariyer Kaplamaların Isıl Özelliklerinin İncelenmesi ve Düşük Termal İletkenlik İçin Parametre Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, İstanbul, 5-29.
19. Nalcı, F. (2010). *Mikro Tesla Türbini Tasarımı ve Üretilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 26.
20. Yaşar H. (1997). *Termal Bariyer Kaplamaların Türbo Doldurmalı Bir Dizel Motorun Performansına Etkileri*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,34.
21. Holleck. H. (1987). *Hartstoffschichten zur Verschleißminderung*, H. Fischmeister, H. Jehn (ed), DGM Informationsgesellschaft, Oberursel, 25-43.
22. Özcan, Ü.E. (2019). *Epoksi Nanokompozit Kaplamalara Katılan Silika ve Grafen Nanopartiküllerin Kaplamanın Mekanik Özelliklerine Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Aksaray, 22-23.
23. Turan, E. (2004). *Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Sıcak Presleme İle Üretilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 3-7,14-17.
24. Ergün, N. (2006). *Borkarbür-Silisyumkarbür Kompozitlerinin Reaktif Sıcak Presleme İle Üretilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 4-8.

25. Coşkun, K. (2002). *Hadde Alüminyum ve Alaşımlarının Uçaklarda Kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5-7.
26. Çelik, İ. (2015). Biyomedikal sektöründe kullanılan titanyum ve alaşımlarının tribolojik özelliklerini iyileştirme yöntemleri. *Ordu Üniversitesi Bilim Teknik Dergisi*, 5(1), 67-75.
27. Bilgin, B. (2007). *Ti-6Al-4V/304L Malzeme Çiftinin Bakır Ara Tabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 28-39.
28. Stokes, J. (2008). Theory and application of the Sulzer Metco HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) Thermal spray process, Dublin City University.
29. Bach, W., Möhwald K. and Bause T. (January 2008). Untersuchung der einflüsse von substratraueheit und spripartikelgrösse auf die haftung thermisch gespritzter schichten, *Mat.-wiss. Und Werkstofftech*
30. Khan N. A. and Lu J. (2007). Thermal cyclic behavior of air plasma sprayed thermal barrier coatings sprayed on stainless steel substrates. *Surface and Coatings Technology*, 201, 4653-4658.
31. Kıroğlu, C.Ö. (2014) *Silika Esaslı Üstün Yalıtım Performansına Sahip Malzemelerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 27-37.
32. Karatay, B. (2019). *Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özellikleri ve Isı İletkenliğinin Üretim Şartlarına Bağlı Olarak Değişiminin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 39-45.
33. Aran, A. ve Temel, M.A. (2003). *Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller, Üretimi-Kullanımı-Standartları*, (1.Baskı), Acar Matbaacılık: İstanbul, 9-13.
34. Osmanoğlu, T. (2012). *AISI 304 ve 430 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapılarına, Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyonun Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 37-39
35. Erdoğan, M. (2000). *Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri*, I, Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 169.
36. Allen, T., Busby, J., Meyer, M., Petti D. (2010). *Materials Challenges For Nuclear Systems*, *Materials Today*, 13(12), ISSN:1369 7021, Elsevier Ltd. Figure 1.

37. Uyar, M. (2019). *Borlanmış 430f Ferritik Paslanmaz Çeliğin Aşınma Davranışı Üzerine Bir Çalışma*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, 9-19.
38. Islak, S. ve Buytoz, S. (2011). *Plazma Püskürtme Yöntemiyle AISI 304 Paslanmaz Çelik Yüzeyinde Elde Edilen ZrO₂ / Al₂O₃- % 13TiO₂ Kompozit Kaplamasının Mikroyapı Özellikleri*, 6 th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ.
39. Shanmugavelayutham, G., Yano, S., Kobayashi A. (2006). Microstructural characterization and properties of ZrO₂/Al₂O₃ thermal barrier coatings by gas tunnel-type plasma spraying, *Vacuum* 80, 1336-1340.
40. Delaunois, F. and Lienard, P. (2002). Heat treatments for electroless nickel–boron plating on aluminium alloys. *Surface Coating Technology* 160(2-3), 239-248.
41. Krishnaveni, K., Narayanan, N. S., and Seshadri, S. K. (2005). Electroless Ni–B coatings preparation and evaluation of hardness and wear resistance, *Surface Coating Technology*, 190(1), 115-121.
42. Delaunois, F., Petitjean, J. P., Lienard, P. and Jacob-Duliere, M. (2000). Autocatalytic electroless nickel-boron plating on light alloys. *Surface Coating Technology*, 124(2-3), 201-209.
43. Yeşildal, R. ve Günay, Y. Z. (2007). Plazma sprej yöntemi ile kaplama ve sprej karakteristiklerinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1), 59-76.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAYAALP, Murat
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05.10.1982, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (505) 537 72 16
 e-mail : kayaalpmurat@gmail.com,
 murat.kayaalp@euas.gov.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2006	FNSS	Servis Mühendisi
2006-2008	Yeniköy/Yatağan Termik Santrali	Türbin Mühendisi
2008-2012	EÜAŞ Teknik Laboratuvarı	Teknik Şef/NDT Level-2
2012-2017	EÜAŞ/Sinop Nükleer Sant. Projesi	Başmühendis
2017-2019	EUAS ICC/Sinop Nükleer Sant. Projesi	Başmühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Kayaalp, M., Hasırcı, H. (2019). *Termokimyasal Yöntemle AISI 304L Çeliğinin Kaplanabilirliğinin İncelenmesi*, 2nd International Turkish World Engineering and Science Congress, November 7-10, 2019, Türkiye

Hobiler

Yüzme, Basketbol, Futbol



GAZİ GELECEKTİR..