



T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**INCONEL 601 SÜPER ALAŞIMININ %8 YSZ TOZU İLE
TERMAL BARIYER KAPLAMA SONRASI KOROZYON VE
TERMAL ŞOK DAYANIMLARININ İNCELENMESİ**

NİDA NUR ERDOĞAN
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Doç.Dr. Aziz Barış BAŞYİĞİT

KIRIKKALE-2023



T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**INCONEL 601 SÜPER ALAŞIMININ %8 YSZ TOZU İLE
TERMAL BARIYER KAPLAMA SONRASI KOROZYON VE
TERMAL ŞOK DAYANIMLARININ İNCELENMESİ**

NİDA NUR ERDOĞAN
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Doç.Dr. Aziz Barış BAŞYİĞİT

KIRIKKALE-2023

Nida Nur ERDOĞAN tarafından hazırlanan “INCONEL 601 SÜPER ALAŞIMININ %8 YSZ TOZU İLE TERMAL BARIYER KAPLAMA SONRASI KOROZYON VE TERMAL ŞOK DAYANIMLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Aziz Barış BAŞYİĞİT

İmza:

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan : Prof. Dr. Osman BİCAN

İmza:

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye : Doç. Dr. Volkan KILIÇLI

İmza:

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 06/02/2023

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

Prof.Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale 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.

Nida Nur Erdoğan

06/02/2023

ÖZET

INCONEL 601 SÜPER ALAŞIMININ %8 YSZ TOZU İLE TERMAL BARIYER KAPLAMA SONRASI KOROZYON VE TERMAL ŞOK DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

Kırıkkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç.Dr. Aziz Barış BAŞYİĞİT
Şubat 2023, 108 sayfa

Demir esaslı, nikel esaslı, kobalt esaslı olmak üzere üç grupta kategorize edilen süper alaşımlar özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedirler. Nikel esaslı bir süper alaşım olan Inconel 601, kimya sanayi, havacılık, enerji üretimi, ısıtma işlemi, kimyasal arıtma ve gaz türbini motorları uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar süper alaşım malzemelerin mekanik özellikleri, aşınma, korozyon ve oksidasyona karşı dayanımları diğer metalik malzemelere kıyasla daha yüksek olsa da, bazı uygulamalarda bu özellikler tatmin edici seviyede olmamaktadır. Bu gibi durumlarda, süper alaşımlara ısıtma işlemi ve çeşitli endüstriyel kaplama işlemleri uygulanarak istenen teknolojik özellikler elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, Inconel 601 altlık malzemesine bağ kaplama için NiCrAlY ve seramik üst kaplama için %8 YSZ toz kaplama malzemeleri ile ortalama olarak; 100, 200 ve 300 µm seramik üst kaplama kalınlıklarında termal bariyer kaplama sistemi oluşturulmuş olup, SEM, EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Ardından numunelere %3,5 NaCl çözeltisi ile elektrokimyasal korozyon testi ve FCT termal şok yöntemi kullanılarak 1200 °C sıcaklıkta 8 döngü şeklinde termal şok testi uygulanmıştır. Elektrokimyasal korozyon testi sonrası, korozyon hızı değerleri ve SEM görüntüleri göz önüne alındığında, korozyon dayanımı en yüksek olan numunenin 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numuneler olduğu belirlenmiştir. Termal şok testi sonrası numunelerin SEM görüntülerinde sinterlenme etkisine bağlı olarak gözenek ve çatlak oranının düştüğü, ancak daha yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun servis koşullarında TGO tabakası kalınlığının artacağı göz önünde bulundurulduğunda, termal bariyer kaplama deformasyonu açısından 100 ve 200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunelerin termal şok açısından daha güvenli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Inconel 601, Nikel Esaslı Süper Alaşım Malzemelerin Dayanımı, Termal Bariyer Kaplamalar, %8 YSZ, Termal Şok, Korozyon.

ABSTRACT

INVESTIGATING THE CORROSION AND THERMAL SHOCK RESISTANCE OF INCONEL 601 SUPER ALLOY AFTER THERMAL BARRIER COATING WITH 8% YSZ POWDER

Kırıkkale University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering, Master's Thesis
Supervisor: Assoc. Prof.Dr. Aziz Barış BAŞYİĞİT
Feb 2023, 108 pages

Superalloys, which are categorized in three groups as iron-based, nickel-based and cobalt-based, are especially preferred in high temperature applications. Inconel 601, a nickel-based superalloy, is widely used in the chemical industry, aerospace, power generation, heat treatment, chemical treatment and gas turbine engine applications. Although the mechanical properties of superalloy materials and their resistance to wear, corrosion and oxidation are higher than other metallic materials, these properties are not at a satisfactory level in some applications. In such cases, the desired technological properties can be obtained by applying heat treatment and various industrial coating processes to superalloys. In this study, a thermal barrier coating system was created with an average of 100, 200 and 300 μm ceramic top coating thicknesses with NiCrAlY for bond coating and 8% YSZ for ceramic top coating powder coating materials to Inconel 601, and SEM, EDS and XRD analyzes were performed. Then, electrochemical corrosion test with 3.5% NaCl solution and 8 cycles of thermal shock test at 1200 °C using FCT thermal shock method were applied to the samples. Considering the corrosion rate values and SEM images after the electrochemical corrosion test, it was determined that the sample with the highest corrosion resistance was the samples with 100 μm ceramic top coating thickness. The pore and crack ratio decreases due to the sintering effect in the SEM images of the samples after the thermal shock test, but considering that the TGO layer thickness will increase at higher temperatures and longer service conditions, in terms of thermal barrier coating deformation, it was concluded that the samples with 100 and 200 μm ceramic top coating thickness were safer in terms of thermal shock.

Key Words: Inconel 601, Strength of Nickel Based Super Alloy Materials, Thermal Barrier Coatings, 8% YSZ, Thermal Shock, Corrosion.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgisini, desteğini, ilgisini ve tecrübesini hiç esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Aziz Barış BAŞYİĞİT'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Kaplamaların yapılmasında ve SEM-EDS analizlerinde ilgisini, desteğini ve tecrübesini eksik etmeyen Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden Prof.Dr.Fatih ÜSTEL'e ve Sakarya Üniversitesi TESLAB personeli Murat Cihan ÇALIŞKAN'a, kaplama aparatının imalatı sırasında yardımcı olan "Polat Torna" sahibi Faik POLAT'a, elektrokimyasal korozyon testlerinin yapılmasında destek olan Bursa Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden Arş.Gör. Burak KÜÇÜKELYAS'a, termal şok testleri ve mikrosertlik ölçümlerinde desteklerini esirgemeyen "Makine ve Kimya Endüstrisi A.Ş." personeli Mehmet KALKAN'a ve ayrıca tez çalışmalarına maddi destek veren Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyonu'na (Proje Kod No:2022/053) teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatımın her döneminde maddi ve manevi hiçbir desteğini, ilgisini esirgemeyen anne ve babama, kardeşlerim Nurdan ERDOĞAN ve Edanur ERDOĞAN'a, bana her zaman destek olan arkadaşlarım Eda ARIK, Samet DURKUT, Zeynep ÇANKAYA, Yunus Emre SAĞLAM ve Emel SEHMEN'e, kuzenim Nurgül BOZKURT'a, teyzem Hamide ÇIRPAN'a şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1.GİRİŞ	1
2.SÜPER ALAŞIMLAR	3
2.1.Demir Esaslı Süper Alaşımlar	7
2.2.Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar	8
2.3.Nikel Esaslı Süper Alaşımlar	9
2.3.1.Nikel Esaslı Süper Alaşımların Mikro Yapısı	14
2.3.1.1. γ (Gama) Matris Fazı	15
2.3.1.2. γ' (Gama Prime) Fazı	15
2.3.1.3. γ'' (Gama Double Prime) Fazı	17
2.3.1.4.TSP Fazlar	18
2.3.1.5.Karbürler	18
2.3.1.6.Borürler	20
2.3.1.7.Nitrürler	20
2.3.2.Nikel Esaslı Süper Alaşımlarda Tane Boyutu ve Faz Etkileri	20
3.SÜPER ALAŞIMLARA UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ	24
4.TERMAL BARIYER KAPLAMALAR	26
4.1.Termal Sprey Teknikleri	27
4.1.1.Atmosferik Plazma Sprey (APS)	28
4.1.2.Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Sprey (HVOF)	28
4.1.3.Sıvı Hammadde Plazma Sprey	29
4.1.4.Alev Sprey	30
4.1.5.Elektrik Ark Sprey	31
4.2.Termal Bariyer Kaplamalarda Isıl İletkenlik	32
4.3.Termal Bariyer Kaplamaların Mikroyapısı	33
5.KOROZYON ve TERMAL ŞOK DAYANIMI	37

5.1.Yüksek Sıcaklık Korozyonu	37
5.2.Elektrokimyasal Korozyon	37
5.3.Termal Bariyer Kaplamalarda Termal Şok Dayanımı	38
6.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
6.1.Deneysel Malzeme.....	41
6.2.Numunelerin Kaplama İşlemi Ön Hazırlığı.....	43
6.3.Termal Bariyer Kaplama İşlemi	43
6.4.Mikroyapısal İncelemeler	48
6.5.SEM-EDS İncelemeleri	48
6.6.XRD Analizleri.....	49
6.7.Mikrosertlik ölçümleri	50
6.8.Elektrokimyasal Korozyon Testi	50
6.9.Termal Şok Testi.....	50
7.BULGULAR.....	51
7.1.Mikroyapısal İncelemeler	51
7.2.SEM Mikroyapı İncelemeleri	54
7.3.EDS Analizi Sonuçları.....	57
7.4.XRD Analizi Sonuçları.....	59
7.4.1.Scherrer Denklemi ile Kristalit Boyutları, Şekil Değiştirme Yoğunluğu ve Mikro Gerinim Değerlerinin Hesaplanması	63
7.4.2. Williamson – Hall (UDM) Metoduyla Mikro Gerinim Değerlerinin Hesaplanması.....	64
7.4.3.Değiştirilmiş Scherrer (Monshi – Scherrer) Denklemi ile Kristalit Boyutlarının Hesaplanması.....	67
7.5.Mikrosertlik Ölçümleri	69
7.6.Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonuçları.....	70
7.6.1.Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası SEM Analizleri	78
7.6.2.Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası EDS Analizleri.....	83
7.7.Termal Şok Testi Sonuçları	86
7.7.1.Termal Şok Testi Sonrası Inconel 601 Mikroyapısı	87
7.7.2.Termal Şok Testi Sonrası Kaplamalara Ait SEM Analizleri	89
7.7.3.Termal Şok Testi Sonrası Kaplamalara Ait EDS Analizleri.....	93
7.7.4.Termal Şok Testi Sonrası Mikrosertlik Ölçümleri.....	95
8.SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR	99
EKLER	105

Ek.1. Ø 11,28 mm x 7 mm numune için TBC kaplama aparatı sıkma parçası.....	105
Ek.2. Ø 16 mm x 7 mm numune için TBC kaplama aparatı sıkma parçası	106
Ek.3. TBC kaplama aparatı (plaka)	107
ÖZGEÇMİŞ	108



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Süper alaşımlar içerisinde gözlenen başlıca fazlar	4
2.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımlarda Alaşım Elementleri ve Etkileri	10
4.1. Termal bariyer kaplama işleminde kullanılan tozlar ve özellikleri	27
6.1. Inconel 601 alaşımının spektral analiz sonrası kimyasal bileşimi ve nominal kimyasal bileşimi	42
6.2. NiCrAlY ve %8 YSZ tozlarının kimyasal bileşimleri ve özellikleri	45
6.3. HVOF (bağ kaplama) ve APS (seramik üst kaplama) işlem parametreleri	47
7.1. XRD analizine tabi tutulan numuneler	59
7.2. XRD verilerinden elde edilen bileşiklerin latis parametreleri ve kristal sistemleri	62
7.3. Kristalit (tanecik) boyutları	63
7.4. Mikrosertlik ölçümleri	69
7.5. %3,5 NaCl çözeltisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testine ait değerler	71
7.6. Numunelere ait β_a ve β_c değerleri	76
7.7. Termal şok testi sonrası mikrosertlik ölçümleri	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
2.1. Kristal yapıların şematik ve sert küre modellerinin gösterimi	7
2.2. Nikel esaslı süper alaşımların oluşumu için önemli olan elementler ve bu elementlerin periyodik tablodaki konumları	11
2.3. Al, Re, W, Ta, Cr, Co ve Ru içeren nikel esaslı süper alaşımın SEM mikro yapı görüntüsü	14
2.4. γ' fazı yapısı	16
2.5. Ni-Al elementlerine ait ikili faz diyagramı	16
2.6. γ/γ' arayüzünde nano-çökelti ile ikincil γ' mikroyapısı: a) kübik şekilli γ' çökelti; b) karmaşık şekilli γ' çökeltisi	17
2.7. Ni-Nb elementlerine ait ikili faz diyagramı	17
2.8. Tane sınırında diyagonal çökelmiş $M_{23}C_6$ tipi karbürler	19
2.9. MC ve M_6C tipi karbürler	20
2.10. Custom Age 625 Plus alaşımının mikro yapısı	21
2.11. Tavlanmış Incoloy 800 süper alaşımı mikro yapısı (250x)	21
2.12. Altlık malzeme olan Inconel 718 bölgesine ait optik mikroskop görüntüleri ..	22
2.13. Hastelloy X süper alaşımının ince folyo TEM görüntüsü	23
2.14. Çözündürme tavlama uygulanmış ve yaşlandırılmış Inconel 625 malzemesinden imal edilen çubuğun mikro yapısı	23
4.1. Zirkonya-İttriya sistemi için faz diyagramı	26
4.2. HVOF torcunun şematik gösterimi	29
4.3. Alev sprej sisteminin şematik gösterimi	31
4.4. Elektrik ark sprej prosesi şematik gösterimi	32
4.5. Bir süper alaşım altlık malzeme üzerindeki tipik TBC mikro yapıları	33
4.6. 450 mm püskürtme mesafesinde biriktirilen YSZ kaplamanın enine kesitinin çatlak morfolojisi ve lamelli yapısı	34
4.7. YSZ tozuna ait SEM görüntüsü	35
4.8. Termal sprej ile üretilen kaplamanın kesit mikro yapısı	35
5.1. Türbin kanadının emme tarafında yüksek sıcaklık korozyonuna bağlı oluşan oyukları gösteren makro yapı görüntüsü	37
5.2. FCT test sistemi	39
5.3. JETS teçhizatı	40
6.1. Deneysel çalışmalara ait akış şeması	41

6.2.	16 mm çapında ve 400 mm uzunluğunda Inconel 601 süper alaşımından imal edilmiş içi dolu çubuk numune.	42
6.3.	Deney numuneleri	43
6.4.	Kumlama sonrası test numuneleri.	44
6.5.	Termal spreycaplama öncesi sabitlenmiş test numuneleri.	44
6.6.	Uygulanan TBC sisteminin şematik görünümü.	45
6.7.	Sulzer Metco termal spreycaplama sistemi	46
6.8.	Numunelerin görünimleri.	47
6.9.	Kaplama işlemi sonrası test numunelerinin görünümü.	48
6.10.	Vakumda kalıplama cihazı.	49
6.11.	Hassas kesme cihazı.	49
6.12.	Taramalı elektron mikroskobu (Vega Tescan II).	49
6.13.	Rigaku Ultima IV XRD cihazı.	50
7.1.	100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunedeki altlık malzemeye ait optik mikroyapı görüntüleri.	51
7.2.	200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunedeki altlık malzemeye ait optik mikroyapı görüntüleri.	52
7.3.	300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunedeki altlık malzemeye ait optik mikroyapı görüntüleri.	53
7.4.	100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin SEM görüntüleri .	54
7.5.	200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin SEM görüntüleri .	56
7.6.	300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin SEM görüntüsü. ..	57
7.7.	Seramik üst kaplama, bağ kaplama ve altlık malzeme Inconel 601 ‘e ait EDS verileri.	57
7.8.	Altlık malzemeye ait EDS verileri.	58
7.9.	Bağ kaplamaya ait EDS verileri.	58
7.10.	Seramik üst kaplamaya ait EDS verileri.	59
7.11.	Numune 1’e ait XRD verileri.	60
7.12.	Numune 2’ye ait XRD verileri.	61
7.13.	Numune 3’ e ait XRD verileri.	61
7.14.	Numune 4’ e ait XRD verileri.	62
7.15.	Numunelerin peak noktaları değeriyle çizilen Williamson Hall (UDM) grafikleri	66
7.16.	Numunelerin peak noktaları değeriyle çizilen Monschi-Scherrer grafikleri	68
7.17.	Kaplamaya ve altlık malzemeye ait ortalama mikrosertlik değeri.....	70
7.18.	Kaplamasız numunelere ait Tafel eğri.....	72

7.19. 100 µm seramik üst kaplamalı numunelere ait Tafel eğrileri.....	73
7.20. 200 µm seramik üst kaplamalı numunelere ait Tafel eğrileri.....	74
7.21. 300 µm seramik üst kaplamalı numunelere ait Tafel eğrileri.....	75
7.22. Tafel eğrilerinin karşılaştırılması.	77
7.23. Elektrokimyasal korozyon testi sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri	82
7.24. Elektrokimyasal korozyon testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizleri	85
7.25. Termal şok testi sonrası altlık malzeme Inconel 601 e ait optik mikroyapı görüntüleri	87
7.26. 1021 °C sıcaklıkta bir saat çözelti tavlaması ve 760°C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırma sertleşmesi uygulanan Inconel 718 optik mikroyapısı.....	88
7.27. 750 °C'de 1000 saat bekletildikten sonra Inconel 740H'nin mikro yapısı.	89
7.28. Termal şok testi sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri.....	90
7.29. CMSX-4 altlık malzemesine uygulanan NiCoCrAlY bağ kaplama ve APS %8 YSZ seramik üst kaplamanın 1050°C'de döngüsel oksidasyon altında yüksek sıcaklığa maruz kalmasının ardından TGO gelişimi.....	92
7.30. Termal döngüden (1 döngü) sonra ısıtma işlemi görmüş YSZ kaplamanın enine kesit mikro yapısı	93
7.31. Termal şok testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizleri.	94

SİMGELER DİZİNİ

γ	Gama Ostenit Faz
γ'	Gama Prime Faz
γ''	Gama Double Prime Faz
δ	Delta Fazı
σ	Sigma Fazı
η	Eta Fazı
μ	Mü Fazı
λ	X-Işınları dalga boyu
β	FWHM
β_a	Anodik Tafel Eğimi
β_c	Katodik Tafel Eğimi
θ	Kırınım Açısı
ε	Mikro Gerinim
δ	Şekil Değiştirme Yoğunluğu
Ag	Gümüş
AgCl	Gümüş Klorür
AlTiN	Alüminyum Titanyum Nitrür
Al ₂ O ₃	Alümina
C ₂ H ₅ OH	Etanol
CaO	Kalsiyum Oksit
Ce ₂ O ₃	Seryum (III) Oksit
CeO ₂	Seryum Oksit
CuCl ₂	Bakır Klorür
D	Kristalit Boyutu
E _{kor}	Korozyon Potansiyeli
HCl	Hidroklorik Asit
I _{kor}	Korozyon Akımı
K	Scherrer Sabiti
La ₂ Zr ₂ O ₇	Lantanyum Zirkonat
MgO	Magnezyum Oksit
Ni(Cr,Al) ₂ O ₄	Spinel
NiO	Nikel Oksit
TiO ₂	Titanyumdioksit
Pt	Platin
R _p	Polarizasyon Direnci
Y ₂ O ₃	İtriyum Oksit
ZrO ₂	Zirkonyumdioksit

KISALTMALAR DİZİNİ

APS	Hava Plazma Püskürtme
APT	Atomik Prop Tomografisi
ASPS	Eksenel Süspansiyon Plazma Sprey
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
D-CYSZ	Yoğun Serya-YSZ
EB-PVD	Elektron Işını Fiziksel Buhar Biriktirme
EDS	Enerji Dağılımlı X- Işını Spektroskopisi
EPMA	Elektron Prop Mikro Analiz
FEGSEM	Alan Emisyon Tabancalı Taramalı Elektron
Mikroskobu	
GZ	Gadolinyum Zirkonat
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HSP	Hegzagonal Sıkı Paket
HV	Vickers Sertliği
LPPS	Düşük Basınç Plazma Püskürtme
TBC	Termal Bariyer Kaplama
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskobu
TGO	Termal Olarak Büyütülmüş Oksit
TSP	Topolojik Sıkı Paket
PACVD / PE-CVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PS-PVD	Plazma Püskürtme Fiziksel Buhar Biriktirme
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop
SPS	Çözelti Plazma Püskürtme
VPS	Vakumlu Plazma Püskürtme
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
YSZ	İtriya ile Stabilize Edilmiş Zirkonya
WDS	Dalga Boyu Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
XRD	X – Işınları Kırınımı
XRF	X- Işınları Florışması

1. GİRİŞ

Süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanım kararlılık özellikleri, aşınma ve korozyon direncine sahip, yüksek sıcaklık uygulamaları için tercihen VIII-A grubu elementlerinden üretilmiş malzemelerdir. Süper alaşımlar; nikel, nikel-demir ve kobalt esaslı olmak üzere üç ana grupta kategorize edilmektedir. Nikel esaslı süper alaşımlar; güç üretim türbinleri, kimyasal işleme tesisleri, nükleer gaz türbinleri, petrokimyasal endüstriler, havacılık, uçak ve uzay endüstrisi gibi üretim alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Günümüzde, gelişmiş uçak motorlarının ağırlığının %50'sinden fazlasını oluşturan nikel esaslı süper alaşımlar, 'Yüzey Merkezli Kübik' yapıda nikel matrisinin yüksek faz kararlılığı, krom ve/veya alüminyum gibi alaşım elementleri ile alaşım yapılarak kolaylıkla geliştirilmektedir [2]. Nikel esaslı süper alaşımlar, % 30 – 75 oranında Nikel, % 30'a kadar Krom içermektedir. Bunun yanında, alaşım elementleri olarak Alüminyum, Titanyum, Kobalt ve az miktarlarda Bor, Zirkonyum, Karbon içeriğine sahiptirler. Nikel ve Krom elementleri bu alaşımlara önemli bir oksidasyon direnci kazandırmaktadır. Nikel esaslı süper alaşımlar, mekanik mukavemet açısından özellikle 650 °C kullanım sıcaklığının üzerinde paslanmaz çeliklerden daha üstün özellik göstermektedirler [3].

Nikel esaslı bir süper alaşım olan Inconel 601, ısıtma fırınlarının makine ve ekipman parçalarında, jet motorları, hava yolu araç parçaları, endüstriyel ısıtıcılar gibi sıcaklığın çok yüksek olduğu bir çok alanda tercih edilmektedir. Süper alaşımların mikro yapısında, ana matris fazı olarak Yüzey merkezli kübik (YMK) yapıda gama, alaşımın mukavemetini artıran gama prime, korozyon ve oksidasyona karşı dayanım sağlayan karbürler ve borürler, delta ve sigma fazları gibi topolojik sıkı paket yapılar bulunmaktadır [4,5]. Süper alaşımların sahip olduğu mekanik özellikler, aşınma ve korozyon dayanımı yeterli gelmediği durumlarda, bu malzemelere ısıtma işlemi ve kaplama işlemleri uygulanarak istenen özellikler elde edilebilmektedir. Bazı Süper Alaşımlar, kaplama malzemeleri ve ek parçalar olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. İyileştirilmiş hizmet ömrü ve performans gereksinimleri arttıkça, süper alaşımlar için uygulamaların da artacağı öngörülmektedir.

Süper alaşımlara uygulanan yüzey sertleştirme yöntemleri, difüzyon kaplama, overlay kaplama ve termal bariyer kaplama olmak üzere üç grupta kategorize edilebilmektedir. Difüzyon kaplama ve overlay kaplama işlemlerinin asıl amacı, malzemeyi aşınma,

oksidasyon ve korozyondan korumak iken, termal bariyer kaplama işlemlerinin amacı ise malzemeyi termal olarak korumaktır [4]. Süper alaşımlara en yaygın olarak uygulanan ısıtıl işlemler ise, gerilim giderme tavlama, tam tavlama, kaplama difüzyonu, yaşlandırma sertleştirilmesi olarak sıralanabilmektedir [6,7].

Termal bariyer kaplamalar (TBC), malzemelerin oksidasyon oranlarını azaltmak ve termal yumuşama ve sünmeden altlık malzemeyi koruyarak ısı akışını azaltmak için kullanılmaktadır. Bu sistemlerin ana uygulaması, gaz ve uçak türbinleridir. Korozyona dayanıklı kaplamalarla birlikte yaygın olarak kullanılan bu kaplamalar, süper alaşımlardaki sıcaklık yükünü 200°C kadar azaltmakta veya tam tersi, türbin verimliliğini artırmak için bu aralıkta çalışma sıcaklığında artışa izin vermektedir. TBC' ler, seramik bir üst kaplama, termal olarak büyütülmüş oksit (TGO) ve bağ kaplamadan oluşmaktadır [8, 9].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, en yaygın olarak kullanılan nikel esaslı süper alaşımlardan Inconel 718 için birçok farklı çalışma bulunurken, diğer süper alaşımlar ve özellikle Inconel 601 süper alaşımı için korozyon ve termal şok dayanımlarının incelendiği bu kapsamda bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu tez çalışması ile birlikte, nikel esaslı bir süper alaşım olan Inconel 601'in bağ kaplama için NiCrAlY ve seramik üst kaplama için %8 YSZ tozu kullanılarak farklı seramik üst kaplama kalınlıklarında üretilen TBC sistemi ile birlikte, TBC sistemi işlem parametreleri ve kullanılan termal sprej yöntemlerinin kaplama mikroyapısına etkisi, %3,5 NaCl çözeltisi ile gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testi sonrası elektrokimyasal korozyon test parametreleri, SEM görüntüleri ve EDS verileri ile birlikte ve 1200 °C ve 8 döngü şeklinde gerçekleştirilen termal şok testi sonrası SEM görüntüleri ve EDS verileri ile birlikte elektrokimyasal korozyon ve termal şok dayanımının yorumlanması amaçlanmıştır.

2. SÜPER ALAŞIMLAR

Bazı malzeme grupları, özelliklerini yüksek sıcaklıklarda muhafaza etme konusunda tatminkar özelliklere sahiptir. Bu malzemeler, yüksek sıcaklık malzemeleri olarak adlandırılmaktadır. Kullanımları çok çeşitli olmakla birlikte, türbinler, roketler ve ısı eşanjörleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Bir malzeme grubunun yüksek sıcaklık malzemesi olarak anılması için, çalışma sıcaklığı $T_{\text{çalışma}}$, malzemenin erime noktası ise T_m olarak belirtilirse, τ olarak belirtilen $T_{\text{çalışma}}/T_m$ olarak tanımlanan oranın yaklaşık olarak 0,6'dan büyük olması gerekmektedir [4].

Çok yüksek sıcaklıklarda seramikler, vanadyum, niyobyum tantalyum gibi V-A grubu metalleri, krom, molibden, tungsten gibi VI-A grubu metalleri kullanılmaktadır. Ancak seramik malzemelerin birçok uygulamada yeterli tokluğa sahip olmaması, V-A ve VI-A grubu metallerinin oksidasyona karşı direncinin düşük olması nedeniyle bu malzemelerin uygulamada yetersiz kaldığı durumlarda süper alaşımlar tercih edilmektedir [1].

Yüksek sıcaklık uygulamalarında sıklıkla tercih edilen süper alaşımlar, nikel, demir veya kobalt elementlerinin en az biri bakımından zengin olan alaşımlardır. Bu noktada, süper alaşımları nikel esaslı, demir esaslı, kobalt esaslı olmak üzere üç grupta kategorize etmek mümkündür. Yüksek sıcaklıkta ve yüksek stres altında yapısal ve yüzey stabilitesini koruyabilen süper alaşımlar, mükemmel mekanik özelliklere, 1050-1200°C sıcaklık aralığında üstün sürünme ve kopma dayanımına, aşınma ve korozyon dayanımına sahiptirler [2]. Gaz türbinleri, kömür dönüştürme tesisleri, kimyasal proses endüstrileri, uçak ve endüstriyel gaz türbinleri, motorlar, ısıl işlem ekipmanları, gemi, lokomotif, roketlerde tahrik sistemleri, nükleer reaktörler, denizcilik, denizaltı uygulamaları, nükleer güç sistemleri, sıcak işleme takımları ve ısı ve korozyon direnci gerektiren diğer yüksek sıcaklık uygulamalarında süper alaşımlar kullanılmaktadır [1,2].

Süper alaşımlar üretim yöntemlerine göre üç grupta incelenmektedir [5,6].

- Dövme
- Dökme
- Toz metalürjisi

Dövülmüş süper alaşımlar, ingot ile dökülme işlemi sonrası, malzemeyi gerekli boyut ve şekle dönüştürmek için sıcak işleme prosesi veya prosesleri uygulanmaktadır.

Döküm süper alaşımlar, bileşenin herhangi bir sıcak şekillendirme yapılmadan doğrudan şekillendirilmektedir. Toz metalürjisi ile üretilen süper alaşımlar ise oksit dispersiyonu ile güçlendirilmektedir [6]. Dövme süper alaşımlar, döküm süper alaşımlara göre daha ince taneli yapıya sahiptirler. Bunun sonucunda, dövme süper alaşımlar orta dereceli sıcaklıklarda, dökmelelere göre çok daha iyi mukavemet ve işleme özelliğine sahip olmasıyla birlikte, yorulma dayanımları ve kırılma özellikleri de dökme süper alaşımlara göre çok daha iyidir. Bunun nedeni, sıcak işleme sırasında dövme süper alaşımlardaki mikro yapısal hasarların ve boşlukların dökme süper alaşımlara kıyasla, ortadan kalkması ve tane boyutunun küçülmesidir [1].

Demir, nikel ve kobalt elementleri süper alaşımların temel elementi olduklarında kristal yapıları yüzey merkezli kübik (YMK) tir. Nikel tüm sıcaklıklarda YMK yapı gösterirken, demir ve kobalt elementleri, oda sıcaklığında YMK yapıda değildir. Demir ve kobaltla alaşımlı diğer elementlerin varlığıyla birlikte, yüksek sıcaklıklarda hem demir hem de kobalt elementleri dönüşüme uğrayarak YMK yapıda olmaktadır. Demir ve kobalt esaslı süper alaşımlara, en iyi özellikleri kazandırmak için alaşım elementi ilavesi yapılmakta ve özellikle nikel ile stabilize edilmektedir. Süper alaşımlar, yalnızca YMK yapı sayesinde değil, aynı zamanda özel güçlendirme fazları ile güçlendirilmektedirler [5]. YMK matriste, alaşım elementlerine bağlı olarak çökelen fazlar, malzemenin mekanik özelliklerini belirlemektedirler. Çizelge 2.1.'de süper alaşımlar içerisinde gözlenen başlıca fazlar verilmiştir.

Çizelge 2.1. Süper alaşımlar içerisinde gözlenen başlıca fazlar [1].

Faz	Kristal yapı	Formül	Açıklamalar
γ'	YMK (Yüzey Merkezli Kübik)	Ni_3Al $Ni_3(Al, Ti)$	Birçok nikel esaslı süper alaşım içinde ana mukavemetlendirme fazıdır, östenit matris içindeki kristal kafesleri küçüktür, küreselden kübiğe değişik şekillerde, sıcaklık ve zamanın etkisiyle de değişik boyutlardır.

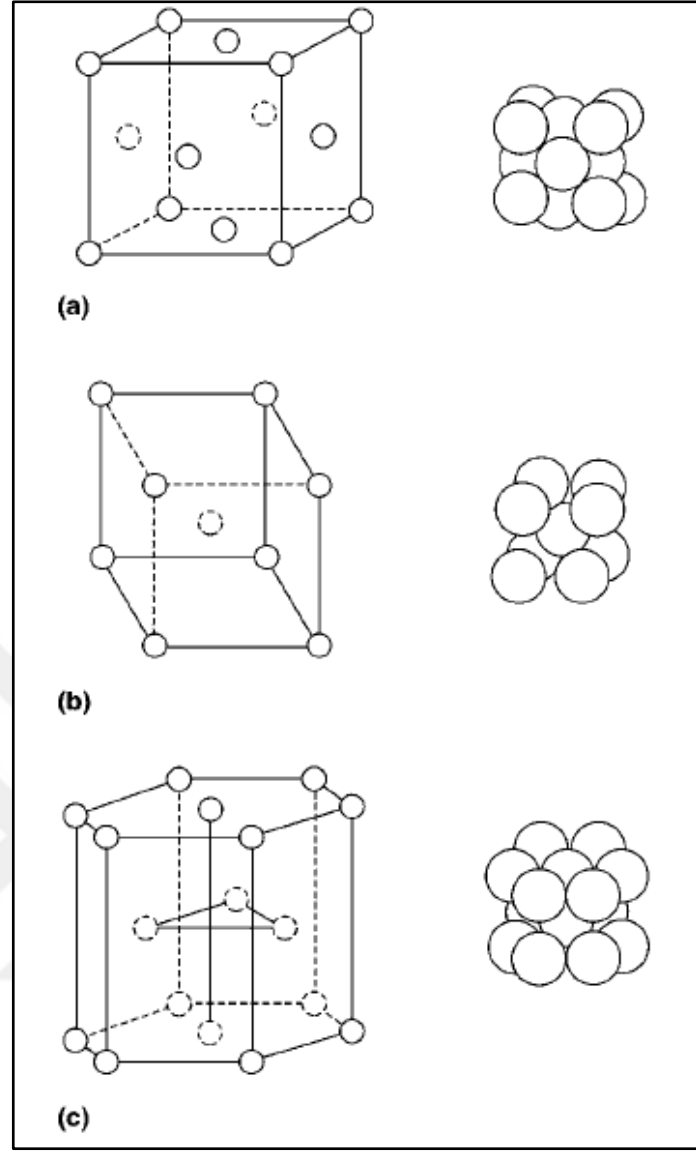
Çizelge 2.1. (devamı) Süper alaşımlar içerisinde gözlenen başlıca fazlar [1].

Faz	Kristal yapı	Formül	Açıklamalar
γ''	HMT (Hacim Merkez Tetragonal)	Ni_3Nb	Inconel 718 içinde ana mukavemetlendirme fazıdır; kararlı bir fazdır.
$Ni_3Nb(\delta)$	Ortorombik	Ni_3Nb	Aşırı yaşlanan Inconel 718 içinde gözlemlenmektedir; 815-980 °C arasında şekillendiğinde iğnemsî bir görüntüye sahiptir.
MC	Kübik	TiC, NbC, HfC	Titanyum karbür nitrojen, zirkonyum ve molibden için çözülebilirliğe sahiptir; bileşimi farklıdır. “M” elementleri Ti, Ta, Hf, Nb, Th ve Zr olabilmektedir.
$M_{23}C_6$	YMK(Yüzey Merkezli Kübik)	$Cr_{23}C_6$ (Cr,Fe,W,Mo) $_{23}C_6$	Film, küresel, levha, lamelli ve hücrel olarak tane sınırlarında çökelebilmekte; “M” elementi genellikle Cr, ancak Ni-Co, Fe, Mo ve Tu de yerine geçebilmektedir.
M_6C	YMK(Yüzey Merkezli Kübik)	$Fe_3Mo_3C, Fe_3W_3C,$ $Fe_4W_2C, Fe_3Nb_3C,$ Fe_3Nb_3C, Ta_3Co_3C	Gelişi güzel dağılan pembemsi karbürlerdir; “M” elementi genellikle Mo, Tu’dur.
M_7C_3	Hegzagonal	Cr_7C_3	Genellikle intergranular bir blok şeklinde görülmektedir; 1000°C sıcaklığın üstünde bir sıcaklığa maruz kaldıktan bazı kobalt esaslı alaşımlarda görülmektedir.

Çizelge 2.1. (devamı) Süper alaşımlar içerisinde gözlenen başlıca fazlar [1].

Faz	Kristal yapı	Formül	Açıklamalar
M₃B₂	Tetragonal	Ta ₃ B ₂ , V ₃ B ₂ , Nb ₃ B ₂ , (Mo, Ti, Cr, Ni, Fe) ₃ B ₂ , Mo ₂ FeB ₂	Fe-Ni, ve nikel esaslı alaşımlarda gözlemlenmektedir; borürler karbürlerle benzer; “M” elementleri Mo, Ta, Nb, Ni, Fe ve V olabilmektedir.
MN	Kübik	TiN, (Ti, Nb, Zr)N, (Ti, Nb, Zr)(C, N), ZrN, NbN	Nitrürler, Ti, Nb ve Zr içeren alaşımlarda görülmektedir; bunlar ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda erimezler.
μ	Rombohedral	Co ₇ W ₆ , (Fe, Co) ₇ (Mo, W) ₆	Genellikle yüksek oranda Molibden ve Tungsten içeren alaşımlarda görülmekte olup; kaba, düzensiz Widmanstent plakalar şeklindedirler ve yüksek sıcaklıklarda şekillenmektedirler.
Laves	Hegzagonal	Fe ₂ Nb, Fe ₂ Ti, Fe ₂ Mo, Co ₂ Ta, Co ₂ Ti	Fe ve Co esaslı süper alaşımların mikro yapısında çok yaygındır; genellikle düzensiz küreler olarak görülürler.
σ	Tetragonal	FeCr, FeCrMo, CrFeMoNi, CrCo, Cr NiMo	En çok Fe ve Co esaslı süper alaşımlar içinde, bir miktar da Ni esaslı süper alaşımlarda 540-980 ⁰ C arasında arasındaki sıcaklıklarda uzun süre bekletildikten sonra şekillenirler.

Şekil. 2.1.’de YMK, HMK ve HSP kristal yapılarının gösterimi verilmiştir.



Şekil.2.1. Kristal yapıların şematik ve sert küre modellerinin gösterimi a) YMK (Yüzey merkezli kübik) b) HMK (Hacim merkezli kübik) c) HSP (Hegzagonal sıkı paket) [5].

2.1. Demir Esaslı Süper Alaşımlar

Demir esaslı süper alaşımların dayanımları nikel esaslı süper alaşımlara kıyasla daha düşüktür. Bu sebeple, yüksek sıcaklık ve mekanik dayanım gerektiren uygulamalarında, nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar demir esaslı süper alaşımlara kıyasla daha çok tercih edilmektedir. Demir esaslı süper alaşımlar, 650°C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılmaktadırlar. Daha düşük sıcaklıklarda, ihtiyaç duyulan mekanik özelliklere de bağlı olarak, demir esaslı süper alaşımlar, nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlara kıyasla daha çok tercih edilmektedir. Diğer süper alaşımlara göre maliyetleri daha düşüktür [5].

Demir esaslı süper alaşımlar ana element olarak Fe (%15-60) içerirken, önemli miktarda Ni (%25-45), Cr (%15-28) ve çok az miktarda da Mo (%1-6) veya W içermektedirler. Krom elementi bu alaşımlara oksidasyon direnci kazandırmaktadır. Al, Ti ve Nb elementlerini içermeleri nedeniyle, çökelme sertleşmesi ile sertleştirilebilmektedirler. Metaller-arası çökelti genellikle $Ni_3(Al, Ti)$ γ' tipindedir. Bunun yanı sıra, karbür ve/veya katı eriyik mukavemeti artırır. Bu alaşımlar genel olarak, gaz türbin motorları, katalitik konvertör parçaları, türbin diskleri ve türbin kutuları gibi motor parçalarının imalatında kullanılmaktadırlar [3].

Demir esaslı süper alaşımların bazıları patentli ticari isimleriyle aşağıda örnek olarak verilmektedir [3].

- Incoloy (800,801,802,807, 825, 903, 907,909)
- A-286
- Alloy 901
- Discaloy
- Haynes 536
- H-155
- V-57

2.2. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşımlar, karbürler ve katı çözelti sertleştiricilerin birleşimi ile güçlendirilmektedirler. Kobalt esaslı süper alaşımlar üretim yöntemine göre dökme ve dövme olmak üzere kendi aralarında iki grupta kategorize edilmektedirler. Dökme alaşımlar X-40 ve dövme alaşımlar L-605 (HA-25) ile karakterize edilmektedir. Kobalt esaslı süper alaşımların ergime sıcaklıkları, nikel esaslı süper alaşımlara göre daha yüksektir. Nikel esaslı alaşımlara kıyasla çok daha yüksek ısıl yorulma dayanımına sahiptirler. Gerçek mukavemet gereksinimine ve malzemeye etki edecek aşındırıcıya bağlı olarak, nikel esaslı süper alaşımlar yerine kobalt esaslı süper alaşımlar kullanılabilir. Nispeten yüksek sıcaklık ve düşük gerilmelerde uzun ömürlü olması istenen parçalarda tercih edilirler [5]. Kobalt esaslı süper alaşımlardan bazıları patentli ticari isimleriyle aşağıda verilmektedir [3].

- Haynes 188
- Haynes 25 (L-605)

- MAR-M918
- MP35N
- MP159
- Stellite 6B
- Elgiloy

2.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Nikel, dökme demirlerde, demir dışı alaşımlarda, çeliklerde en önemli alaşım elementlerinden biridir. Saf nikel, 1453°C erime noktasına sahiptir ve erime noktasına kadar olan sıcaklıklarda YMK yapıya sahip olması nedeniyle sünek yapıdadır. Nikel ve nikel alaşımları bu sebeple, dövme, döküm ve toz metalürjisi gibi geleneksel yöntemlerle kolaylıkla üretilmektedir. Nikel ve nikel esaslı alaşımlar, aşındırıcı ortamlarda ve yüksek sıcaklık uygulamalarında yüksek dayanım göstermeleri sebebiyle endüstri uygulamaları için büyük önem taşımaktadırlar. Nikel-demir alaşımları ise kontrollü termal genleşme ve yumuşak manyetik özellikler gerektiren uygulamalar için geliştirilmişlerdir [8].

Genel olarak kobalt esaslı süper alaşımların ergime sıcaklığı, demir ve nikel esaslı süper alaşımlarına kıyasla daha yüksek olsa da, nikel esaslı süper alaşımların içeriğindeki alaşım elementlerinin etkisiyle, yüksek sıcaklıklarda ve yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kobalt esaslı süper alaşımlara göre daha çok tercih edilmektedirler [1,5].

Nikel esaslı süper alaşımlar, % 30 – 75 oranında Ni, % 30'a kadar Cr ve alaşım elementleri olarak Al, Ti, Co ve az miktarlarda B, Zr, C içermektedirler. Ni ve Cr birleşimi bu alaşımlara önemli bir oksidasyon direnci kazandırmaktadır [3]. Korozyon dayanımı için Cr, Al veya Si gibi alaşım elementleri, gevreklemeye yol açtığı veya ergime noktasını dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda sürünme mukavemetini düşürdüğü için daha yüksek oranlarda kullanılamamaktadır [9].

YMK kafes yapılı matriste, alaşım elementlerine bağlı olarak çökelen fazlar, malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde rol oynamaktadır. Birçok alaşım elementi, süper alaşımlara özellikle de nikel esaslı süper alaşımlara, alaşımın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için küçük ya da büyük miktarda eklenmektedir. Nikelin sağlam ve sünek YMK matrisi, %35 Cr, %20 Mo ve W, %5 ila %10 Al, Ti, V elementlerini çözebilmektedir. Bazı alaşımlar, on dört kadar alaşım elementi

İçerebilmektedir [5].

Çizelge 2.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımlarda Alaşım Elementleri ve Etkileri [5].

Etki	Alaşım Elementleri
Katı çözelti sertleştiriciler	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta, Re
<u>Karbür formları:</u>	
MC	W, Ta, Ti, Mo, Nb, Hf
M ₇ C ₃	Cr
M ₂₃ C ₆	Cr, Mo, W
M ₆ C	Mo, W, Nb
Karbonitritler M(CN)	C, N
γ' Ni ₃ (Al, Ti) oluşturanlar	Al, Ti
γ'' ın çözücü sıcaklığını yükselticiler	Co
γ'' ın çözücü sıcaklığını düşürücüler	Cr
Sertleşme çöktiriciler ve/veya intermetalikler	Al, Ti, Nb
Oksidasyon direnci geliştiriciler	Al, Cr, Y, La, Ce
Sıcak korozyon direnci geliştiriciler	La, Th
Sülfidasyon direnci	Cr, Co, Si
Sürünme özelliklerini iyileştiriciler	B, Ta

Nikel esaslı süper alaşımlarda, krom ve alüminyum alaşıma oksidasyon direnci kazandırmak için gereklidir. Bor, zirkonyum gibi alaşım elementleri, tane sınırı güçlendirici elementlerdir ve yüksek sıcaklıkta sürünme direncini ve malzemenin sıcak işlenebilirliğini arttırmaktadırlar Kobalt, demir, krom, tungsten, vanadyum, titanyum, tantalum ve alüminyum gibi alaşım elementleri, hem γ hem de γ' fazı olarak katı çözelti sertleştiricilerdir. Nikel esaslı süper alaşımlarda çözünen temel alaşım elementleri, alaşım içerisinde atomik olarak yüzde 10'dan daha az toplam konsantrasyona sahip alüminyum ve/veya titanyumdur. Bu elementler, gama (γ) ve gama prime (γ') fazlarından oluşan iki fazlı mikro yapıyı oluşturmaktadırlar.

Malzemenin yüksek sıcaklık ve sürünme deformasyonuna karşı dayanımı, γ' fazı yani $Ni_3(Al,Ti)$ çokaltılması ile mümkün olmaktadır. [10,11].

Tek kristal Ni_3Al polikristal yapıya kıyasla daha yüksek süneklik göstermektedir [12]. Alaşım içerisinde meydana gelen karbürler ise, tane sınırlarında çökelme eğiliminde olup, tane sınırı kaymasını azaltmaktadırlar [10].

Şekil 2.2.'de nikel esaslı süper alaşımların oluşumu için önemli olan elementler ve bu elementlerin periyodik tablodaki konumları verilmiştir.

B

C

Atom çapının nikel
yüzde farkı

+6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Şekil 2.2. Nikel esaslı süper alaşımların oluşumu için önemli olan elementler ve bu elementlerin periyodik tablodaki konumları [4].

Cr_2O_3 ve Al_2O_3 oluşumu ile malzemenin yüzey stabilitesini geliştirmek için alaşım elementi olarak krom ve alüminyum gereklidir. Molibden, niyobyum ve tungsten gibi alaşım elementleri, karbür oluşturmuculardır [10,13]. Nikel esaslı süper alaşımlarda güçlendirici olarak bilinen Ni_3Al , Ni_3Ti ve Ni_3Nb intermetaliklerinin artan sıcaklık ile mukavemetleri de artmaktadır [14,15].

Endüstriyel olarak kullanılan bazı nikel esaslı süper alaşımlara aşağıda patentli ticari isimleriyle verilmektedir [3]:

- Inconel (587, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, X750)
- Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.11, PE.16, Pk.33)
- Rene (41, 45)
- Udimet (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720)
- Pyromet 860

- Astroloy
- M –252
- Hastelloy (C-22, G-30, S, X)
- Waspaloy
- Unitemp AF2-IDA6
- Cabot 214
- Haynes 230

Hastelloy S, %67 Ni, %16 Cr ve %15 Mo içeriğinin yanı sıra, termal kararlılığını, yorulma ömrünü, oksidasyon direncini iyileştiren diğer alaşım elementlerini içermektedir. Düşük gerilmeli gaz türbini parçalarında kullanılır ve mükemmel bir dolgu metalidir [9]. Hastelloy X alaşımı, 1204 °C'ye kadar mükemmel mukavemete ve oksidasyon direncine sahiptir. Ayrıca stres-korozyon çatlamasına karşı dayanıklıdır [10]. Nimonic 75, yakıcılar ve egzoz boruları gibi sac malzemeden üretilen gaz türbini bileşenlerinde kullanılmaktadır [8,12].

Inconel 600 alaşımı, ısıtılma ekipmanları ve ısı eşanjörleri gibi genel endüstriyel fırın parçaları için yaygın olarak kullanılan bir alaşımdır.

Inconel 690 ve Inconel 601 alaşımları, nikel esaslı süper alaşımlar arasında yüksek Cr ve Fe içeriğiyle dikkat çeken alaşımlardır.

%29 Cr içeriğiyle Inconel 690 alaşımı, nükleer buhar jeneratörleri için geliştirilmiştir. Yüksek oksidasyon direnci için geliştirilmiş olan Inconel 601 alaşımı %1,4 Al içermektedir [8,12].

Inconel 718, matris elementi nikelin yanı sıra, yaşlandırma sertleştirilmesi için titanyum ve niyobyum ilaveleri içermektedir. Bu alaşım, %0,04 C, %19 Cr, %1 Ti, %0,6 Al, %20 Fe, %3 Mo, %5,2 Nb, %0,003 B kompozisyonuyla havacılıkta ve uzay sanayinde, kimyasallara teması olan parçalarda, roket ve motor parçalarında, denizcilik araçlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, Inconel 718 nikel esaslı süper alaşımı, çöktürme yolu ile sertleştirilmekte, üretilen ve tüketilen toplam süper alaşım hacminin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır [6, 12].

Inconel 625 ve Inconel 617 alaşımları, uçak motorları için geliştirilmiş ancak yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyon direnci gerektiren uygulamalarda geniş kullanım alanı bulmuştur [8].

Inconel 800 alaşım serisi, yüksek sıcaklıkta sürünme ve gerilme kopması açısından mkemmek mukavemet göstermektedir. 903, 907 ve 909 alaşımlarının tümü, 650 °C'ye kadar olan uygulamalar için yüksek mukavemet ve düşük termal genleşme katsayısı sağlamak için geliştirilmiştir [16].

Inconel 903 ve 909 alaşımları 650 °C' ye kadar tatminkar kullanım alanı bulmaktadırlar. Fakat kimyasal kompozisyonda kromun olmayışı malzemenin oksidasyon direncini önemli ölçüde azaltmaktadır [17].

MA-754 ve MA-6000E gibi nikel esaslı süper alaşımlar, γ' faz keltmesinin yanında, başta itriyum oksit (Y_2O_3) olmak üzere inert parçacıkların dağılımıyla ve oksit dispersiyonu ile güçlendirilmiş alaşımlardır [18].

Nikel-krom-demir alaşımı olan Inconel 601, ısıya, korozyona ve oksidasyona karşı direnç gerektiren uygulamalar için genel amaçlı bir mühendislik malzemesidir. Yüksek mekanik mukavemete sahip olan Inconel 601, kolayca şekillendirilebilmekte, işlenebilmekte ve kaynaklanabilmektedir. Alaşımın bileşimi, yüksek metalürjik kararlılığa sahip YMK katı çözeltisidir. Alüminyum içeriği ile oksidasyon dayanımı daha da geliştirilmiştir. Krom içeriği ile de yüksek sıcaklıklı ve aşındırıcı ortamlara karşı dayanım sağlamaktadır. [19].

Inconel 601 alaşımının mekanik özellikleri, kirlilik kontrolü, kimyasal işleme, havacılık, enerji üretimi, ısıl işlem, kimyasal arıtma ve gaz türbini motorları gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir malzeme haline getirmektedir [19]. Inconel 601 nikel esaslı süper alaşımı; endüstriyel ısıtma uygulamaları (tavlama, karbürleme, karbonitrürleme, nitrürleme ve diğer ısıl işlem makine ve ekipman parçaları), petrokimyasal işlemede yüksek yoğunluklu polietilen üretiminde katalizör rejeneratrleri ve hava n ısıtıcıları, uçak ve endüstriyel uygulamalar için gaz türbinlerindeki muhafaza halkaları, benzinli motorların egzoz sistemlerindeki termal reaktörler, katı atık yakma fırınlarında yanma odaları, jet motorları ve hava yolu araç parçaları, yanma kutusu gömlekleri gibi korozyon direnci ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık istenen uygulamalarda kullanılmaktadır [4,19].

Inconel 601 alaşımında, sigma gibi gevrekleşen ve düşük kopma mukavemetine neden olan intermetalik fazlar mevcut değildir. Alaşımdaki nikel ve krom içeriği, alüminyum ile birlikte yüksek sıcaklıklarda korozyona karşı dayanım sağlamasının yanı sıra, yaklaşık 1200°C yüksek sıcaklıklarda ve döngüsel termal koşullar altında oksidasyona

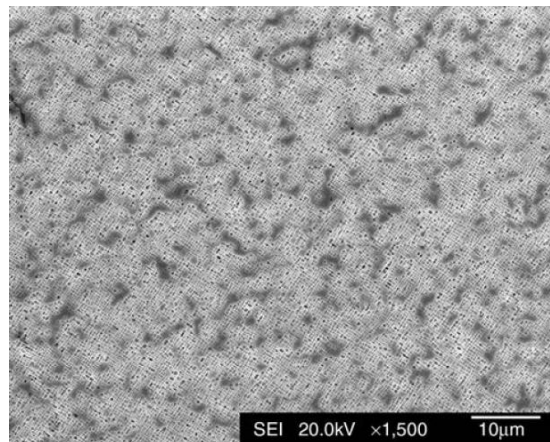
karşı da mükemmel dayanım sağlamaktadır. Inconel 601 içeriğinde bulunan bu elementler, yüksek sıcaklığa maruz kalma sırasında malzemenin yüzeyinde son derece koruyucu ve yapışkan bir oksit filmi oluşturmaktadır. Bunların yanı sıra Inconel 601, karbürizasyona karşı da mükemmel direnç sağlamaktadır [19].

2.3.1. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Mikro Yapısı

Nikel, yeryüzünde en bol bulunan beşinci elementtir. Atom numarası 28'dir ve periyodik tabloda, demir ve kobaltın yanı sıra geçiş metallerinin d bloğunun ilk satırında bulunmaktadır. Atom ağırlığı 58.71'dir. Kristal yapısı, erime noktası olan 1455 °C'ye kadar yüzey merkezli kübiktir [4].

Süper alaşımlar, genel olarak, bir östenitik γ matrisine sahiptirler ve çok çeşitli ikincil fazlar içermektedirler. Niyobyum ve tantalyum içeren alaşımlarda, birincil güçlendirme fazı, tetragonal faz olan γ'' dir. Süper alaşımların mikro yapısında gözlenen en yaygın ikincil fazlar γ' fazı ve metal karbürlerdir. Bor ve zirkonyum alaşım elementleri, karbürlerin tane sınırını güçlendirmesinde olumlu etkiye sahiptirler. Genel olarak istenmeyen ortorombik δ fazı, σ fazı, Laves ve η fazı, bazı alaşımlarda genellikle döküm ve haddeleme sonrasında veya yüksek sıcaklığa maruz kalma nedeniyle oluşabilmektedir [20-23]. Inconel 718 ve Inconel 706 gibi niyobyum içeren bazı nikel esaslı süper alaşımlar, $D0_{22}$ yapıları Ni_3Nb esaslı γ'' fazı oluşumu ile sertleştirilebilmektedirler [23].

Al, Re, W, Ta, Cr, Co ve Ru içeren nikel esaslı süper alaşımın SEI modunda FEGSEM mikro yapı görüntüsü Şekil.2.3.' de verilmiştir. Mikro yapı γ / γ' 'dan oluşmakta, koyu olan faz γ' ve daha parlak olan faz γ fazıdır [24].



Şekil 2.3. Al, Re, W, Ta, Cr, Co ve Ru içeren nikel esaslı süper alaşımın SEM mikro yapı görüntüsü [24].

Genel olarak, polikristal süper alaşımlara iki tane sınırı güçlendirme elementi eklenmektedir. İlk olarak, alaşım elementi olarak eklenen karbon, karbürlerin oluşumuna yol açmaktadır. Karbürler, termomekanik işlem sırasında tane boyutunu kontrol etmek ve deformasyon sırasında tane sınırı kaymasını önlemek için kullanılmaktadır. İkincisi, bor, polikristal süper alaşımlarda tane sınırı güçlendirme elementi olarak kullanılmaktadır. Alaşımın tane boyutuna bağlı olarak bor, tane sınırlarında veya tane sınırları boyunca ayrılarak M_5B_3 ve M_3B_2 gibi çeşitli borürlerin oluşumuna neden olmaktadır. Borürler, süper alaşımlarda ikincil fazlar olarak kabul edilmektedir. Ancak mikro yapıdaki varlığı, polikristal süper alaşımların mekanik performansını etkilemektedir [25, 26].

Inconel süper alaşımlarının mikroskobik incelemelerinde γ ve γ' fazlarının mevcudiyeti, ısıtıl işlem ile değişmektedir ve bu durum, alaşım özelliklerini de değiştirmektedir [27].

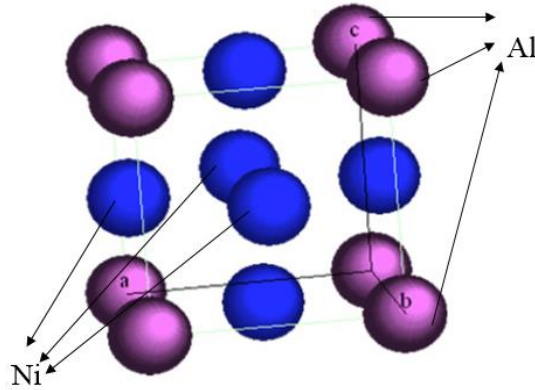
2.3.1.1. γ (Gama) Matris Fazı

Nikel bir çok alaşım elementi için geniş bir katı çözünürlüğe sahip olduğundan nikel alaşımlarının mikro yapısı, içinde çökeltilerin oluşabileceği YMK katı çözeltili östenitinden (γ) oluşmaktadır. Tamamen östenit ve YMK kristal yapısına sahip olan Ni-Cr matrisi, HMK kristal yapısına göre yüksek sıcaklıklarda daha iyi çekme, yorulma ve sürünme özellikleri göstermektedir. Bununla yanında, gama matris fazı yüksek sıcaklıklarda kolayca mukavemetlendirilmektedir [3].

2.3.1.2. γ' (Gama Prime) Fazı

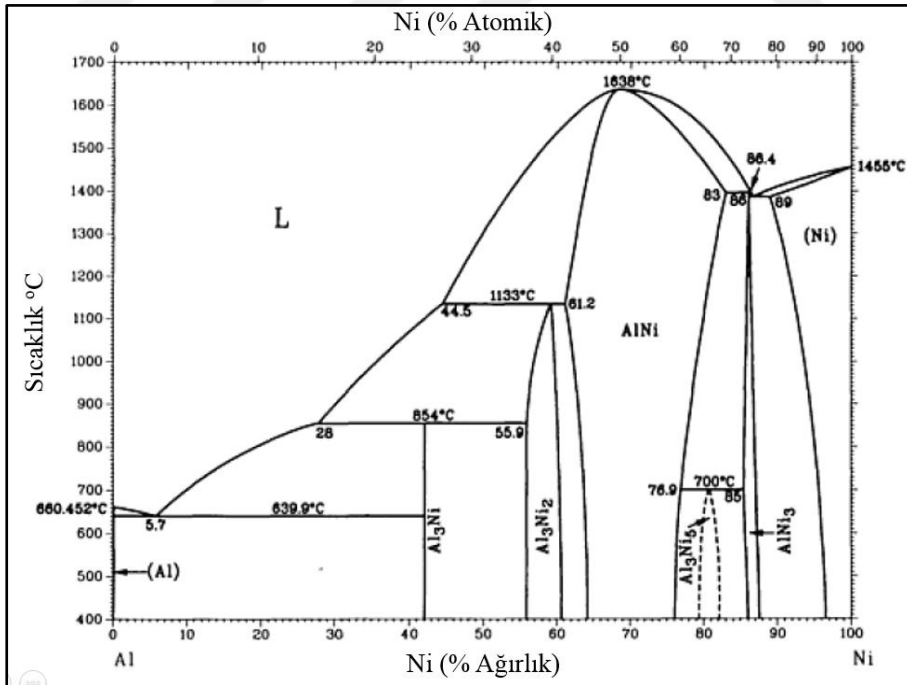
Nikel esaslı süper alaşımlarda γ' (gama prime) fazı, alaşımın temel mukavemet özelliklerini kazandıran fazdır. γ' fazı, YMK yapıya ve $Ni_3(Al, Ti)$ kimyasal formülüne sahiptir. Nikelin YMK γ matrisi içerisine eklenen Al, Ti elementler, yaşlandırma sertleşmesi ile oluşan γ' $Ni_3(Al, Ti)$ fazını elde etmek için birlikte kullanılmaktadır [26]. Özellikle Nb, Ta ve Cr gibi alaşım elementleri de γ fazına girmektedir. Bu aşamada amaç, sıcaklık dayanımı ve sürünme direncini artırmaktır. γ' fazının hacimce artmasıyla birlikte, alaşımın yüksek sıcaklık mukavemeti artmaktadır. Bu nedenle nikel esaslı süper alaşımlardaki alüminyum ve titanyum miktarı arttıkça, yüksek sıcaklık mukavemeti de artmaktadır. γ' fazı mukavemeti, sıcaklıkla ters orantılı olup, Ni esaslı süper alaşımlar için ana güçlendirme mekanizmalarından biridir [6, 28].

Şekil 2.4. 'de gama prime fazının yapısı verilmiş olup, mor atomlar Al elementini, mavi atomlar ise Ni elementini temsil etmektedir.



Şekil 2.4. γ' fazı yapısı [22].

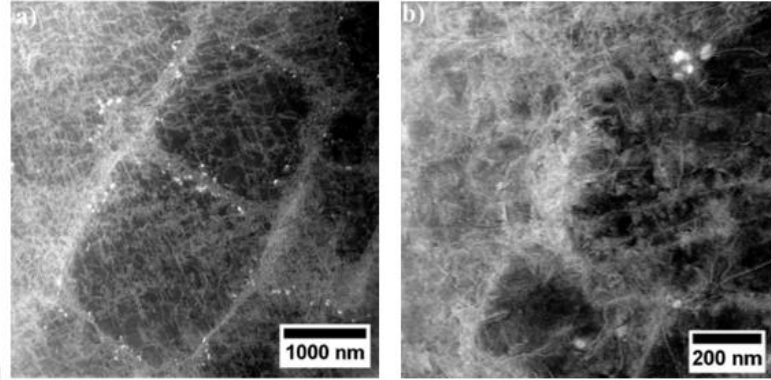
Alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak γ' ve γ'' fazlarının kimyasal kompozisyonları değişmektedir. Nb elementinin miktarına bağlı olarak γ' fazı $\text{Ni}_3(\text{AlTiNb})$; γ'' fazı ise $\text{Ni}_3(\text{NbAlTi})$ şeklinde gösterilebilmektedir [3]. Şekil 2.5.'de Ni-Al elementlerine ait ikili faz diyagramı verilmiştir. Ni-Al ikili faz diyagramında, Al_3Ni , Al_3Ni_2 , Al_3Ni_5 , NiAl , Ni_3Al intermetalik bileşikleri mevcuttur [12].



Şekil 2.5. Ni-Al elementlerine ait ikili faz diyagramı [15].

Mekanik özellikler, çökeltilerin ve matrisin kimyasal bileşimine bağlıdır. René 108 süper alaşımının matrisini oluşturan γ fazı, esas olarak γ' fazı ile güçlendirilmektedir.

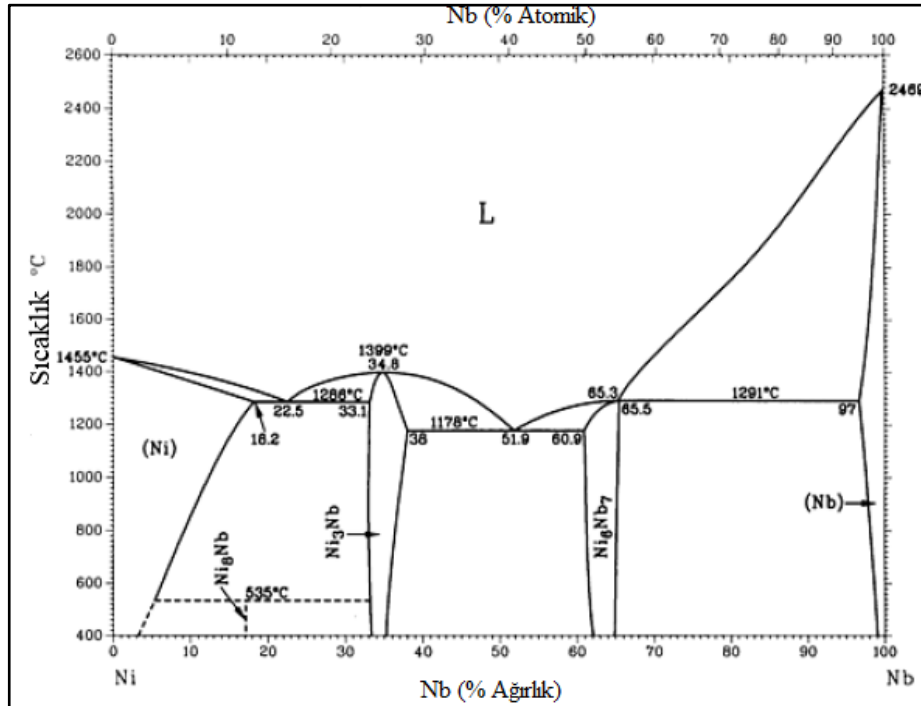
γ matrisinin dar kanallarında, büyük ikincil γ' çökeltileri arasında nanometrik üçüncül γ' çökeltileri bulunmaktadır. Ayrıca, γ/γ' ara yüzlerinde parlak nano çökeltiler gözlenmektedir. Şekil 2.6.'da René 108 süper alaşımına ait a) kübik şekilli γ' çökeltileri; b) karmaşık şekilli γ' çökeltileri, görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.6. γ/γ' arayüzünde nano-çökeltiler ile ikincil γ' mikroyapısı: a) kübik şekilli γ' çökeltileri; b) karmaşık şekilli γ' çökeltileri [26].

2.3.1.3. γ'' (Gama Double Prime) Fazı

Nikel, Nb ve Fe varlığında γ matrisi ile uyumlu hacim merkezli tetragonal (HMT) kristal yapısına sahip γ'' fazı (Ni_3Nb) oluşturmaktadır. Ancak bu faz, düşük ve orta sıcaklıklarda çok yüksek mukavemet gösterirken, 650 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kararsızdır [13]. Şekil 2.7.'de Ni-Nb elementlerine ait ikili faz diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.7. Ni-Nb elementlerine ait ikili faz diyagramı [15].

1273 K°de Ni₃Al–Ni₃Ti–Ni₃Nb üçlü alaşım sistemine dayanan alaşımların faz ilişkisi araştırılan çalışmada, Ni₃Al fazı, YMK yapıya dayanan L1₂ kristal yapısına sahip olup, kafes parametresi a=0,3572 nm dir. Ni₃Ti fazı, dörtgen bir yapıya sahip olan D0₂₄ kristal yapısına sahip olup, kafes parametreleri a= 0.5101 nm ve b= 0.8307 nm dir. Ni₃Nb fazı ise, HSP yapıya dayanan D0_a kristal yapısına sahip olup, kafes parametreleri a=0.5106 nm, b=0.4251 nm ve c=0.4553 nm şeklinde bildirilmiştir [14].

2.3.1.4. TSP Fazlar

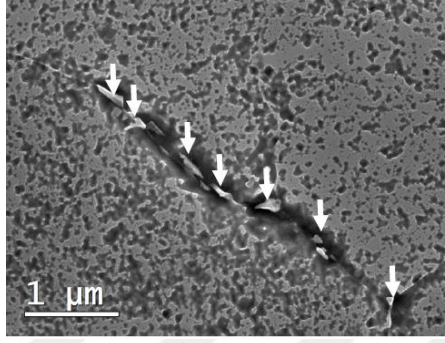
Süper alaşımlarda alaşım elementi olarak W, Re, Mo gibi refrakter metaller kullanılması, TSP kristal yapısına sahip sert intermetalik fazların (σ , μ , Laves fazları) oluşmasına neden olmaktadır. Nikel alaşımları özellikle σ ve μ oluşumuna yatkındır. Bazı bileşimler için ve belirli koşullarda oluşan σ , μ , η fazları düşük kopma mukavemetine ve sünekliğe neden oldukları için oluşması istenmeyen veya alaşımda istenen mekanik özelliklere göre az miktarda oluşması istenen fazlardır [3,13].

2.3.1.5. Karbürler

Nikel esaslı süper alaşımlarda C ve B alaşım elementleri, tane sınırlarındaki segregasyon ile karbür ve borürlerin oluşmasını sağlayarak tane sınırlarını güçlendirmektedirler. Tane sınırında oluşan karbürler, tane sınırı mukavemetini artırmaktadırlar. Servis sırasında meydana gelen karbürler ise matris içinde fazları kararsız hale getirebilecek elementleri bağlamaktadırlar.

- MC Karbürleri: Nikel esaslı süper alaşımlara ağırlıkça yaklaşık %0.02 ila %0.2 oranında eklenen karbon elementi, titanyum, tantalyum, hafniyum ve niyobyum gibi elementler ile birleşerek metal karbürleri (MC) oluşturmaktadır. M ile temsil edilen elementlerden Ti, Nb, Hf ve Ta elementlerinin alaşım matrisi ile uyumları çok az ya da hiç olmamasıyla birlikte, yüksek çöktürme ve ergime sıcaklıkları nedeniyle yüksek dayanımlıdırlar [3]. Alaşım, ısıtılma sırasında ve/veya kullanıma hazır hale geldiği sırada MC karbürler, tane sınırlarında oluşma eğiliminde olan MC₆ ve/veya M₆C gibi diğer karbürleri ayrıştırma ve üretme eğilimindedirler. MC karbürleri, genellikle iri ve yoğun dizilmiş YMK kristal yapısına sahiptirler. MC karbürleri, alaşımda yaşanacak faz reaksiyonlarında ana karbon kaynağıdırlar [13,17].
- M₂₃C₆ karbürleri: Orta ve yüksek krom içeriklerinde kolayca oluşan bu karbürler YMK yapıya sahiptirler. Bu karbürler, hem matris içerisinde kalan serbest

karbondan hem de MC karbürlerin bozunmasıyla 760-980 °C sıcaklık aralığında oluşabilmektedirler. $M_{23}C_6$ karbürleri genellikle tane sınırlarında görülürken, ikiz sınırları boyunca, istif hatalarında, ikiz sonlarında da oluşmaktadırlar. $M_{23}C_6$ karbür yapısından karbon atomları uzaklaşırsa, σ fazına yakın bir yapı oluşmaktadır. Böyle bir durumda, normalde disk şeklinde gözlemlenen σ fazı, $M_{23}C_6$ karbür partikülleri üzerinde çekirdeklenmektedir [17].

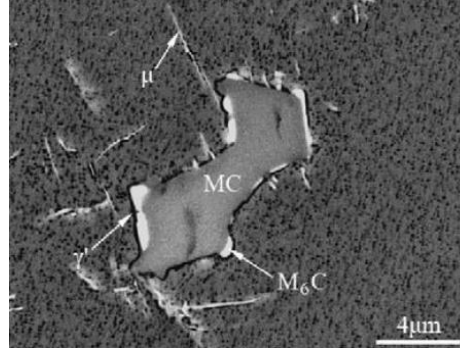


Şekil.2.8. Tane sınırında diyagonal çökelmiş $M_{23}C_6$ tipi karbürler [22].

Kristal kafeste kromun yerini alan alaşım elementleri özellikle Cr kafes parametresini artırabilmektedir. Bununla birlikte, Mo ve W dahil olmak üzere çok sayıda alaşım elementi, Cr (Mo,W)C ve (Ni, Co, Fe, Cr) (Mo, W)C gibi çok daha karmaşık bir bileşim oluşturabilmektedir. Süper alaşımlarda, demir içeriğinin artmasıyla, bu alaşım elementlerinin kısmen kromun yerini almaları beklenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda süper alaşımların uzun süreli servis veya ısıl işlem uygulamaları, aşağıdaki reaksiyonlara göre MC karbürlerin daha düşük karbon içeriğine sahip daha kararlı MC çökeltilerinin oluşmasına yol açabilmektedir [26].



- **M_6C karbürleri:** Molibden ve/veya tungsten içeriği %6 ila 8'den fazla olduğunda, tipik olarak 815 ila 980 °C aralığında olduğunda oluşan M_6C karbürleri karmaşık bir kübik yapıya sahiptir. M_6C karbürlerinin tipik kimyasal kompozisyonları; (Ni, Co)₃Mo₃C ve (Ni, Co)₂W₄C'dir.



Şekil.2.9. MC ve M₆C tipi karbürler [23].

2.3.1.6. Borürler

Borürler, süper alaşımlarda ikincil fazlar olarak kabul edilmektedirler. Süper alaşımlara bor elementinin az miktarda eklenmesi, alaşımın sürünme kopması dayanımını artırmaktadır. Borürler, M₃B₂ formunda olup, süper alaşımlarda tane sınırlarında tetragonal hücre şeklinde gözlemlenmektedirler. Dolayısıyla tane sınırı yapılarını etkilemektedirler. Alaşım içerisinde bloktan yarım aya kadar çok farklı şekillerde bulunabilmektedirler. Bor ayrıca, karbonun östenit içindeki çözünürlüğünü azaltarak daha ince boyutlu MC ve M₂₃C₆ karbürlerinin çökmesini artırmaktadır. M elementi, molibden, tantalum, niyobyum, nikel, demir ve ya vanadyum olabilmektedir [13, 20].

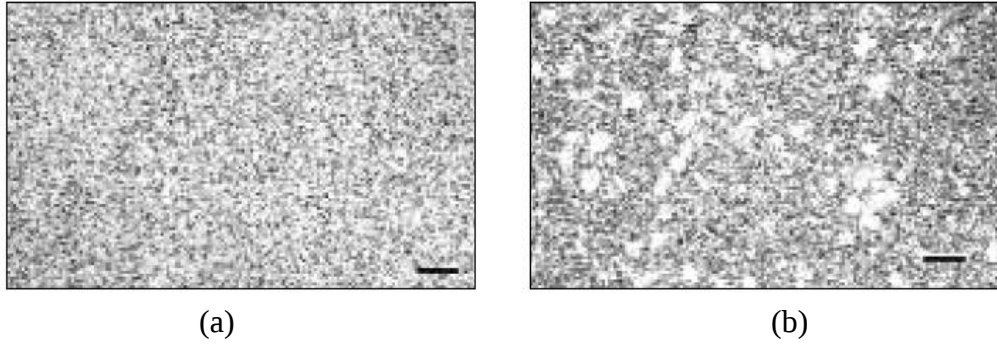
2.3.1.7. Nitrürler

Nitrürler, en yaygın olarak titanyum nitrür olarak ve ya niyobyum nitrür olarak titanyum veya niyobyum içeren süper alaşımlarda gözlenmektedirler. Nitrürler, düzenli ve açısız şekle sahiptirler ve oldukça sert olmaları nedeniyle, cilalamadan sonra kabartma olarak görünmektedirler. Karbon için bir miktar çözünürlükleri vardır, bu nedenle kimyasal kompozisyonları Nb(C,N), Ti(C,N) olarak adlandırılabilir. Nitrürler genelde bir faz veya etrafını saran bir tabaka yapısı içermektedirler. Bu ikinci faz, genellikle önemli miktarda karbon içeren daha koyu renkli bir nitrür olarak gözlemlenmektedir [20].

2.3.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımlarda Tane Boyutu ve Faz Etkileri

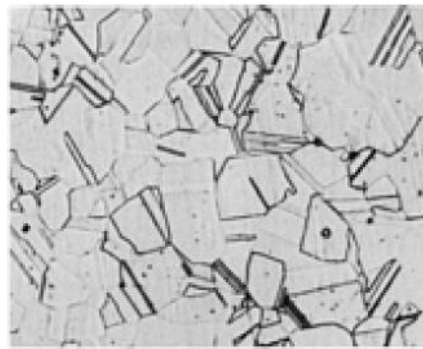
Nikel esaslı süper alaşımlarda gözlemlenen fazların yanı sıra, tane boyutu da önemli bir mikro yapısal parametredir. İnce tane boyutları normalde tokluk, mukavemet ve yorulma direnci gibi üstün oda sıcaklığı özellikleri sağlamaktadır. İri tane boyutları genellikle yüksek sıcaklıklarda daha iyi sürünme dayanımı sağlamasına karşın, diğer

yüklemeler altında alaşım özellikleri zarar görebilmektedir. İri tane boyutları daha az tane sınırı yüzey alanına sahiptir. [20]. Aşırı yüksek sıcaklıklarda malzemenin mikro yapısında σ ve μ fazları gözlemlenebilirken, Laves fazına ise döküm ve haddelenmiş malzemelerde karşılaşılabılır. Çalışma sıcaklıkları, verim ve ince taneli bir yapı için dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. Örnek olarak, Şekil 2.10'da haddelenmiş, Custom Age 625 Plus alaşımının mikro yapısının çok ince taneli olduğu görülmektedir. 968°C sıcaklıkta çözelti tavlamasına tabi tutulduğunda, bir miktar tane büyümesi ve yeniden kristalleşme görülmektedir [21].



Şekil 2.10. Custom Age 625 Plus alaşımının mikro yapısı a) haddelenmiş, bitirme haddesi 1007°C sıcaklıkta yapılmış Custom Age 625 Plus alaşımının mikro yapısı b) 968°C sıcaklıkta çözelti tavlamasına tabi tutulmuş aynı malzemenin mikro yapısı [21].

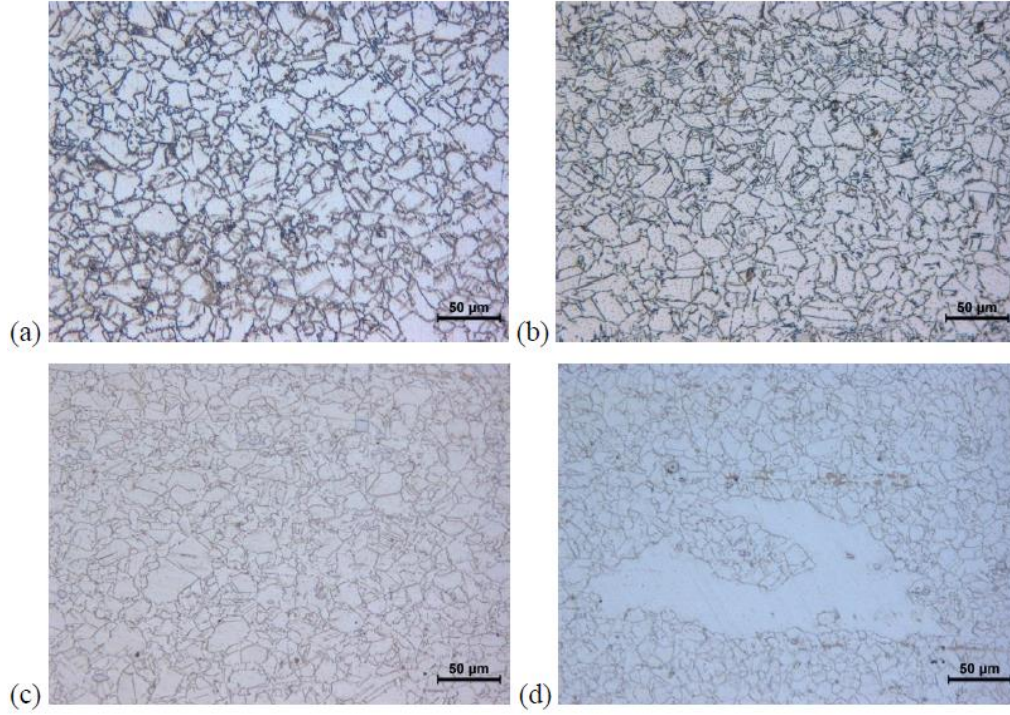
Şekil 2.11.'de tavllanmış Incoloy 800 süper alaşımının mikro yapısı, bazı tanelerin sınırlarında çökelmiş karbür parçacıkları ve ikizlenmelerin gözlemlendiği katı çözelti matrisinden oluşmaktadır [21].



Şekil 2.11. Tavllanmış Incoloy 800 süper alaşımı mikro yapısı (250x) [20].

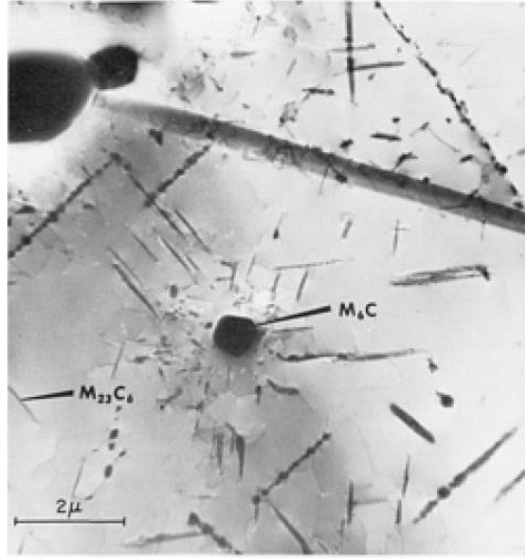
Şekil 2.12'de ısıtılmış, 600 °C'de ısıtılmış işlem görmüş, 700 °C'de ısıtılmış işlem görmüş ve 800 °C'de ısıtılmış işlem görmüş AlTiN kaplı numunelerin Inconel 718 altlık malzemesine ait mikro yapılar verilmiştir. Isıtılmış numunede Nb ve Ti esaslı çökeltilerin oluşumu, tane sınırlarında ve tane içlerinde ikizlenmelerin başlamasına

sebebi olduğu gözlemlenmektedir. 600 °C ısıtma işlemine tabi tutulan numune, tane boyutunun azaldığı ve ikizlenme oluşumunun devam ettiği, 700 °C ve 800 °C’lerde ısıtma işlemi uygulandığında ise tane boyutunun azaldığı ve ikizlenmelerin arttığı gözlemlenmektedir [3].



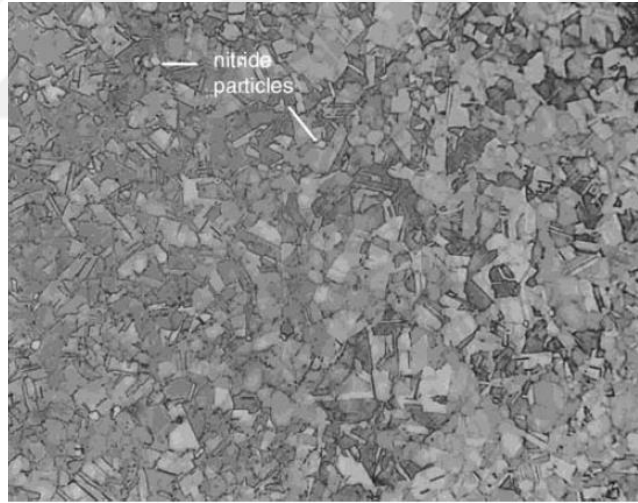
Şekil 2.12. Altlık malzeme olan Inconel 718 bölgesine ait optik mikroskop görüntüleri (a) Isıl işlemsiz numune, (b) 600 °C’ de ısıtma işlemi görmüş numune, (c) 700 °C’ de ısıtma işlemi görmüş numune, (d) 800 °C’ de ısıtma işlemi görmüş numune [3].

Şekil 2.13.’te 1175 °C’de bir saat tavlandıktan sonra su verme işlemine tabi tutulmuş ve ardından 705 °C’de 500 saat yaşlandırılmış Hastelloy X süper alaşımının ince folyo TEM görüntüsü (11000x) verilmiştir. Mikro yapıda, birincil karbür etrafında M_6C karbürleri ve iğne benzeri yapıda $M_{23}C_6$ karbürlerinin olduğu gözlenmektedir [20].



Şekil 2.13. Hastelloy X süper alaşımının ince folyo TEM görüntüsü [20].

Çözündürme tavlaması uygulanmış ve yaşlandırılmış Inconel 625 malzemesinden imal edilen çubuğun mikro yapısı Şekil 2.14.'te verilmiştir. Mikro yapı, MC ve M₆C karbürleri ve nitrür parçacıklarını içeren bir katı çözelti matrisinden oluşmaktadır [22].



Şekil 2.14. Çözündürme tavlaması uygulanmış ve yaşlandırılmış Inconel 625 malzemesinden imal edilen çubuğun mikro yapısı [24].

3. SÜPER ALAŞIMLARA UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ

Yüksek sıcaklık malzemeleri, oksidasyon, korozyon, erozyon ve aşınmaya neden olabilecek ortamlarda kullanılmaktadırlar. Bazı uygulamalarda, malzeme ömrünü artırmak için malzemenin dayanımı bir yüzey işlemi ile desteklenmelidir [12]. Yüzey işlemleri ile yüzeyin ve yüzeye yakın bölgenin özelliklerinin istenilen şekilde değiştirilmesi sağlanmaktadır [29]. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, yüksek sıcaklığa maruz kalan makine parçaları, türbin motorları ve yapısal malzemelere uygulanan kaplama teknolojileri de gelişmektedir [3]. Kaplama uygulamalarında amaç, malzemeyi korozyon, aşınma, termal bozulma ve oksidasyondan koruyarak, malzemenin kullanım ömrünü arttırmaktır. Bunun yanında, kaplamalar ayrıca mekanik ve termal-mekanik yüklere de dayanabilmelidir.

İnce film kaplama olarak da adlandırılan fiziksel buhar biriktirme (PVD) işlemi, malzemenin katı veya sıvı bir kaynaktan atomlar veya moleküller şeklinde buharlaştırıldığı ve düşük basınçlı bir buhar şeklinde altlık malzemenin yüzeyine taşındığı kaplama işlemidir. [29].

Kimyasal buhar biriktirme (CVD), buhar fazındaki kimyasal bileşenlerin, ısıtılmış bir altlık malzemenin yüzeyinde kaplama oluşturmak için reaksiyona girdiği bir yüzey işlemidir. Girintiler, delikler ve diğer zor üç boyutlu karmaşık şekilli parçalar, CVD işlemi ile nispeten kolaylıkla kaplanabilmektedir. CVD işleminde, biriktirme hızı yüksektir ve bazı durumlarda santimetre kalınlığında olabilecek kalın kaplamalar kolaylıkla elde edilebilmektedir. CVD'nin temel uygulama alanları olan, yarı iletken endüstrisi, kesici takım imalatında metalurjik kaplama endüstrisinde hızla gelişmektedir [30].

Süper alaşımlara uygulanan kaplamalar; difüzyon, overlay kaplama ve termal bariyer kaplama olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Difüzyon ve overlay kaplama yöntemlerinin uygulanması ile alaşımı oksidasyon ve korozyondan korumak amaçlanmaktadır. Termal bariyer kaplamalar ise, altlık malzemeyi termal olarak korumaktadırlar [4,9].

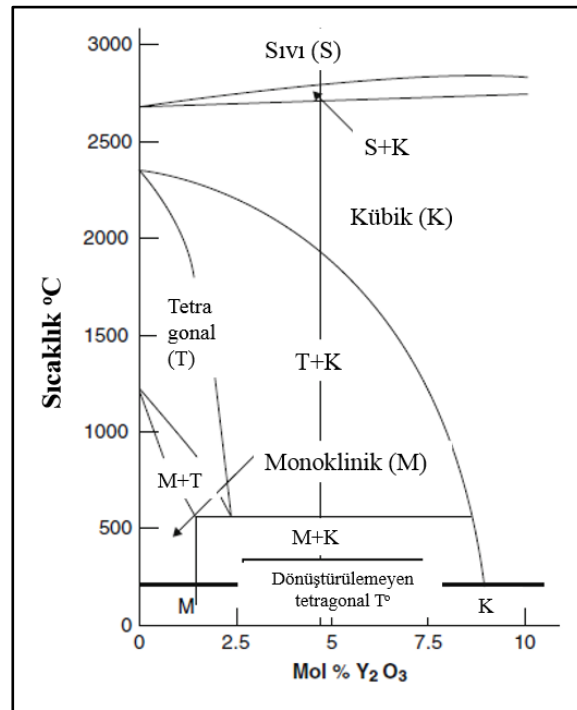
Yüzey işlemleri arasında en yaygın olarak kullanılan difüzyon kaplamalar, altlık malzeme yüzeyine yakın metalik elementlerin difüzyon yoluyla kimyasal olarak reaksiyona girerek kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile zenginleştirilmesine dayanmaktadır. Tüm difüzyon işlemlerinde olduğu gibi, zaman, sıcaklık ve faz bileşimi parametreleri işlem boyunca büyük önem taşımaktadır. Difüzyon kaplamaların faz bileşimi ve mikro yapısı, kaplanan altlık malzemeye büyük ölçüde bağlı olduğundan, işlem koşullarının her malzeme için optimize edilmesi gerekmektedir [9,12].

Overlay kaplama işleminde, difüzyon kaplamaların aksine altlık malzemenin hiçbir elementi dahil olmamaktadır. Bu nedenle, bu tür kaplamalar, tamamen farklı bileşimler uygulama imkanı sunmaktadır. Ancak hava biriktirme (APS), vakumlu plazma püskürtme (VPS) veya elektron ışını fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) yöntemleri ile gerçekleştirilmesi gerektiği için maliyeti yüksektir. Korozyona dayanıklı olduğu kadar mekanik ve termal olarak altlık malzeme ile uyumlu olan overlay kaplamalar, süper alaşımlar için MCrAlY bileşimine sahiptir. Genellikle M elementi Co veya Ni veya da bu iki elementin karışımı olabilmektedir. Y ile ifade edilen element itriyumdur, ancak bu bileşimde reaktif elementler grubundan bir başka element de itriyum yerine gelebilmektedir [4, 9].

Termal bariyer kaplamalar (TBC), CVD yöntemi ile oluşturulan alüminid veya overlay kaplaması üzerine seramik bir üst kaplama yerleştirilerek elde edilmektedirler. Termal bariyer kaplamalar, süper alaşımları oksidasyon, termal yumuşama ve sürünmeden korumak için kullanılmakta ve genellikle gaz ve uçak türbinleri parçaları için yapılmaktadır. Bu kaplamalar, süper alaşımlardaki sıcaklık yükünü 200°C kadar azaltmaktadır. Tam tersi bir durum olarak termal bariyer kaplamalar, türbin verimliliğini artırmak için bu aralıkta çalışma sıcaklığında bir artışa izin verebilmektedirler. [4, 9].

4. TERMAL BARIYER KAPLAMALAR

Modern gaz türbinlerindeki yüksek sıcaklık bileşenlerinin termal olarak korunması ve ömürlerini uzatmak için süper alaşım bileşenlerin yüzeyine seramik termal bariyer kaplamalar uygulanmaktadır [31]. Esas olarak, tahrik ve güç üretim türbinlerinde yaygın olarak kullanılan termal bariyer kaplamalar, alt tabakanın sıcaklığını azaltmak için kullanılmaktadır. Tipik bir termal bariyer kaplama, bir metalik bağ kaplamadan ve kaplama boyunca sıcaklık düşüşünü sağlayan bir seramik üst kaplamadan oluşmaktadır. Mevcut son teknoloji üst kaplama malzemesi, NiCoCrAlY'den oluşan bağlayıcı bir kaplama üzerine genellikle termal püskürtme ile uygulanan ağırlıkça %6-8 oranında itriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) seramiktir [31-35]. Üst kaplama olarak kullanılan malzemenin göstermesi istenen temel özellikler; düşük ısı iletkenliği, yüksek erime noktası ve faz kararlılığıdır. Zirkonya seramikleri, iyi mekanik ve elektriksel özelliklere de sahip olan metalik olmayan malzemelerden biridir. Saf ZrO_2 , oda sıcaklığında monoklinik bir kristal yapıya sahiptir ve artan sıcaklıklarda tetragonal (1197 °C'de) ve kübik (2300 °C'de) faz dönüşümlerine uğrar [33-36]. Şekil 4.1, zirkonya-itriya sistemi için faz diyagramını göstermektedir.



Şekil 4.1. Zirkonya-İtriya sistemi için faz diyagramı [33].

Kübik (K) fazdan tetragonal (T) ve monoklinik (M) fazlara faz dönüşümü nedeniyle oluşan hacim genişlemesi, saf ZrO_2 'nin yüksek sıcaklıktan soğutulması durumunda çatlaklar oluşturacak büyük gerilmelere neden olmaktadır. Bu nedenle, tetragonal ve/veya kübik ZrO_2 fazlarını stabilize etmek için itriya (Y_2O_3), serya (Ce_2O_3), magnezyum oksit (MgO) ve kalsiyum oksit (CaO) gibi oksitler eklenmektedir.

Servis koşullarında bağ kaplamanın oksidasyonu, üst kaplama-bağ kaplama ara yüzeyinin yakınında bir TGO tabakasının oluşmasına neden olmaktadır. Tipik olarak kullanılan MCrAlY bağlayıcı kaplamasının oksidasyonu nedeniyle oluşan ana oksit alüminadır. Genellikle oluşan diğer oksitler kromya ($(Cr,Al)_2O_3$), spinel ($Ni(Cr,Al)_2O_4$), nikel oksit (NiO) ve silikadır. Bağ kaplama oksidasyonu, TBC'lerin başarısızlığının ana nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir [33-38].

4.1. Termal Sprey Teknikleri

Termal sprej, metalik veya metalik olmayan kaplama malzemesinin toz, tel veya çubuk şeklinde erimiş veya yarı erimiş duruma ısıtıldığı ve daha sonra işlem gazı veya atomizasyon yoluyla bir yüzeye doğru püskürtüldüğü yüzey mühendisliği işlemlerinin bir dalıdır. Termal sprejin en önemli avantajı, önemli bir ısı girdisi olmaksızın çok çeşitli malzemeleri biriktirmek için kullanılabilmesidir [33]. Termal bariyer kaplama işleminde kullanılan tozlar ve özellikleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Termal sprej teknikleri, atmosferik plazma sprej, yüksek hızlı oksijen yakıt sprej, sıvı hammadde plazma sprej alev sprej ve elektrik ark sprej olarak sıralanabilir.

Çizelge 4.1. Termal bariyer kaplama işleminde kullanılan tozlar ve özellikleri [34].

Kaplama	Boyut (μm)	Kimyasal kompozisyon (% ağırlık)
7YSZ	10-106	Y_2O_3 -7, ZrO_2
8YSZ	15-25	Y_2O_3 -8, ZrO_2
20YSZ	25-90	Y_2O_3 -20, ZrO_2
NiCr	5-20	Cr - 19.2, Fe - 0.4, Ni
NiCrAl	30-100	Cr - 18.9, Al - 5.6, Ni
NiCrAlY	≤ 36	Cr - 22.7, Al - 10, Y-1.7, Si-0.8, Fe - 0.4, Ni
NiCoCrAlY	≤ 36	Cr - 21, Co - 36, Al - 8.8, Y - 1, Si - 0.9, Fe - 0.2, Ni

4.1.1. Atmosferik Plazma Sprey (APS)

Plazma, yüklü parçacıklar içeren elektriksel olarak iletken bir gazdır. Bir gaz, yüksek enerji seviyelerine uyarıldığında, atomlar elektronlarından bazılarını kaybetmekte ve 20000 K' e kadar değişen sıcaklıklarda elektrik yüklü parçacıklar (iyonlar ve elektronlar) içeren plazma üreterek iyonize hale gelmektedir. Plazma püskürtme işlemi için üretilen plazma genellikle bir gaz veya argon, helyum, nitrojen ve hidrojen karışımı içermektedir. Plazma alevinin avantajı, moleküler gazların atomik gazlara ayrışması ve iyonlaşma yoluyla büyük miktarda enerji sağlamasıdır. Tipik bir plazma püskürtme işlemi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır;

- İlk olarak, su soğutmalı bakır anot ile tungsten katot arasına bir gaz akışı karışımı (H_2 , N_2 , Ar) verilir.
- Yüksek yoğunluklu bir DC elektrik arkı katot ve anot arasından geçer ve yüksek sıcaklıklara ulaşmak için plazma oluşturmak üzere iyonize edilir.
- Taşıyıcı gaz (genellikle argon) tarafından taşınan ince bir toz formundaki kaplama malzemesi, akış gazları nedeniyle oluşan plazma bulutunun içine harici bir toz portu aracılığıyla verilir ve erimiş duruma kadar ısıtılır.
- Sıkıştırılmış gaz, erimiş parçacıkları 200 ila 800 m/s arasında değişen parçacık hızlarıyla alt tabakaya doğru iter.

Plazma sprej için uygun malzemeler arasında çinko, alüminyum, bakır alaşımları, kalay, molibden, bazı çelikler ve çok sayıda seramik malzeme bulunmaktadır. Plazma püskürtme yönteminin avantajı, çok yüksek erime noktasına sahip tungsten gibi refrakter metalleri ve zirkonya gibi seramik malzemeleri püskürtebilmesidir. Öte yandan, daha yüksek maliyet gerektirmekte ve süreç karmaşıklığını arttırmaktadır [33].

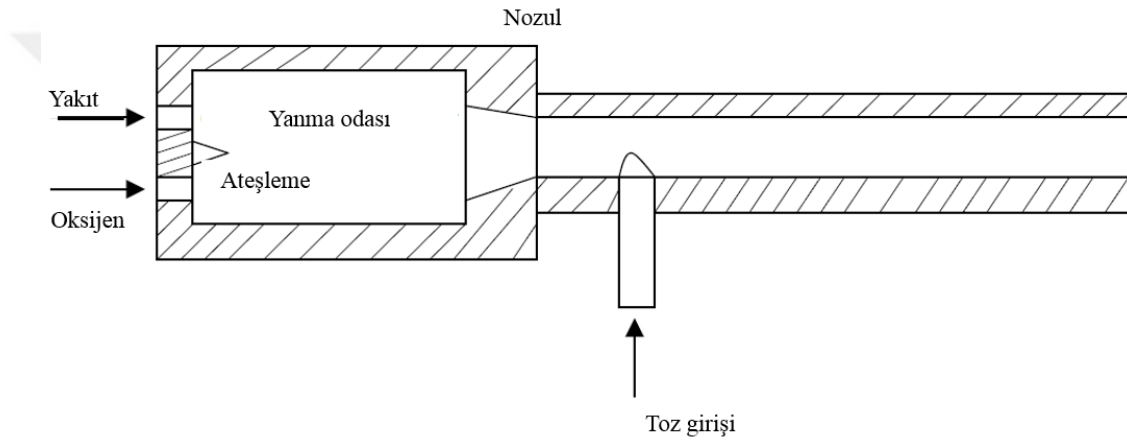
4.1.2. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Sprey (HVOF)

Yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) sprej işlemi sırasında, hidrojen, propan ve propilen gibi gaz yakıt ve oksijen karışımı, bir yanma odasında yüksek basınçlarda ateşlenmektedir. Prensipte olarak, yüksek hacimli yanıcı gazlar, 8 ila 30 cm uzunluğunda bir sınırlandırıcı nozula ardından yanma odasına beslenmektedir. Yüksek yanma sıcaklığıyla birleşen gaz akışının büyük kısmı, nozul çıkışında 1525 ila 1825 m/s aralığında hıza sahiptir. Kullanılan yüksek hızlı oksijen-yakıt gazları arasında hidrojen, propilen, propan, asetilen ve kerosen yer almaktadır. Kerosen yakıtlı

tabancalar, yanmayı desteklemek için hava veya oksijen kullanılmaktadır. HVOF sistemi, aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır [33-36].

- Yüksek hacimli gaz kaynağı, yüksek basınçlı gaz hortumları, oksijen ve yakıt için yüksek akışlı gaz regülatörleri, yüksek akışlı gaz kontrolleri, geri tepme önleyiciler,
- Torç gövdesi, yanma odası, toz enjektörü ve nozuldaki oluşan bir HVOF püskürtme tabancası,
- Su veya hava soğutma devreleri,
- Yüksek basınçlı toz besleyici.

Şekil.4.2. 'de HVOF torcunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil. 4.2. HVOF torcunun şematik gösterimi [38].

HVOF işlemi ile, son derece yoğun ve iyi bağlanmış kaplamalar üretilmektedir. Genellikle HVOF işlemi ile elde edilen kaplamalar, WC/Co, Cr₂C₃/NiCr veya MCrAlY (M = Ni ve/veya Co) gibi sert sermetlerdir ve uçak türbin kanatlarına bağ kaplama olarak uygulanmaktadır. HVOF yönteminin düşük işlem sıcaklığı nedeniyle kaplamaların az oksit içermesi, TBC bağlayıcı kaplama uygulamaları için daha çok tercih edilir bir yöntem olmasını sağlamaktadır [33-36].

4.1.3. Sıvı Hammadde Plazma Sprey

Atmosferik plazma sprey (APS) yöntemi için kullanılabilecek minimum partikül boyutunun sınırlandırılması, sıvı hammadde kullanılmasına dayalı plazma sprey teknolojisinin geliştirilmesine yol açmıştır. 5 µm'nin altındaki tozların plazma torcuna beslenmesi ve enjekte edilmesi zor olduğundan, nano veya mikrometrik tozun sıvı bir ortamda sırasıyla bir süspansiyon/çözelti oluşturmak için dağıtılması/çözülmesi ve bu

şekilde kullanılmasıyla nano yapılı kaplamalar elde edilmektedir. Süspansiyonlar, ya suya ya da tipik olarak etanol gibi alkol formundaki organik bir çözüciye dayanmaktadır. Çözeltiler tipik olarak, püskürtme işlemi sırasında oksitlenen nitratlar veya klorürlerden yapılmaktadır [33].

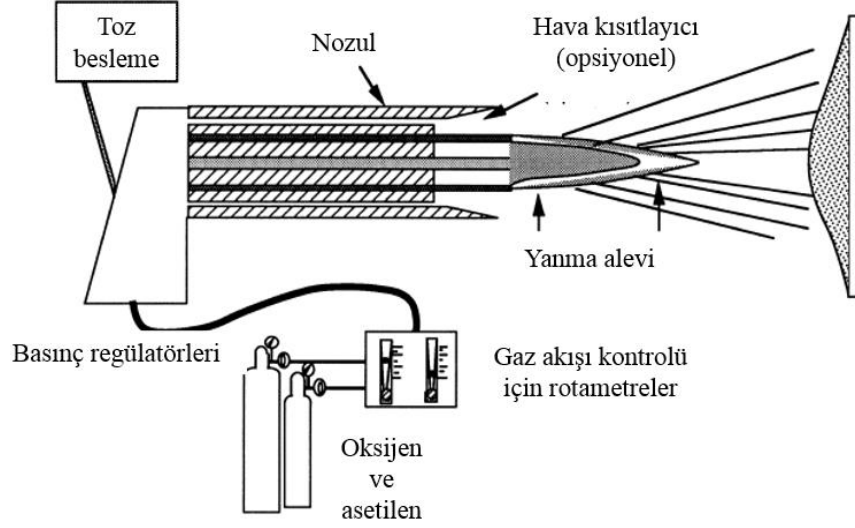
4.1.4. Alev Sprey

Alev püskürtme (flame spray) yönteminde, ısı üretmek için yanan yakıt gazlarının kimyasal enerjisini kullanılmaktadır. En yüksek yanma sıcaklıklarını oluşturmak için oksijenle birlikte ana yakıt olarak asetilen kullanan oksiasetilen torçları yaygın olarak kullanılmaktadır. Tozlar, teller veya çubuklar, nozul çıkışındaki aleve nozulun arkasından eksenel olarak verilir. Hammadde malzemeleri eritilir ve partiküller/damlacıklar, genişleyen gaz akışı ve hava jetleri ile malzeme yüzeyine doğru hızlanır.

Toz, püskürtmeli torçlara taşıyıcı gazlar ve yerçekimi olmak üzere iki yoldan biriyle beslenir. Yerçekimi ile beslenen cihazlarda, doğrudan torcun üzerine monte edilmiş toz kutuları bulunur. Toz besleme hızı, tozu ölçen bir sıkıştırma valfi tarafından kontrol edilir. Taşıyıcı gaz beslemeli ünitelerde, harici olarak monte edilmiş toz besleyiciler kullanılır. Alev püskürtme için kullanılan taşıyıcı gazlar genellikle hava veya nitrojendir. Tipik bir alev püskürtme sisteminin temel bileşenleri şunlardır [36]:

- Gaz kaynağı
- Hava besleme
- Gaz hortumları
- Oksijen, yakıt ve hava için gaz regülatörleri
- Gaz akışı kontrolü için rotametreler
- Tabancada ve regülatörlerde geri tepme önleyiciler
- Torç gövdesi, nozul ve atomize hava başlığından oluşan alevli püskürtme tabancası
- Teller ve çubuklar için bir toz besleyici, toz hunisi ve hava türbini tahrikinden oluşan besleme stoğu dağıtım sistemi

Alev püskürtme sisteminin şematik gösterimi Şekil.4.3.'de verilmektedir.



Şekil.4.3. Alev sprej sisteminin şematik gösterimi [36].

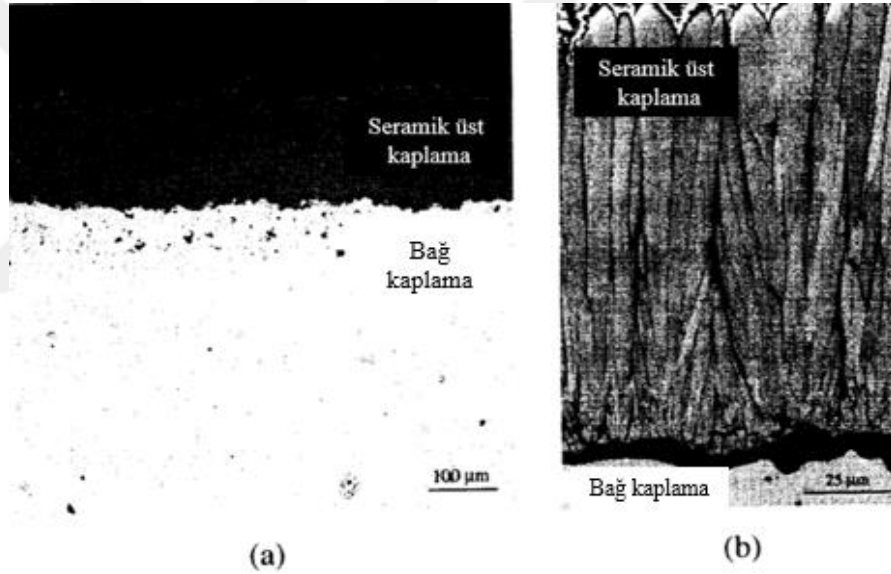
4.1.5. Elektrik Ark Sprey

Diğer termal sprej proseslerinden farklı olarak, elektrik ark püskürtme prosesleri, doğrudan eritmeyi gerçekleştirmek için iki tüketilebilir elektrot teli arasında doğru akım elektrik arkı kullanılmaktadır. İki tel sürekli olarak birlikte beslendiğinden, tel uçları arasındaki boşlukta bir elektrik arkı oluşmaktadır. Teller doğrudan ark tarafından eritildiğinden, elektrik ark sprej işleminin termal verimliliği, diğer termal püskürtme işlemlerine kıyasla önemli ölçüde daha yüksektir. Yüksek hızlı hava akışı 0,8 ila 1,8 m³/dak arasında değişmektedir. Erimiş metal tellerden koptuğunda, malzemeyi atomize eder veya parçalayarak daha ince parçacıklara ayırır ve ince erimiş metal damlacıkları dağılımı oluşturur. Püskürtme havası erimiş partiküllerin bir kaplama oluşturmak üzere çarptığı, deforme olduğu ve katılaştığı malzeme yüzeyine doğru hızlandırmak için kullanılmaktadır [36]. Şekil.4.4.'te elektrik ark sprej prosesinin şematik gösterimi verilmiştir.

Alümina ve YSZ termal bariyer kaplamaların ısı iletkenliğinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, 25 W/(m·K) değerinde ısı iletkenliğe sahip olan alümina kaplama ve 2,5 W/(m·K) değerinde ısı iletkenliğe sahip olan YSZ kaplama karşılaştırıldığında, YSZ ile seramik kaplama kullanılması durumunda kaydedilen sıcaklıkların %96 Alümina ile kaplama kullanılmasından daha yüksek olduğunu göstermektedir [44].

4.3. Termal Bariyer Kaplamaların Mikroyapısı

TBC uygulamalarında kullanılan termal spre y yöntemlerine göre kaplama mikro yapısı değışim göstermektedir. Alev püskürtme prosesleri sonrasında, kaplama malzemesine ve tekniğe bağı tipik olarak %85 ila %98 arasında değışen kaplama yoğunlukları elde edilmektedir [36]. Şekil.4.5.'de bir süper alaşım altlık malzeme üzerindeki tipik TBC mikro yapıları verilmiştir.

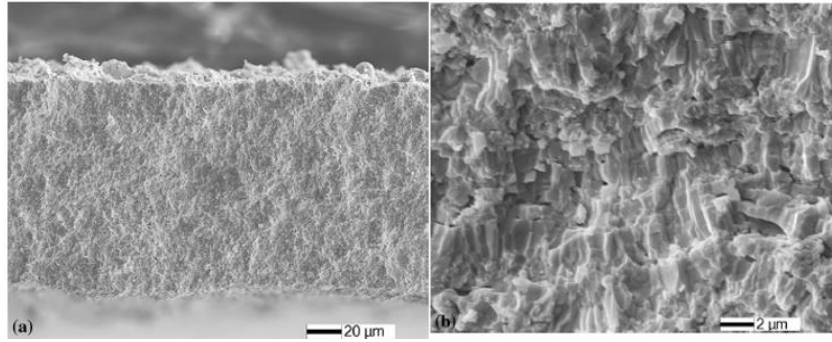


Şekil 4.5. Bir süper alaşım altlık malzeme üzerindeki tipik TBC mikro yapıları (a) Plazma püskürtme yöntemi ile üretilen TBC, (b) EB-PVD yöntemi ile üretilen TBC [43].

Ganvir A. ve arkadaşları, eksenel süspansiyon plazma spre y (ASPS) yöntemi ile ürettikleri TBC mikroyapısının dikey çatlaklar, gözenekler ve sütun şeklinde yapılar içerdiğini ve ASPS yöntemi ile üretilen TBC'nın, EB-PVD yöntemi ile üretilen kaplamalara kıyasla daha düşük termal iletkenlik değerine sahip olduğunu bildirmişlerdir [45].

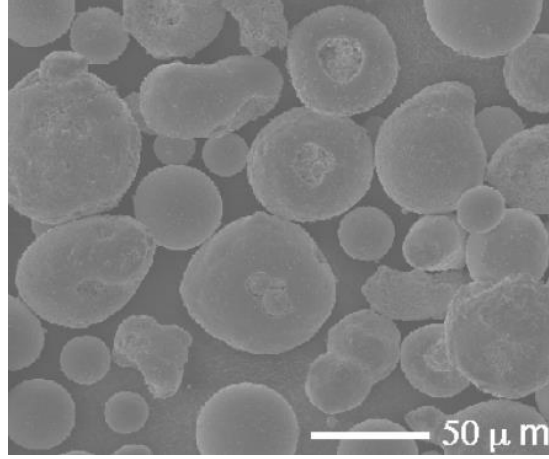
Termal bariyer kaplama ömrü, yalnızca bağlayıcı ve üst kaplamaların kimyasal kompozisyonuna ve işlenmesine değil, aynı zamanda altlık malzemenin kimyasal kompozisyonuna da bağlıdır. APS TBC'ların ömrü, EB-PVD TBC'ların ömrüne göre çok daha iyi olduğu bildirilmiştir. Artan sıcaklıklar veya azalan döngü süreleri kaplama ömrü üzerinde olumsuz bir etki göstermektedir [46].

450 mm'de püskürtme mesafesinde PS- PVD yöntemi ile püskürtülen YSZ kaplamanın enine kesitinin çatlak morfolojisi Şekil.4.6. 'da gösterilmektedir. Kaplama, gözenek ve çatlak içeren lamelli bir yapı göstermektedir. Her katmanın kalınlığı, APS ve LPPS ile elde edilenlerden çok daha ince olduğu bildirilmiştir. 450 mm'lik püskürtme mesafesinde, YSZ tozları neredeyse damlacıklar halinde eritilmekte ve daha sonra alt tabakalara çarparak yoğun bir yapı oluşturmak üzere katılaştırılmaktadır. Yeni oluşan damlacıklar eskilerin üzerine binerek lamelli yapının oluşmasına neden olmaktadır [47].



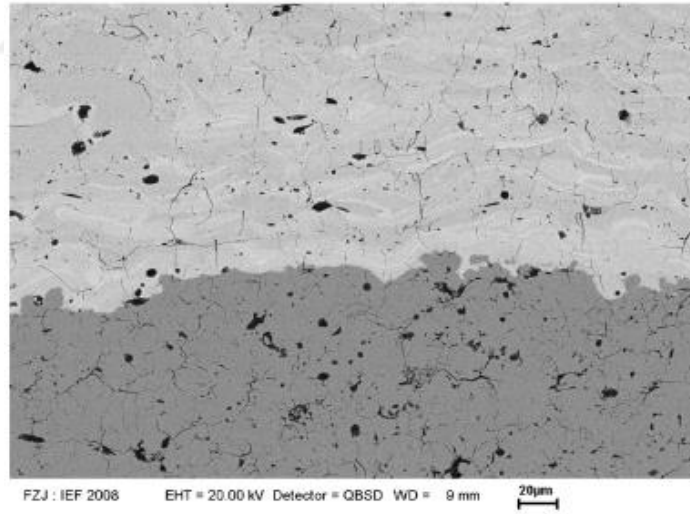
Şekil 4.6. 450 mm püskürtme mesafesinde biriktirilen YSZ kaplamanın enine kesitinin çatlak morfolojisi ve lamelli yapısı (a) 20 µm (b) 2 µm [47].

TBC kaplama uygulaması sırasında toz, püskürtmeden önce dikkatlice karıştırılmazsa, biriktirme sırasında toz boyutu segregasyonu, püskürtülen partikül özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. YSZ tozuna ait SEM görüntüsü Şekil.4.7.'de verilmiştir. Düşük koşullar altında püskürtülen Y_2O_3 ve YSZ kaplamaları, yüksek koşullar altında püskürtülen aynı malzemelerden daha iyi termal döngü çatlak direnci gösterdiği bildirilmiştir [48].



Şekil 4.7. YSZ tozuna ait SEM görüntüsü [48].

Bir toz püskürtme işlemi sırasında tamamen eritilmeyen toz partikülü, yine de yüzeye yapışıp şeklini koruyabilmektedir. Şekil 4.8.’da termal spreyle üretilen kaplamanın mikro yapısı görülmektedir. Kaplama yapısında erimemiş partiküller genellikle istenmemektedir. Çünkü bu partiküller zayıf bir şekilde yapışmakta ve gözenek oluşumuna neden olabilmektedir. Kaplama ile bir aşındırıcı teması sonrası, zayıf yapışan erimemiş partiküller kaplama yapısından düşebilmektedir.



Şekil 4.8. Termal spreyle üretilen kaplamanın kesit mikro yapısı [49].

TBC biriktirme yöntemlerinin kaplama yapısındaki gözeneklilik seviyesine etkisinin araştırıldığı çalışmada, dört SPS ve bir APS kaplama üretilmiş olup, tüm SPS kaplamaların, APS kaplamaya kıyasla gözenek boyutu dağılımının tamamında daha fazla sayıda gözenek içerdiği bildirilmiştir. APS kaplamanın gözeneklilik seviyesi yaklaşık %12.10, SPS kaplamaların gözeneklilik seviyeleri %40.0 civarındadır. Farklı

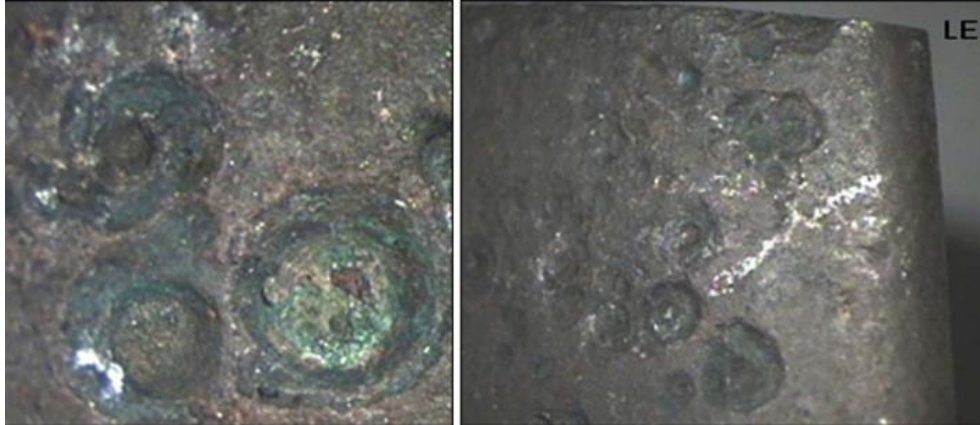
SPS kaplamaların tam gözeneklilik seviyeleri %22.94, %29.41, %31.13 ve %40.0 olarak bildirilmiştir. SPS kaplamalarının mikro yapısındaki ve gözeneklilik seviyeleri arasındaki fark, süspansiyonun kütle içeriği, plazma gücü ve püskürtme gibi farklı işleme koşullarına bağlanabilir [50].



5. KOROZYON ve TERMAL ŞOK DAYANIMI

5.1. Yüksek Sıcaklık Korozyonu

Yüksek sıcaklık korozyonu, kükürt ve alkali metal tuzları ile yüksek sıcaklıktaki gazlara maruz kalan yüzeyleri etkileyen hızlı bir oksidasyon şeklidir ve termal bariyer kaplama sisteminde sıcak gazın etkisiyle eriyen tuzların kaplamada kalıcı hasarlar meydana getirmesi ile oluşmaktadır. Düşük kaliteli yakıtlar genellikle yüksek oranda Na_2SO_4 ve V_2O_5 tuzları içerirler. Bu tuzlar sıcaklığın etkisiyle eriyerek stabilizör yitriya ile reaksiyona girmekte ve soğuma sırasında kaplamada tetragonal veya kübik faz yapısının monoklinik faza dönüşmesine neden olmaktadır. Faz dönüşümü, %3-5 arası hacim artışına ve bununla birlikte kaplamada çatlak ve ayrılmalara neden olmaktadır. Şekil. 5.1.'de türbin kanadının emme tarafında yüksek sıcaklık korozyonuna bağlı oluşan oyukları gösteren makro yapı görüntüsü verilmiştir. Termal bariyer kaplamaları yüksek sıcaklık korozyon dayanımını iyileştirmek için; In_2O_3 , Sc_2O_3 veya CeO_2 gibi daha dayanıklı stabilizörler kullanılmakta, Al_2O_3 seramik üst kaplamanın üzerine kaplanarak yüksek sıcaklık korozyonuna karşı kaplamaları korumaktadır [51,52].



Şekil. 5.1. Türbin kanadının emme tarafında yüksek sıcaklık korozyonuna bağlı oluşan oyukları gösteren makro yapı görüntüsü [53].

5.2. Elektrokimyasal Korozyon

Elektrokimyasal korozyon sırasında bir elektrolit ile temas halinde olan metal elektrot

olarak davranmaktadır. Bu şekilde elektrolit içerisinde temasta bulunan iki metal parçası elektrokimyasal hücre oluşturmaktadır. Bu elektrokimyasal hücrede devrenin tamamlanmasıyla elektrokimyasal korozyon gerçekleşmektedir. Bir elektrokimyasal korozyon olayında, anot devreye elektron veren ve korozyona uğrayan malzeme, katot devreden elektron alan eleman, elektrolit ise devreyi tamamlayan iletken çözeltilidir. Metal anot oksidasyona uğrayarak yükseltgenir, metal atomları iyon haline geçerek anodu terk ederler ve böylece anot korozyona uğrar [54].

5.3. Termal Bariyer Kaplamalarda Termal Şok Dayanımı

Malzemeler arasında en kırılgan malzemelerden biri olan seramik malzemeler, düşük ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle termal şok dirençleri de düşüktür. Termal bariyer kaplamanın türüne göre, kaplamada bulunan gözenekler ve oksidasyon oranı da termal şok dayanımını etkilemektedir. Kaplama, yüksek sıcaklığa maruz kaldığı sırada oluşan ısıl gerilmeler gözenekler sayesinde ortadan kalkmaktadır. Termal şok; malzemenin kırılma mukavemetine (R_m), elastisite modülüne (E), Poisson oranına (ν), termal genleşme katsayısına (α) ve ısıl iletkenliğe (K) bağlıdır [52].

Termal şoka maruz kalan termal bariyer kaplamada; üst kaplamanın atması, merkezde meydana gelen çatlaklar nedeniyle kaplamada parçalanma ve yüzey çatlakları gibi hasarlar görülebilmektedir [55].

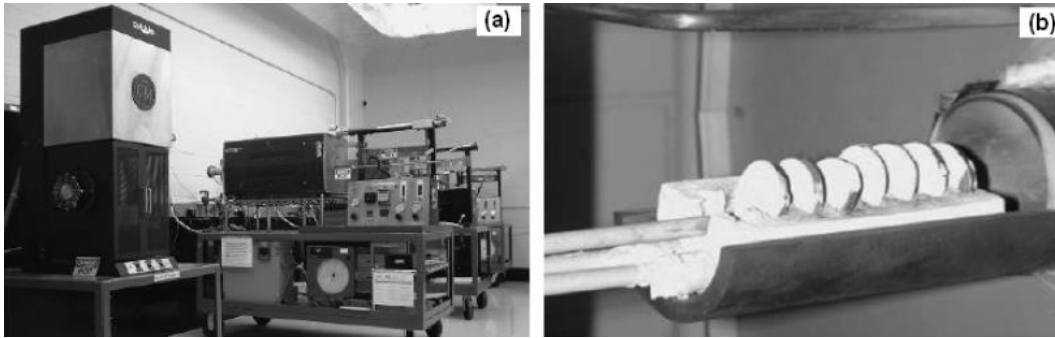
Seramik gibi kırılgan malzemelerin en zayıf noktalarından biri termal şok dayanımlarının düşük olmasıdır. TBC'lar, enerji santralleri, gelişmiş turbo motor yanma odaları, türbin kanatları gibi çeşitli alanlarda ve yüksek termal yükler altında kullanılmaktadır. TBC'ları geliştirmek adına havacılık ve kara gaz türbini üreticileri tarafından çeşitli termal şok testleri uygulanmaktadır. Termal bariyer kaplamalarda termal şok dayanımını belirlemeye yönelik birçok test yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler, su verme (fırında ısıtma/soğutma) termal şok testi, brülör ısıtma(alevle ısıtma/soğutma) termal şok testi ve lazer ışınıyla termal şok testi olmak üzere kategorize edilebilmektedir. FCT (periyodik fırın oksidasyon termal şok testi) ve JETS (jet motoru termal şok testi) bu yöntemler arasında en çok kullanılan yöntemlerdir [52, 56, 57].

Termal şok testleri, numunenin belirli bir sıcaklığa çıkarıldıktan sonra aniden soğutulması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Isıtma-soğutma işlemi bir çevrim olarak adlandırılmaktadır. Termal şok çevrimleri sırasında numune gözlemlenerek hangi

çevrim sayısında kaplamada hasarın oluştuğu belirlenmekte ve elde edilen çevrim sayısı, kaplamanın termal şok ömrünü göstermektedir.

FCT testi sırasında, seramik üst kaplama/bağ kaplama ara yüzünü döngüsel olarak termal strese maruz bırakmak amacıyla orta derece termal şok ile bağ kaplama oksidasyonu için yüksek sıcaklıkta bir izotermal ortam oluşturulmaktadır. TBC sistemi oksitlenmekte ve oda sıcaklığı ile 1100 ila 1200 °C arasında değişen sıcaklık değerlerine maruz kalan numune, uzun süre yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmakta ve bu da önemli bağlayıcı kaplama oksidasyonuna yol açmaktadır.

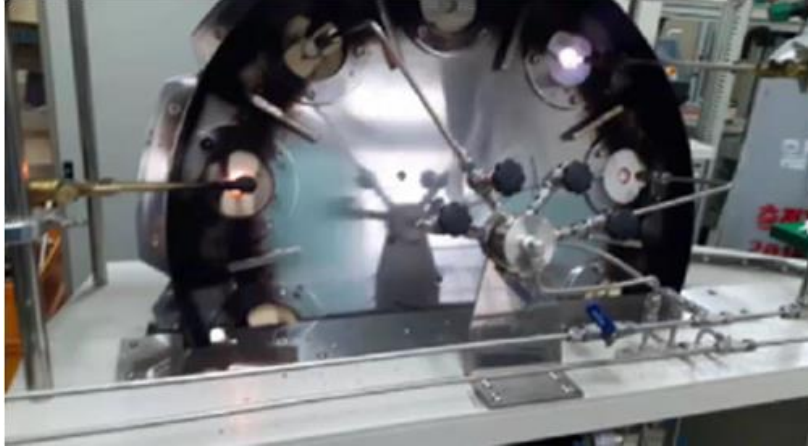
FCT testi genel olarak uçak motor ve endüstriyel gaz türbini parçalarının termal şok dayanımını belirlemek için kullanılmaktadır. Uçak motor parçaları için, yüksek sıcaklıkta (1080 °C veya 1135 °C) 45-50 dakika arası ve oda sıcaklığında 10-15 dakika arasında bir saatlik döngüler gerçekleştirilmektedir. Endüstriyel gaz türbini parçaları için ise, yüksek sıcaklıkta (1080 °C veya 1121 °C) 23 saat, oda sıcaklığında ise bir saat olmak üzere toplamda 24 saatlik döngüler şeklinde gerçekleştirilmektedir. TBC yüzeyinin %20'sinin ve daha fazlasının parçalanması, bu kaplamanın termal şok dayanımının yeterli olmadığını göstermektedir. Şekil.5.2. 'de FCT test sistemi verilmiştir.



Şekil. 5.2. FCT test sistemi; (a) TBC sistemi için kullanılan FCT fırını (b) Numuneler ve numune tutucu [56,57].

JETS testi ile termal bariyer kaplamanın seramik üst yüzeyi, LPG ve oksijen karışımı ile 1400° C'de alev kullanılarak 20 saniye ısıtılması, azot gazı kullanılarak 20 saniye soğutulması ve ortam havasında 40 saniyelik bekleme döngüsünden oluşmakta ve bu işlemler 2000 döngüye kadar tekrar edilmektedir. Ön ve arka yüzey sıcaklığı iki renkli bir pirometre ile 1,2 µm dalga boyunda ölçülmektedir. Ayrıca JETS testinde numunenin çevresi seramik bir tutucu ile sarılarak alevin seramik son kat yüzeyi dışında numunenin diğer bu kısımlarına uygulanması engellenmektedir [56,57].

Şekil.5.3, JETS teçhizatını göstermektedir.



Şekil.5.3. JETS teçhizatı [58].

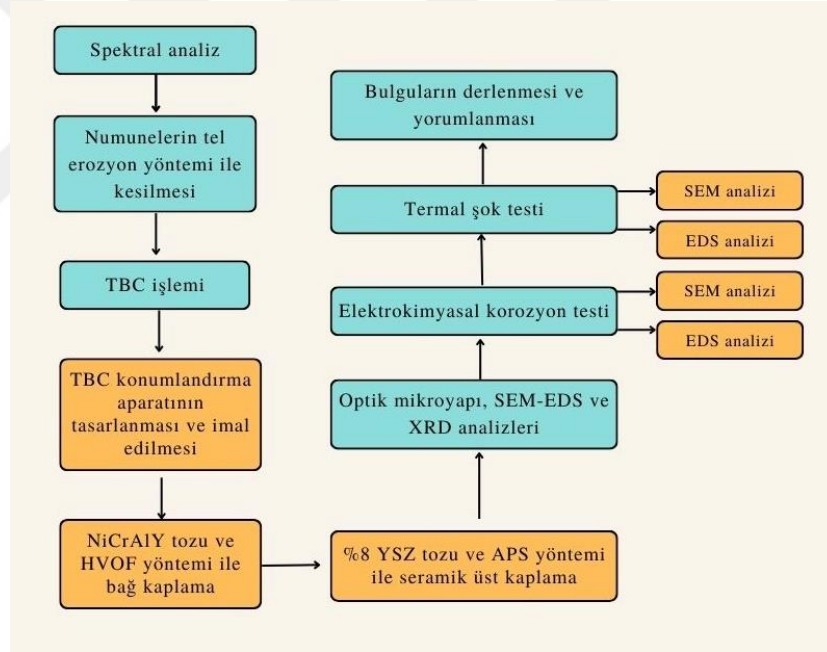
Torkashvand K. ve arkadaşları, termal şok testinin ısı işlem gören numuneler üzerinde farklı süreler boyunca yapılması sonrası TGO'nun termal şoka karşı direnç üzerindeki etkisini ölçtükleri çalışmalarında, TGO'nun yaklaşık 2 ila 3 mikron kalınlığında varlığının, termal bariyer kaplamaların termal şoklara karşı direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir [59].

Roche J. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, YSZ kaplamaya uygulanan 100 ila 150 μm arasında kalınlığa sahip bir D-CYSZ (yoğun Serya-YSZ) tabakası, TBC termal şok yanıtını azaltmadan sistemin sıcak korozyon dayanımını arttırdığını göstermişlerdir [60].

Abedi H.R. ve arkadaşları, 100 μm kalınlığında NiCrAlY bağ kaplamaya sahip numunede, 50 μm ve 150 μm kalınlıklarında NiCrAlY bağ kaplamaya sahip olan numunelere göre daha yüksek termal şok dayanım gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Bunun nedeni, kaplama/substrat ara yüzeyi daha yüksek yapışma mukavemetine sahiptir. 100 μm kalınlığında NiCrAlY bağ kaplamaya sahip numunenin ara tabakasında nispeten daha düşük artık gerilimin var olmasıdır [61].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımı ve yüksek sürünme özellikleri sebebiyle kullanılan Inconel 601 alaşımının kullanım ömrünü artırma amacıyla, bağ kaplama için NiCrAlY tozu ve seramik üst kaplama için %8 YSZ tozu kullanılarak termal bariyer kaplamalar yapılmıştır. Kaplanmış ve kaplamasız numuneler, termal şok ve korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen numunelerin SEM, EDS ve XRD analizleri, kristalit boyutları, kaplama kalınlıkları, mikro sertlikleri, kaplama tabakalarının ve altlık malzeme olan Inconel 601' in mikroyapıları incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil.6.1.'de deneysel çalışmalara ait akış şeması verilmiştir.



Şekil.6.1. Deneysel çalışmalara ait akış şeması.

6.1. Deneysel Malzeme

Bu çalışmada kirlilik kontrolü, kimyasal işleme, havacılık, enerji üretimi, ısıtma işlemi, kimyasal arıtma ve gaz türbini motorları gibi uygulamalarda kullanılan Inconel 601 süper alaşımı kullanılmıştır. 16 mm çapında, 400 mm uzunluğundaki içi dolu çubuk malzeme, Şekil 6.2.'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan Inconel 601 malzemesinin kimyasal bileşiminin tespiti için AmateX Spectromaxx marka argon optik spektrometre

kullanılmıştır. Inconel 601 alaşımının spektral analiz sonrası kimyasal bileşimi ve nominal kimyasal bileşimi Çizelge 6.1. 'de verilmiştir.



Şekil.6.2. 16 mm çapında ve 400 mm uzunluğunda Inconel 601 süper alaşımından imal edilmiş içi dolu çubuk numune.

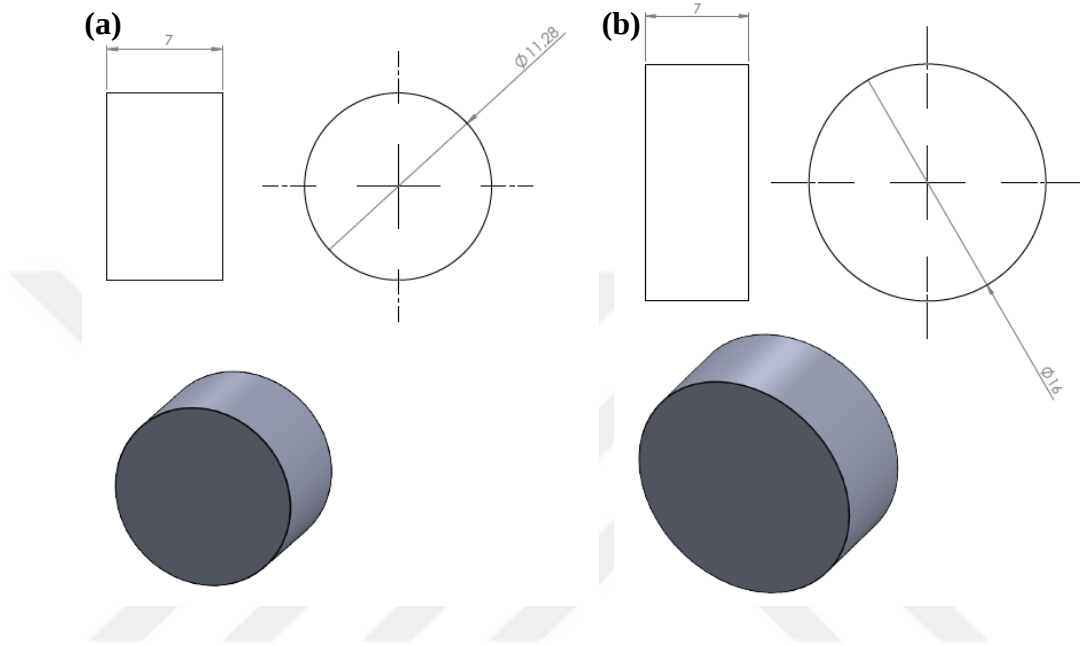
Çizelge 6.1. Inconel 601 alaşımının spektral analiz sonrası kimyasal bileşimi ve nominal kimyasal bileşimi.

Element	Kimyasal bileşim (%ağ)	Nominal bileşim (%ağ) [19].
Ni	58,230	58,0-63,0
Cr	23,000	21,0-25,0
Fe	16,370	Geriye kalan
Al	1,000	1,0-1,7
C	0,100	0,1 maks.
Mn	0,320	1.0 maks.
Si	0,431	0,5 maks.
Cu	0,035	1,0 maks.
Diğer Elementler	0,514	-

Çizelge 6.1.'de verilen nominal element bileşimleri dışındaki Ti, Nb, W, V, Mo, S elementleri ise (%ağ) 0,514 oranında bulunmaktadır.

6.2. Numunelerin Kaplama İşlemi Ön Hazırlığı

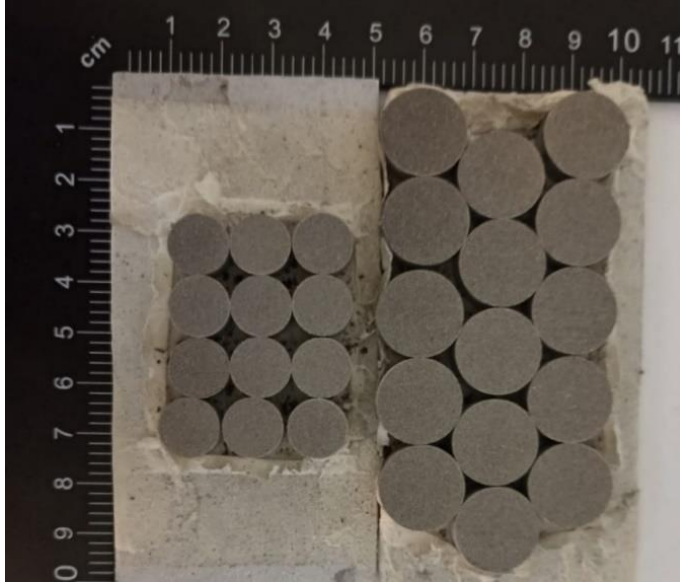
Ø16 mm x 400 mm boyutlarındaki Inconel 601 dolu çubuk, tel erozyon ile kesilerek termal şok deneyi amaçlı Ø16mm x 7 mm ve korozyon deneyi amaçlı ve Ø11,28 mm x 7 mm boyutlarında test numuneleri hazırlanmıştır. Test numuneleri Şekil 6.3.'de gösterilmiştir.



Şekil.6.3. Deney numuneleri (a) Korozyon deney numuneleri (b) Termal şok deney numuneleri.

6.3. Termal Bariyer Kaplama İşlemi

Termal bariyer kaplama işleminden önce, numunelerin kaplama işlemi için konumlandırma aparatı 304 paslanmaz çelik malzemedan tasarlanmış ve imal edilmiştir. Aparat teknik çizimleri Ek.1., Ek.2., ve Ek.3.'te verilmiştir. Termal bariyer kaplama işlemi öncesinde, numuneler kumlama ile yüzey temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Kumlama işlemi, 15 cm uzaklıktan 6 bar basınç altında ve iki paso olmak üzere NK F020 tozu ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kumlama işlemi yapıldıktan sonraki görünümleri Şekil.6.4.'de verilmiştir.



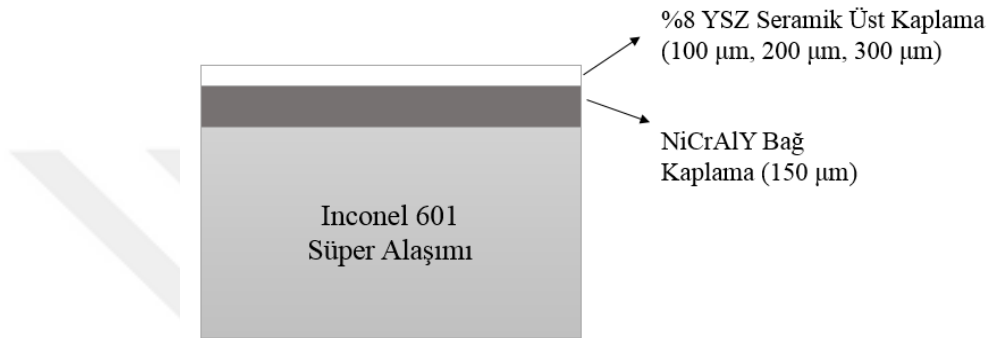
Şekil. 6.4. Kumlama sonrası test numuneleri.

Ardından, numuneler kaplama aparatına yerleştirilip sabitlenmiştir. Aparat termal sprej hedef ünitesine yerleştirilmiştir. Şekil 6.5.'de, termal sprej kaplama öncesi sabitlenmiş test numuneleri verilmektedir.



Şekil.6.5. Termal sprej kaplama öncesi sabitlenmiş test numuneleri.

Şekil.6.6’da uygulanan TBC sistemine ait görünüm şematik olarak verilmiştir. Bağ kaplama malzemesi olan NiCrAlY tozunun Inconel 601 altlık malzemesi üzerine uygulanması HVOF sprej yöntemi ile, seramik üst kaplama malzemesi olan %8 Yitria içeren YSZ tozunun bağ kaplama üzerine uygulanması ise APS yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bağ kaplama kalınlığı yaklaşık olarak 150 µm, seramik üst kaplama kalınlıkları ise ortalama olarak 100 µm, 200 µm ve 300 µm olmak üzere üç farklı kalınlıkta uygulanmıştır. NiCrAlY ve %8 YSZ tozlarının kimyasal bileşimleri ve özellikleri ise Çizelge.6.2.’de verilmiştir.



Şekil.6.6. Uygulanan TBC sisteminin şematik görünümü.

HVOF ve APS yöntemleri ile gerçekleştirilen TBC uygulaması, Sulzer Metco Termal Sprej Sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.7.’de Sulzer Metco Termal Sprej Sistemi püskürtme tabancası, 6 eksenli IRB2400 robot kolu, genişleme nozulu ve toz besleme ünitesi verilmiştir.

Çizelge.6.2. NiCrAlY ve %8 YSZ tozlarının kimyasal bileşimleri ve özellikleri.

Toz Özellikleri	YSZ (ZrO ₂ -Y ₂ O ₃)	NiCrAlY
Kimyasal Bileşim (%ağ)	ZrO ₂ :92 Y ₂ O ₃ :8	Ni: 67 Cr:22 Al:10 Y:1
Üretim Tekniği	Atomize	Atomize
Toz Morfolojisi	Küresel	Küresel
Toz Boyut Dağılımı	106 ± 11 µm	106±52 µm



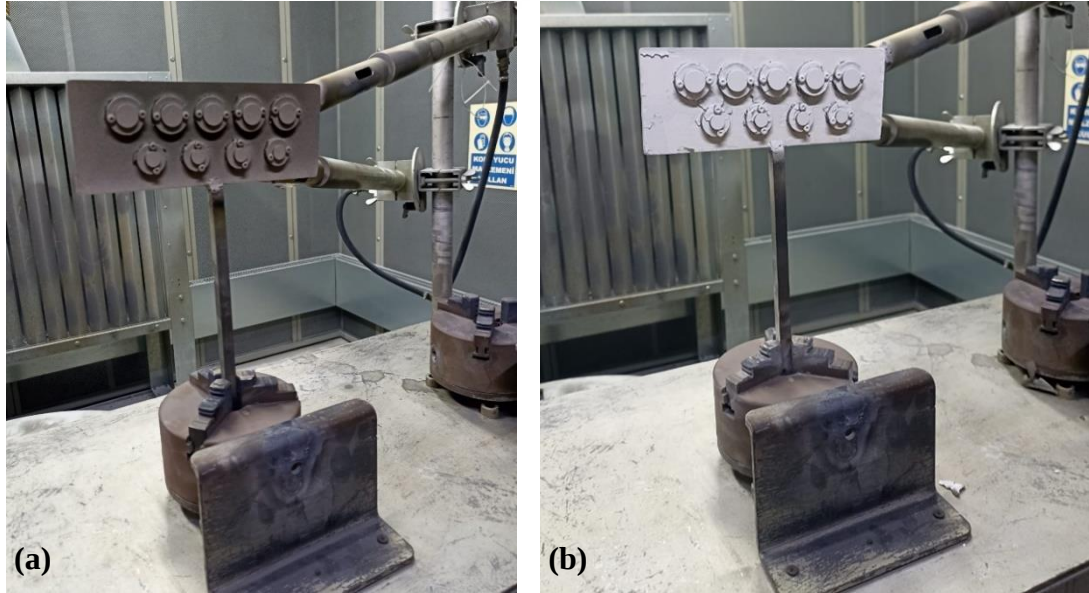
Şekil.6.7. Sulzer Metco termal sprey sistemi (a) püskürtme tabancası, 6 eksenli IRB2400 robot kolu ve genleşme nozulu (b) toz besleme ünitesi.

HVOF ve APS kaplama işlem parametreleri Çizelge 6.3.'de verilmiştir. Şekil.6.8'de numunelerin bağ kaplama, seramik üst kaplama sonrası görünüşleri verilmiştir. Şekil.6.9'da ise kaplama işlemi sonrası test numunelerinin görünümü verilmiştir.

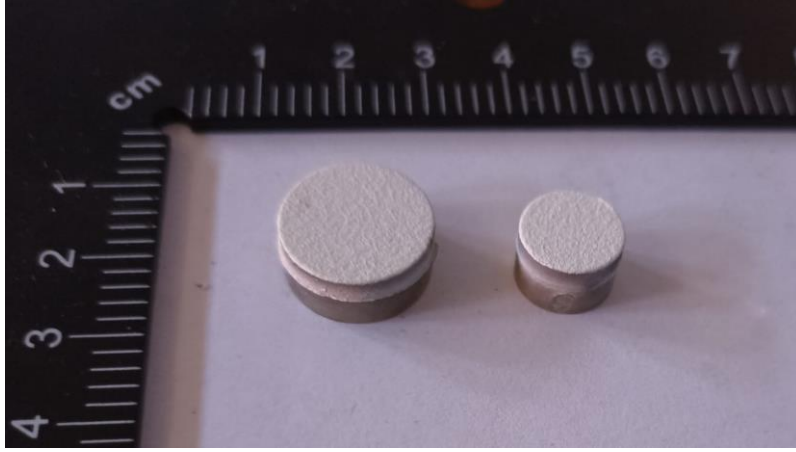
Çizelge 6.3. HVOF (bağ kaplama) ve APS (seramik üst kaplama) işlem parametreleri.

İşlem Parametreleri	Bağ Kaplama	Seramik Üst Kaplama
Termal Sprey Yöntemi	HVOF	APS
Püskürtme mesafesi (mm)	150	130
Argon (NLPM)	45	55
Hidrojen (NLPM)	12	15
Taşıyıcı Gaz (NLPM)	2,4	1,8
Disk Hızı	%15	%10
Akım (A)	575	630
Robot Hareket Hızı (mm/s)	300	250
Toz Besleme Hızı (g/dk)	45	20

APS termal sprey yöntemi ile gerçekleştirilen bağ kaplama işlemi 2 paso ve HVOF termal sprey yöntemi ile gerçekleştirilen seramik üst kaplama işlemi 100 μm kaplama kalınlığı için 15 paso, 200 μm kaplama kalınlığı için 30 paso, 300 μm kaplama kalınlığı için ise 45 paso atılarak uygulanmıştır.



Şekil.6.8. Numunelerin görünüşleri a) Bağ kaplama sonrası b) Seramik üst kaplama sonrası.



Şekil.6.9. Kaplama işlemi sonrası test numunelerinin görünümü.

6.4. Mikroyapısal İncelemeler

Numunelerin mikroyapısal incelemeleri Gazi Üniversitesi Optik Mikroskopi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. İnceleme öncesinde numuneler, 0,06 μm toz boyutuna sahip AlO tozu ile hassas parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından, 2:50:40 oranlarında sırasıyla CuCl_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ve HCl ile hazırlanan dağlama çözeltisinde 30 saniye boyunca dağlanmıştır.

6.5. SEM-EDS İncelemeleri

SEM ve EDS analizleri, 100 μm 200 μm ve 300 μm TBC kaplama kalınlıklarına sahip üç adet numuneye ve kaplamasız Inconel 601 numuneye uygulanmıştır. Numuneler vakumda kalıplama cihazı ile kalıplandıktan sonra, hassas kesme cihazı ile kesitleri alınarak SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Şekil.6.10., Şekil.6.11. ve Şekil.6.12'de vakumda kalıplama cihazı, hassas kesme cihazı ve taramalı elektron mikroskobu (Vega Tescan II) na ait görüntüler verilmiştir.



Şekil.6.10. Vakumda kalıplama cihazı.



Şekil.6.11. Hassas kesme cihazı.



Şekil.6.12. Taramalı elektron mikroskobu (Vega Tescan II).

SEM-EDS analizleri, Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı (TESLAB)'nda gerçekleştirilmiştir.

6.6. XRD Analizleri

XRD analizleri için tarama açısı 10-90 derece aralığında, tarama hızı ise 2 derece/dakika olarak belirlenmiş ve analizler ince film/bulk kırınım deseni çekimi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Analiz, bakır hedefli X ışını tüpüne sahip Rigaku Ultima IV X-Işını Difraktometresi ile ve 40 kV çalışma voltajı, 30 mA çalışma akımı

değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Rigaku Ultima IV XRD cihazına ait görsel, Şekil.6.13 'de verilmiştir.



Şekil.6.13. Rigaku Ultima IV XRD cihazı.

6.7. Mikrosertlik ölçümleri

Test numunelerinin sertlik taramalarında, Emcotest marka Durascan 20 model vikers mikrosertlik test cihazı ile 100g hücresel yük HV0.1 kullanılmıştır.

6.8. Elektrokimyasal Korozyon Testi

Elektrokimyasal korozyon testleri oda sıcaklığında %3.5 NaCl içeren çözeltide yapılmıştır. Testler öncesinde numuneler 1 saat süre ile çözeltiye daldırılmış ve alınan OCP'ye göre ± 400 mV aralığında tafel polarizasyon taraması yapılmıştır. Tafel tarama hızı 1 mV/sn'dir. Kullanılan referans elektrot Ag/AgCl, karşıt elektrot Pt'dir.

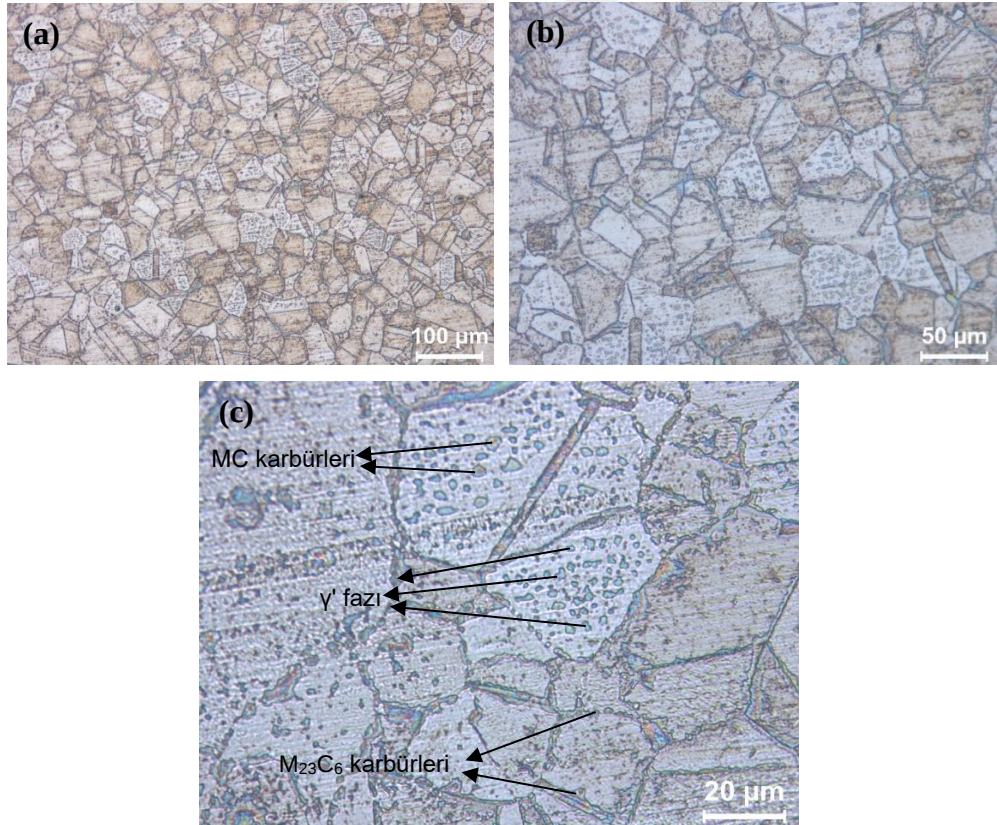
6.9. Termal Şok Testi

Termal şok testleri için FCT (döngüsel fırın oksidasyon) termal şok yöntemi kullanılmıştır. 4 adet numune 45 dakika 1200 °C sıcaklıkta tutulmuş ve ardından 15 dakika havada soğutulmuştur. Termal şok testleri 8 döngü şeklinde tekrarlanmıştır.

7. BULGULAR

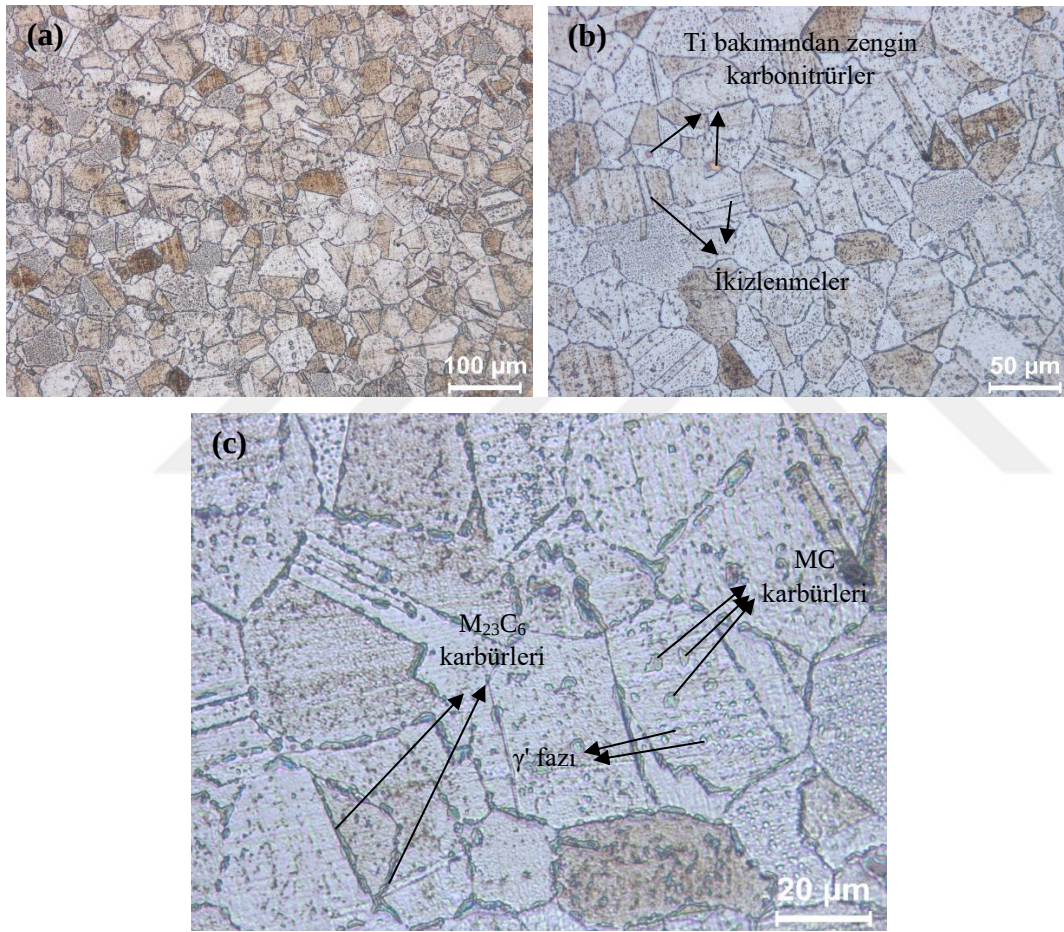
7.1. Mikroyapısal İncelemeler

Inconel 601 süper alaşımı matrisini oluşturan γ fazı, esas olarak γ' fazı ile mukavemetlendirilir. Inconel 601 nikel esaslı süper alaşımının ana mukavemetlendirme fazı γ' , $\text{Ni}_3(\text{Al, Ti})$ bileşimine sahiptir, küresel ve kübik şekillerde gözlenebilirken matris içinde küçük noktalar olarak da görünebilmektedir. Şekil.7.1., Şekil.7.2 ve Şekil.7.3.'de, altlık malzeme Inconel 601 mikroyapılarında γ matris fazı içinde γ' fazı gözlenmektedir. γ' fazı morfolojilerindeki bu fark γ' ve γ fazları arasındaki çeşitli elementlerin dağılımı ve yüzey enerjisine göre elastik gerinim enerjisi üzerindeki etkiye bağlıdır.

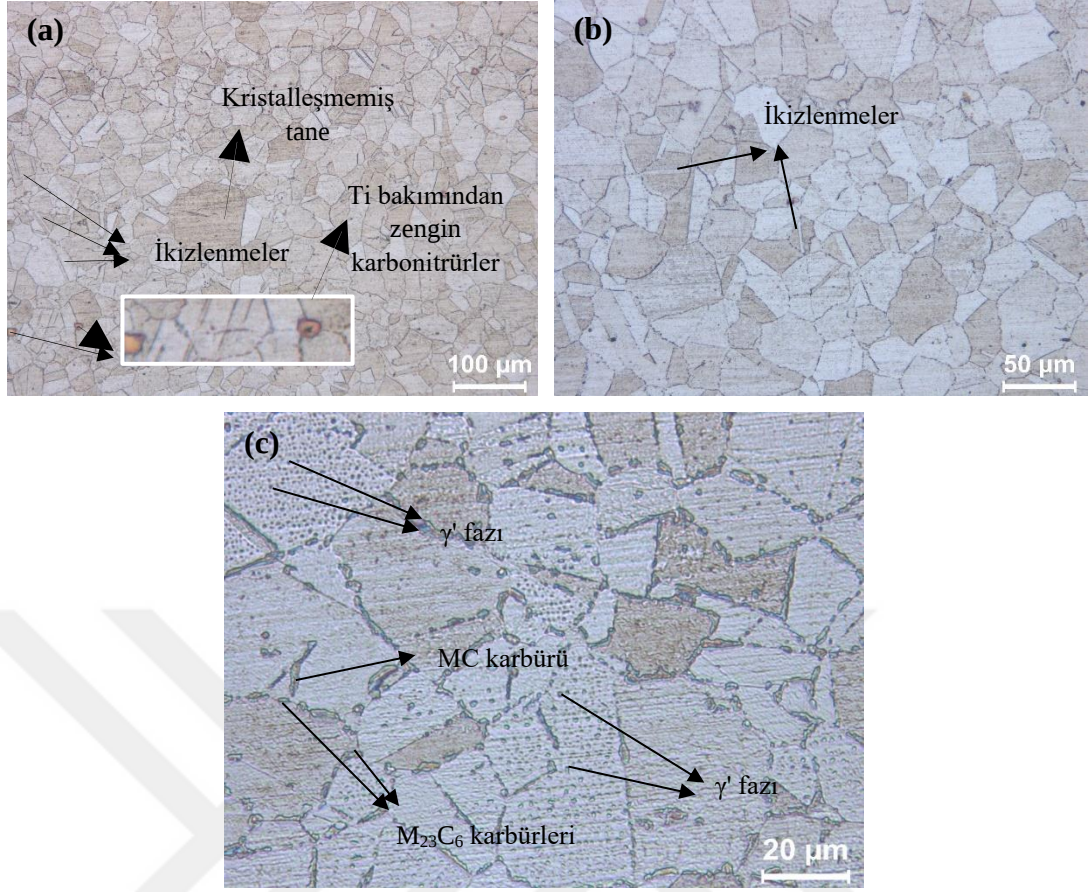


Şekil.7.1. 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunedeki altlık malzemeye ait optik mikroyapı görüntüleri.

Nikel esaslı süper alaşımların çoğu hem birincil hem de ikincil karbürler içermektedir. Birincil MC karbürleri, katılaşma sırasında oluşmakta ve alaşımın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. MC karbürleri, γ matris tane boyutunun kontrolüne yardımcı olur. İkincil $M_{23}C_6$ karbürleri, ısıtılma sırasında oluşmakta ve tane sınırlarının mukavemetini artırmaktadırlar. $M_{23}C_6$ karbürleri genel olarak Cr içeriklidir [62]. γ matris fazı tane sınırlarında, düzensiz morfolojiye sahip sürekli veya yarı sürekli çökeltiler $M_{23}C_6$ karbürleri gözlemlenmektedir. γ' fazı, Ti ve Al içeriğine göre yüksek miktarda Nb içeren süper alaşımlarda gözlemlenmektedir. Bu nedenle, Inconel 601 süper alaşımında γ' fazı gözlemlenmemiştir.



Şekil.7.2. 200 μm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunedeki altlık malzemeye ait optik mikroyapı görüntüleri.



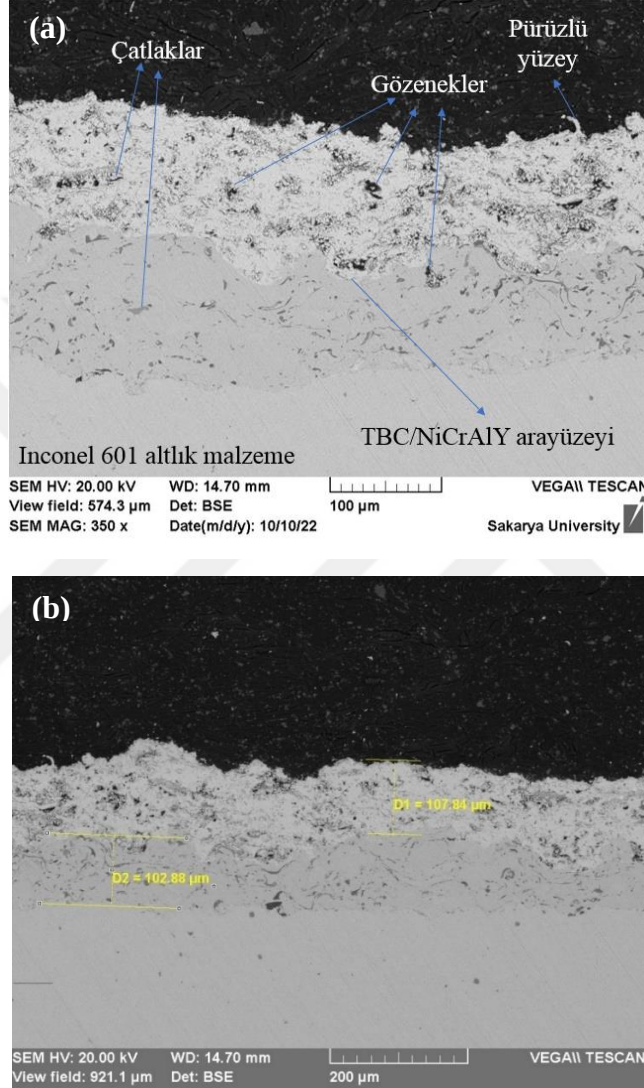
Şekil.7.3. 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunedeki altlık malzemeye ait optik mikroyapı görüntüleri.

Şekil.7.3. (a)'da Ti bakımından zengin karbonitrürler ve kristalleşmemiş tane gözlemlenmektedir. Ti bakımından zengin çökeltilerin bulundukları bölgede tane sınırlarında ve içlerinde yoğun ikizlenme bölgeleri oluşturdukları gözlemlenmektedir. Ti bakımından zengin karbonitrürler turuncu renkte görünmekte ve bu büyük, bloklu karbürler, yorulma dayanımını azaltmakta ve çatlak başlatma alanları olarak işlev görebilmektedirler [63].

Kontis P. ve ark., 850 °C'de termal-mekanik yorulma koşulları altında polikristal bir süper alaşımda oksitlenmiş MC karbürler incelemiştir. Karbürlerin 30 saat boyunca 850 °C'ye maruz kaldıktan sonra hızla oksitlendiği gözlemlenmiştir. Genellikle gözenekli oksitlenmiş karbürlerin hacim genişlemesinden kaynaklanan plastik deformasyon, bitişik matriste yüksek dislokasyon yoğunluklarına yol açmıştır [64].

7.2. SEM Mikroyapı İncelemeleri

Termal bariyer kaplama işlemi yapılan numunelerin taramalı elektron mikroskobu ile görüntüleri alınmış ve kaplama kalınlıklarının ve TBC işlem proseslerinin mikroyapıya olan etkisi incelenmiştir. Şekil. 7.4.'de Inconel 601 altlık malzemesine ait SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil.7.4. 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin SEM görüntüleri. (a) 100 µm (b) 200 µm.

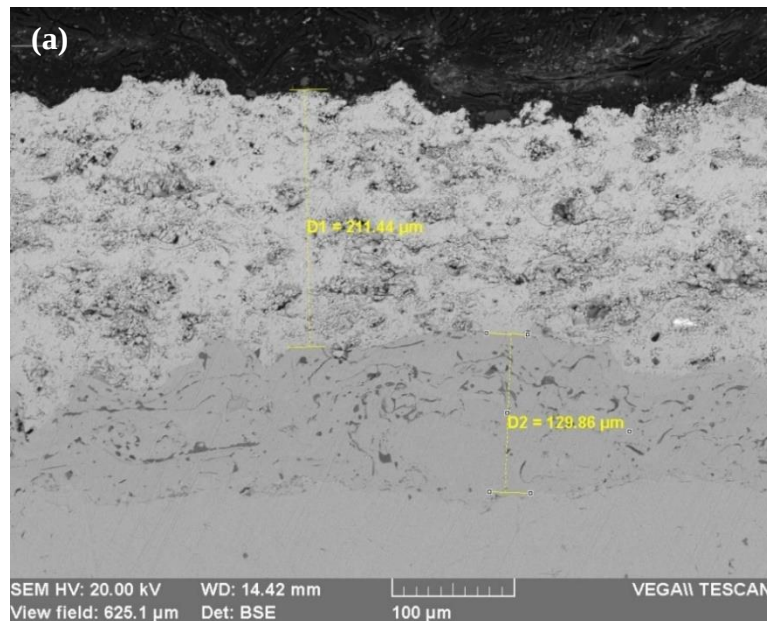
Şekil.7.4., Şekil.7.5. ve Şekil.7.6.'da bağ kaplaması HVOF ve seramik üst kaplaması APS tekniği ile 100, 200 ve 300 µm seramik üst kaplama kalınlıklarında termal bariyer kaplanmış Inconel 601'e ait enine kesitten alınmış SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil.7.4. (a)'da daha net görüleceği üzere, numunenin seramik üst kaplaması lamelli bir mikro yapıya sahip olmakla birlikte, gözenekler, çatlaklar ve ergimemiş parçacıklar

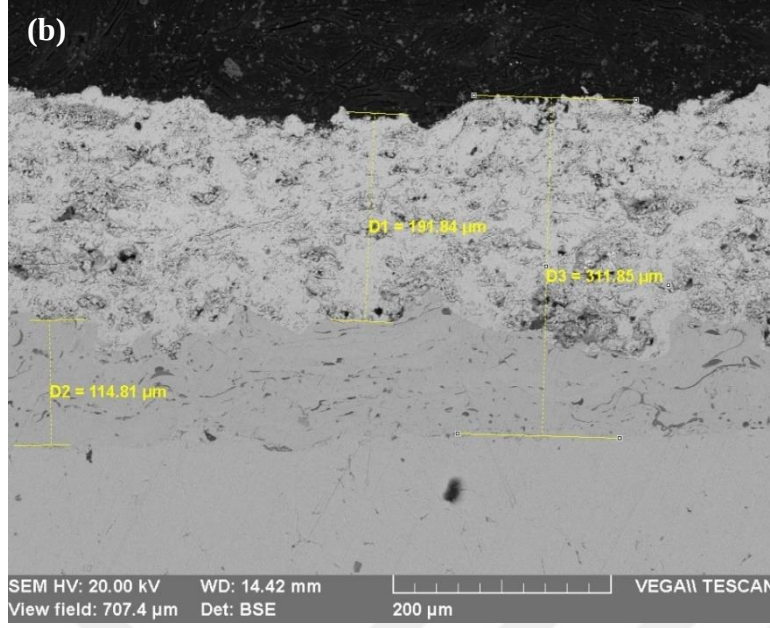
mevcuttur. Genel olarak TBC yapısında belirli miktarda bulunan gözenek ve çatlak, düşük termal iletkenlik ve yüksek düzeyde termal şok dayanımına sahip olmasını sağlamaktadır [65].

Yüzeyin pürüzlü olması, TBC işlemi sırasında ergimemiş parçacıkların kaplamaya yapışması ve tam birleşme sağlamadan bu şekilde soğumasından kaynaklanmaktadır. Kaplamanın yüzeyi ile bağlantılı gözenekler yüzeye açık gözenekler, kaplamanın iç kısmında konumlanan gözenekler kapalı gözenekler, yüzeyden arayüze konumlanan gözenekler ise enine gözenekler olarak adlandırılır [37].

Bağ kaplama ve seramik üst kaplama mikro yapısı kıyaslandığında, bağ kaplama mikro yapısının daha düzenli olduğu, seramik üst kaplamanın ise daha çok iç kusur içerdiği görülmektedir. Bu mikroyapı farklılığının nedeni, TBC uygulama tekniklerinin farklı olmasıdır. HVOF tekniği ile üretilen kaplamalar APS tekniği ile üretilen kaplamalara kıyasla genellikle daha düşük miktarda gözenek ve çatlak içermektedirler [66].

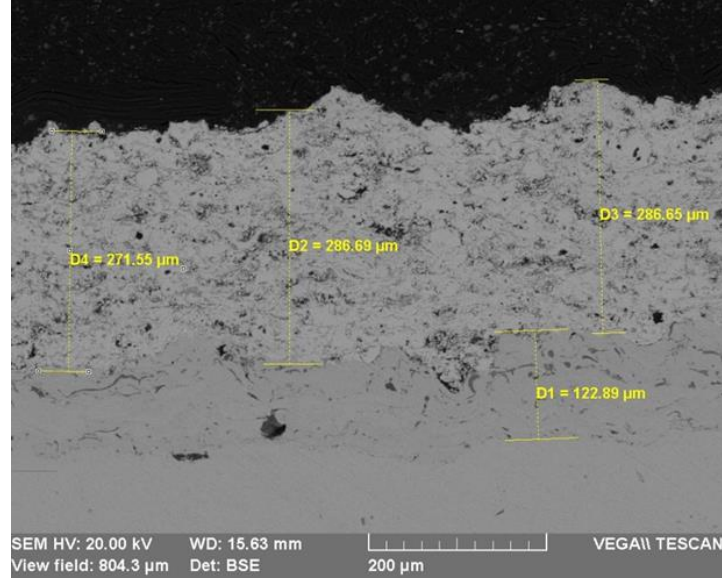
İşlem parametrelerinden püskürtme mesafesinin kısa oluşu, segmentasyon çatlakları yoğunluğunun yüksek olmasına neden olabilmektedir [35]. Çizelge.6.3.'de de görüldüğü üzere, bağ kaplama işlemi için püskürtme mesafesi 150 mm, seramik üst kaplama işlemi için ise 130 mm'dir. Seramik üst kaplama işlemi için püskürtme mesafesinin bağ kaplama için püskürtme mesafesine kıyasla kısa oluşu da, püskürtme tekniğinin yanı sıra seramik üst kaplamanın gözenek ve çatlak yoğunluğunun yüksek olmasına neden olabilmektedir.





Şekil.7.5. 200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin SEM görüntüleri. (a) 100 µm (b) 200 µm.

Termal bariyer kaplamaların kalitesi ayrıca, plazma ark gücü ile yakından ilişkilidir. Plazma gücündeki artış, porozite oranını azaltmaktadır. Bu noktada, argon/hidrojen oranı da kaplamanın mikroyapısı ve porozite değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [67-70]. Çizelge.6.3.'de de görülebileceği üzere, HVOF yöntemi ile üretilen bağ kaplama işlem parametrelerinden argon/hidrojen oranının 3.75, APS yöntemi ile üretilen seramik üst kaplama işlem parametrelerinden argon/hidrojen oranının ise 3.66 olduğu görülmektedir. Argon/hidrojen oranları arasında büyük bir fark olmasa da, HVOF yöntemi ile üretilen bağ kaplama işlemi sırasında plazma ark gücünün daha yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bağ kaplamada porozite oranının daha düşük olmasının bir başka nedeninin plazma ark gücündeki fark olduğu söylenebilir.

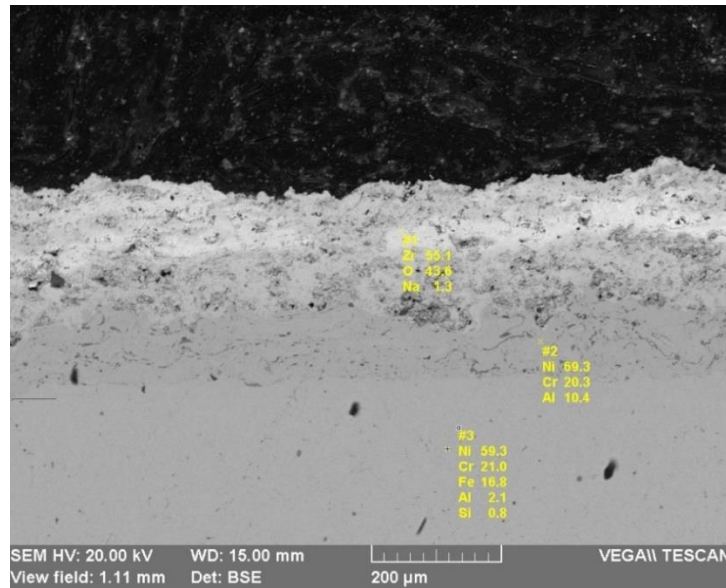


Şekil.7.6. 300 μ m seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin SEM görüntüsü.

Yaklaşık olarak 100, 200 ve 300 μ m seramik üst kaplama kalınlığına sahip olarak bahsedilen numunelere ait üst kaplama kalınlıklarının sırasıyla 107.84, 191.84, 286.69 μ m, bağ kaplama kalınlıklarının ise sırasıyla 102.88, 114.81, 122.89 μ m olduğu gözlemlenmektedir.

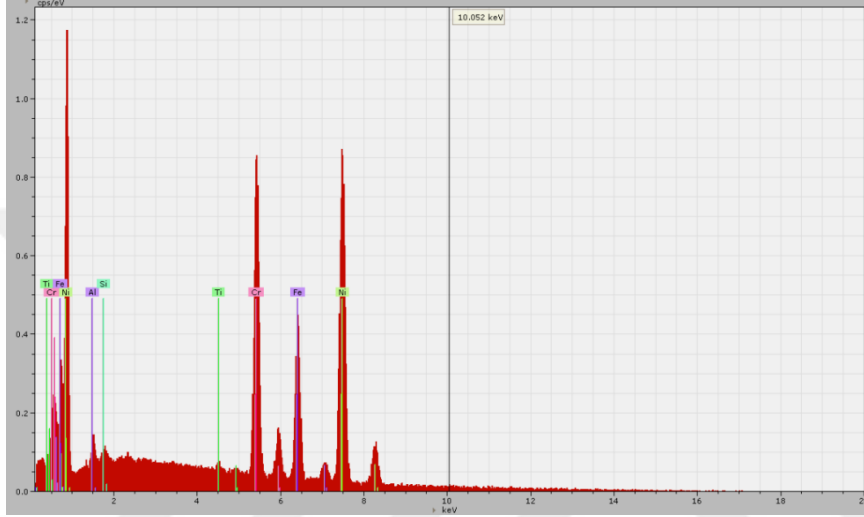
7.3. EDS Analizi Sonuçları

Altlık malzeme, bağ kaplama ve seramik üst kaplamaya ait EDS verileri Şekil. 7.7., Şekil. 7.8., Şekil 7.9. ve Şekil.7.10.'da gösterilmiştir.

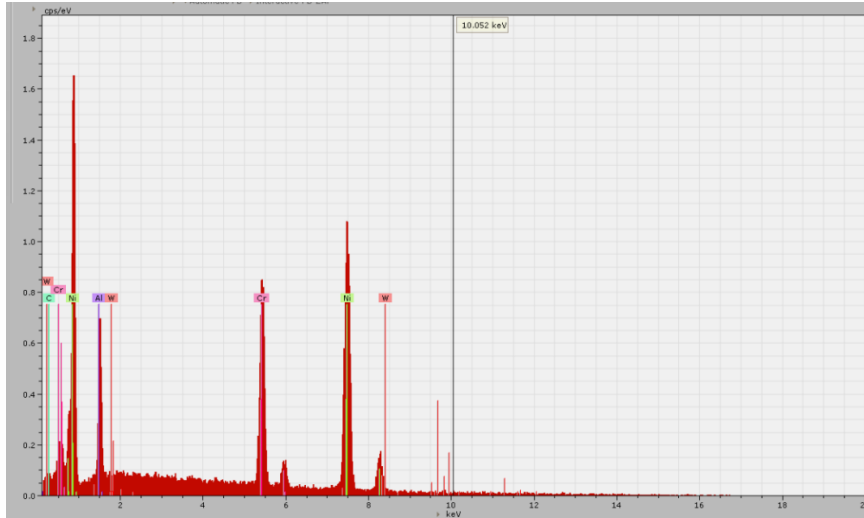


Şekil. 7.7. Seramik üst kaplama, bağ kaplama ve altlık malzeme Inconel 601 'e ait EDS verileri.

Şekil.7.7. ve Şekil.7.8. 'de, altlık malzeme Inconel 601'e ait EDS verileri incelendiğinde, beklendiği gibi, Inconel 601 nikel esaslı süper alaşımının γ matrisine ait yüksek oranda Ni, Cr ve Fe elementleri ve bunun yanı sıra, altlık malzeme kimyasal kompozisyonunda bulunan alaşım elementleri Al, Ti ve Si görülmektedir. EDS verilerinde Al ve Ti alaşım elementlerinin de gözlemlenmesi ile birlikte, nikel esaslı süper alaşımlarda ana mukavemetlendirme fazı ve mikro yapıda değişik şekil ve boyutlarda görülebilen γ' $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ fazının varlığı düşünülmektedir.



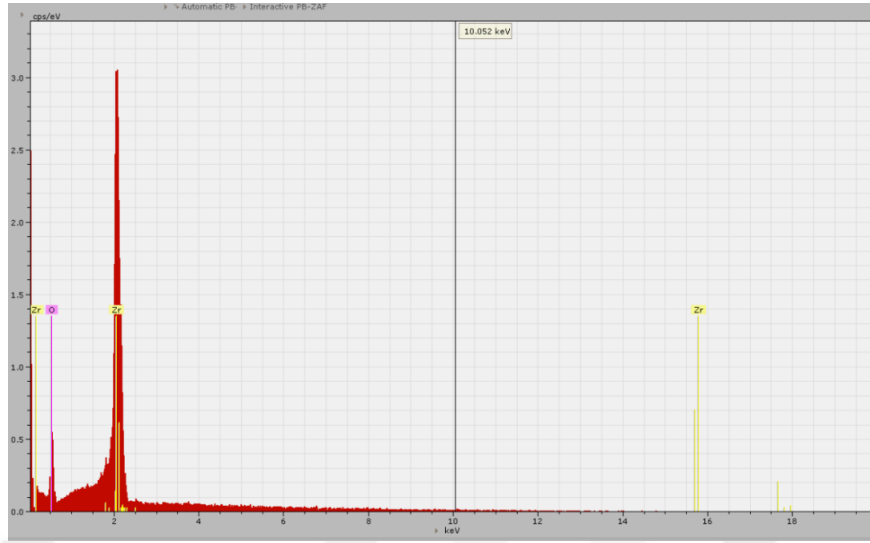
Şekil.7.8. Altlık malzemeye ait EDS verileri.



Şekil.7.9. Bağ kaplamaya ait EDS verileri.

Şekil.7.9.'da, NiCrAlY bağ kaplamaya ait EDS verileri incelendiğinde, bağ kaplamanın % 69.3 Ni, % 20.3 Cr ve % 10.4 Al elementlerini içerdiği görülmektedir. Bunun yanında, W,C ve Si elementleri de düşük oranda gözlemlenmiş olup bu durum,

altlık malzemeden bağ tabakaya minör bir difüzyon olduğunu göstermektedir.



Şekil.7.10. Seramik üst kaplamaya ait EDS verileri.

Beklendiği gibi, seramik üst kaplama tozu bileşimi %8 Y_2O_3 + ZrO_2 olması sebebiyle EDS sonuçlarında Zr ve O elementleri gözlemlenmektedir. Y elementinin bağ tabaka ve seramik üst tabaka EDS verilerinde görülmemesi nedeninin NiCrAlY ve %8 YSZ toz bileşimlerinde Y elementi yüzdesinin diğer elementlere göre çok daha düşük olması nedeniyle dedekte edilemediği düşünülmektedir.

7.4. XRD Analizi Sonuçları

TBC kaplamalı üç adet numuneye ve Inconel 601 numuneye XRD analizleri yapılmıştır. Numune no, seramik üst kaplama kalınlığı ve numune şekli, numaralandırılarak Çizelge 7.1’de verilmiştir.

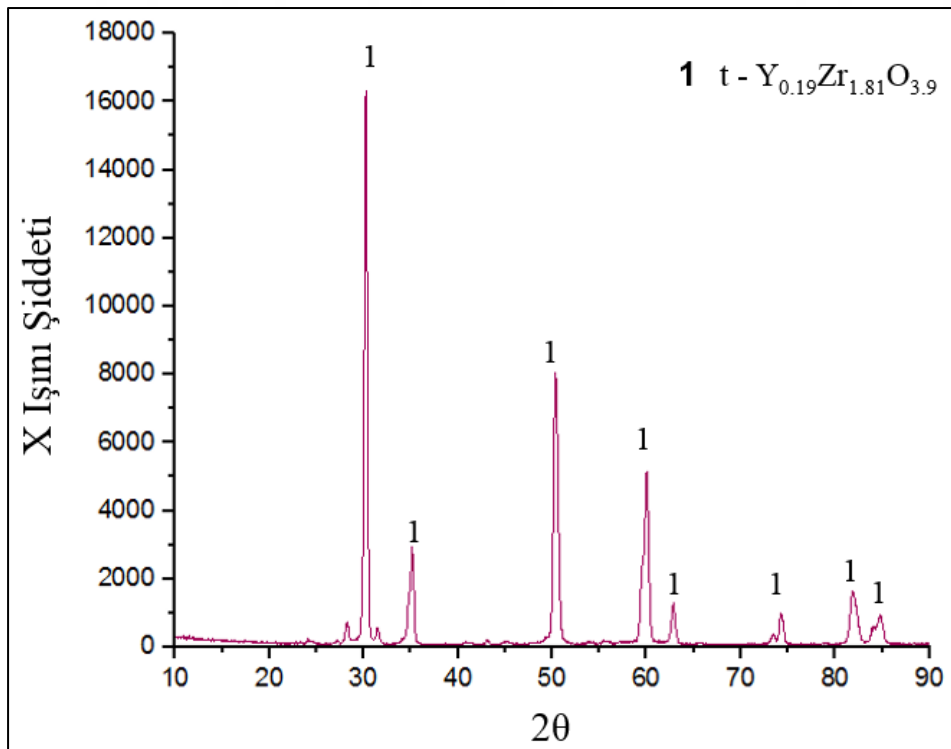
Çizelge.7.1. XRD analizine tabi tutulan numuneler.

Numune no	Seramik üst kaplama kalınlığı	Numune Şekli
1	100 μm	İnce film
2	200 μm	
3	300 μm	
4	Kaplamasız	

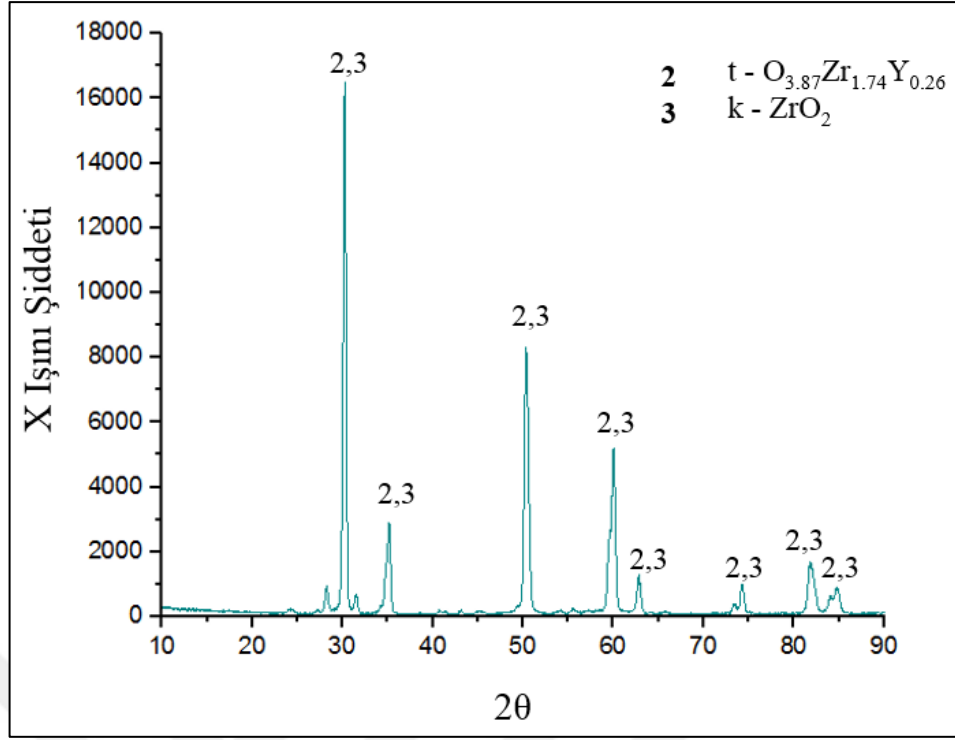
Şekil.7.11., Şekil.7.12., Şekil 7.13. ve Şekil.7.14., Numune 1, Numune 2, Numune 3 ve Numune 4’e ait XRD verilerini göstermektedir. Grafikler Origin Pro ortamında çizilmiş, peak noktalarında difraksiyon alınan bileşikler X’Pert HighScore Plus

ortamında elde edilmiştir. Grafiklerde t harfi tetragonal yapıyı, k harfi ise kübik yapıyı temsil etmektedir.

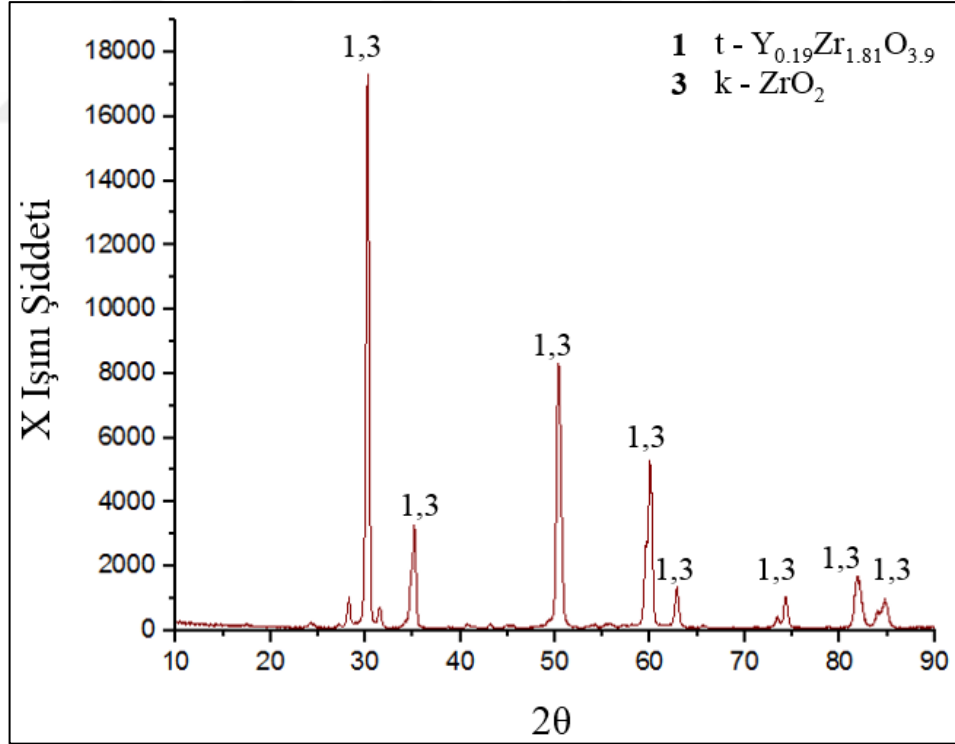
- Numune 1'e ait XRD verileri incelendiğinde, $30,2^\circ$, $35,2^\circ$, $50,3^\circ$, $59,9^\circ$, $62,8^\circ$, $74,2^\circ$, $81,8^\circ$ ve $84,7^\circ$ de tetragonal yapıda $Y_{0.19}Zr_{1.81}O_{3.9}$ ait (101), (110), (112), (211), (202), (220), (213) ve (310) düzlemlerinden,
- Numune 2'ye ait XRD verileri incelendiğinde, $30,2^\circ$, 35° , $50,3^\circ$, $59,8^\circ$, $62,7^\circ$, $73,9^\circ$, $81,8^\circ$ ve $84,5^\circ$ de tetragonal yapıda $O_{3.87}Zr_{1.74}Y_{0.26}$ 'e ait (101), (110), (112), (211), (202), (220), (213) ve (310) düzlemlerinden ve kübik yapıda ZrO_2 'e ait (111), (020), (022), (131), (222), (040), (133), (042) düzlemlerinden,
- Numune 3'e ait XRD verileri incelendiğinde, $30,2^\circ$, $35,1^\circ$, $50,2^\circ$, $59,9^\circ$, $62,7^\circ$, $74,1^\circ$, $81,7^\circ$ ve $84,7^\circ$ de tetragonal yapıda $Y_{0.19}Zr_{1.81}O_{3.90}$ 'e ait (101), (110), (112), (211), (202), (220), (213) ve (310) düzlemlerinden ve kübik yapıda ZrO_2 'e ait (111), (020), (022), (131), (222), (040), (133), (042) düzlemlerinden,
- Numune 4'e ait XRD verileri incelendiğinde ise, $43,9^\circ$, $51,1^\circ$ ve $75,2^\circ$ de $Ni_{2.88}W_{0.32}Cr_{0.8}$, Ni_4 , $CrNi$ ve Fe_4 'e ait (111), (200) ve (220) düzlemlerinden, difraksiyon alınmıştır. Bu sonuçlar, benzer çalışmalar tarafından da desteklenmektedirler [71-73].



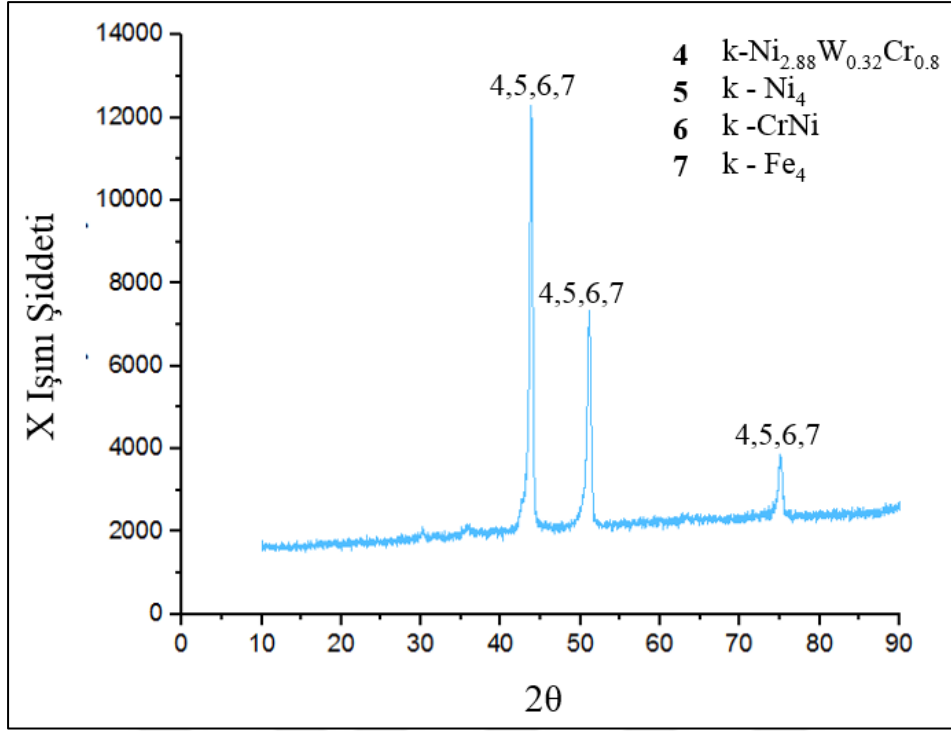
Şekil.7.11. Numune 1'e ait XRD verileri.



Şekil.7.12. Numune 2'ye ait XRD verileri.



Şekil.7.13. Numune 3' e ait XRD verileri.



Şekil.7.14. Numune 4' e ait XRD verileri.

Çizelge. 7.2. XRD verilerinden elde edilen bileşiklerin latis parametreleri ve kristal sistemleri.

No	Bileşikler	Latis parametreleri			Kristal Sistem
		a (Å)	b (Å)	c (Å)	
1	$Y_{0.19}Zr_{1.81}O_{3.9}$	3,616	3,616	5,158	Tetragonal
2	$O_{3.87}Zr_{1.74}Y_{0.26}$	3,625	3,625	5,14	Tetragonal
3	ZrO_2	5,129	5,129	5,129	Kübik
4	$Ni_{2.88}W_{0.32}Cr_{0.8}$	3,573	3,573	3,573	Kübik
5	Ni_4	3,571	3,571	3,571	Kübik
6	$CrNi$	3,591	3,591	3,591	Kübik
7	Fe_4	3,49	3,49	3,49	Kübik

Zirkonya, 1170 °C'nin altında monoklinik, 1170 °C ve 2370 °C arasında tetragonal, 2370 °C'nin üzerinde ise kübik yapıda gözlemlenmektedir [74]. 200 ve 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip olan numunelerde kübik yapıda ZrO_2 difraksiyonu alındığı görülmektedir. Numunelerde gözlenen zirkonyanın kübik yapıda bulunmasının TBC işlem sıcaklığına ve kaplama kalınlığına bağlı olarak işlem sonrasında numunelerin oda sıcaklığında soğuma durumuna bağlı olduğu

düşünülmektedir.

Inconel 601 numunede (Numune 4) ise, beklendiği gibi kübik yapıda Ni₄ ve Fe₄ ‘ün yanı sıra, CrNi ve Ni_{2.88}W_{0.32}Cr_{0.8} difraksiyonları alınmıştır. Ni elementinin, nikel matrisin içine katılan W ve Cr alaşım elementleriyle bağ yaptığı görülmektedir.

7.4.1. Scherrer Denklemi ile Kristalit Boyutları, Şekil Değiştirme Yoğunluğu ve Mikro Gerinim Değerlerinin Hesaplanması

Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanan kristalit (tanecik) boyutları Çizelge.7.3. ‘de verilmiştir.

Çizelge.7.3. Kristalit (tanecik) boyutları.

Peak No	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4
	Kristalit boyutları (nm)			
1	21,3	21,3	21,3	22.2
2	27,1	27,2	31,1	17.5
3	18,9	14,1	20,7	18.5
4	26,5	23,8	26,5	-
5	17,1	17,1	20,1	-
6	21,5	21,5	21,5	-
7	11,2	16,9	11,2	-
8	17,3	17,3	15,4	-

XRD peak noktalarından Scherrer denklemi ile hesaplanan kristalit boyutları incelendiğinde, Numune 1 için ortalama kristalit boyutu 20,1 nm, numune 2 için ortalama kristalit boyutu 19,9 nm, numune 3 için ortalama kristalit boyutu 20,98, numune 4 için ortalama kristal boyutu ise 19,4 nm’dir. $D = \text{kristalit boyutunu}$, $\delta = \frac{1}{D^2}$

şekil değiştirme (strain) yoğunluğunu, $\varepsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta}$ ise mikro gerinimi ifade etmektedir [75,76]. Numunelere ait majör peak noktaları için δ ve ε değerleri hesaplandığında,

Numune 1 için, $\delta = 2,204 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$, $\varepsilon = 6 \times 10^{-3}$, Numune 2 için, $\delta = 2,204 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$, $\varepsilon = 5,9 \times 10^{-3}$, Numune 3 için, $\delta = 2,204 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$, $\varepsilon = 5,92 \times 10^{-3}$, Numune 4 için, $\delta = 2,03 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$, $\varepsilon = 4,67 \times 10^{-3}$ şeklinde bulunur.

7.4.2. Williamson – Hall (UDM) Metoduyla Mikro Gerinim Değerlerinin Hesaplanması

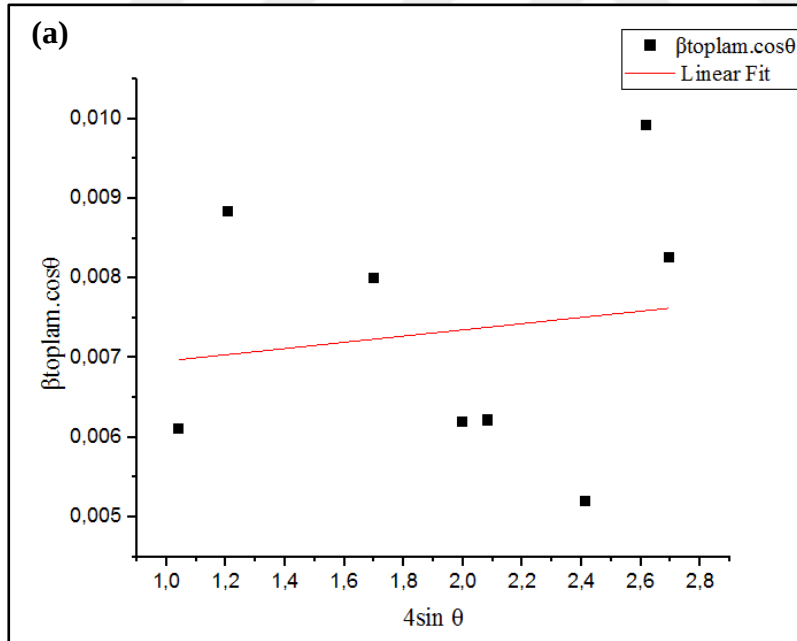
Williamson – Hall metodu ise peaklerin genişlemesini, boyut kaynaklı genişleme ve şekil değiştirme kaynaklı genişlemenin toplam etkisi olduğunu varsaymaktadır. William – Hall metodu; $\beta_{\text{toplam}} = \beta_{\text{boyut}} + \beta_{\text{şekil değiştirme}}$ şeklinde ifade edilebilir. Değiştirilmiş W-H metodu olarak da bilinen düzgün deformasyon modeli (UDM) ise;

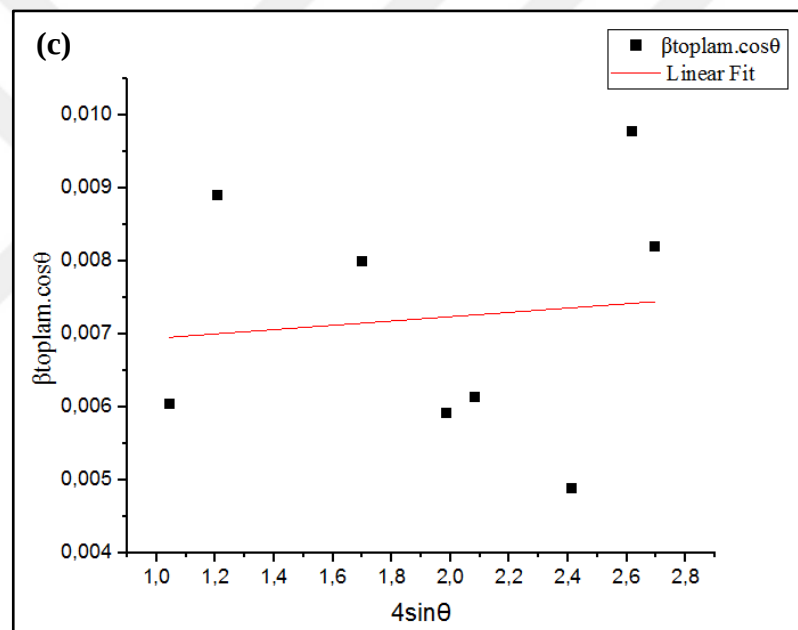
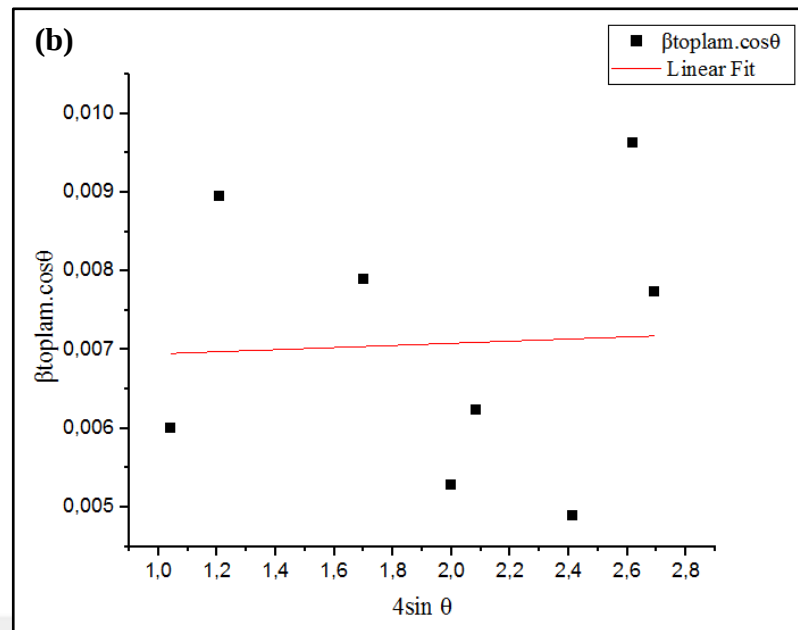
$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \cdot \tan \theta} = \beta_{\text{şekil değiştirme}} \cdot \frac{\cos \theta}{4 \cdot \sin \theta} \quad (7.1)$$

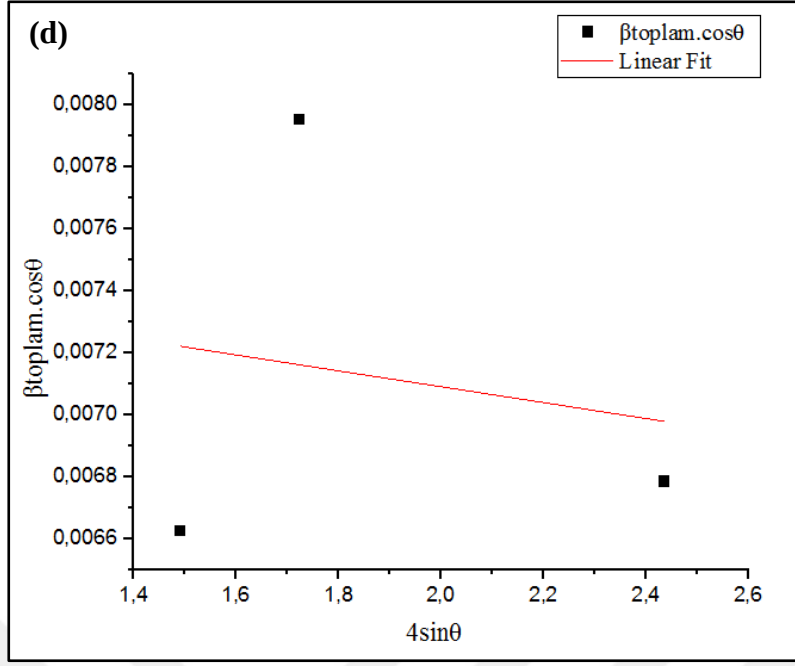
$$\beta_{\text{toplam}} = \beta_{\text{boyut}} + \beta_{\text{şekil değiştirme}} = \frac{K \cdot \lambda}{D \cdot \cos \theta} + 4 \varepsilon \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (7.2)$$

$$\beta_{\text{toplam}} \cdot \cos \theta = \frac{K \cdot \lambda}{D} + 4 \varepsilon \sin \theta \quad (7.3)$$

şeklinde ifade edilebilir [76]. Williamson-Hall (UDM) metoduna göre, Denklem 7.3.'da ifade edilen denklem, eğimi ε , y eksenini kestiği nokta ise $\frac{K \cdot \lambda}{D}$ olan bir doğru belirtmektedir.



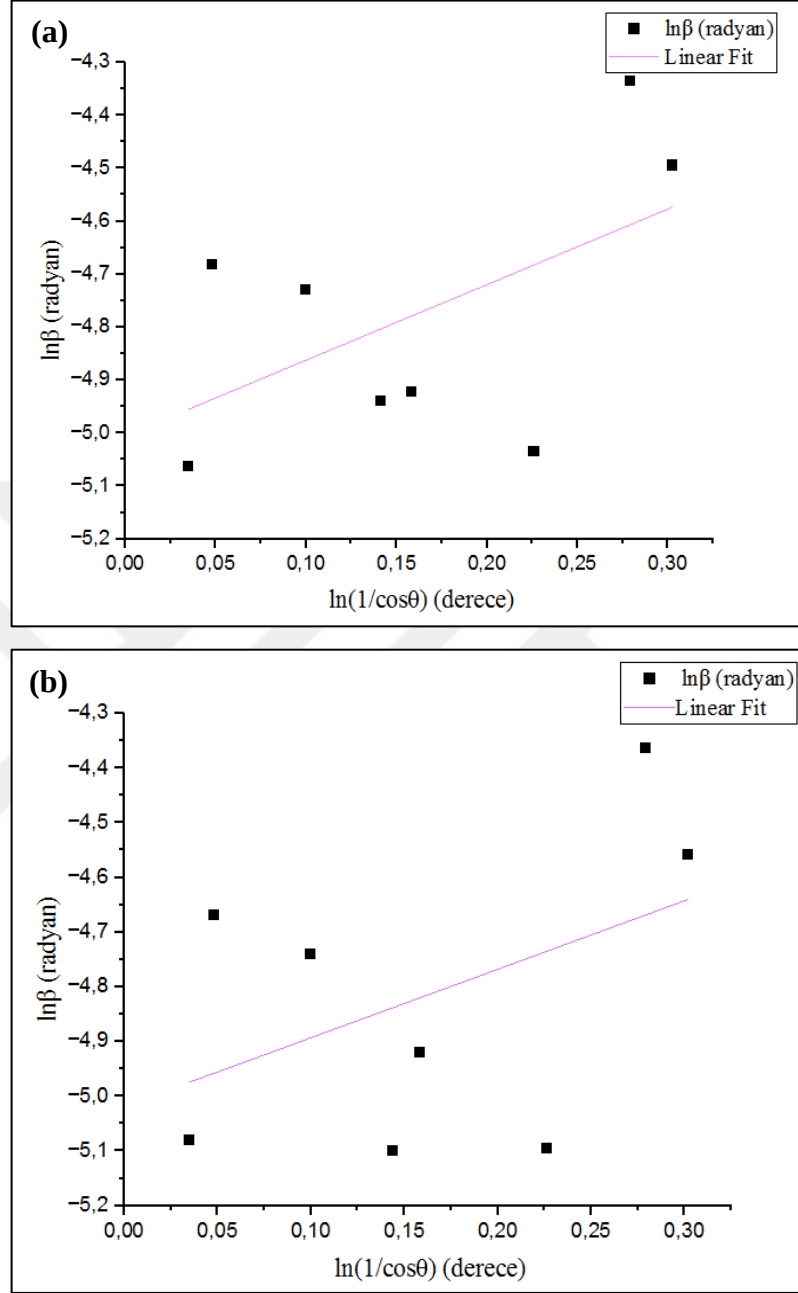


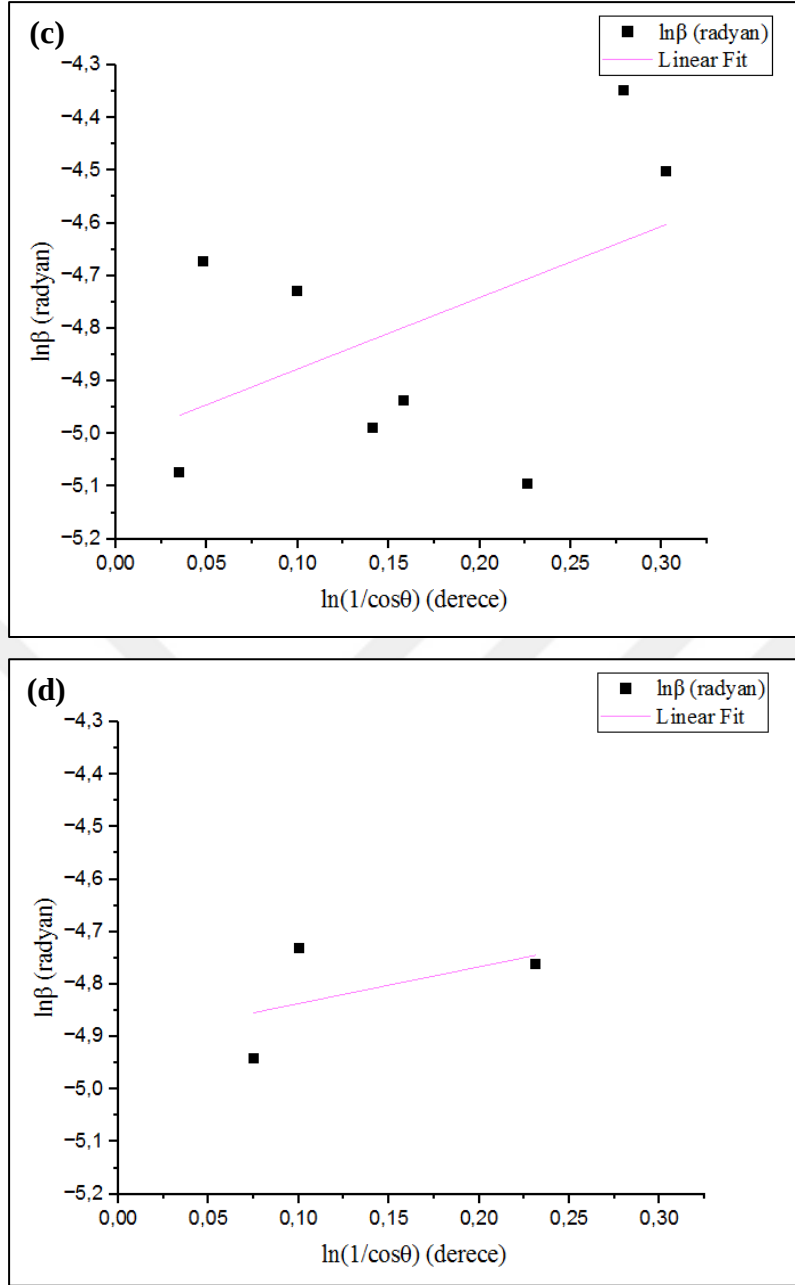


Şekil.7.15. Numunelerin peak noktaları değerleriyle çizilen Williamson Hall (UDM) grafikleri. (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3 (d) Numune 4.

Numunelerin peak noktaları değerleriyle çizilen Williamson-Hall grafiklerinin eğimi, dolayısıyla numunelere ait boyut ve şekil değiştirmeden gelen toplam mikro gerinim değerleri sırasıyla, $0,39 \times 10^{-3}$, $0,13 \times 10^{-3}$, $0,29 \times 10^{-4}$ ve $-0,26 \times 10^{-3}$ dür. Pozitif değerler mikro gerinimin çekme gerilmesi etkisinde olduğunu, negatif değerler ise basma gerilmesi etkisinde olduğunu göstermektedir.

7.4.3. Değiştirilmiş Scherrer (Monshi – Scherrer) Denklemi ile Kristalit Boyutlarının Hesaplanması





Şekil.7.16. Numunelerin peak noktaları değerleriyle çizilen Monschi-Scherrer grafikleri. (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3 (d) Numune 4.

Numuneler için çizilen Monschi-Scherrer grafiklerinin y eksenini kestiği noktaların sırasıyla -5,00515, -5,01819, -5,01257 ve -4,90664 olduğu görülmektedir. $e^{\text{intercept}} = \frac{K\lambda}{D}$ eşitlikleri sağlandığında, numunelerin Monschi-Scherrer denklemi ile bulunan kristalit boyutları sırasıyla, 21,6, 21,9, 24,4 ve 19,6 nm'dir.

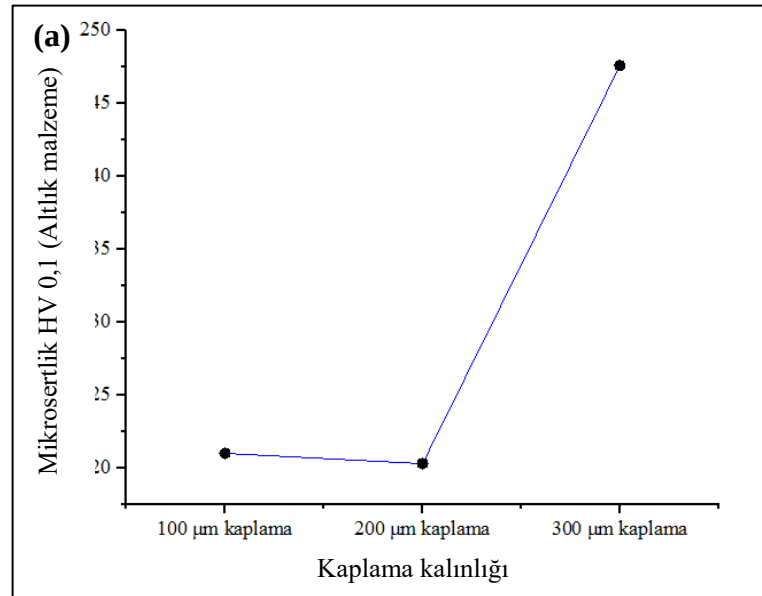
7.5. Mikrosertlik Ölçümleri

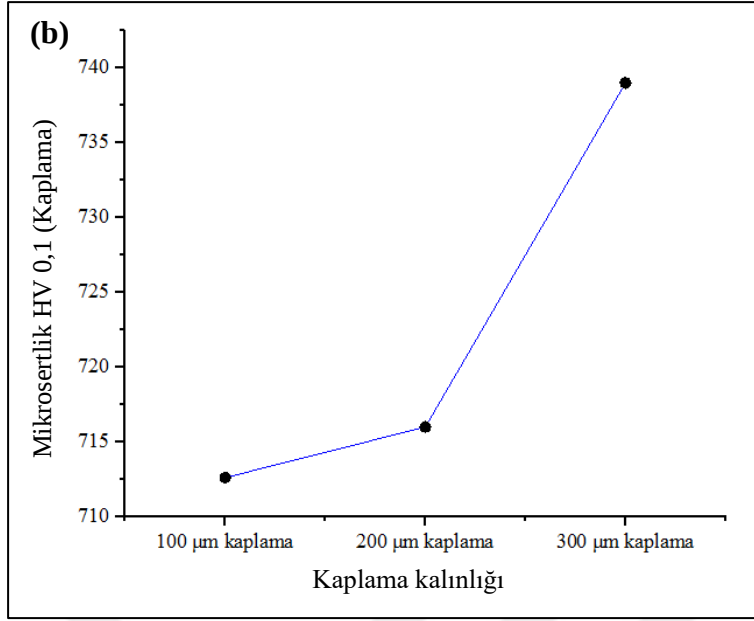
Çizelge.7.4.'de 100 μm , 200 μm ve 300 μm kaplamaya ve 100 μm , 200 μm ve 300 μm kaplamaya sahip numunelerde altlık malzemelerin mikrosertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge. 7.4. Mikrosertlik ölçümleri.

Sertlik ölçümü alınan kısım	Mikro Sertlik değeri (HV 0,1)			
	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	Ortalama
100 μm kaplama	673	725	740	712,6
100 μm - Altlık malzeme	221	218	224	221
200 μm kaplama	705	728	715	716
200 μm - Altlık malzeme	218	224	219	220,3
300 μm kaplama	772	711	734	739
300 μm - Altlık malzeme	243	247	253	247,6

Mikrosertlik değerleri incelendiğinde, kaplama kalınlığı arttıkça kaplama mikrosertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Altlık malzemeye ait ortalama mikrosertlik değerlerinin ise, kaplama kalınlığı 100 μm iken 221, 200 μm iken 220,3 ve 300 μm iken 247,6 olduğu görülmektedir. Kaplama kalınlığı 100 μm 'dan 200 μm 'a çıktığında, mikrosertlik değerinde hafif bir düşüş gözlenirken, kaplama kalınlığı 300 μm 'a çıktığında ise mikrosertlik değerinin arttığı görülmektedir. Kaplamaya ve altlık malzemeye ait ortalama mikrosertlik değerleri Şekil. 7.17'de verilmiştir.





Şekil.7.17. Kaplamaya ve altlık malzemeye ait ortalama mikrosertlik değerleri (a) Altlık malzeme (b) Kaplama.

7.6. Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonuçları

Inconel 601 kaplamasız numuneler ve bağ kaplaması HVOF yöntemi ile seramik üst kaplaması APS yöntemi ile üretilen Inconel 601 termal bariyer kaplı numunelerin her biri %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde elektrokimyasal korozyona uğratılmıştır. Çizelge 7.5’de, %3.5 NaCl çözeltisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testine ait değerler verilmiştir. I_{kor} korozyon akımını, E_{kor} korozyon potansiyelini, R_p ise polarizasyon direncini ifade etmektedir. Şekil.7.18, Şekil.7.19, Şekil.7.20 ve Şekil.7.21’de numunelerin elektrokimyasal korozyon testine tabi tutulduktan sonra elde edilen tafel eğrileri verilmiştir. Şekil.7.22.’de ise tafel eğrilerinin karşılaştırılması verilmiştir.

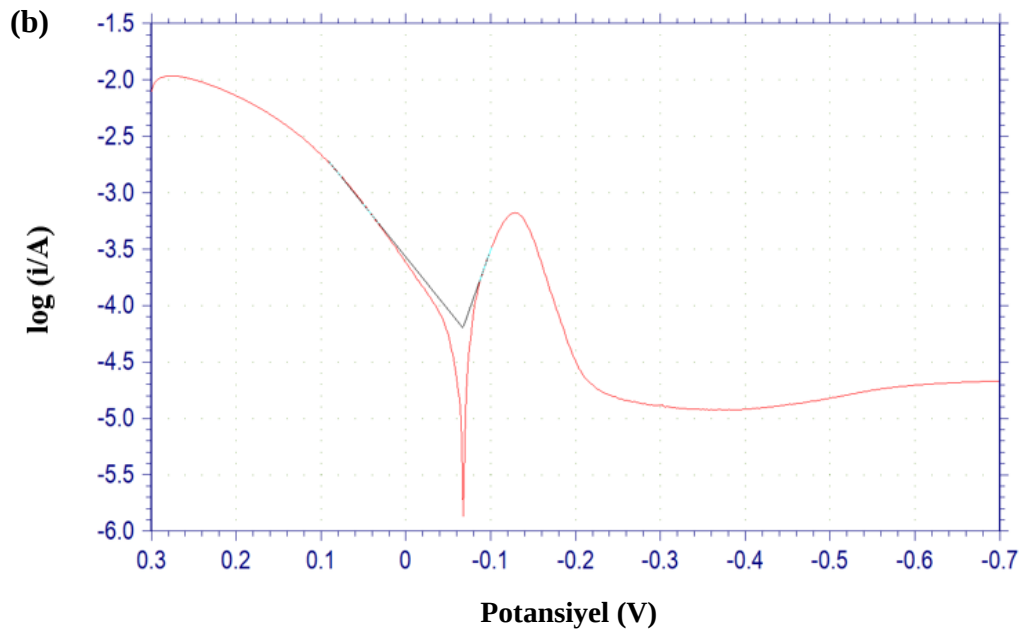
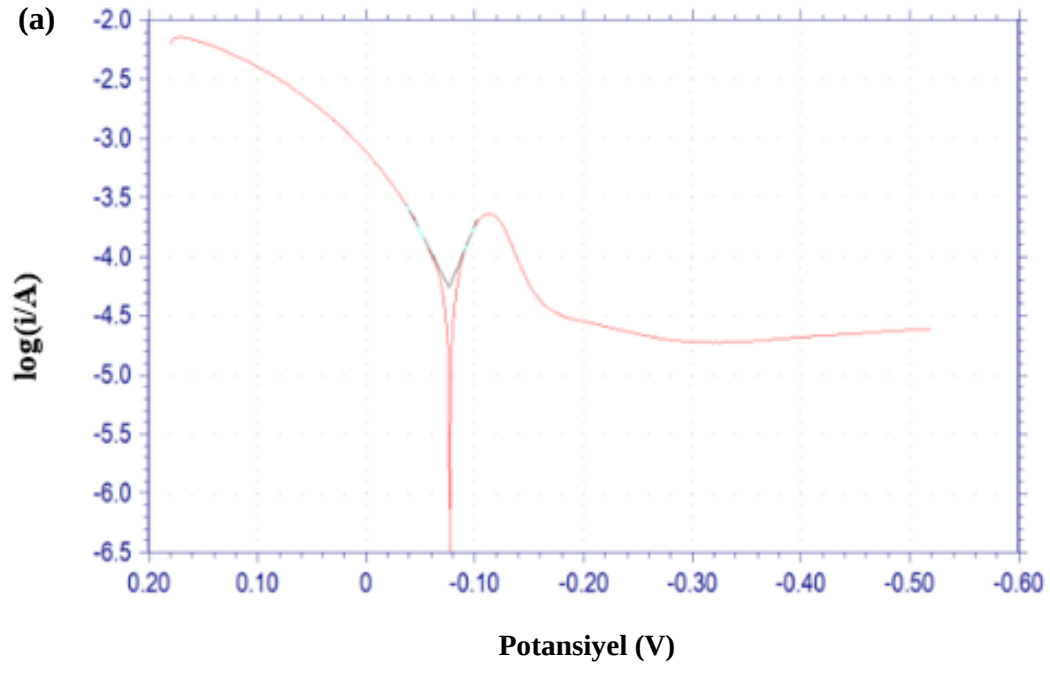
Korozyon kontrol uygulamaları için termal bariyer kaplamanın lamelli yapısı, gözeneklilik, mikro çatlaklar ve diğer mikroyapısal kusurlar önem arz etmektedir. Ergimemiş parçacıklar lameller arası boşluk ve gözeneklilik zayıf bağ bölgelerini oluşturmaktadırlar. Koroziif sıvıların girişine izin veren kusurlar, kaplama ayrışma işlemini hızlandıracak ve bunun sonucunda korozyon dayanımı düşecektir [77].

Çizelge. 7.5. %3,5 NaCl çözeltisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testine ait değerler.

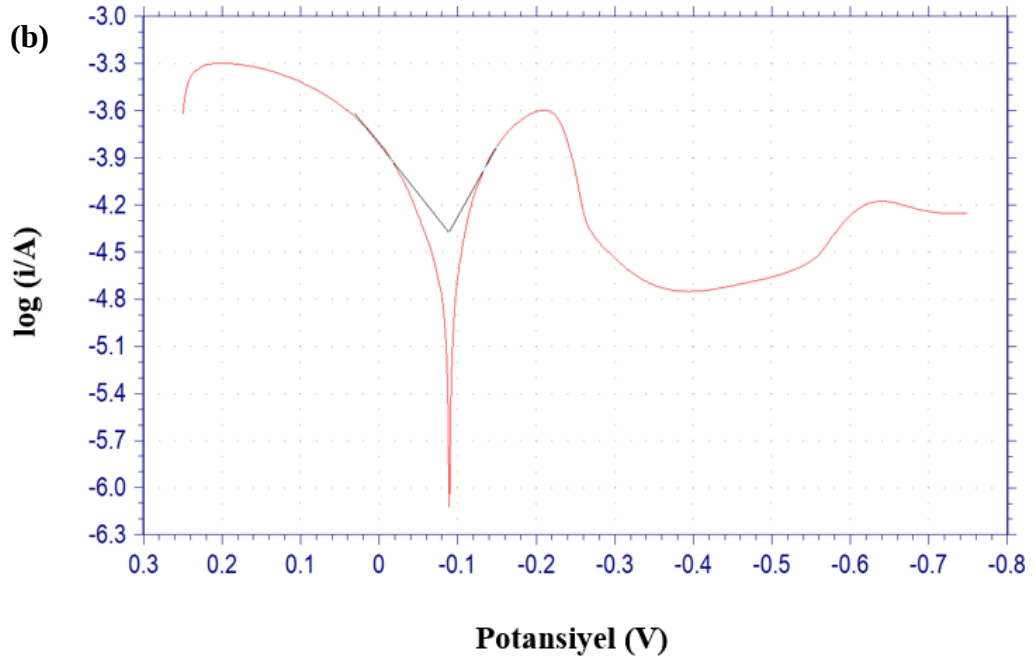
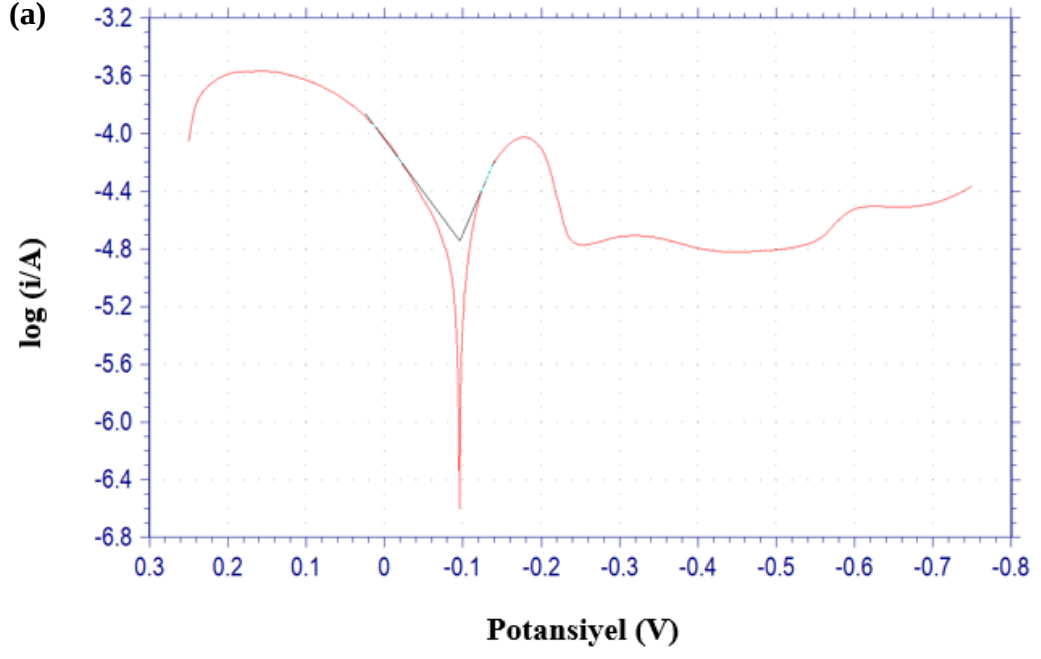
Numuneler	I_{kor} (A)	E_{kor} (V)	Korozyon Hızı (mpy)	R_p (ohm)
Kaplamasız - 1	$8,608 \times 10^{-5}$	-0,077	36,53	126
Kaplamasız - 2	$6,682 \times 10^{-5}$	-0,068	28,36	212
100 μm -1	$2,426 \times 10^{-5}$	-0,096	10,29	898
100 μm -2	$3,089 \times 10^{-5}$	-0,089	13,11	547
200 μm -1	$1,224 \times 10^{-4}$	-0,138	51,93	160
200 μm -2	$9,563 \times 10^{-5}$	-0,123	40,58	170
300 μm -1	$7,929 \times 10^{-5}$	-0,107	33,65	378
300 μm -2	$9,092 \times 10^{-5}$	-0,122	38,58	179

Çizelge 7.5. incelendiğinde, 100 μm seramik üst kaplamalı numunelerin I_{kor} değerleri, kaplamasız numunelere göre daha düşüktür. 300 μm seramik üst kaplamalı numunelerin I_{kor} değerleri ortalaması ise, 200 μm seramik üst kaplamalı numunelerin I_{kor} değerleri ortalamasına göre kıyasla düşüktür. Numunelerin korozyon dayanımları R_p değerleri açısından karşılaştırıldığında, en yüksek ortalama R_p değerinin korozyon dayanımı en yüksek olarak belirlenen 100 μm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunelere ait olduğu gözlenmektedir.

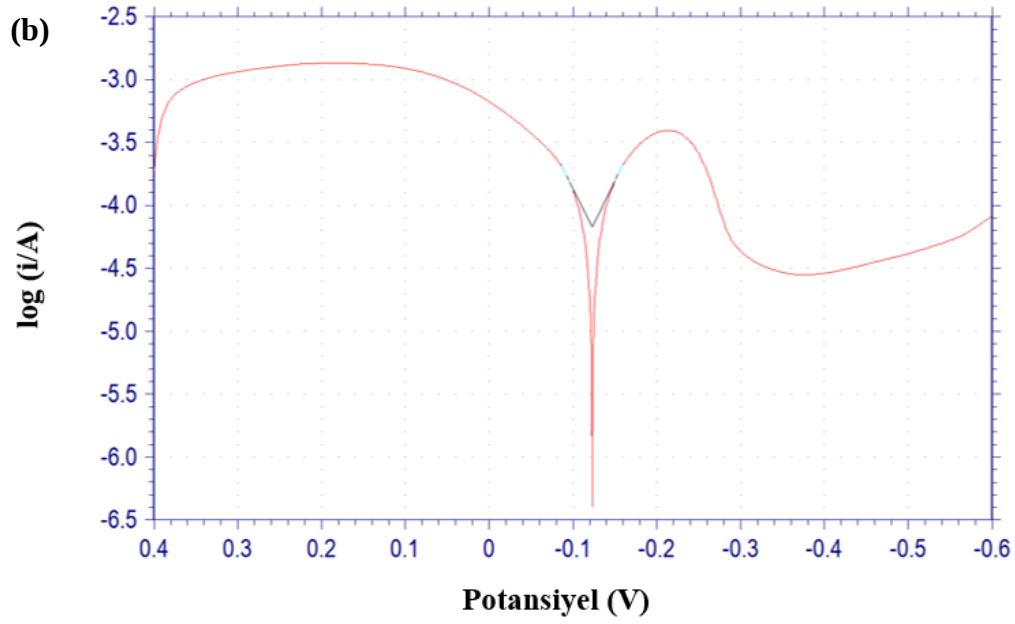
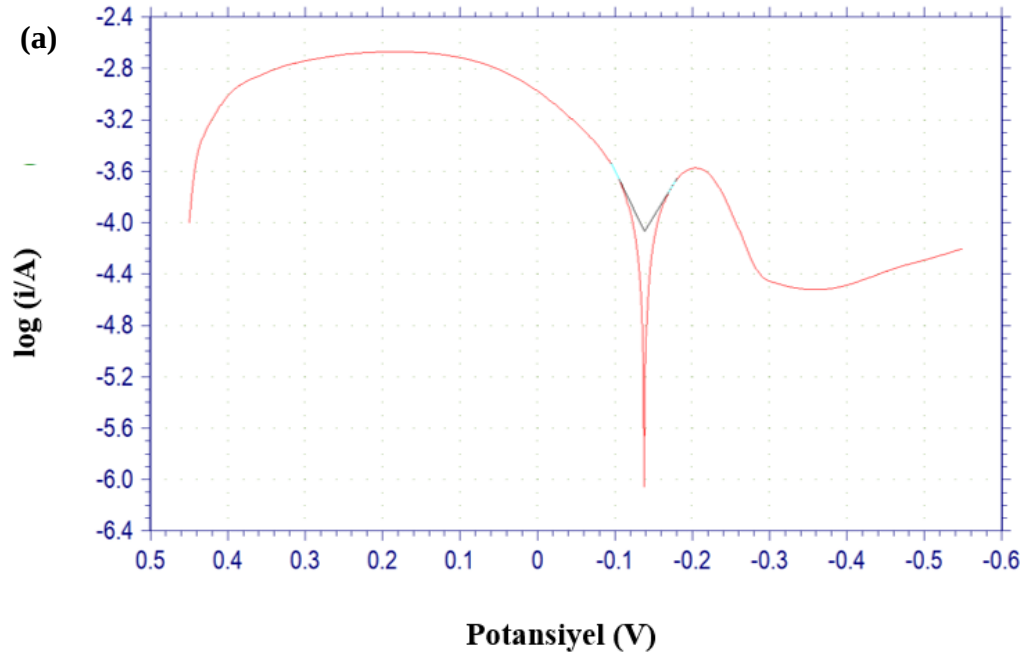
Korozyon potansiyeli, E_{kor} anodik ve katodik reaksiyon oranlarının tam olarak eşit olduğu potansiyeldir. E_{kor} 'daki anodik veya katodik reaksiyon oranı korozyon oranına eşittir. Anodik tafel eğimi (β_a) ve katodik tafel eğimi (β_c) pozitif sayılardır. Korozyon akım yoğunluğunun elde edilmesi yöntemi Tafel ekstrapolasyon yöntemi olarak adlandırılır [78].



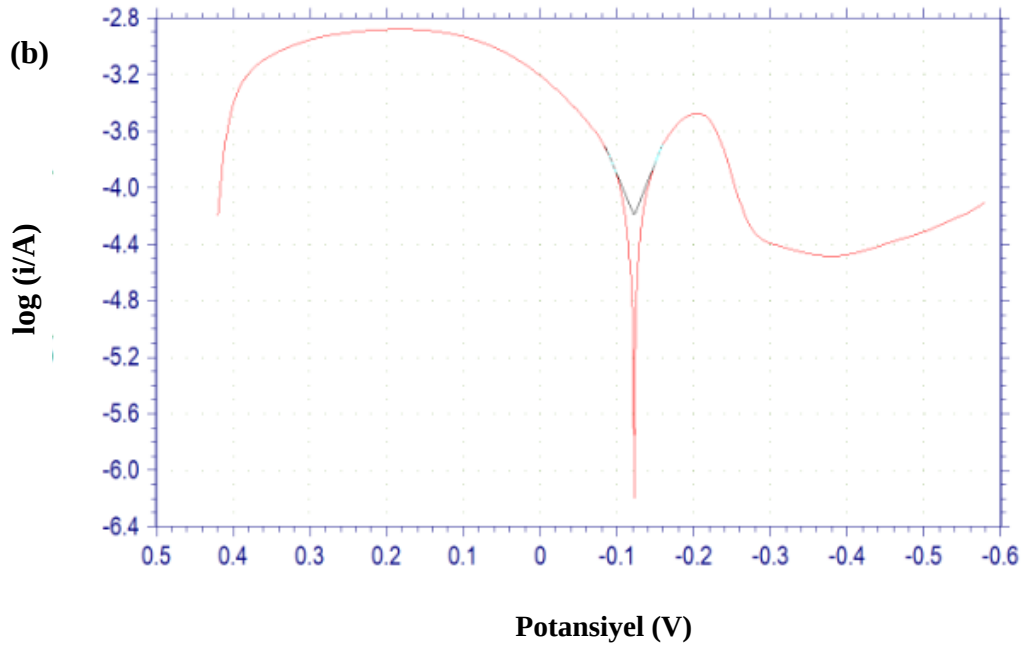
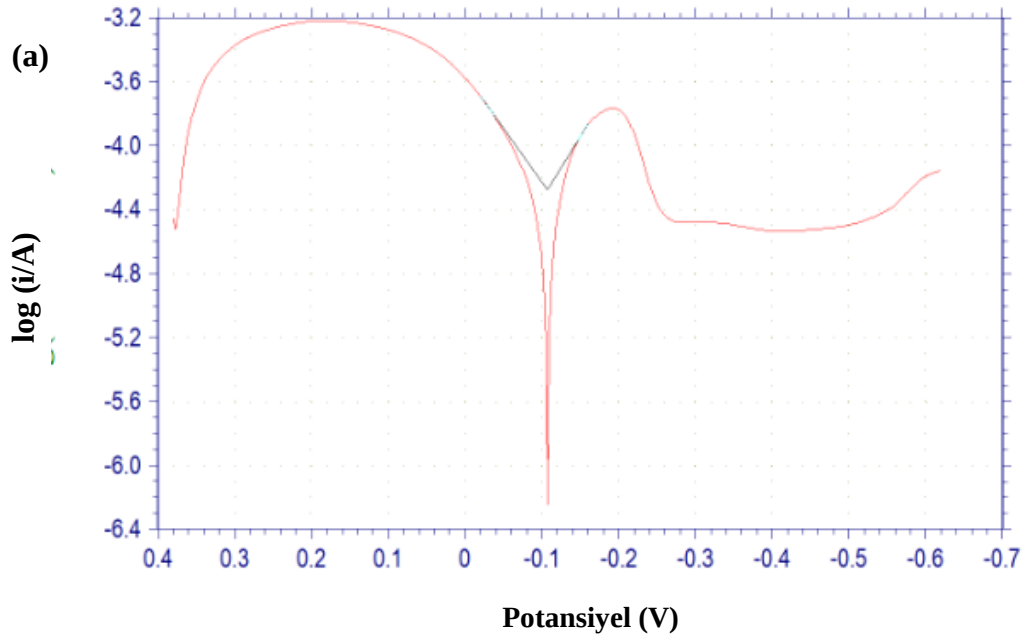
Şekil.7.18. Kaplamasız numunelere ait Tafel eğrileri (a) 1.numune (b) 2.numune.



Şekil.7.19. 100 μm seramik üst kaplamalı numunelere ait Tafel eğrileri (a) 1.numune (b) 2.numune.



Şekil.7.20. 200 μm seramik üst kaplamalı numunelere ait Tafel eğrileri (a) 1.numune (b) 2.numune.



Şekil.7.21. 300 µm seramik üst kaplamalı numunelere ait Tafel eğrileri (a) 1.numune (b) 2.numune.

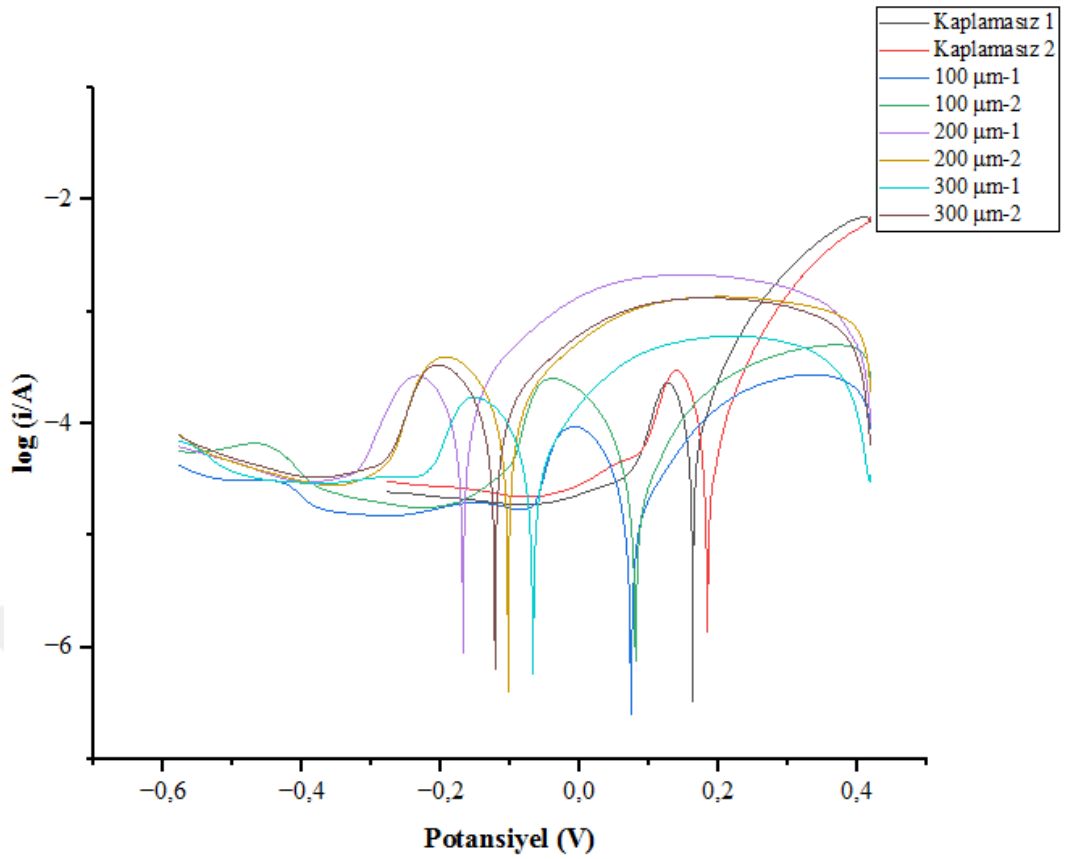
Korozyon hızı değerlerindeki azalma, korozyon dayanımında artışı ifade etmektedir. Elektrokimyasal korozyon testi sonucunda numunelerin korozyon hızları incelendiğinde, korozyon dayanımı en düşük olan numunelerin kaplamasız numuneler, korozyon dayanımı en yüksek olan numunelerin 100 µm kalınlığında seramik üst kaplamaya sahip numuneler olduğu görülmektedir. Korozyon dayanımı açısından en iyi performansı gösteren ikinci grup 300 µm kalınlığında seramik üst

kaplamaya sahip numunelerdir. 200 μm kalınlığında seramik üst kaplamaya sahip numunelerin korozyon dayanımının kaplamasız numunelerin korozyon dayanımına kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, termal bariyer kaplamalarda kaplama kalınlığı arttıkça, gerilimin artması ve buna bağlı olarak gözenek ve çatlak yoğunluğunda değişim meydana gelmesidir. 100 μm kalınlığında seramik üst kaplamaya sahip numunelerin en yüksek korozyon dayanımına sahip oluşu, bu şekilde açıklanabilir. 200 μm ve 300 μm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, 200 μm seramik üst kaplama kalınlığına sahip olan numunelerin gözenek ve çatlak yoğunluğunun daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge.7.6. Numunelere ait β_a ve β_c değerleri.

Numuneler	β_a (1/V)	β_c (1/V)
Kaplamasız - 1	17,689	22,485
Kaplamasız - 2	9,314	21,414
100 μm -1	7,350	12,618
100 μm -2	6,343	9,029
200 μm -1	12,259	9,891
200 μm -2	13,153	13,606
300 μm -1	6,778	7,738
300 μm -2	13,184	13,517

Çizelge.7.6.'daki verilere göre; korozyon dayanımı en yüksek olan 100 μm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunelerin ortalama olarak en düşük β_a değerlerini aldığını görülmektedir. Korozyon dayanımı en yüksek ikinci grup 300 μm kalınlığında seramik üst kaplamaya sahip numunelerin ortalama β_a değeri ise, 200 μm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunelerin ortalama β_a değerine kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. 200 μm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunelerin ortalama β_a değeri ile kaplamasız numunelerin ortalama β_a değeri birbirine çok yakındır.



Şekil.7.22. Tafel eğrilerinin karşılaştırılması.

Sadeghimeresht ve ark., 304L paslanmaz çelik üzerine HVAF tekniği ile üretilmiş Ni, NiCr, NiCoCrAlY ve CoNiCrAlY bağ kaplamalara sahip Cr_3C_2 -NiCr kaplamalı numuneleri, 25 °C'de ağırlıkça %3.5 NaCl çözeltisinde elektrokimyasal ve daldırma testlerine tabi tutmuşlardır. İki katmanlı kaplamaların polarizasyon direnci (R_p), farklı Ni, NiCr, NiCoCrAlY ve CoNiCrAlY bağ kaplamaları için sırasıyla, 77, 189, 487 ve 74 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ olarak gözlemlenmiştir. 304L substrat için R_p değeri 101 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ve tek katmanlı Cr_3C_2 -NiCr kaplama için 30 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ olarak bildirilmiştir. R_p değerlerine göre kıyaslama yapıldığında da en yüksek R_p değerine sahip olan NiCoCrAlY kaplamalı numunenin en yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu görülmüştür [78].

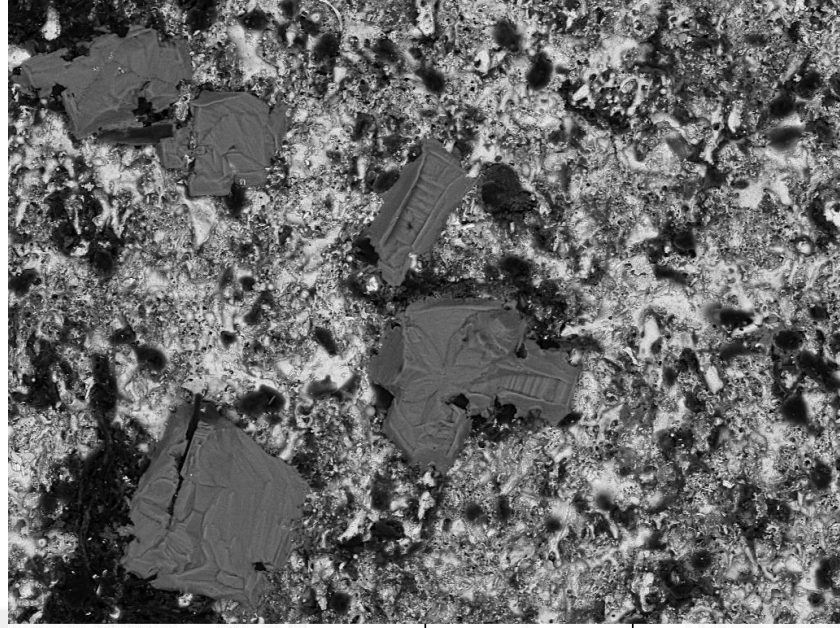
Altan E., yaptığı çalışmada, kaplamasız Inconel 718 numuneyi, HVOF yöntemi ile bağ kaplaması yapılmış Inconel 718 numuneyi ve HVOF yöntemi ile bağ kaplaması APS yöntemiyle seramik üst kaplaması üretilmiş Inconel 718 numuneyi elektrokimyasal korozyon testine tabi tutmuştur. Kaplamasız Inconel 718 numunenin elektrokimyasal korozyon testi sonrası SEM görüntülerinde yüzeyde tuz kristallerinin biriktiği bildirilmiştir. Kaplamasız Inconel 718, bağ kaplamalı Inconel 718 bağ ve seramik üst kaplamalı numunelere ait i_{kor} değerleri sırasıyla 4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 0,7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dir.

Korozyon dayanımının en düşük olarak gözlendiği kaplamasız Inconel 718 numunesine ait I_{kor} değeri en yüksek değeri almıştır [55]. Bu durum bizim çalışmamızda da görülmekte ve I_{kor} değeri korozyon dayanımı arasındaki ilişkiyi destekler niteliktedir.

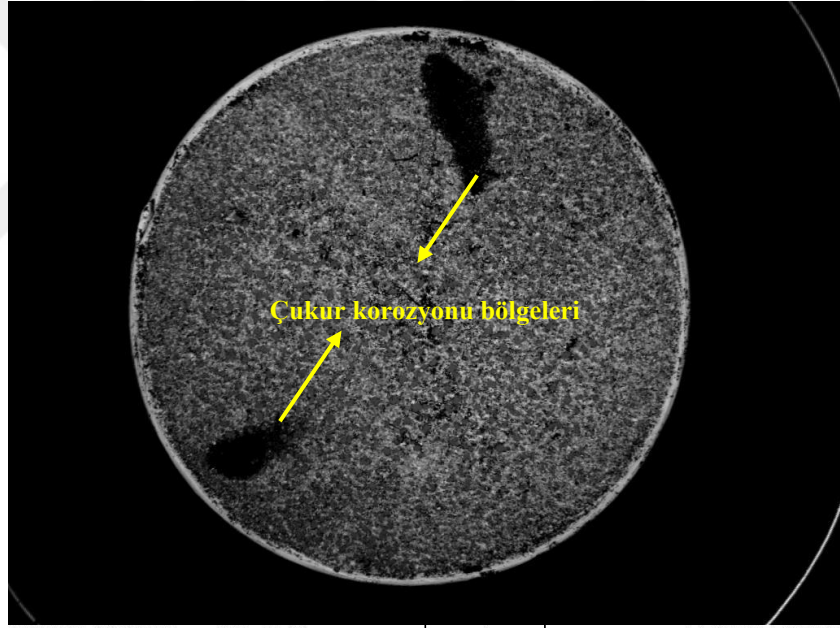
Khajezadeh ve ark., çalışmalarında, nikel esaslı Inconel 738 altlık malzemesine HVOF yöntemi ile CoNiCrAlY tozları bağ kaplama olarak, APS yöntemi ile ise ilk katman olarak %10 La_2O_3 -%90 YSZ ve son katman olarak %100 YSZ seramik üst katmanları biriktirilmiştir. Kaplama prosesinden sonra numuneler, 400 saat boyunca $880^\circ C$ 'de Na_2SO_4 - %20 V_2O_5 tuz ortamında sıcak korozyona uğratılmıştır. Sıcak korozyonun ardından numuneler yine Na_2SO_4 - %20 V_2O_5 tuz ortamında elektrokimyasal korozyon testine tabi tutulmuşlardır. Sıcak korozyon ve elektrokimyasal korozyon testlerinin ardından, sıcak korozyon sırasında TGO oluşumuna bağlı olarak, I_{kor} değerlerindeki azalmayla birlikte korozyon dayanımında artış meydana geldiği bildirilmiştir [79].

7.6.1. Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası SEM Analizleri

Nikel esaslı süper alaşımlar da, diğer alaşımlar gibi düzgün korozyon ve ya lokalize korozyon tiplerine maruz kalabilir. Şekil.5.22.'de altlık malzeme ve termal bariyer kaplamalı numunelerde %3,5 NaCl çözeltisi ile elektrokimyasal korozyonu sonrası, lokalize korozyon tipinin olduğu ve kare şekle benzer yapıda NaCl tuzlarının biriktiği gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, seramik üst kaplamanın APS yöntemi ile üretilmiş olmasından kaynaklı olarak, elektrokimyasal korozyon testi sonrası numune yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde yüzeysel çatlaklar ve yoğun porozite gözlemlenmektedir.

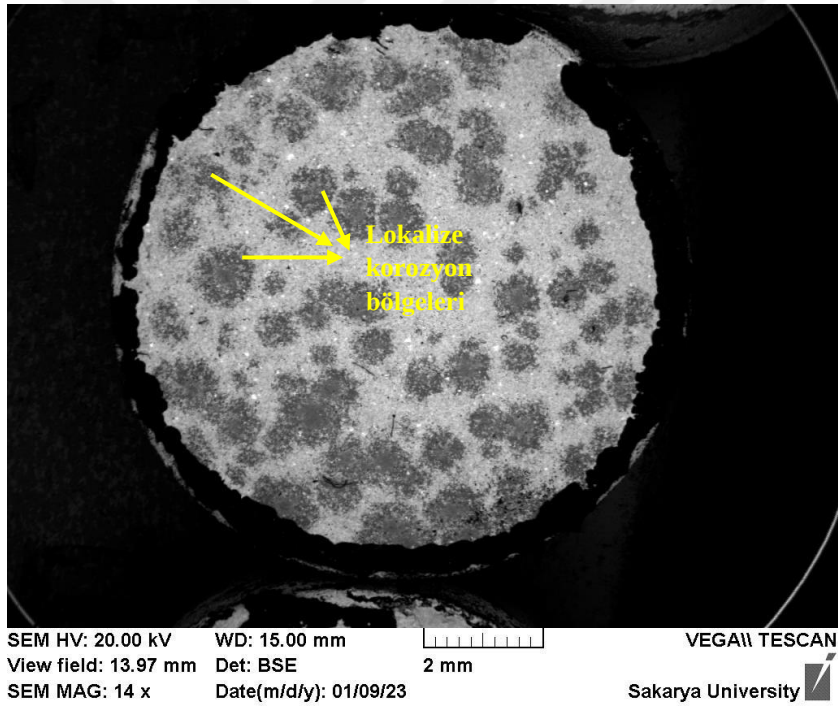
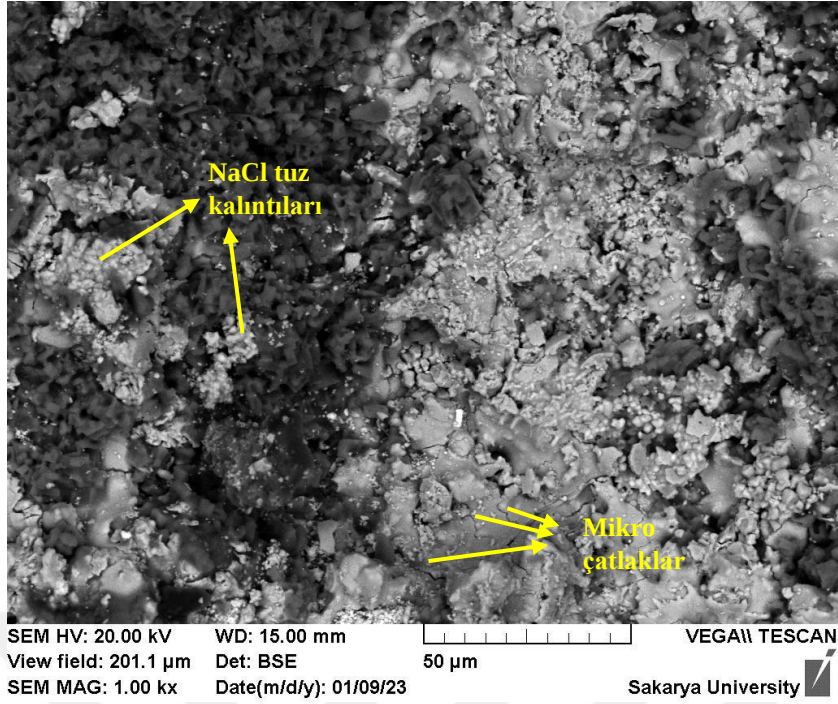


SEM HV: 20.00 kV WD: 15.00 mm View field: 804.3 μ m Det: BSE SEM MAG: 250 x Date(m/d/y): 01/09/23 VEGA\\ TESCAN Sakarya University

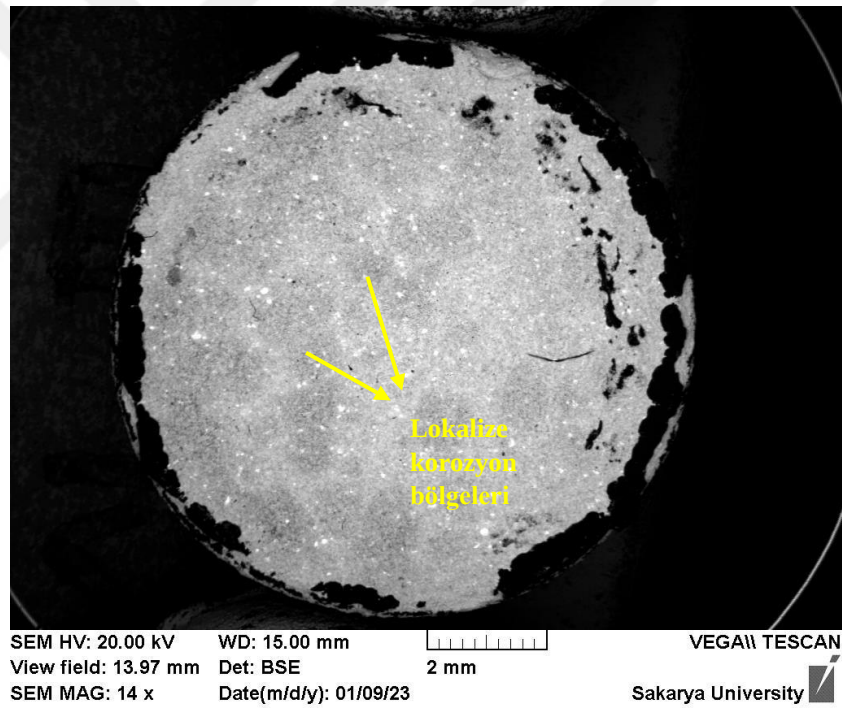
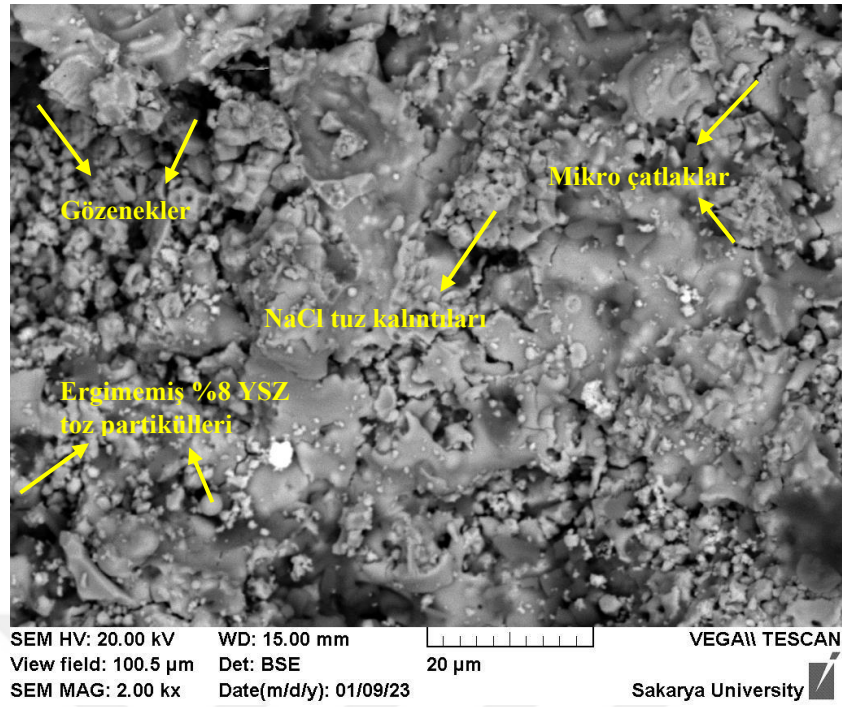


SEM HV: 20.00 kV WD: 15.00 mm View field: 13.97 mm Det: BSE SEM MAG: 14 x Date(m/d/y): 01/09/23 VEGA\\ TESCAN Sakarya University

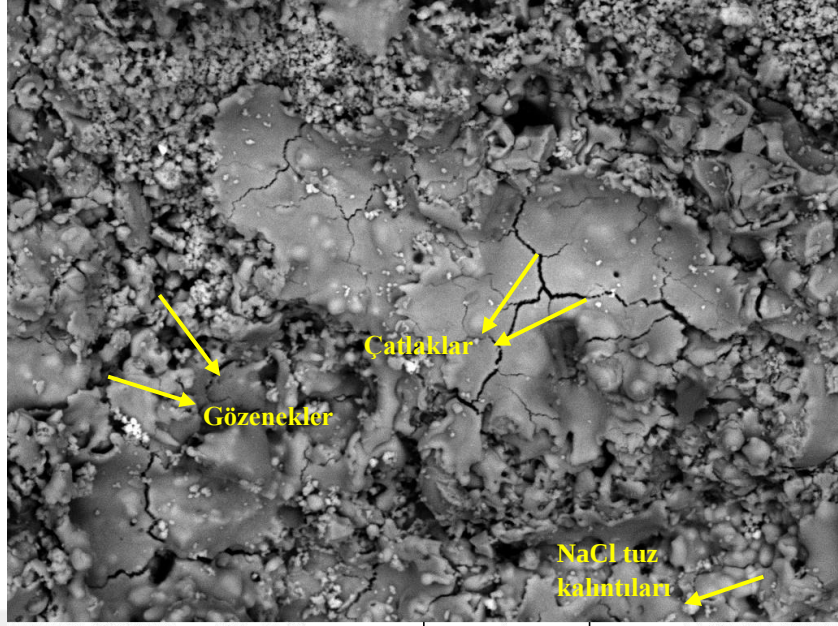
(a)



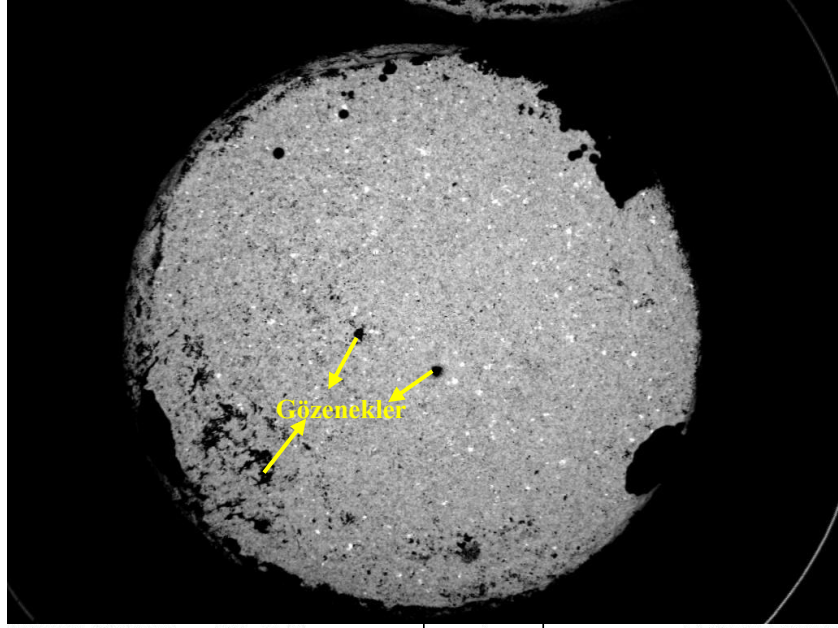
(b)



(c)



SEM HV: 20.00 kV WD: 15.00 mm
View field: 100.5 μ m Det: BSE
SEM MAG: 2.00 kx Date(m/d/y): 01/09/23
20 μ m VEGA|| TESCAN
Sakarya University



SEM HV: 20.00 kV WD: 15.00 mm
View field: 13.97 mm Det: BSE
SEM MAG: 14 x Date(m/d/y): 01/09/23
2 mm VEGA|| TESCAN
Sakarya University

(d)

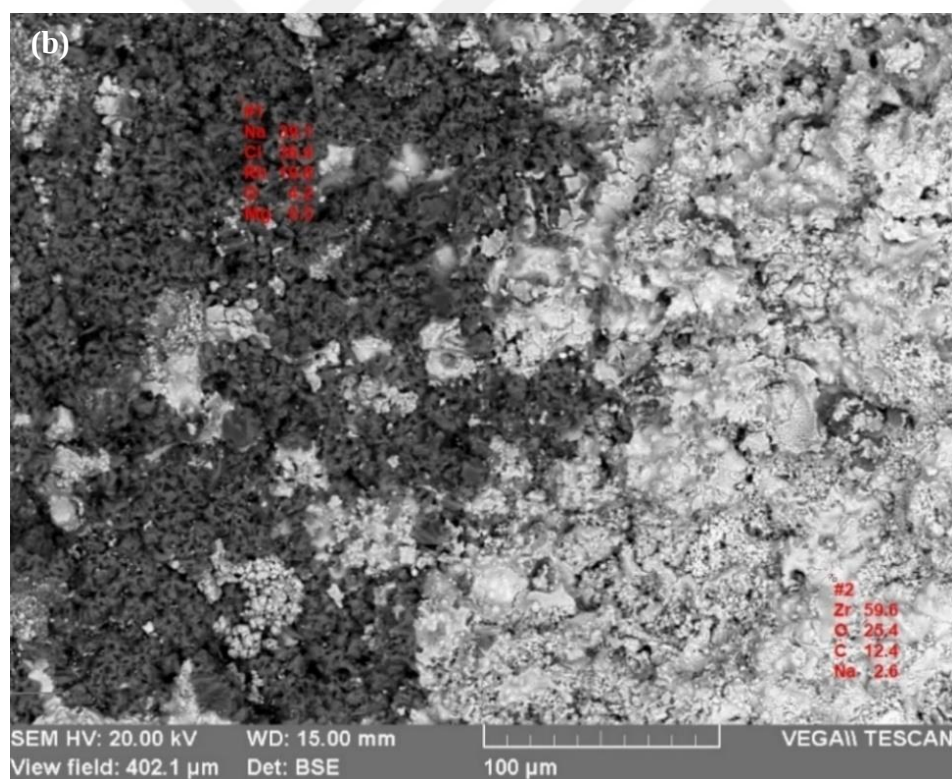
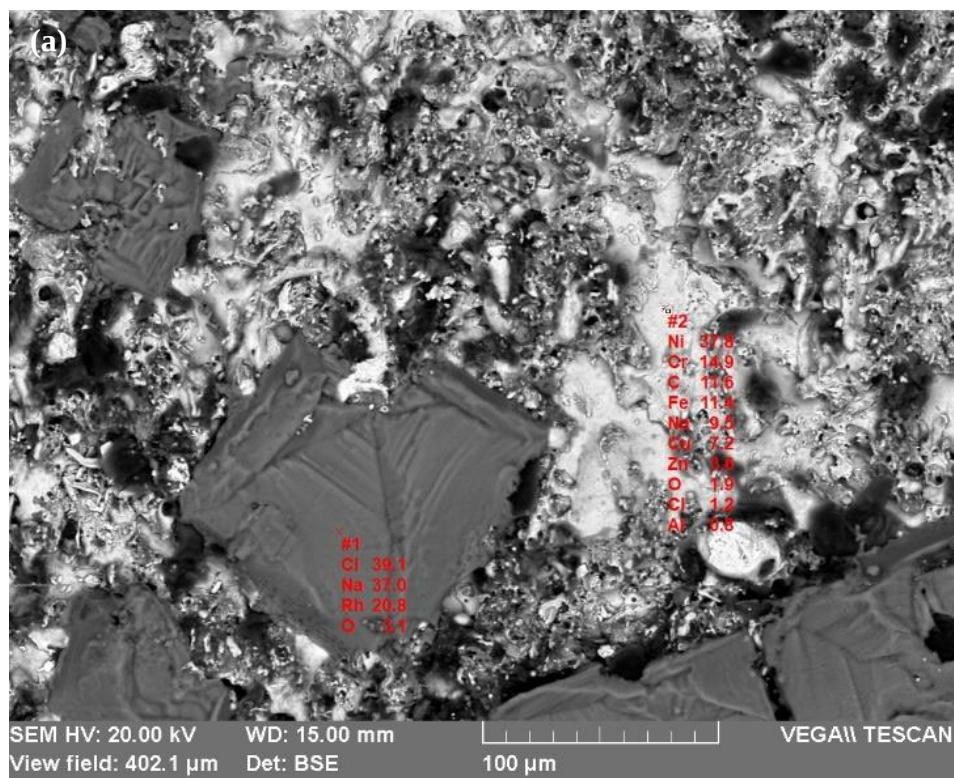
Şekil.7.23. Elektrokimyasal korozyon testi sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri.
(a) Altlık malzeme Inconel 601. (b) 100 μ m (c) 200 μ m (d) 300 μ m seramik üst kaplama kalınlığına sahip numuneler.

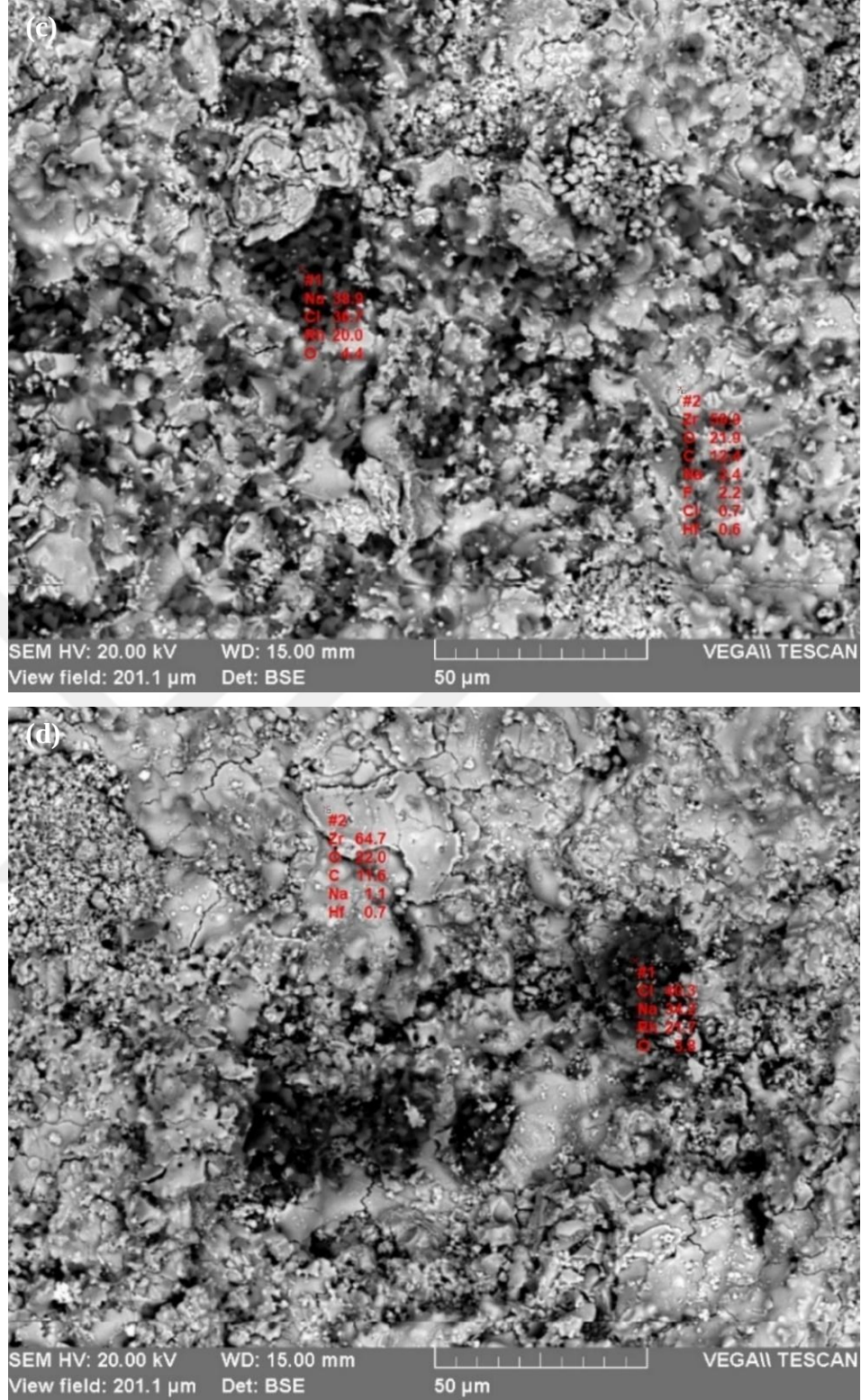
Şekil.7.23’de yer alan kaplamasız ve kaplamalı numunelerin %3,5 NaCl çözeltisi ile elektrokimyasal korozyona uğratılmasının ardından numunelerin yüzeyinden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, altlık malzeme Inconel 601’e ait SEM görüntülerinde, kaplamalı numunelere kıyasla daha büyük boyutta çukur korozyonu

ve daha yoğun lokalize korozyon bölgelerinin meydana geldiği görülmektedir. Elektrokimyasal test parametrelerine göre korozyon hızı en düşük yani korozyon dayanımı en yüksek olan 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin SEM görüntülerinde seramik kaplama üzerinde lokalize korozyon çok daha yoğun olsa da gözenek yoğunluğu diğer kaplamalı numunelere kıyasla daha düşük oranda gözlenirken, 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin SEM görüntülerinde ise lokalize korozyonun oluşmadığı ancak gözenek oranının arttığı gözlemlenmekte ve buna bağlı olarak da %3,5 NaCl çözeltisinin altlık malzemeye ulaşarak korozyon hızının 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunelerin korozyon hızına kıyasla çok daha yüksek oluşunu destekler niteliktedir. 200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin SEM görüntülerinde ise lokalize korozyon yoğunluğunun 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin lokalize korozyon yoğunluğuna göre azaldığı ve elektrokimyasal korozyon testi sonrası gözenek oranının en yüksek olduğu numune olduğu gözlemlenmektedir. Buna bağlı olarak bu numunelerin korozyon dayanımının düşük olmasının nedeni, elektrokimyasal korozyon testi sonrası numunenin gözenek oranının yüksek oluşundan kaynaklanmaktadır. Kaplamalı numunelerde ise 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numuneye kıyasla daha düşük korozyon dayanımına sahip olan 200 µm ve 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunelerin SEM görüntülerinde daha yoğun çatlaklar izlenmektedir.

7.6.2. Elektrokimyasal Korozyon Testi Sonrası EDS Analizleri

Genellikle NiCrAlY tozu, nikel esaslı süper alaşım altlık malzeme ile karşılaştırıldığında daha iyi bir oksidasyon ve sıcak korozyon direnci sağlaması için çok daha yüksek Al ve Cr oranına sahiptir. Koroziif saldırı sırasında NiCrAlY kaplamadan altlık malzemeye Al interdifüzyonu gerçekleşmektedir. Ayrıca, krom tükenmesi, ergimiş tuz ile elektrokimyasal korozyona maruz kalan alaşımlarda gözlemlenir[77]. Bu nedenlerden ötürü, Şekil.7.24’de verilen elektrokimyasal korozyon testi sonrası kaplamalı numuneler için yüzeyden alınan EDS analizlerinde Al ve Cr elementlerine rastlanılmamıştır.





Şekil.7.24. Elektrokimyasal korozyon testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizleri.
(a) Altlık malzeme Inconel 601. (b) 100 µm (c) 200 µm (d) 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numuneler.

Şekil.7.24.'de de görüldüğü üzere, elektrokimyasal korozyon sonrası altlık malzeme ve kaplamalı numunelere ait EDS analizlerinde Na ve Cl elementlerine rastlanılmıştır.

Bu durum, %3,5 NaCl çözeltisi tuz kalıntılarının numuneler üzerinde varlığını göstermektedir. Kaplamasız ve kaplamalı numunelerde 1 ile numaralandırılan bölgelerde NaCl tuzu kalıntılarının daha yoğun olduğu göze çarpmaktadır. 2 ile numaralandırılan bölgelerde ise, 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunede %59,6 Zr, %25,4 O, %12,4 C ve %2,4 Na elementleri, 200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunede %59,9 Zr, %21,9 O, %12,4 C, %2,4 Na, %2,2 F, 0,7 Cl, 0,6 Hf elementleri, 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunede ise %64,7 Zr, %22,0 O, %11,6 C, %1,1 Na, %0,7 Hf elementleri dedekte edilmiştir. Zr ve O elementleri zirkonya kaynaklı, Na ve Cl elementlerinin tuz kalıntılarından kaynaklı ve C, F ve Hf elementlerinin ise altlık malzemeden minör difüzyon nedeniyle dedekte edildiği düşünülmektedir. Kaplamasız numunede 2 ile numaralandırılan bölgede, %37,8 Ni, %14,9 Cr, %11,6 C, %11,4 Fe, %9,5 Na, %7,2 Cu, %3,6 Zn, %1,9 O %1,2 Cl, %0,8 Al elementleri dedekte edilmiştir. Bu veriler, Şekil. 7.7.'de verilen EDS verileri ile karşılaştırıldığında özellikle Ni, Cr ve Fe element yüzdelерinin azaldığı göze çarpmaktadır. Bahsi geçen bu bölgede, NaCl tuz kalıntılarının yoğunluğundan dolayı Ni, Cr ve Fe elementlerinin az bulunduğu söylenebilir.

Song Y. ve ark., NaCl ve su buharı ile NiCrAlY + YSZ termal bariyer kaplamanın 1050 °C'deki döngüsel korozyon davranışını test etmişlerdir. Kaplamanın başarısızlığı esas olarak bağ kaplaması ile YSZ arasında ara yüzeye yakın bir bölgede meydana gelmiş, NaCl buharı ile gerçekleştirilen 50 döngü korozyon testi sonucunda tetragonal ZrO₂'den monoklinik ZrO₂'ye faz dönüşümü gözlenirken, NaCl + su buharı ile gerçekleştirilen korozyon testi sonucunda ZrO₂'nin faz dönüşümü olmadığı ve korozyon testlerinde su buharı mevcudiyetinde TGO kalınlığının arttığını bildirmişlerdir [80].

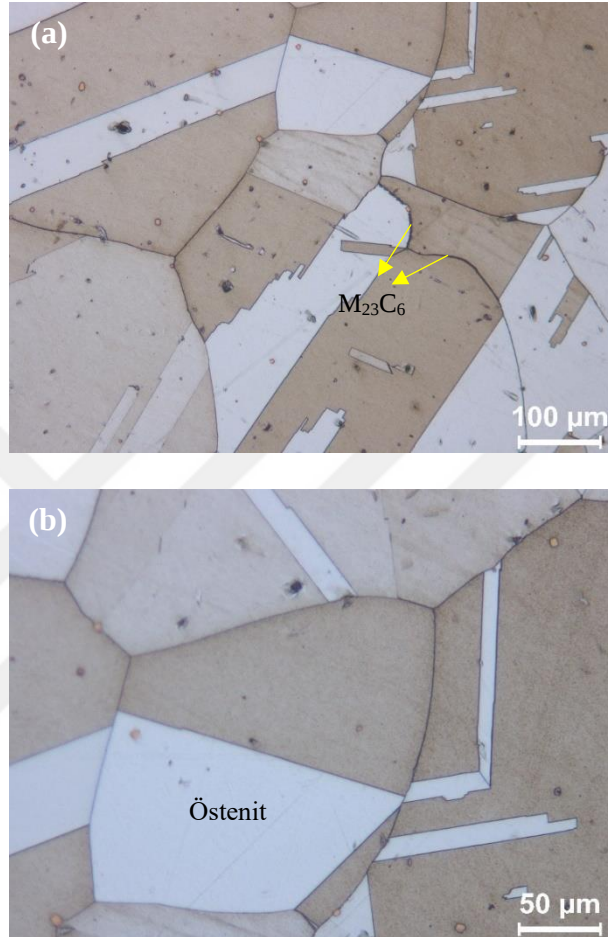
7.7. Termal Şok Testi Sonuçları

Termal şok testi sırasında kaplamanın hızlı bir şekilde ısıtılması ve soğutulması, oksit tabakasında meydana gelebilecek hasarı artırmaktadır. Termal şok ve bozulma karşısında kaplama dayanıklılığı, kaplama tozlarının yapışmasına ve oksit tabakasına bağlı olarak değişebilmektedir. Üst kaplamanın kırılma tiplerinden biri, TGO tabakasının büyümesinden kaynaklanan arayüzün yakınındaki üst kaplamanın parçalanmasıdır [57]. 7.7.1. ve 7.7.2.'de 1200 °C sıcaklıkta 8 döngü şeklinde gerçekleştirilen termal şok testi sonrası optik mikroyapı görüntüleri, SEM görüntüleri

ve EDS analizleri verilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

7.7.1. Termal Şok Testi Sonrası Inconel 601 Mikroyapısı

Şekil.7.25’de termal şok testi sonrası altlık malzeme Inconel 601 e ait optik mikroyapı görüntüleri verilmiştir.

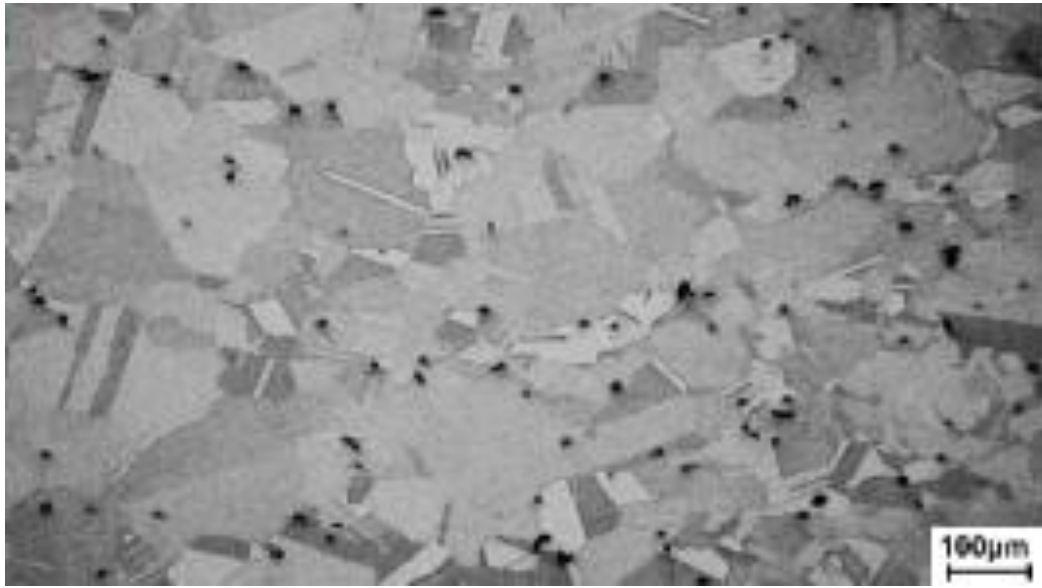


Şekil.7.25. Termal şok testi sonrası altlık malzeme Inconel 601 e ait optik mikroyapı görüntüleri. (a) 100 µm (b) 50 µm skala.

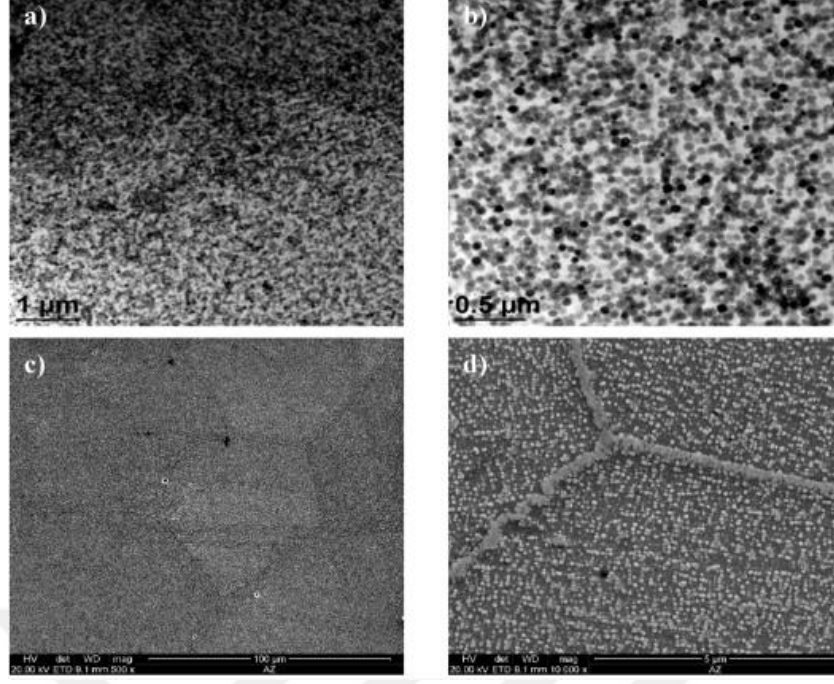
Süper alaşımlarda çökeltilerin boyut dağılımı ısıtılma işlem sıcaklığından etkilenmektedir. Optimum ısıtılma işlem sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklara maruz kalan süper alaşımlarda çökelti kabalaşması veya daha da yüksek sıcaklıklarda çözünme gerçekleşmektedir. Kısa süreli yüksek sıcaklık özellikleri için, küçük, ince dağılmış γ' çökelti parçacıkları arzu edilmektedir [81]. 1200 °C 8 döngü şeklinde gerçekleştirilen termal şok testi sonrası 2:50:40 oranlarında sırasıyla $CuCl_2$, C_2H_5OH ve HCl ile hazırlanan dağlama çözeltisiyle dağlanan altlık malzeme Inconel 601’e ait optik mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, östenitik bir tane yapısı gözlemlenmektedir. Inconel 601 için optimum ısıtılma işlem sıcaklığı 1095-1175°C aralığında olması nedeniyle

[81], γ' fazı ve karbür yapılarının çözündüğü düşünülmemektedir. γ' fazı ve karbür yapılarının mikroyapıda çok küçük olmasından kaynaklı, optik mikroyapı görüntülerinde konumlarını belirlemek zor olmasıyla birlikte, mikroyapı termal şok öncesi altlık malzeme mikroyapısından oldukça farklıdır.

Keogh M.M.'nin yaptığı çalışmada, 1021 °C sıcaklıkta bir saat çözelti tavlaması ve 760°C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırma sertleşmesi uygulanan ve 100 ml etanol, 100 ml HCl, 5 g CuCl ile hazırlanan dağlama çözeltisiyle dağlanan Inconel 718 nikel esaslı süper alaşımın mikro yapısı da benzer şekilde östenitik tane yapısı göstermektedir [82].



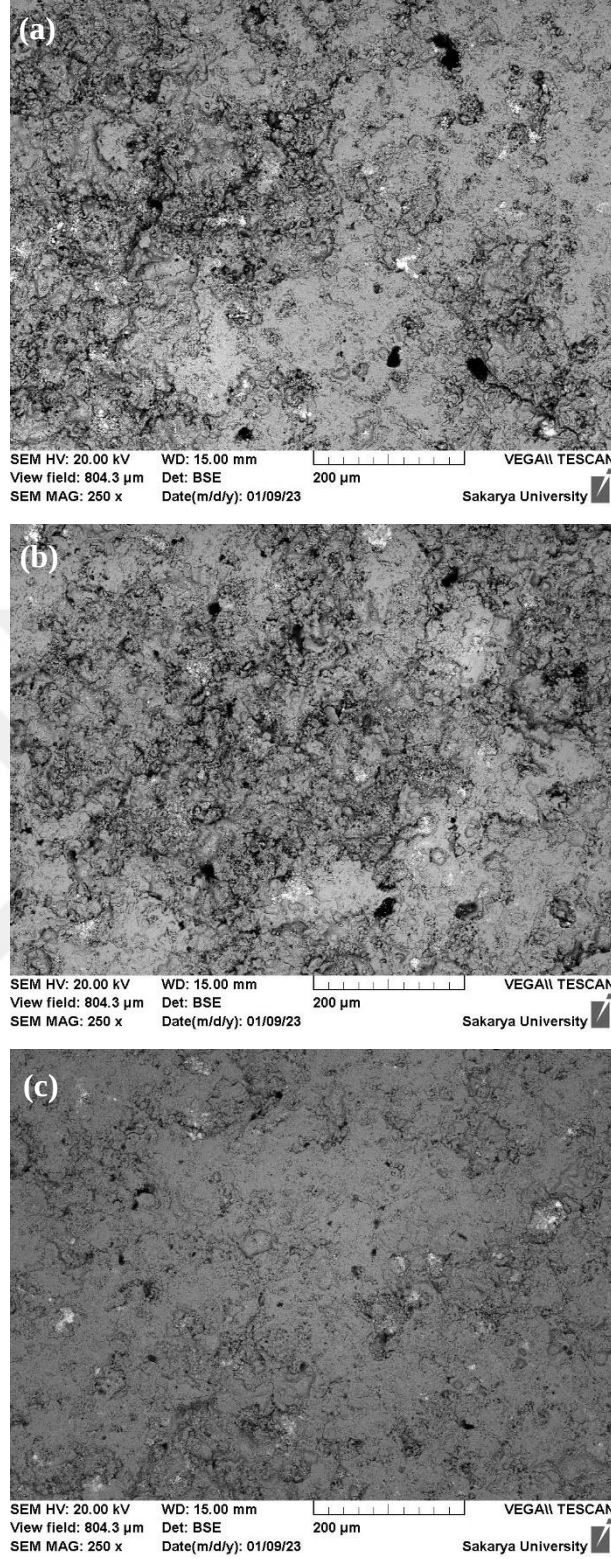
Şekil.7.26. 1021 °C sıcaklıkta bir saat çözelti tavlaması ve 760°C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırma sertleşmesi uygulanan Inconel 718 optik mikroyapısı [82].



Şekil. 7.27. 750 °C'de 1000 saat bekletildikten sonra Inconel 740H'nin mikro yapısı (a,b) Transmisyon elektron mikroskobu (c,d) taramalı elektron mikroskobu [83].

7.7.2. Termal Şok Testi Sonrası Kaplamalara Ait SEM Analizleri

Plazma sprey işlemi sırasında oluşan γ - Al_2O_3 fazının bir kısmı termal çevrim sırasında α - Al_2O_3 dönüşmektedir. Termal şok sonrası kaplama hasarının en büyük nedeni, faz dönüşümü nedeniyle gözlenen hacim ve porozite değişimidir. Bunun yanı sıra, APS yöntemi ile üretilen termal bariyer kaplamalar yoğun gözeneklilik içermesi nedeniyle TGO oluşumu sırasında meydana gelen hacim değişimi konusunda avantaj sağlamaktadır [4,51]. Termal şok testi sonrası alınan SEM görüntüleri yüzeyden alınması nedeniyle TGO katmanı gözlemlenememiştir. Ancak kaplamalarda çatlak oluşmamasından dolayı TGO oluşumu faz dönüşümü sırasında hacim değişiminin kaplamaya büyük oranda zarar verecek miktarda olmadığı ve seramik üst kaplamanın APS tekniği ile üretilmesine bağlı olarak seramik üst kaplamada porozite oranının yüksek oluşunun bu faz dönüşümü sırasındaki hacim değişimiyle kaplamanın parçalanarak zarar görmemiş olmasının nedeni olduğu düşünülmektedir.



Şekil.7.28. Termal şok testi sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri. (a) 100 μ m (b) 200 μ m (c) 300 μ m seramik üst kaplama kalınlığına sahip numuneler.

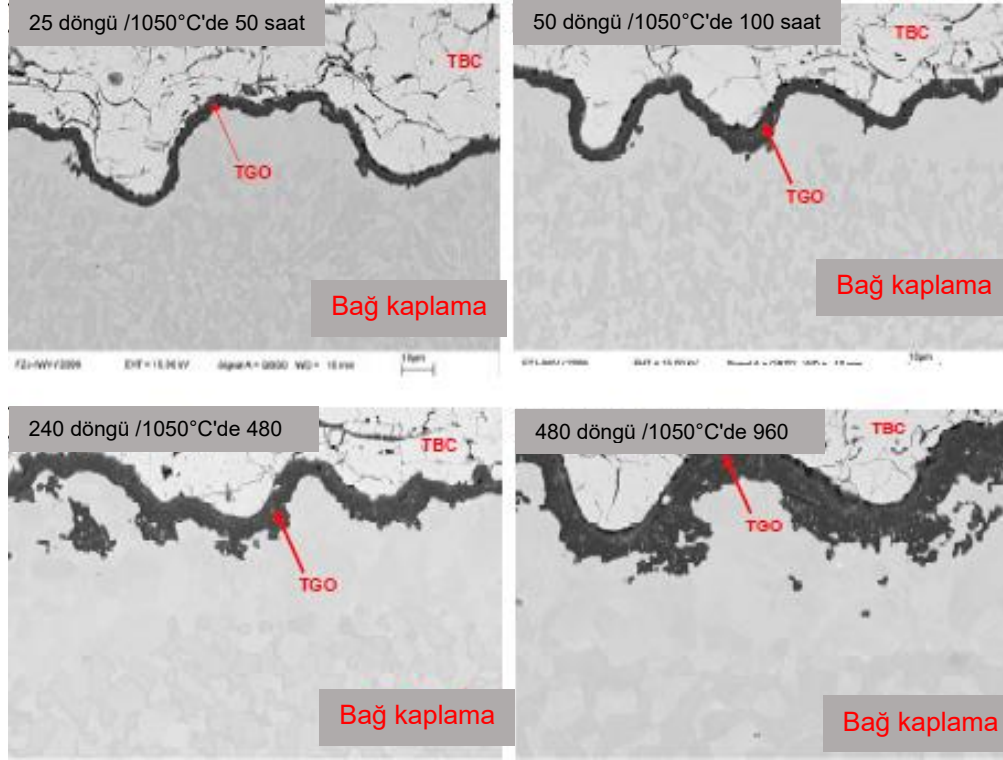
Şekil.7.28’de termal şok testi sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Termal şok testi sonrasında, özellikle 300 μ m seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunenin mikro yapısında %8 YSZ toz partiküllerinin birbirine yaklaştığı ve buna

bağlı olarak gözeneklilik ve kaplama içerisindeki süreksiz açıklıkların azaldığı görülmektedir.

Yüksek sıcaklıklarda ($>1000-1200$ °C), sinterlenme ve faz dönüşümü gibi ek mekanizmalar termal bariyer kaplamaların başarısız olmasına neden olmaktadır. APS yöntemi ile üretilen ve gözenekli bir yapıya sahip olan termal bariyer kaplamalarda, 900 °C üzerindeki sıcaklıklarda kaplama yapısında sinterlenme etkisi görülmektedir. Sinterlenme etkisi sonucunda termal iletkenlik artarken, bağ kaplama, seramik üst kaplama ve süper alaşım için sinterlenme hızı ve termal genleşme katsayısının uyumsuzluğu kaplamada ek gerilimlere neden olmaktadır [84-86].

1200 °C sıcaklıkta 8 döngü şeklinde gerçekleştirilen termal şok testi sonrasında kaplamalardaki gözeneklilik oranının düşmesi ve kaplama yoğunluğunun artmasının temel nedeni sinterlenme etkisidir. Ancak sinterlenme etkisine bağlı olarak gözeneklilik oranının azalması, daha yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreli servis koşullarında TGO tabakası kalınlığının artması göz önüne alındığında, kaplama bütünlüğü konusunda bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, termal şok testi sonrası incelenen mikro yapı görüntüleri doğrultusunda, Inconel 601 altlık malzeme için 100 ve 200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip olan numunelerin kaplamanın parçalanma ihtimali açısından çok daha güvenli olduğu söylenebilir.

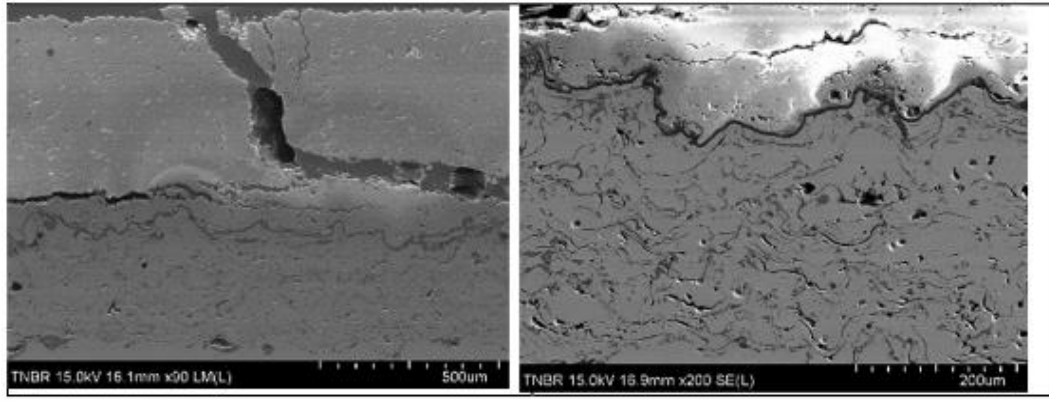
Kaplan M. ve Karaoğlu A.C., APS tekniği ile ürettikleri CoNiCrAlY bağ kaplama ve YSZ içeren seramik üst kaplamalı TBC'lere fırın termal döngü testleri yapmışlardır. Termal döngü testlerinin ardından kesit mikroyapısında kaplama ara yüzeyinde Al_2O_3 fazı başta olmakla birlikte Cr_2O_3 , (Co, Ni)O fazlarını gözlemlemişlerdir. Seramik üst kaplamada yüksek sıcaklığın etkisi ile sinterlenme etkisinin gerçekleştiğini bildirmişlerdir [87].



Şekil.7.29. CMSX-4 altlık malzemesine uygulanan NiCoCrAlY bağ kaplama ve APS %8 YSZ seramik üst kaplamanın 1050°C'de döngüsel oksidasyon altında yüksek sıcaklığa maruz kalmasının ardından TGO gelişimi [87].

Postolenko V., bağ kaplaması NiCoCrAlY ve seramik üst kaplaması APS %8 YSZ ile CMSX-4 altlık malzemesi üzerine termal bariyer kaplama uygulaması sonrası, 25 termal döngüden sonra (1050°C'de 50 saat) ince bir TGO katmanının oluştuğunu, TGO kalınlığı artışının yüksek sıcaklığa maruz kalma süresinin artışı ile birlikte gerçekleştiğini, 1050°C'de 960 saate karşılık gelen, 480 termal döngüden sonra numunede en kalın TGO gözlemlendiğini bildirmiştir [86].

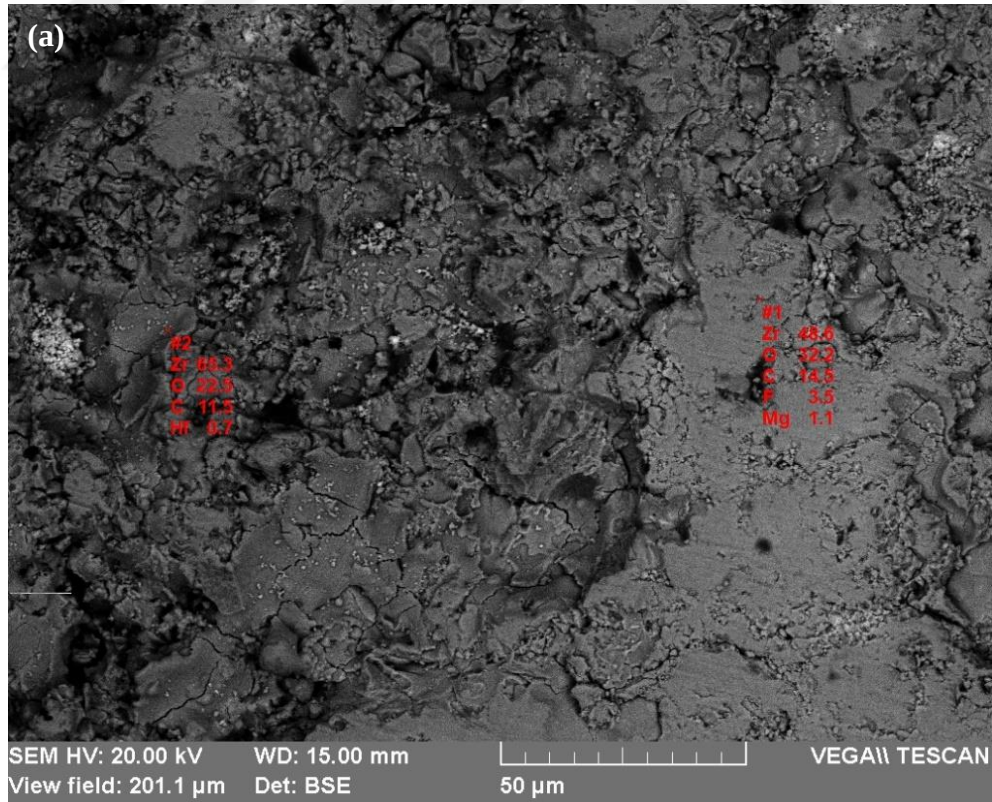
Johari A.D. ve diğerleri, Nimonic 263 süper alaşımı üzerine APS yöntemiyle dubleks YSZ ve beş katmanlı GZ uygulamışlardır. TBC örnekleri 1100 °C'de 100 saat süreyle gerçekleştirilen spre ve izotermal ısı işlem testine tabi tutulmuştur. YSZ TBC, izotermal ısı işleminden sonra, esas olarak termal döngü testi sırasında oluşan gerilimler ve termal spre uygulamasından kaynaklanan çatlakları absorbe edememesi nedeniyle başarısız olduğunu düşünülmektedir [88].

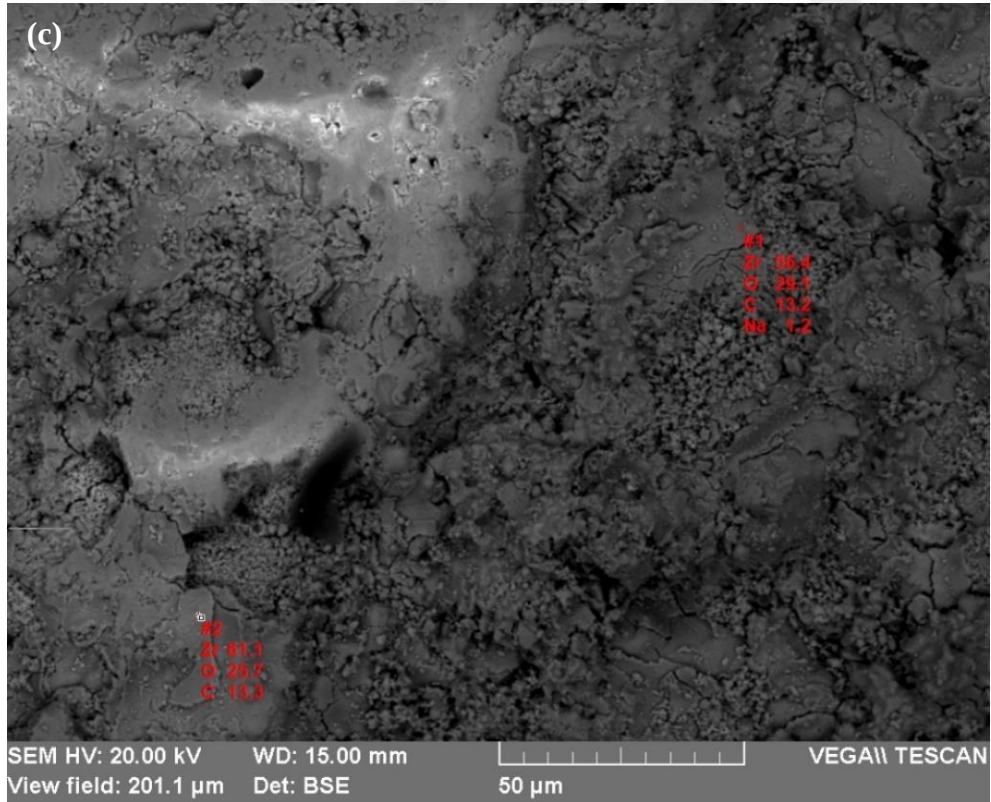
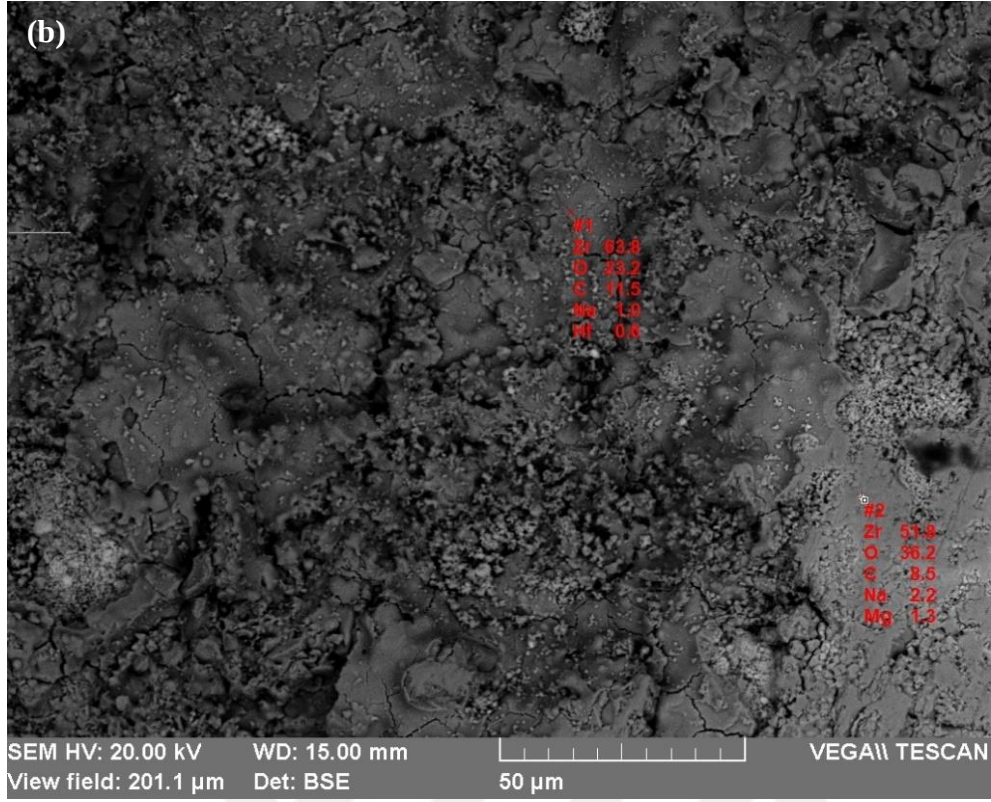


Şekil.7.30. Termal döngüden (1 döngü) sonra ısıt işlem görmüş YSZ kaplamanın enine kesit mikro yapısı [88].

7.7.3. Termal Şok Testi Sonrası Kaplamalara Ait EDS Analizleri

Şekil.7.30.'da 100 µm, 200 µm ve 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunelerin termal şok testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizleri verilmiştir. 1200 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde, bağ ve seramik üst kaplama arasında TGO tabakasında oluşan Al_2O_3 , Cr_2O_3 ve karışık oksit oluşumuna bağlı olarak, yüzeyden alınan EDS verilerinde Al ve Cr elementlerine rastlanmamıştır.





Şekil.7.31. Termal şok testi sonrası yüzeyden alınan EDS analizleri. (a) 100 µm (b) 200 µm (c) 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numuneler.

1 ile numaralandırılan bölgelerde, 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunede %48,6 Zr, %32,2 O, %14,6 C, %3,5 F ve %1,1 Mg elementleri, 200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunede %63,8 Zr, %23,2 O, %11,5 C, %1 Na, %0,6 Hf elementleri, 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunede ise %56,4 Zr, %29,1 O, %13,2 C, %1,2 Na elementleri dedekte edilmiştir. 2 ile numaralandırılan bölgelerde ise, 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunede %65,3 Zr, %22,5 O, %11,5 C ve %0,7 Hf elementleri, 200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunede %51,8 Zr, %36,2 O, %8,5 C, %2,2 Na, %1,3 Mg elementleri, 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunede ise %61,1 Zr, %25,7 O, %13,3 C elementleri dedekte edilmiştir. Zr ve O elemetleri zirkonya kaynaklı, C, Na, Mg ve Hf elementlerinin ise altlık malzemedan minör difüzyon nedeniyle dedekte edildiği düşünülmektedir.

7.7.4. Termal Şok Testi Sonrası Mikrosertlik Ölçümleri

Termal şok testi sonrası mikrosertlik ölçümleri Çizelge 7.7.'de verilmiştir.

Çizelge. 7.7. Termal şok testi sonrası mikrosertlik ölçümleri.

Sertlik ölçümü alınan kısım	Sertlik değeri (HV 0,1)		
	1.ölçüm	2.ölçüm	Ortalama
100 µm kaplama	1276	1134	1205
200 µm kaplama	1142	1062	1102
300 µm kaplama	1048	1069	1058,5
Kaplamasız numune	924	841	882,5

Çizelge 7.4. ve Çizelge 7.7. karşılaştırıldığında, termal şok testi sonrası kaplamalardaki mikrosertlik değerlerinin termal şok testi öncesi kaplamalardaki mikrosertlik değerlerinin yaklaşık bir buçuk - iki katı olduğu görülmektedir. Kaplamasız altlık malzemenin termal şok testi sonrası mikrosertlik değerlerinin termal şok testi öncesi sertlik değerlerinin yaklaşık dört katı olduğu gözlemlenmektedir. Kaplamalardaki mikrosertlik değerlerindeki bu artış, seramik üst kaplamada meydana gelen sinterlenme etkisiyle birlikte gözeneklilik oranının düşmesi, buna bağlı olarak kaplama yoğunluğunun artmasına bağlanmaktadır. Vickers mikrosertliği, sertleştirme fazı γ' ın boyut, şekil, hacim oranı ve dağılımı ile ilişkilidir. Altlık malzemenin sertlik değerlerinin artışı ise, termal şok testi sonrası γ' fazı boyutunun küçülmesine buna

bağlı olarak da ince γ' fazı çökelmesiyle γ' hacim fraksiyonunun artmasına bağlanmaktadır. Bu sonuç, benzer şekilde literatürdeki diğer çalışmalarla da desteklenmektedir [89, 90].



8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Inconel 601 süper alaşımından imal edilen 16 mm çapında, 400 mm uzunluğundaki içi dolu çubuk numune, tel erozyon yöntemi ile kesilerek 16 mm ve 11,28 mm çaplarında ve 7 mm kalınlıkta numuneler elde edilmiştir. Ardından numunelere uygulanan termal bariyer kaplama sonrası incelenen korozyon ve termal şok dayanımlarına ait sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. 16 mm ve 11,28 mm çaplarında ve 7 mm kalınlıktaki numunelere, bağ kaplama için NiCrAlY tozu, seramik üst kaplama için %8 YSZ tozu kullanılarak seramik üst kaplama kalınlığı yaklaşık 100, 200 ve 300 μm , bağ kaplama kalınlığı ise yaklaşık 150 μm olan termal bariyer kaplamalar başarı ile üretilmiştir.
2. Altlık malzemelerin optik mikroyapı görüntülerinde, MC karbürleri, M_{23}C_6 karbürleri, γ' fazı, Ti bakımından zengin karbonitrürler, kristalleşmemiş taneler ve ikizlenmeler gözlemlenmiştir. Beklenildiği gibi, γ'' fazı gözlemlenmemiştir.
3. TBC kaplamalı numunelere ait SEM görüntülerinde seramik üst kaplamada gözenekler, çatlaklar ve ergimemiş parçacıklar gözlemlenmiştir. TBC uygulama tekniklerinin farklı oluşunun yanı sıra işlem parametrelerinden püskürtme mesafesi ve plazma ark gücü farklılıkları nedeniyle seramik üst kaplama ve bağ kaplama mikroyapılarında farklılıklar gözlemlenmiştir.
4. Altlık malzemeye ait EDS verilerinde Ni, Cr, Fe, Al, Ti ve Si elementleri gözlemlenmiştir. Bağ kaplamaya ait EDS verilerinde Ni, Cr ve Al elementleri ve ayrıca W, C ve Si elementleri de düşük oranda gözlemlenmiş olup bu durum, altlık malzemeden bağ tabakaya minör bir difüzyon olduğunu göstermektedir. Seramik üst kaplama ait EDS verilerinde ise Zr ve O elementleri gözlemlenmiştir. Y elementi yüzdesinin diğer elementlere göre çok daha düşük olması nedeniyle EDS verilerinde dedekte edilememiştir.
5. XRD analizlerinden Numune 1 için $\text{Y}_{0.19}\text{Zr}_{1.81}\text{O}_{3.90}$, Numune 2 için $\text{O}_{3.87}\text{Zr}_{1.74}\text{Y}_{0.26}$ ve ZrO_2 , Numune 3 için $\text{Y}_{0.19}\text{Zr}_{1.81}\text{O}_{3.90}$ ve ZrO_2 , Numune 4 için $\text{Ni}_{2.88}\text{W}_{0.32}\text{Cr}_{0.8}$, Ni_4 , CrNi ve Fe_4 difraksiyonları alınmıştır.
6. Elektrokimyasal korozyon hızları incelendiğinde, korozyon dayanımı en düşük olan numunelerin kaplamasız numuneler, korozyon dayanımı en yüksek olan

numunelerin 100 µm kalınlığında seramik üst kaplamaya sahip numuneler olduğu gözlemlenmiştir. TBC kaplamalı ve kaplamasız numuneler yüksek sıcaklık korozyonu açısından da değerlendirilebilir.

7. Elektrokimyasal korozyon sonrası numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, kaplamasız numunelerde hem çukur korozyonu hem lokalize korozyon gözlenirken, 100 ve 200 µm kalınlığında seramik üst kaplamaya sahip numunelerin lokalize korozyona uğradığı, 300 200 µm kalınlığında seramik üst kaplamaya sahip numunenin ise gözenek miktarının diğer numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
8. Termal şok testi sonrası altlık malzeme Inconel 601'de östenitik tane yapısı gözlenmiş olup, γ' fazı ve karbürler, mikroyapıda çok küçük olmasından kaynaklı olarak gözlemlenememiştir. İleride yapılabilecek benzer çalışmalarda, çok daha küçük skalalarda mikroyapı görüntüleri alınarak γ' fazı hacim fraksiyonları termal şok öncesi ve sonrası için incelenerek yorumlanabilir.
9. Termal şok testi sonrasında kaplamalardaki gözeneklilik oranının düşmesi ve kaplama yoğunluğunun artmasının temel nedeni sinterlenme etkisidir. 300 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip olan numunenin gözeneklilik miktarı, 100 ve 200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip olan numunelerin gözeneklilik miktarına kıyasla daha düşüktür. Daha yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreli servis koşullarında TGO tabakası kalınlığının artması göz önüne alındığında, Inconel 601 altlık malzeme için 100 ve 200 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip olan numunelerin kaplamanın parçalanma ihtimali açısından çok daha güvenlidir.
10. Kaplamaların termal şok testi öncesi ve sonrası mikrosertlik değerleri karşılaştırıldığında, termal şok sonrası mikrosertlik değerlerinin termal şok testi öncesi kaplamalardaki mikrosertlik değerlerinin yaklaşık bir buçuk - iki katı olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik değerlerindeki bu artışın nedeni, seramiklerin sinterlenme etkisinden kaynaklanmaktadır. Inconel 601 altlık malzemenin Vickers sertlik değerindeki artış ise γ' fazının hacim ve boyut değişimine bağlanmaktadır.
11. TGO tabakasının büyüme davranışını görebilmek ve faz dönüşümünü gözlemlemek adına, termal şok testi belirli döngü aralıklarında SEM kesit mikro yapısı, EDS ve XRD analizleri veya EPMA(Elektron prop mikro analiz) benzeri ileri karakterizasyon teknikleri kullanılarak yorumlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Çay V.V., Ozan S., *Süperalaşımlar ve Uygulama Alanları*, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, Cilt 3, Sayı 2, ss 178 – 188, 2005.
- [2] Akça E., Gürsel A., *A Review on Superalloys and IN718 Nickel-Based Inconel Superalloy*, Periodicals of Engineering and Natural Sciences, Vol.3. No.1., 2015.
- [3] Atmaca E.S., *Inconel 718 Süperalaşımlarının PVD Yöntemi ile AlTiN ve CrN Kaplanması ve Karakterize Edilmesi*, Gazi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Nisan 2015.
- [4] Reed R.C., *The Superalloys Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, ss 1-28, 55, 73-74, 283-335, 2006.
- [5] Donachie M.J. ve Donachie S.J., *Superalloys A Technical Guide*, Second Edition, ASM International, ss 25-39, 2002.
- [6] Watson J.E., *Superalloys, Production, Properties and Applications*, Nova Science Publishers, Inc. New York, ss 25-44, 128-130, 2011.
- [7] Heubner U., *Nickel Alloys*, CRC Press Taylor & Francis Group, Germany, ss 129-160, 2018.
- [8] *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*, ss 9-54, 287, 2000.
- [9] Galetz M.C. *Coatings on Superalloys*, Superalloys, Coatings for Superalloys, InTech, DOI:10.5772/61141, 2015.
- [10] Everhart J.L., *Engineering Properties of Nickel and Nickel Alloys*, Plenum Press, New York, ss 83-110, 1971.
- [11] Royer A., Bastie P., Veron M., *Temperature dependence of the structural order in the γ' phase of nickel base superalloy*, Scripta Materialia, Vol. 40, No. 8, pp. 955–961, 1999.
- [12] Meetham G.W., Prof.Dr.Voorde M.H. *Materials for High Temperature Engineering Applications*, Springer, ss 68-82, 39-50, 100-101, 140-144, 2000.
- [13] Raza S.S., *Superalloys: An Introduction with Thermal Analysis*, Journal of Fundamental and Applied Sciences, ISSN 1112-9867, 7(3), ss 364-374, 2015.
- [14] Tomihisa K., Kaneno Y., Takasugi T., *Phase Relation and Microstructure in Ni3Al–Ni3Ti–Ni3Nb Pseudo-ternary Alloy System*, Intermetallics 10, ss 247–254, 2002.
- [15] ASM Handbook, Vol 3, *Alloy Phase Diagrams*, ASM International, ss 1182-1183, 1992.
- [16] ASM Metals Handbook, Vol 2, *Non-Ferrous Alloys and Special Purpose Materials*, ASM International, ss 1363-1403, 1992.
- [17] Özdoğru E.F., *CrCoNi Süperalaşımlarının Yüksek Sıcaklık Oksidasyon ve Karbürizasyon Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, ss 3-8, 2002.
- [18] F. Campbell, *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, ASM International, Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, ss 323- 343, 563-578, 2008.
- [19] *Inconel Alloy 601*, Publication Number SMC-028, Special Metals Corporation, 2005.
- [20] ASM Handbook, Vol 09, *Metallography and Microstructures*, ASM International, ss 131-140, 590-649, 1992.
- [21] Vort G.F.V., *Metallographic Techniques for Superalloys*, Microscopy and Microanalysis 10(S02), DOI:10.1017/S1431927604883442, 2004.
- [22] Kitaguchi H., *Microstructure-Property Relationship in Advanced Ni-Based Superalloys*, Metallurgy - Advances in Materials and Processes, Dr. Yogiraj Pardhi (Ed.), InTech, ss 19-27, 2012.

- [23] Sims, C. T. *A History of Superalloy Metallurgy For Superalloy Metallurgists. Superalloys* ss 399–419, 1984.
- [24] MacKenzie D.S., Totten G.E., *Analytical Characterization of Aluminum, Steel, and Superalloys*, Taylor&Francis Group, ss 235-290, 2006.
- [25] Kontis P., Kostka A., Raabe D., Gault B., *Influence of composition and precipitation evolution on damage at grain boundaries in a crept polycrystalline Ni-based superalloy*. *Acta Materialia*, Vol 166, ss 158-167, 2019.
- [26] Lukasz R., Rutkowski B., ve diğ. *Analysis of γ' Precipitates, Carbides and Nano-Borides in Heat-Treated Ni-Based Superalloy Using SEM, STEM-EDX, and HRSTEM*, *Materials*, 13(19), ss 4452.
- [27] Mohamed A., Pumwa J., *Micromechanism and Failure Analysis of Inconel 601*, Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bangkok, Thailand, 2019.
- [28] Ruzic J., Goto K., Watanabe I., Osada T., Wu L., Ohmura T., *Temperature-dependent deformation behavior of γ and γ' single-phase nickel-based superalloys*, *Materials Science & Engineering A*, 818 ,141439, 2021.
- [29] Mattox D.M., *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, Second Edition, William Andrew Publishing, ss 1-3, 2010.
- [30] Pierson H.O., *Handbook of Chemical Vapor Deposition Principles, Technology and Applications*, Second Edition, William Andrew Publishing, ss 1-36, 219, 1999.
- [31] Ren X., Zhao M., Feng J., Pan W., *Phase transformation behavior in air plasma sprayed yttria stabilized zirconia coating*, *Journal of Alloys and Compounds* 750, ss 189-196, 2018.
- [32] Patsias S., Tassini N., Lambrinou K., *Ceramic coatings: Effect of deposition method on damping and modulus of elasticity for yttria-stabilized zirconia*, *Materials Science and Engineering A* 442, ss 504–508, 2006.
- [33] Gupta M., *Design of Thermal Barrier Coatings A Modelling Approach*, Springer, ss 7-14, 2015.
- [34] Brandt R., Pawlowski L., Neuer G., *Specific heat and thermal conductivity of plasma sprayed yttria-stabilized zirconia and NiAl, NiCr, NiCrAl, NiCrAlY, NiCoCrAlY coatings*, *High Temperatures – High Pressures*, vol. 18, ss 65-77, 1986.
- [35] Xu H., Guo H., *Thermal Barrier Coatings*, Woodhead Publishing Limited, ss 3-7, 160-180, 2011.
- [36] Davis J.R., *Handbook of thermal spray technology*, ASM International. Thermal Spray Society Training Committee, ss 43-88, 2004.
- [37] Pawlowski L., *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-471-49049-4, ss 249-284, 2008.
- [38] Schweitzer P.A., *Paintings and Coatings Applications and Corrosion Resistance*, CRC Press, ss 639-641, 2006.
- [39] Gell M., Klemens P.G., *Thermal conductivity of thermal barrier coatings*, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 245, Issue 2, ss 143-149, 1998.
- [40] Soltani R., Coyle T.W., Mostaghimi J., Lima R.S., Moreau C., *Thermophysical properties of plasma sprayed Yttria Stabilized Zirconia Coatings*, *Surface & Coatings Technology* 202, ss 3954–3959, 2008.
- [41] Slifka A.J., Filla B.J., Phelps J.M., Bancke G., Berndt C.C., *Thermal*

- Conductivity of a Zirconia Thermal Barrier Coating*, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 7(1) , ss 43-46., 1998.
- [42] Ghai R.S., Chen K., Baddour N., *Modelling Thermal Conductivity of Porous Thermal Barrier Coatings*, Coatings ss 9, 101, 2019.
- [43] Zhu D., Miller R.A., *Thermophysical and Thermomechanical Properties of Thermal Barrier Coatings*, NASA/TM-2000-210237.
- [44] Michael F., Uzuneanu K., Ion I.V., Popescu F., *The analysis of the thermal barrier coating using Ansys software*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 997 012143.
- [45] Ganvir, A.; Curry, N.; Bjorklund, S.; Markocsan, N.; Nylen, P. Characterization of microstructure and thermal properties of ysz coatings obtained by axial suspension plasma spraying (ASPS). *J. Therm. Spray Technol.* 24, ss 1195–1204, 2015.
- [46] Kimmel J., Mutasim Z., Brentnall W., *Effects of Alloy Composition on the Performance of Ytria Stabilized Zirconia—Thermal Barrier Coatings*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 122, ss 393-400, 2000.
- [47] Li C., Guo H., Gao L., Wei L., Gong S., Xu H., *Microstructures of Ytria-Stabilized Zirconia Coatings by Plasma Spray-Physical Vapor Deposition*, Journal of Thermal Spray Technology, 215, ss 452–459, 2013.
- [48] Hollis K.J., Peters M.I., Bartram B.D., *Plasma Sprayed Ceramic Coatings for Protection Against Molten Metal*, Proceedings from the 1st International Surface Engineering Congress and the 13th IFHTSE Congress, 2002.
- [49] Vaßen R., Jarligo M.O., Steinke T., Mack D.E., Stöver D., *Overview on advanced thermal barrier coatings*, Surface&Coating Technology 205, ss 938-942, 2010.
- [50] Ohji T., Wereszczak A., *Advanced Ceramic Coatings and Interfaces III: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Volume 29, Issue 4, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, ss 147-159, 2009.
- [51] Avcı A., *Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon ve Sıcaklık Korozyonu Davranışlarının İncelenmesi*, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, ss 43-55, 2015.
- [52] Kahraman, Y., *Termal Bariyer Kaplı Gaz Türbin Kanatlarında Çalışma Esnasında Oluşan Gerilmelerin Modellenmesi Ve Analizi*, (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi, ss 10-11, 2011.
- [53] Kosieniak E., Biesiada K., Kaczorowski J., Innocenti M., *Corrosion Failures in Gas Turbine Hot Components*, J Fail. Anal. and Preven.,ss 330–337, 2012.
- [54] Uzunsoy D. ve Küçükelyas B., *Elektrokimyasal korozyon deneyi*. Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Deney Föyü, 2017.
- [55] Altan, E., *Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Mikroyapısal Ve Elektrokimyasal Korozyon Davranışlarının İncelenmesi*,(Yüksek Lisans Tezi), Bartın Üniversitesi, 2019.
- [56] Bolcavage A., Feuerstein A., Foster J., Moore P., *Thermal Shock Testing of Thermal Barrier Coating/Bondcoat Systems*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol: 13(4),ss 389-397, 2004.
- [57] Karaoğlu A.C., Ogawa K., Türk A., Özdemir İ., *Thermal Shock and Cycling Behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs) Used in Gas Turbines*, Progress in Gas Turbine Performance, ss 237-260, 2014.

- [58] P. Kwang-Yong, Y. Byung-il, J.Soo-hyeok, P. Hyeon-myeong, J. Yeon-Gil, *Variation of Thermal Barrier Coating Lifetime Characteristics with Thermal Durability Evaluation Methods*, Journal of Thermal Spray Technology, 27, ss 1436–1446, 2018.
- [59] Torkashwand K., Poursaeidi E., Mohammadi M., *Effect of TGO Thickness on the Thermal Barrier Coatings Life Under Thermal Shock and Thermal Cycle Loading*, Ceramics International, Volume 44, Issue 8, ss 9283-9293, 2018.
- [60] Roche J., Gomez P.A., Alvarado-Orozco J.M., Toro A., *Hot corrosion and thermal shock resistance of Dense-CYSZ/YSZ bilayer thermal barrier coatings systems applied onto Ni-base superalloy*, Journal of the European Ceramic Society, Volume 40, Issue 15, ss 5692-5703, 2020.
- [61] Abedi H.R., Salehi M., Shafyei A., *Microstructural, Mechanical and Thermal Shock Properties of Triple-layer TBCs with Different Thicknesses of Bond Coat and Ceramic Top Coat Deposited onto Polyimide Matrix Composite*, Ceramics International, 44(6), ss 6212-6222, 2018.
- [62] Totten G.E., Xie L., Funatani K., *Handbook of Mechanical Alloy Design*, Marcel Decker, ss 585-619, 2004.
- [63] Enrique P.D., Jiao Z., Zhou N.Y., *Effect of Direct Aging on Heat-Affected Zone and Tensile Properties of Electrospray-Deposited Alloy 718*, Metallurgical and Materials Transactions A, 50, ss 285–294, 2019.
- [64] Kontis P., Li Z., Segersall M., Moverare J.J., Reed R.C., Raabe D., Gault B., *The Role of Oxidized Carbides on Thermal-Mechanical Performance of Polycrystalline Superalloys*, Metallurgical and Materials Transactions A volume 49, ss 4236–4245, 2018.
- [65] Lu Z., Myoung S.W, Kim E.H., Lee J.H., Jung Y.G., *Microstructure evolution and thermal durability with coating thickness in APS thermal barrier coatings*, Materials Today: Proceedings 1, ss 35 – 43, 2014.
- [66] Bruchwald O. Ve diğ., *Material Characterization of Thin Coatings Using High Frequency Eddy Current Technology*, 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016.
- [67] Çiftyürek E., %8 YSZ (İtiryum ile Stabilize Edilmiş ZrO₂) Termal Bariyer Kaplamaların (TBK) Üretilmesi ve Proses Parametrelerinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, ss 67-100, 2009.
- [68] Gnaeupel-Herold T., Prask H.J., Barker J., Biancaniello F.S., Jiggetts R.D., Matejček J., *Microstructure, mechanical properties, and adhesion in IN625 air plasma sprayed coatings*, Materials Science and Engineering A 421 ss 77–85, 2006.
- [69] Kulkarni A., Vaidya A., Golland A., Sampath S., Herman H., *Processing effects on porosity-property correlations in plasma sprayed yttria-stabilized zirconia coatings*, Materials and Engineering A359, ss 100-111, 2003.
- [70] K.Brinkiene, R.Kezelis, *Correlations between processing parameters and microstructure for YSZ films produced by plasma spray technique*, Journal of the European Ceramic Society 24 ss 1095–1099, 2004.
- [71] Jamail H., Razavi R.S., *Investigation of Thermal Shock Behavior of Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/YSZ Thermal Barrier Coatings*, Advanced Materials Research Vols. 472-475, ss 246-250, 2012.
- [72] Loghman-Estarki M.R., Nejati M., Edris H., Razavi R.S., Jamali H., Pakseresht A.H., *Evaluation of hot corrosion behavior of plasma sprayed*

- scandia and yttrium-stabilized nanostructured thermal barrier coatings in the presence of molten sulfate and vanadate salt*, Journal of the European Ceramic Society 35, ss 693–702, 2015.
- [73] Sathish S., Geetha M., Aruna S.T., Balaji N., Rajam K.S., Asokamani R., *Studies on plasma sprayed bi-layered ceramic coating on bio-medical Ti–13Nb–13Zr alloy*, Ceramics International 37, ss 1333–1339, 2011.
- [74] Kırmalı Ö., Özdemir A.K., *Zirkonya Esaslı Seramikler*, İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi 2: ss 15-18, 2012.
- [75] Kolhe M.L., Karande K.J., Deshmukh S.G. , *Artificial Intelligence, Internet of Things (IOT) and Smart Materials for Energy Applications*, CRC Press, ss 32, 2022.
- [76] Rabiei M. ve diğerleri, *Comparing Methods for Calculating Nanocrystal Size of Natural Hydroxyapatite Using X-Ray Diffraction*, Nanomaterials pp 10, 1627, 2020.
- [77] Covino J., Bernard S., ASM Handbook Vol 13A, *Corrosion Fundamentals, Testing and Protection*, ASM International, ss 548-550, 693-695, 2062-2088, 2003.
- [78] Sadeghimeresht, E., Marcoksan, N. Ve Nylén, P. *Microstructural and electrochemical characterization of Ni-based bi-layer coatings produced by the HVOF process*. Surface and Coatings Technology. 304; ss 606-619, 2016.
- [79] Khajezadeh M.H., Mohammadi M., ve Ghatee M., *Hot corrosion performance and electrochemical study of CoNiCrAlY/YSZ/YSZ-La2O3 multilayer thermal barrier coatings in the presence of molten salt*. Materials Chemistry and Physics.,ss 23-34, 2018.
- [80] Song Y., Zhou C., Xu H., *Corrosion behavior of thermal barrier coatings exposed to NaCl plus water vapor at 1050 °C*, Thin Solid Films 516, ss 5686 – 5689, 2008.
- [81] ASM Handbook Vol 4, Heat Treating, pp 1765-1800, 2036, 1991.
- [82] Keogh M.M., *Localised Corrosion of Ni-base Superalloys in Seawater*, Doktora Tezi, University of Manchester, 2019.
- [83] Zielinski A., Sroka M., Dudziak T., *Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 740H after Long-Term Service*, Materials ,11(11), ss 2130, 2018.
- [84] Kumar V., Balasubramanian K., *Progress update on failure mechanisms of advanced thermal barrier coatings : A review*, Progress in Organic Coatings 90, ss 54–82, 2016.
- [85] Paul, S., Cipitria, A., Tsipas, S.A., Clyne ve T.W., *Sintering characteristics of plasma sprayed zirconia coatings containing different stabilizers*, Surface & Coatings Technology, 203, ss 1069-1074, 2009.
- [86] Postolenko V. *Failure Mechanisms of Thermal Barrier Coatings for High Temperature Gas Turbine Components under Cyclic Thermal Loading*, (doktora tezi), Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch -Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2008.

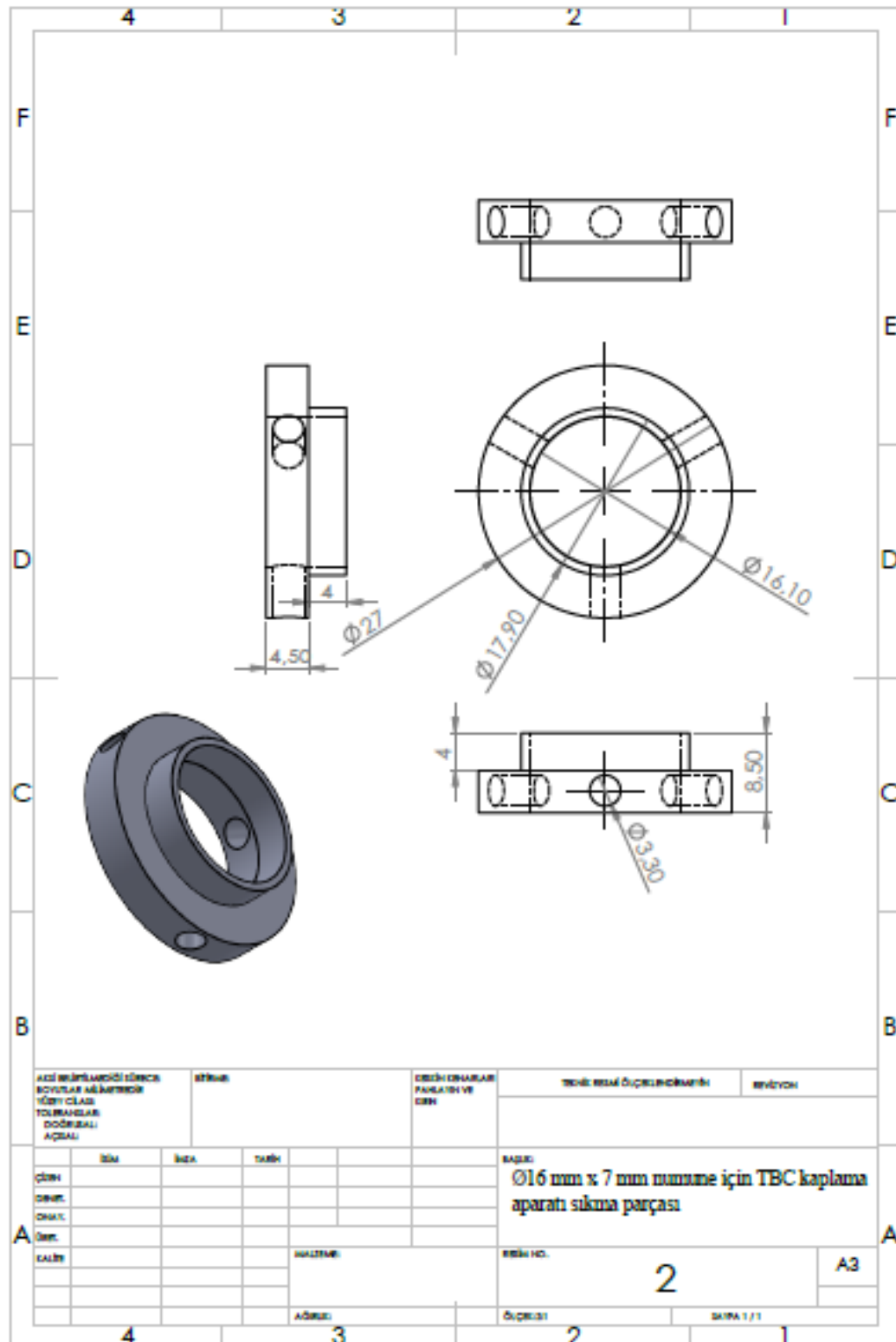
- [87] Kaplan M., Karaoğlu A.C., *Thermal-cycling behavior of CoNiCrAlY bonds coated with thermal barriercoatings (TBCs) produced with atmospheric plasma spraying (APS)*, Materials and Technologies, ss 897-901, 2017.
- [88] Johari A.D., Yunus S.M., Biyamin S.A., Rahman M.M., Hasini H., Manap A., *Effect of Isothermal Heat Treatment on Cyclic Life of Yitria Stabilized Zirconia and Gadolinium Zirconate Thermal Barrier Coating*, Materials Today: Proceedings 5, ss 16032–16041, 2018.
- [89] Lavakumar A., Singh P.K., Srivastava S, Kori S., Kumar L.A., *Gamma Prime Coarsening Behavior of Nickel Super alloy Super cast 247A after Prolonged Thermal Exposures*, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) ISSN (e): 2278-1684, ISSN (p): 2320–334X, pp 37-42, 2013.
- [90] Silva A.A., Baidan R., Couto A.A., *Experimental Investigation of Delta Phase Precipitation in Inconel 625 Superalloy Aged at 550, 625 and 725 °C*, Materials Research, 23(1):20190546, 2020.



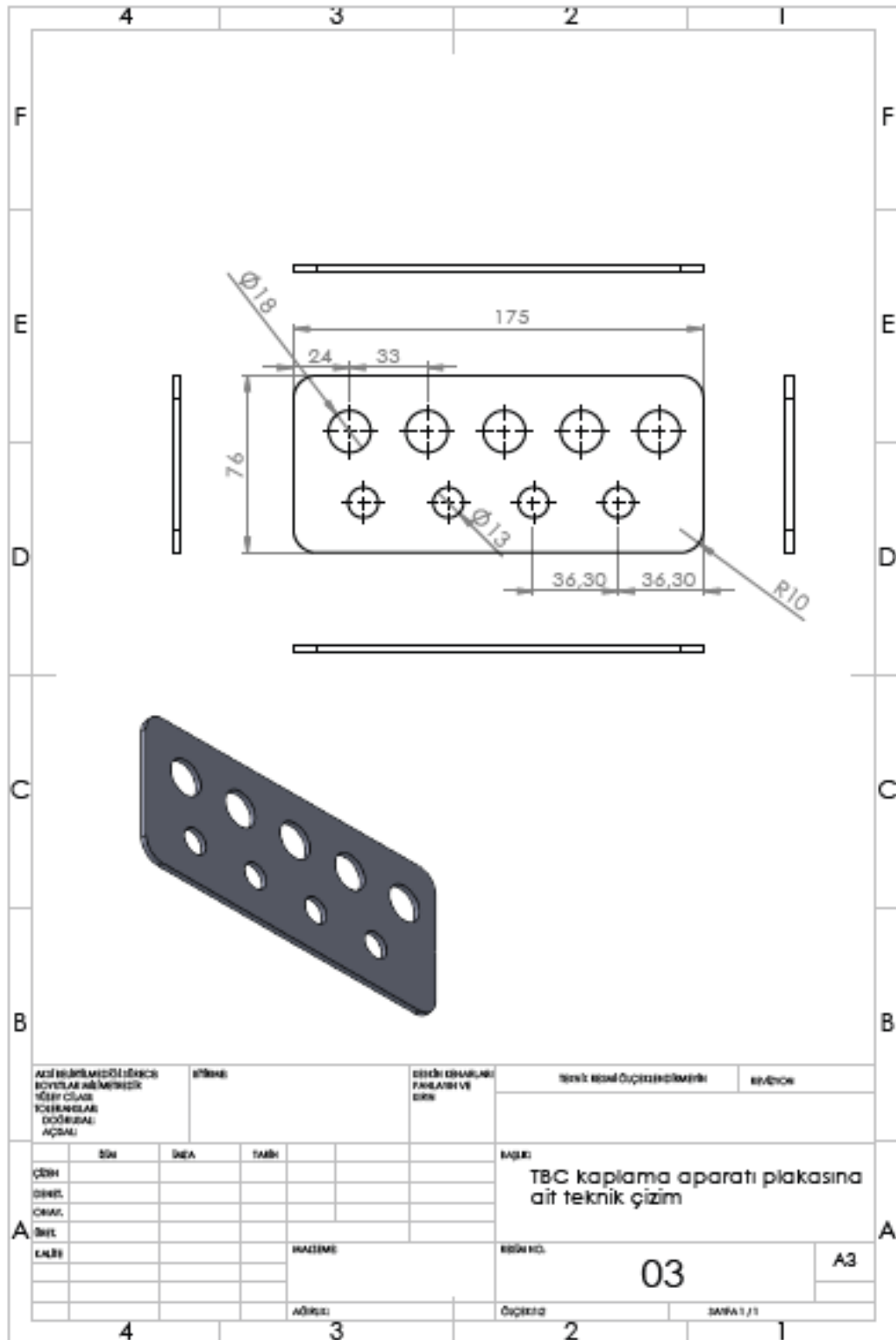
Ek.1. Ø 11,28 mm x 7 mm numune için TBC kaplama aparatı sıkma parçası



Ek.2. Ø 16 mm x 7 mm numune için TBC kaplama aparatı sıkma parçası



Ek.3. TBC kaplama aparatı (plaka)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı

: Nida Nur ERDOĞAN

Doğum Tarihi

Yabancı Dil

:İngilizce, İspanyolca

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lisans : Gazi Üniversitesi Makine
Mühendisliği (2014-2019)
Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi Makine
Mühendisliği (2020-2023)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar :

Yayınları (Diğer) :

1. Erdoğan N.N., Daş M.T., (2021, Eylül). *Aktif ve pasif süspansiyonlu çeyrek araba modelinin benzetimi ve Ziegler-Nichols Tyreus-Luyben metotları ile PID parametrelerinin karşılaştırılması*, Dicle Üniversitesi UMTS 2021’de sunuldu, Diyarbakır.

2. Erdoğan N.N., Başığit A.B., (2022, Aralık). *An Investigation on Thermal Barrier Coating Applicability of Inconel 601 Super Alloy with %8 YSZ Powder*, ICOMNAS 2022 2.Uluslararası Multidisipliner Doğa Bilimleri ve Mühendislik Kongresi’nde sunuldu, Ankara.

Araştırma Alanları

: Nikel Esaslı Süper Alaşımlar, Termal

Bariyer Kaplamalar.