



**Ni BAZLI CMSX-4 SÜPER ALAŞIMININ OKSİDASYON DAYANIMINA
KAPLAMALARIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Erkin DEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2020

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.



Erkin DEMİR

20/01/2020

Ni BAZLI CMSX-4 SÜPER ALAŞIMININ OKSİDASYON DAYANIMINA
KAPLAMALARIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Erkin DEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklıklarda çalışan gaz türbinlerinin çalışma şartlarında gösterdiği oksidasyon direncine, farklı kaplama ve sistemlerinin etkileri incelenmiştir. Günümüz havacılık teknolojisinde verimlilik ve performans üretici firmalar için en kritik karakteristiklerden birisi haline gelmiştir. Bu anlayışla tasarlanan tüm hava araçlarında motor performansının geliştirmesi üzerine yoğun araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülmektedir. Söz konusu askeri ve sivil havacılıkta kullanılan hava araçlarının büyük bir çoğunluğunda turbofan, turboprop ve turboşaft olarak isimlendirilmiş üç farklı motor çeşidi kullanılmaktadır. Bu motor sistemlerinin ortak yönü ise üç sistemde de havanın yanma odasında yakıtla birleşmeden önce sıkıştırılmasını sağlayan bir kompresör sistemi ve yanma sonucu basıncı arttırılan havanın çevirdiği bir türbin sistemi bulundurmalarıdır. Kompresör ve türbin kademeleri bu nedenle motor karakteristiğini ve performansını belirleyen ana etkenlerden birisidir. Yüksek basınç türbinlerinin malzeme ve tasarım açısından kısıtları vardır. Bu kısıtlardan bir tanesi de türbin bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların ve yanma gazlarının türbin bıçaklarının yapılarında oluşturduğu oksidasyon ve korozyondur. Bir bakıma türbin bıçağının fonksiyonunu yerine getirebileceği maksimum sıcaklık ve bu sıcaklıkta çalışabileceği süre bir motorun performansını karakterize etme ve geliştirmede dikkate alınması gereken en önemli parametrelerden biridir. Bu sebeple bu tezde türbin bıçaklarında yüksek sıcaklık korozyon dayanımını arttırmak amacı ile kullanılan farklı kaplamalar ekonomik, performans ve uygulama yönünden kıyaslanarak hangi tekniklerin avantajlı olduğunun tespit edilmesi hedeflenmiştir. Deneysel çalışmalarda paket yayılım kaplama (codep) ve solüsyon ile difüzyon kaplama, yöntemleri CMSX-4 ve CM247-LC malzemenin üzerine kaplanarak ilgili metotların aynı ve farklı malzemeler üzerindeki sıcak korozyon performansına olan etkileri incelenmiştir.

Bilim Kodu : 91510

Anahtar Kelimeler : Süper alaşım, CMSX-4, CM247-LC, Kaplama, Codep, Kutu Sementasyon, Difüzyon Kaplama, Yüksek Sıcaklık Korozyon Dayanımı, Türbin Bıçağı, Gaz Türbini

Sayfa Adedi : 76

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Necati YALÇIN

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COATINGS ON THE OXIDATION
RESISTANCE OF Ni-BASED CMSX-4 SUPERALLOY

(M. Sc. Thesis)

Erkin DEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

In this thesis, the effects of different coatings and coating systems are investigated in term of oxidation resistance of gas turbines, which operate at high temperatures. In today's aviation technology, efficiency and performance have become two of the most critical characteristics for manufacturers. Ongoing, intensive research and development activities are actualize to improve engine performance and all recent aircrafts are design with this perspective. Three different types of gas turbine engines turbofan, turboprop and turboshaft that are used on the majority of the aircrafts that are used in military and civil aviation. The common aspect of these engine systems is that they all have a compressor and turbine system. Thanks to compressor system, intake air compresses before joining with fuel. Compressed air flows through combustion chamber and increases its pressure with effect of combustion. Then compressed hot air goes through directly turbine system. The compressor and turbine stages are therefore some of the main factors while evaluating the engine characteristics and performance. High-pressure turbines have limitations especially in terms of material and design. Two of these constraints are the oxidation and corrosion, which causes from high temperatures and combustion gases. In a way, the maximum serving temperature of the turbine blade and maximum service time of turbine blade at highest temperature are two of the most important parameters to consider and improve the performance of an engine. Therefore, in this thesis aimed to determine which coating techniques have advantages in terms of cost, performance and applicability. In the experimental part of this study, Codep coating and solution diffusion coating applied to two different materials, which are CMSX-4 and CM247-LC. After application, samples were tested and the study aimed to determine which coating technic has better performance on hot corrosion and oxidation resistance. Additionally behavior of coating on different materials were investigated

Science Code : 91510

Key Words : Superalloys, CMSX-4, CM247-LC, Coating, Codep, Pack Cementation, Diffusion Coatings, Hot Corrosion Resistance, Turbine Blade, Gas Turbine

Page Number : 76

Supervisor : Assist. Prof. Necati YALCIN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması sırasında desteklerinden dolayı danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Necati YALÇIN'a teşekkür ederim. Literatür ve deneysel çalışmaların metodolojisi ile ilgili yaptığım araştırmalar sırasında benden desteklerini esirgemeyen 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı'na ve tesise ulaşmamızı sağlayan TEI AIT&MRO direktörlüğüne teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmasının konu ve kapsamın belirlenmesi, deneysel çalışmalarda kullanılan süper alaşım numunelerin ve IP1041 solüsyonunun tedarik edilmesi, CODEP kaplama uygulama süreçlerinin tüm aşamalarında bana sınırsız destek veren Sn. Rıfat YILMAZ'a bu tezin oluşmasındaki kritik katkılarından dolayı en derin şükranlarımı sunarım. Çalışmanın literatür araştırması, kaynakça oluşturulması gibi alanlarında kendi tecrübeleri ile bana destek olan ve bu süreç içerisinde kuvvetli manevi desteği ile her an yanımda olan kıymetli eşim Ceren DEMİR'e teşekkür ederim. Ayrıca babam Gürkan DEMİR ve annem Nebahat DEMİR'e beni yetiştirirken yaptıkları tüm fedakârlıklar ve harcadıkları emekler, abim Kıvanç DEMİR'e paylaştığı tecrübe ve kıymetli görüşlerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Tez çalışmamı finansal ve teknik anlamda geniş bir kapsamda destekleyen işyerim TEI-Tusaş Motor Sanayii AŞ'ye ve burada çalışan kalite müdürlüğü başta olmak üzere yöneticilerim ve tüm çalışma arkadaşlarıma desteklerinden dolayı en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Bilime ve çalışanların akademik gelişimine verilen bu destek TEI'yi salt üretim yapan bir işyeri olmaktan çıkarıp genç mühendislerin ve dinamik beyinlerin Türkiye'nin geleceği için müthiş bir motivasyon ile çalıştığı öncü bir kuruluş yapıyor.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. SÜPER ALAŞIMLAR.....	3
2.1. Süper Alaşımların Yüksek Sıcaklık Malzemesi Olarak Kullanımı.....	5
2.2. Ni Bazlı Süper alaşımların Kimyasal ve Mikroyapısal Özellikleri.....	8
2.3. CMSX-4 SLS ve CM247 LC Süper Alaşımları.....	13
2.4. Sürünme Direncini Belirlemede Larson-Miller Prensibi	19
3. TÜRBİN UYGULAMALARINDA KULLANILAN SÜPER ALAŞIM KAPLAMA METODLARI	21
3.1. TBC Kaplamalar.....	24
3.2. Bağ Kat Kaplamalar (Bond Coat)	26
3.3. Son Kat Kaplamalar (Top Coat).....	30
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
4.1. İncelenen Malzemeler	35
4.2. Kaplama Uygulamaları.....	36
4.2.1. Kutu sementasyon (CODEP) uygulaması.....	36

	Sayfa
4.2.2. Solüsyon ile difüzyon kaplama (IPAL IP1041)	38
4.3. Çevrimsel Oksidasyon Testi	43
4.4. Metalografik İnceleme	45
5. TARTIŞMA	47
5.1. Oksidasyon Testi Öncesi Kaplama Kalınlıklarının Belirlenmesi	47
5.2. Çevrimsel Oksidasyon Testi Sonuçları	48
5.2.1. CMSX-4 ve CM247-LC numunelerin çevrimsel oksidasyon test sonuçlarının değerlendirilmesi	48
5.2.2. CODEP kaplamanın CMSX-4 ve CM247-LC numunelerdeki çevrimsel oksidasyon test sonuçlarının kıyaslanması	52
5.2.3 IP1041 kaplamanın CMSX-4 ve CM247-LC numunelerdeki çevrimsel oksidasyon test sonuçlarının kıyaslanması	54
5.3. Çevrimsel Oksidasyon Testi Sonrası Metalografik İnceleme Sonuçları	56
5.3.1. CODEP ve IP1041 kaplamanın metalografik morfolojilerinin kıyaslanması	56
5.3.2. CODEP kaplamanın CMSX-4 ve CM247-LC üzerindeki performansının kıyaslanması	60
5.3.3. IP1041 kaplamanın CMSX-4 ve CM247-LC üzerindeki performansının kıyaslanması	60
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
EKLER	69
EK-1. IPAL IP1041 Kaplama Teknik Özellikleri ve Uygulama Adımları	70
EK-2. IP1041kaplı CM247-LC numunelerin çevrimsel oksidasyon testinden önce ve sonra görüntülerinin kıyaslanması (a) önce, (b) sonra	76
EK-3. IP1041kaplı CMSX-4 numunelerin çevrimsel oksidasyon testinden önce ve sonra görüntülerinin kıyaslanması (a) önce, (b) sonra	76
ÖZGEÇMİŞ	77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Ticari nikel bazlı süper alaşımların kimyasal kompozisyonlarının gösterimi	12
Çizelge 2.2. CMSX-4 ve CM247-LC süper alaşımlarının kimyasal kompozisyonları ..	18
Çizelge 4.1. CODEP uygulamasında kullanılan malzemeler ve özellikleri	37

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Rolls-Royce Trent 800 motor kesiti	4
Şekil 2.2. Yıl ve motor modellerine göre türbin giriş sıcaklığındaki değişim.	5
Şekil 2.3. Siemens firmasının elektrik üretiminde kullanılan SGT6-5000F kodlu gaz türbin jeneratörü.....	6
Şekil 2.4. Basit bir gaz türbin motorunun çalışma prensibinin gösterilmesi	7
Şekil 2.5. Rolls-Royce Trent 800 motorunda kullanılan malzemelerin kesit üzerinden gösterimi.	8
Şekil 2.6. Seramik kalıba döküm yönteminin şematik gösterimi	9
Şekil 2.7. Bridgman tipi yönlendirilmiş katılaştırma fırını.....	10
Şekil 2.8. Ni bazlı süper alaşımlarda kullanılan yaygın alaşım elementleri	11
Şekil 2.9. Ni bazlı bir süper alaşımın mikroyapısı.	12
Şekil 2.10. CMSX-4 ve yaygın bazı tek kristalli süper alaşımların sıcaklığa bağlı akma dayanımlarının gösterimi.	14
Şekil 2.11. Mar-M200 malzemesinin 260 MPa ve 982 °C’de sürünme dayanımlarının tane yapılarına göre kıyaslanması	14
Şekil 2.12. CMSX-4 süper alaşımının mikroyapısı 10.000X büyütme (solda) ve 25.000X büyütme (sağda).....	15
Şekil 2.13. CMSX-4, CM 247 LC ve IN738 LC alaşımlarına 982°C’de statik kuvvet altında yapılan çekme deneyi ve kopma dayanımları.	16
Şekil 2.14. Dentrit kolları şematik gösterimi	17
Şekil 2.15. CM247LC alaşımının mikroyapısı (25X).....	18
Şekil 2.16. CM247LC alaşımının tane sınırı oryantasyonlarına göre düşük çevrim sayılarındaki yorulma dayanımları.....	19
Şekil 2.17. Bazı yaygın süper alaşımların Larson-Miller parametrelerinin kıyaslanması	20
Şekil 2.18. Yıllara göre türbin bıçaklarının maruz kaldığı çalışma sıcaklıkları ve TBC etkisi	20
Şekil 3.1. Modern bir gaz türbini ve güncel soğutma sistemlerinin gösterimi	23

Şekil	Sayfa
Şekil 3.2. Engine Alliance GP7200 motoruna ait 10cm uzunluğundaki yüksek basınç türbin kanatçığının TBC kaplamalı kesitinin SEM mikroskobu ile çekilmiş görüntüsü	24
Şekil 3.3. Kutu sementasyon prosesinin şematik gösterimi.....	27
Şekil 3.4. Ni Bazlı süper alaşım üzerine Pt modifiyeli difüzyon kaplamanın SEM ile alınmış kesit görüntüsü.....	28
Şekil 3.5. EB-PVD kaplama sisteminin şematik gösterimi	30
Şekil 3.6. CODEP kaplama sırasında kullanılan hidrojen fırını ve CODEP tozu	30
Şekil 3.7. Ağırlıkça Y2O3 içeriğine göre TBC kaplamanın çevrimsel oksidasyon testine dayanımı.....	32
Şekil 3.8. APS ve EB-PVD metodu ile yüzeye biriktirilmiş YSZ katmanları (a) APS, (b) EB-PVD	33
Şekil 3.9. Uygulama metodu ve kimyasal içeriklerine göre seramik bazlı son kat kaplamaların termal iletkenlik özellikleri.....	34
Şekil 4.1. Kesilmiş ve yüzeyi hazırlanmış disk numune	36
Şekil 4.2. CMSX-4 ve CM247-LC disk numunelerin kaplama öncesi temizlenmesi	39
Şekil 4.3. Numunelerin kaplama öncesi 60psi basınçta 120/220 mesh Al ₂ O ₃ tozları ile kumlanması	39
Şekil 4.4. Solüsyonun karıştırılmasını sağlayan döner rulo karıştırıcı	40
Şekil 4.5. (a) IP1041 solüsyonunun basınçlı boya tabancası ile uygulanışı (b) Uygulama sonrasında kurumuş numuneler	41
Şekil 4.6. Kurutma ve kütleme işleminin gerçekleştirildiği Reta marka kurutma fırını ve fırın içerisinde numuneler.....	41
Şekil 4.7. Difüzyon işleminin gerçekleştirildiği atmosfer kontrollü Protherm marka tüp fırının şematik gösterimi. 1) Argontüpü 2) Manometre 3) Gaz taşıyıcı hortumlar 4) Seramik tüp 5) Numune 6)Fırın gövdesi 7) Kapaklar 8) Gaz çıkış kontrol kabı 9)Su.....	42
Şekil 4.8. Difüzyon işleminin gerçekleştirilmesinin ardından numunelerin görünümü.	42
Şekil 4.9. Çevrimsel oksidasyon testinin gerçekleştirilmesinde kullanılan Heraus marka muffle tipi fırın ve test düzeneği.	43
Şekil 4.10. Çevrimsel oksidasyon testi uygulanan soğuma evresindeki numuneler.....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Akriliğe gömülmüş ve zımparalanarak parlatılmış numunelerin nihai görüntüsü.....	45
Şekil 5.1. Kaplama sonrası CMSX-4 üzerinde IP1041(solda) ve CODEP(sağda) kaplamaların kalınlık ölçümleri.....	47
Şekil 5.2. CM247LC numunelerin çevrimsel oksidasyon testi sonuçları.....	49
Şekil 5.3. CMSX-4 numunelerin çevrimsel oksidasyon testi sonuçları.....	50
Şekil 5.4. IP1041 kaplamada oluşan deformasyon ve oksit cebi morfolojisi	51
Şekil 5.5. Çevrimsel Oksidasyon testi sonrası CODEP kaplama morfolojisi.....	51
Şekil 5.6. CM247-LC Malzemede oluşmuş alüminyumca zengin iğnemsî oksit yapıları.....	53
Şekil 5.7. CODEP Kaplamanın CMSX-4 ve CM247-LC numuneler üzerindeki çevrimsel oksidasyon test sonuçları	53
Şekil 5.8. CM247-LC tane sınırlarında ilerleyen korozyon ve kaplama yüzeyinde meydana gelen dökülmeler.....	55
Şekil 5.9. IP1041 Kaplamanın CMSX-4 ve CM247-LC numuneler üzerindeki çevrimsel oksidasyon test sonuçları	55
Şekil 5.10. IP1041 kaplı CM247-LC numunesinin mikroyapısı (9 çevrim termal oksidasyon testi sonrası)	57
Şekil 5.11. CODEP kaplı CM247-LC numunesinin mikroyapısı (9 çevrim termal oksidasyon testi sonrası)	57
Şekil 5.12. CODEP kaplı CM247-LC numunesinin mikroyapısı (Termal oksidasyon testi öncesi)	58
Şekil 5.13. IP1041 kaplı CMSX-4 numunesinin mikroyapısı (Termal oksidasyon testi öncesi)	58
Şekil 5.14. IP1041 kaplı CMSX-4 numunesinin mikroyapısı (9 çevrim termal oksidasyon testi sonrası)	59
Şekil 5.15. CODEP kaplı CMSX-4 numunesinin mikroyapısı (9 çevrim termal oksidasyon testi sonrası)	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

γ	Gama Fazı
γ'	Gama Prime Fazı
nm	Nanometre
μm	Mikrometre
W	Watt
m	Metre
K	Kelvin

Kısaltmalar

Açıklamalar

APS	Air Plasma Spray
CVD	Chemical Vapor Deposition
EB-PVD	Electron Beam Pyhsical Vapor Deposition
EDM	Electrical Discharge Machining
LPPS	Low Pressure Plasma Spray
PDAS	Birincil Dentrit Kol Genişliği
ppm	Parts Per Million
PS-PVD	Plasma Spray Pyhsical Vapor Deposition
SDAS	İkincil Dentrit Kol Genişliği
SEM	Scanning Electron Microscope
SPS	Suspension Plasma Spray
TBC	Thermal Barrier Coating

Kısaltmalar**Açıklamalar****TGO**

Thermally Grown Oxide

YMK

Yüzey Merkezli Kübik

YSZ

Yttria-Stabilized Zirconia

1. GİRİŞ

Havacılık sanayii başarılı olan ülke ve kurumlara sağladığı büyük avantajlar sebebiyle mühendislik alanında en yoğun çalışmaların ve arge faaliyetlerinin sürdürüldüğü alanlardan bir tanesidir. Bu faaliyetlerin önemli bir bölümünün de havacılık motorlarının geliştirilmesi ile ilgili olduğu söylenebilir.

Havacılık motorlarının çalışma şartları göz önünde bulundurulduğunda geliştirilmelerindeki temel kısıtlardan en önemlileri malzeme ve proses geliştirilmesidir. Ana motor komponentlerinden olan kompresör grubu içerisindeki yüksek basınç türbin bıçakları da motor içerisindeki en yüksek dinamik ve termal zorlanmalara maruz kalan parçalardır. Bu kısıtlar hedeflenerek, yıllar içerisinde şartlara uygun malzeme tasarımı anlayışı ile endüstriyel ve akademik olarak yoğun çalışmalar yürütülmüş ve ikinci dünya savaşının sonunda gaz türbinlerinde kullanılmak amacıyla ilk süper alaşımlar ortaya çıkmıştır. İlk süper alaşımlar östenitik paslanmaz çeliklerin bir modifikasyonu olup günümüzde kullanımda olan birçok malzeme 1950-1970 yılları arasında geliştirilmiştir. Geliştirilen süper alaşımlara zaman içerisinde farklı element ilaveleri ile farklı özellik ve kullanım alanlarına sahip süper alaşımların geliştirilmesi sağlanmıştır. Süper alaşımlar ve kontrollü katılaştırma metotları konusunda yapılan çalışmaların neticesinde 1980'li yıllarda süper alaşımlarda “Yönlendirilmiş Katılaştırma” ve “Tek Kristal” malzemeler geliştirilmiştir. Yönlendirilmiş ve tek kristal yapıların karakterizasyonu sonucunda malzemelerin iç yapılarındaki tane sınırlarının azalması ve anizotropik özellik göstermesi sonucu dinamik yüklere karşı çok daha mukavvim malzemeler geliştirildi. Tek kristal malzemelerin geliştirme sürecinde 2. Nesil Ni bazlı CMSX-4 süper alaşımı da geliştirilmiştir. Literatürde ki birçok çalışmaya konu olan alaşımın 1991'den beri havacılık ve endüstriyel gaz türbinlerinde çok sayıda başarılı uygulamaları vardır [1-3].

Malzemelerin geliştirilmesi ardından motorların performansını arttırabilmek adına yanma odası ve türbin sıcaklıklarının yükseltilmesi mümkün olmuştur. Fakat yanma sonucu oluşan yüksek sıcaklıklar türbin bıçaklarının 1000°C üzerinde ısınmasına neden oluyordu ve bu durumun uzun süreli etkilerinde türbin yüzeylerinde yüksek sıcaklığa bağlı oksidasyon oluşumu gözleniyordu. Bu çalışma şartlarına süper alaşımların salt kendi korozyon dirençleri yeterli gelmeyerek farklı yöntemlerle geliştirilmeleri gerekti, termal bariyer

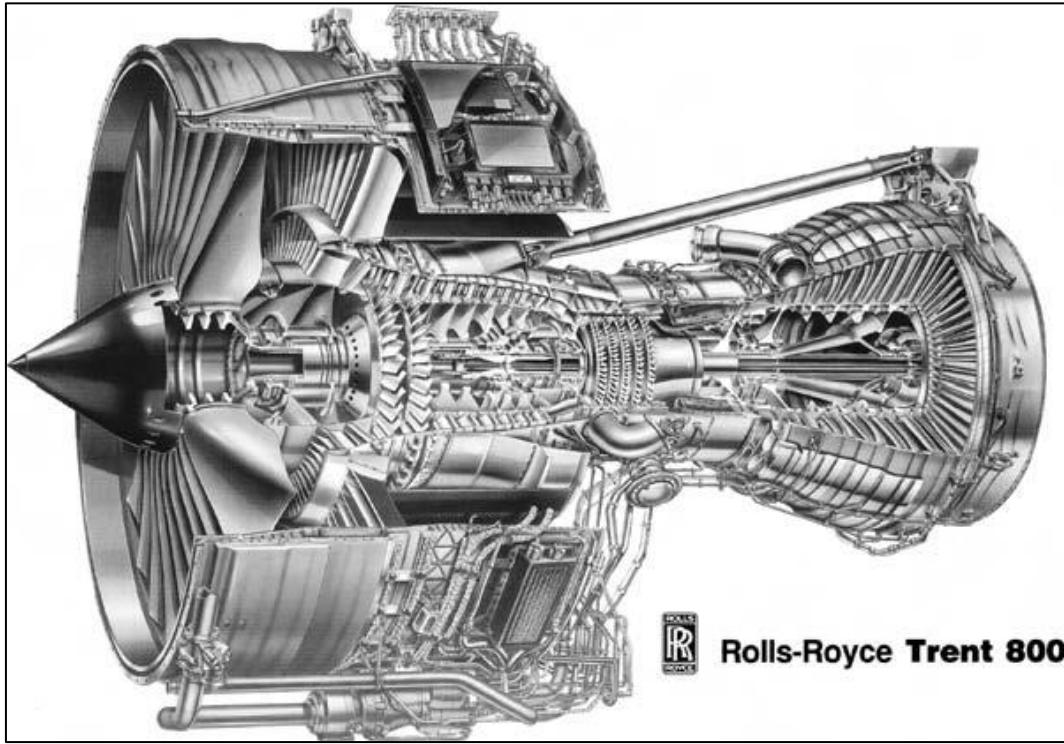
kaplama teknolojileri de bu arayış sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada söz konusu TBC kaplama sistemlerinde bağ katman (bond coat) olarak kullanılan iki farklı metodun iki farklı Ni bazlı süper alaşım grubu üzerinde uygulaması yapılarak yöntemler ve malzemeler arasındaki oksidasyon performansının kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu sayede yüksek basınç türbini tasarımlarında bu çalışmanın sonuçları destekleyici olarak kullanılabilir.

2. SÜPER ALAŞIMLAR

Paslanmaz çelikler 1920-1930'lara kadar yüksek korozyon dayanımına sahip olmaları ve etkileyici mekanik özellikleri ile birçok tasarımda büyük rol oynadılar. Fakat devam eden süreçte gelişen tasarımlar özellikle havacılık motorlarının komponent tasarımları daha zorlayıcı şartların oluşmasına neden oldu ve paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklık uygulamaları bakımından kısıtlarına ulaşıldığı tespit edildi. Tüm bunların sonucu olarak tasarımcılar tarafından yeni nesil uygulamalar için yeni nesil malzeme ihtiyaçları doğdu ve arayış başladı. Metalurjistler tarafından bu ihtiyaçlar doğrultusunda yapılan araştırmalar sonucunda paslanmaz çelikler geliştirilerek günümüzde süper alaşım olarak adlandırılan malzeme grubunun ilk öncülleri üretildi. Yapılan ilk çalışmalardan sonra belirli bir dönem süper alaşımlarla ilgili büyük gelişmeler olmadı. Fakat ikinci dünya savaşıyla eş zamanlı olarak gaz türbinleri konusu alaşım geliştirme için büyük bir motivasyon haline geldi. 1920'lerin başında nichrome alaşımlarına alüminyum ve titanyum ilavesinin etkilerine dair araştırmalar yapıyordu, bu esnada süper alaşımlara dışçilikte kullanılan kobalt adaptasyonunu keşfedilerek havacılık motorlarının yüksek sıcaklık ve mekanik dayanım gerekliliklerinin karşılanması sağlandı. Bahsi geçen süper alaşımların (Inconel ve Nimonic) tümünün kabaca 20. Yüzyılın başlarında keşfedilen ve nichrome olarak adlandırılan bir tost makinesinin rezistans teline bağlı olduğu söylenebilir. Yani süper alaşım geliştirme yarışı, tasarımcıların sürekli daha fazlasını istediği yüksek sıcaklık ve yüksek mekanik özellikleri geliştirme üzerine evirildi diyebiliriz [4, 5].

Yüksek sıcaklıkta çalışacak bir malzemedan beklenen özellikler nelerdir. İlk olarak erime noktasına yakın sıcaklıklarda bir operasyon sıcaklığına sahip olması beklenir. $T_{çlş}$ çalışma sıcaklığını T_{erg} 'de alaşımın ergime noktasını simgelesin. Bu ikisinin oranından oluşan $T_{çlş} / T_{erg} = \tau$ sıcaklığının 0,6'dan büyük olması gerekmektedir. Bu oranın sağlanması sayesinde bir süper alaşım 1455°C 'de ergiyen nikelin ergime sıcaklığına çok yakın olan 1000°C sıcaklıkta hizmet verebilir. $(1000 + 273) / (1455 + 273) \sim 0,75 \tau$ bu hesaplama göre $0,75 \tau$ oranıyla bu malzeme yüksek sıcaklık malzemesi sayılabilir. İkinci karakter ise malzemenin uzun süreli çalışmalarda mekanik özelliklerinin yitirilmesine karşın yüksek bir direnç göstermesidir. Yüksek τ oranlarında çalışırken zamana bağlı olarak gerçekleşen ve geri çevrimi olmayan plastik bir deformasyon şekli olan sürünmenin kaçınılmaz olduğunu göz önünde bulundurmak gerekir. Zaman arttıkça sürünmeye bağlı uzamayı simgeleyen

esürünme oranının düşük olduğu malzemelerin yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmesi daha uzun bir çalışma periyodu açısından gereklidir. Ayrıca yüksek sıcaklık malzemelerinin statik özelliklerden olan akma dayanımı, çekme dayanımı ve kırılma tokluğunu yüksek sıcaklıklarda muhafaza ediyor olması önemlidir. Son önemli karakteristik ise malzemenin çalıştığı ortam şartlarından kaynaklanan çeşitli etkilere karşı dayanım gösteriyor olmasıdır. Örneğin termik bir santralin jeneratör kısmından geçen basınçlı hava içerisinde bulunan yüksek sülfür oranı atmosferin önemli derecede korozif olmasına yol açar. Benzer olarak havacılık motorlarının yakıt sistemlerinin temizlenmesinde kullanılan kerosen içerisine karışan potasyum tuzu veya deniz suyu gibi impuritelere korozyona neden olurlar. Bu gibi impuritelere yüksek sıcaklıkta komponentler üzerinde oksidasyona neden olma ihtimalleri daha yüksektir [4, 6, 7].

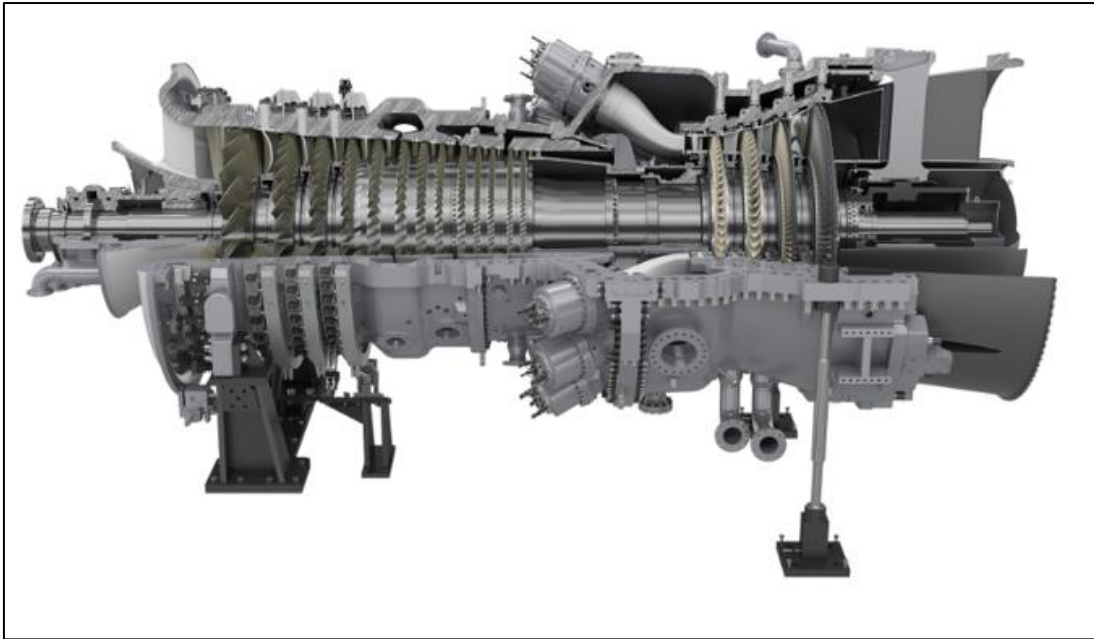


Şekil 2.1. Rolls-Royce Trent 800 motor kesiti

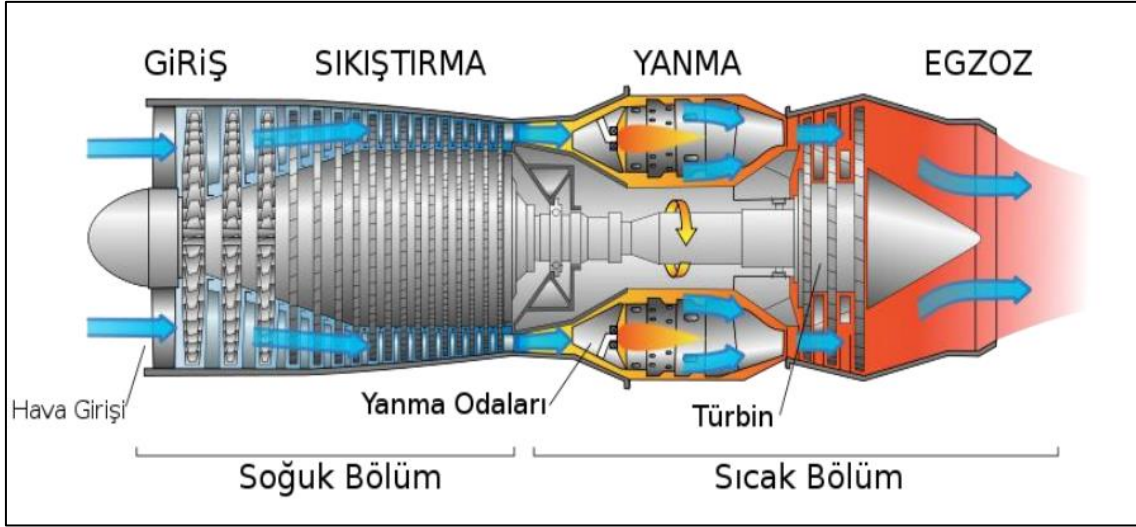
Süper alaşımlar;

- Krom ve nikel içeren veya karmaşık demir-nikel-krom-kobalt içeren demir esaslı alaşımlar,
- Karbür kuvvetlendirmeli kobalt esaslı alaşımlar,
- Katı çökeltilme sertleştirmeli nikel esaslı alaşımlar, olmak üzere üç grupta toplanır. Genellikle dövme ve döküm formlarında kullanılmaktadır [2, 8].

MW'lık doğalgaz ile çalışan bir çevrim santralinde yaklaşık 1 milyon nüfusu olan bir şehrin elektriği üretilir. Enerji sektöründe kullanılan gaz türbin uygulamalarında uygulama alanına ve jeneratör tipine göre türbin kısmının ulaştığı sıcaklık ve bu sıcaklığa bağlı olarak türbin kanatçıkları için kullanılacak malzeme grupları da farklılık göstermektedir. Örneğin titanyum alaşımları çok düşük özgül ağırlıklarına rağmen gösterdikleri yüksek dayanım sebebiyle bazı santrallerde tercih edilebilirler fakat yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon dayanımlarının yetersiz olması sebebiyle titanyum alaşımlarının gaz türbinlerindeki kullanım sıcaklıkları 700°C'nin altında kalmaktadır. Bazı elektrik üretim santrallerinde türbin çevirici olarak 565°C'ye kadar ısıtılmış buhar kullanılmaktadır. Bu santrallerde sıcaklık isteri daha düşük olduğu için maliyet göz önünde bulundurularak sürünmeye dayanıklı yüksek mukavemetli ferritik çelikler türbin komponentlerinde kullanılabilir. Yeni nesil kömür yakıtlı termik santrallerde ise türbin bölgesinin sıcaklığı 750°C'ye kadar çıkmakta ve bu sıcaklıkta 200000 saate kadar çalışması gerekmektedir. Bu gibi uygulamalarda ferritik çeliklerin kullanım imkanı kalmadığı için yeni nesil süper alaşımlar geliştirilmiştir. Yüksek sıcaklık korozyon dayanımları açısından ileri özelliklere sahip olan seramikler ise gevrek yapıları ve düşük tokluk değerleri sebebi ile gaz türbini olarak kullanılamamaktadır. Fakat Zr, Al, Ni, Y, Hf, Ta gibi elementlerin içlerinde bulunduğu bazı seramik yapılar yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan süper alaşımlarda TBC (ısı bariyer kaplaması) olarak kullanım alanı bulurlar [6, 10-12].

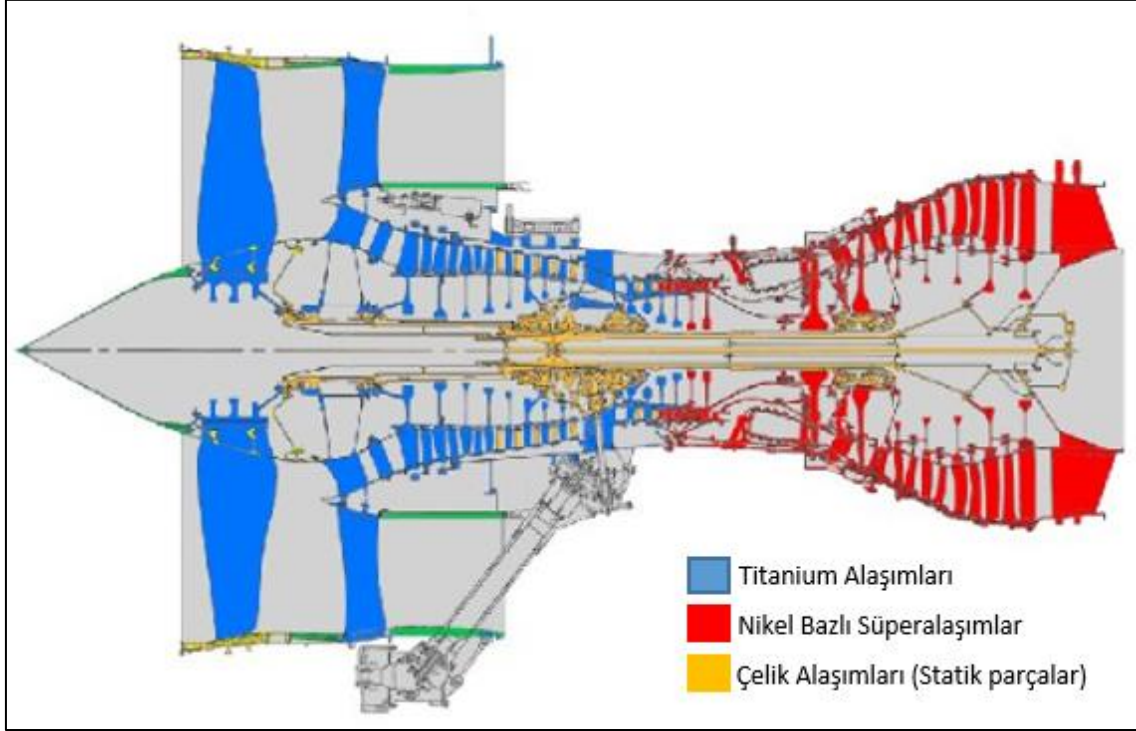


Şekil 2.3. Siemens firmasının elektrik üretiminde kullanılan SGT6-5000F kodlu gaz türbin jeneratörü [13]



Şekil 2.4. Basit bir gaz türbin motorunun çalışma prensibinin gösterilmesi [14]

Şekil 2.4’de görülen şematik turbojet motor gösteriminde ilk kademe olan kompresör bölümünün görevi havayı alarak tüm kademedeki kompresör gruplarından geçirmek ve sıkışmış olarak yanma odasına iletilmesini sağlamaktır. Yanma odasında sıkışan havaya yakıt karışımı eklenir ve ardından ateşleme yapılır. Ateşleme sonucunda meydana gelen ısı havanın genişmesini sağlar. Genleşen hava ise türbin bölgesine hareket ederek türbinlerin dönmelerini sağlar. Türbinler ile kompresör sistemi birbirine şaft ile bağlıdır. Bu şaft sayesinde türbindeki mekanik enerji kompresör bölümüne aktarılır ve kompresör bölümü dönmeye devam ederek daha fazla havayı motor içerisine çeker. Bu sayede türbin bölgesinde itiş gücü oluşmaya devam eder buda uçağın itiş momentumu sayesinde hareket etmesine neden olur. Bu sistem temelde motorun fan ve kompresörü tarafından alınan havanın çok daha yüksek bir hızda egzoz gazı olarak atılması ile momentum yaratılmasını sağlamaktadır [13, 15].



Şekil 2.5. Rolls-Royce Trent 800 motorunda kullanılan malzemelerin kesit üzerinden gösterimi (Yanma odası ve türbin alanında nikel bazlı süper alaşım kullanımı yüksek oranda) [6]

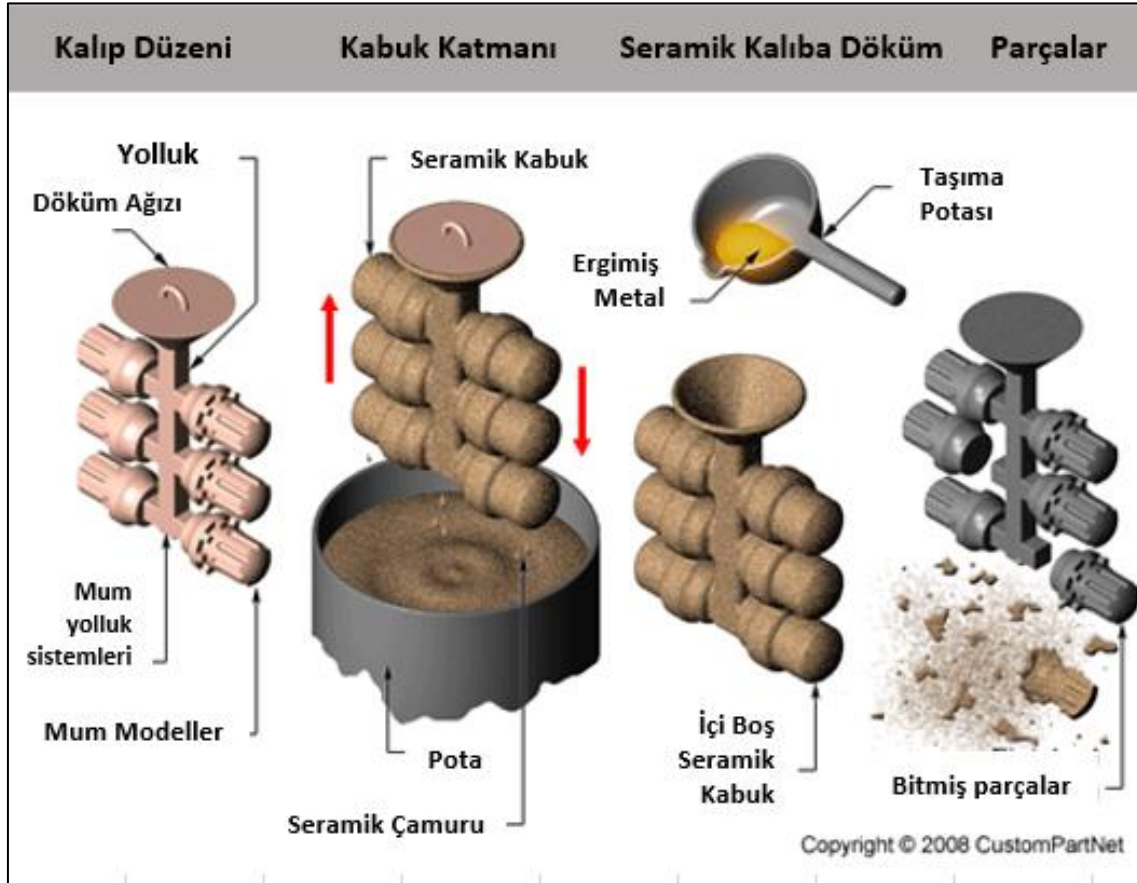
2.2. Ni Bazlı Süper alaşımların Kimyasal ve Mikroyapısal Özellikleri

Nikel bazlı süper alaşımlar yüksek sıcaklık dayanımı, tokluk ve plastik deformasyona karşı mukavemet gösteren istisnai bir metalik malzeme sınıfıdır. Bu malzemeler genelde uçak ve güç üretimi türbinlerinde, roket motorlarında, nükleer enerji ve kimyasal işleme tesisleri dahil olmak üzere diğer zorlu çalışma ortamlarında kullanım alanı bulurlar. Son otuz yıl içerisinde süper alaşımların ve imalat süreçlerinin geliştirmesi üzerine yoğun çalışmalar yapılarak yeni karakterize edilen bu malzemelerin büyük gelişimler kat etmesine ve günümüz süper alaşım teknolojisinin oluşmasına katkı sağlamıştır [16-18].

Ni bazlı süper alaşımlar uçak motorlarının ağırlıkça %40-50'sini oluştururlar çoğunlukla yüksek sıcaklığa maruz kalan yanma odası ve türbin kısımlarında yoğun kullanımları vardır. Türbin kısmında kullanılan sürünme dayanımı yüksek süper alaşımların üretimi büyük oranda seramik kalıba döküm yöntemi ile yapılır. Fakat soğuma şemaları, tane sınırlarının kontrolü, tane geometrileri (yönlendirilmiş vb) gibi faktörlerin kontrolü çok önemli olduğu için üretim metodu standart seramik kalıba döküm prosesinden farklılıklar göstermektedir.

Süper alaşımlar üretim metotlarına göre döküm ve dövme olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Yapısal olarak ise aşağıdaki şekilde bir sınıflandırma yapılabilir [16-18].

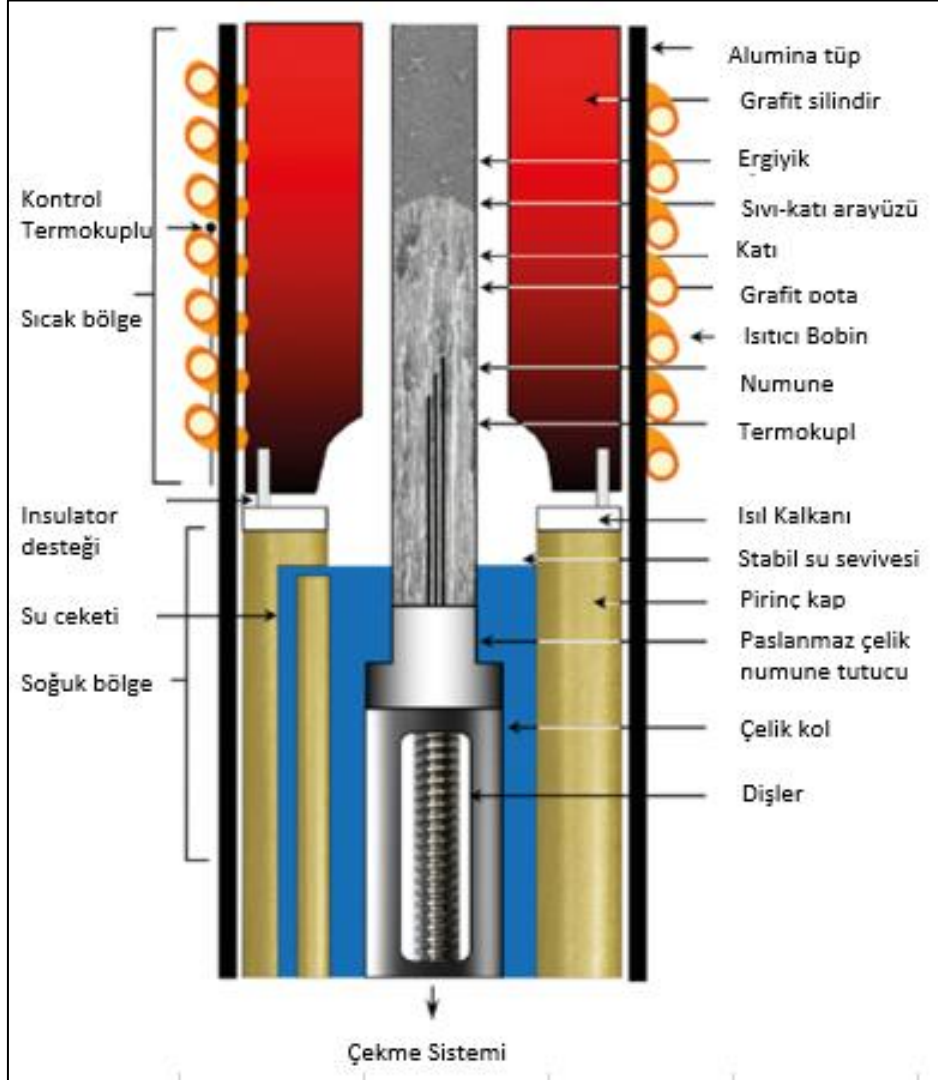
- CGDS (Sütunsal yönlendirilmiş taneli süper alaşım)
- SCDS (Yönlendirilmiş tek kristalli süper alaşım)
- PC (Çok taneli süper alaşım)



Şekil 2.6. Seramik kalıba döküm yönteminin şematik gösterimi

Motorların yüksek basınçlı türbinlerinde genellikle yüksek sürünme gerilimi ve mekanik özellikler gerektirdiği için tek kristalli ve yönlendirilmiş taneli malzemeler kullanılırken arka türbin kademelerinde eş eksenli süper alaşımların kullanılması yeterli olmaktadır. Tek kristalli ve yönlendirilmiş taneli süper alaşımların üretiminde ise parametrelerin büyük oranda kontrol altına alındığı bir döküm yöntemi olan yönlendirilmiş katılaşma metodu kullanılmaktadır. (Bkz. Şekil 2.7) Ni bazlı Süper alaşımlar türbin kanatçıkları dışında motor dış çerçevesi ve türbin diski gibi komponentlerde de kullanılmaktadır. Bu komponentlerin geometrik ölçüleri daha büyük mikroyapısal ve mekanik gereklilikleri daha temel seviyede

olduğu için nihai geometrileri torna, freze, edm gibi talaş kaldırma yöntemleri ile verilir. Bu sebeple hammadde aşamasında da bu malzemeler ingot döküm yöntemi ile üretilirler.



Şekil 2.7. Bridgman tipi yönlendirilmiş katılaştırma fırını [19]

(Metod temelde ergimiş metalin yavaş ve kontrollü bir biçimde soğutulmasıyla tane sınırlarının istenilen yönde oluşmasına veya hiç oluşmayarak tek kristalli bir yapının meydana gelmesini sağlar). Çizelge 2.1’de süper alaşım malzemelerdeki ana kristal yapısının büyük oranda YMK olduğunu görülebilir. Süper alaşımların birçoğu ağırlıkça %40 oranında 5-10 elementin karışımından oluşurlar. Söz konusu elementlerin hangileri olduğu Şekil 2.7’de görülebilir.

IIA	IIIA	IVB						
	B 0.097	C 0.077						
	Al 0.143		IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	VIIIA
		Ti 0.147	V 0.132	Cr 0.125		Fe 0.124	Co 0.125	Ni 0.125
	Y 0.181	Zr 0.158	Nb 0.143	Mo 0.136		Ru 0.134		
		Hf 0.159	Ta 0.147	W 0.137	Re 0.138			

γ' öncesi
 Minör alaşım elementi
 γ öncesi

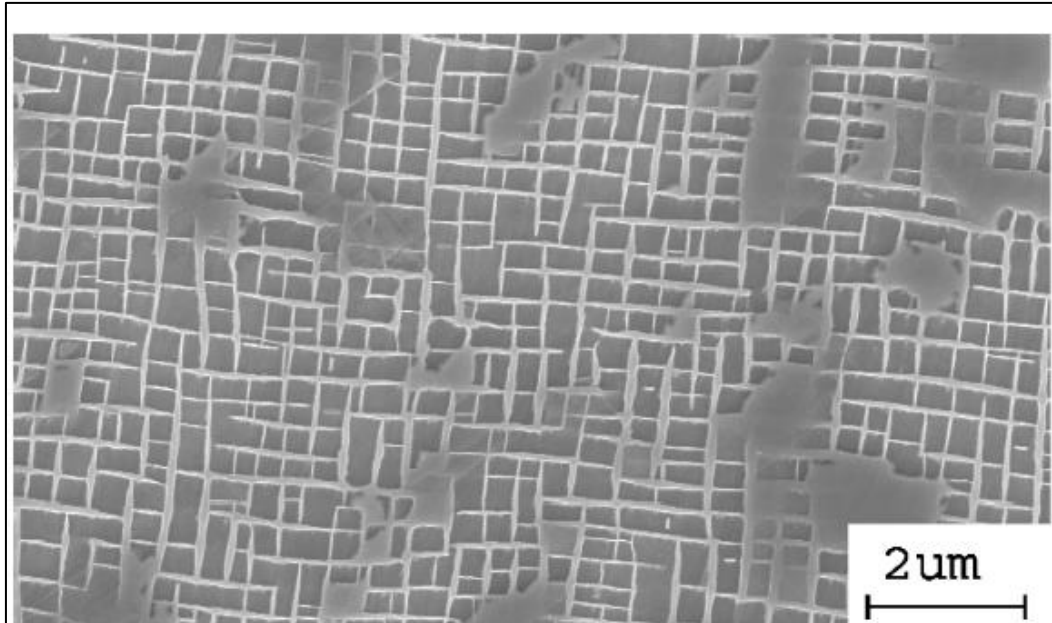
Şekil 2.8. Ni bazlı süper alaşımlarda kullanılan yaygın alaşım elementleri

Nikel-Alüminyum ikili sistemi süper alaşım kompozisyonları için temel yapıtaşını oluşturmaktadır. Nikel içerisine eklenen alüminyum ile γ yapılı nikel ikinci faz çökmesi artar. Çökelen ikinci fazın nominal yapısı Ni_3Al 'dir ve γ' sembolü ile gösterilir. γ' fazı mikroyapı içerisinde kübik veya sferoid olarak gözlemlenebilir katı haldeki durumu aşırı doymuş katı çözelti olarak gözlemlenir. Temel olarak Ni bazlı süper alaşımların mekanik dayanımlarını sağlayan mekanizma ise bu iki faz arasındaki intermetalik bağlanma olarak belirtilebilir [20].

Çizelge 2.1. Ticari nikel bazlı süper alaşımların kimyasal kompozisyonlarının gösterimi

Alaşımlar	Cr	Co	Mo	W	Ta	Re	Nb	Al	Ti	Hf	C	B	Y	Zr	Diğer
<i>Ticari Döküm Alaşımları</i>															
Mar-M246	8.3	10.0	0.7	10.0	3.0	—	—	5.5	1.0	1.50	0.14	0.02	—	0.05	—
Rene' 80	14.0	9.5	4.0	4.0	—	—	—	3.0	5.0	—	0.17	0.02	—	0.03	—
IN-713LC	12.0	—	4.5	—	—	—	2.0	5.9	0.6	—	0.05	0.01	—	0.10	—
C1023	15.5	10.0	8.5	—	—	—	—	4.2	3.6	—	0.16	0.01	—	—	—
<i>Yönlü Katılaştırılmış Alaşımlar</i>															
IN792	12.6	9.0	1.9	4.3	4.3	—	—	3.4	4.0	1.00	0.09	0.02	—	0.06	—
GTD111	14.0	9.5	1.5	3.8	2.8	—	—	3.0	4.9	—	0.10	0.01	—	—	—
<i>1. Nesil Tek Kristal Alaşımlar</i>															
PWA 1480	10.0	5.0	—	4.0	12.0	—	—	5.0	1.5	—	—	—	—	—	—
Rene' N4	9.8	7.5	1.5	6.0	4.8	—	0.5	4.2	3.5	0.15	0.05	0.00	—	—	—
CMSX-3	8.0	5.0	0.6	8.0	6.0	—	—	5.6	1.0	0.10	—	—	—	—	—
<i>2. Nesil Tek Kristal Alaşımlar</i>															
PWA 1484	5.0	10.0	2.0	6.0	9.0	3.0	—	5.6	—	0.10	—	—	—	—	—
Rene' N5	7.0	7.5	1.5	5.0	6.5	3.0	—	6.2	—	0.15	0.05	0.00	0.01	—	—
CMSX-4	6.5	9.0	0.6	6.0	6.5	3.0	—	5.6	1.0	0.10	—	—	—	—	—
<i>3. Nesil Tek Kristal Alaşımlar</i>															
Rene' N6	4.2	12.5	1.4	6.0	7.2	5.4	—	5.8	—	0.15	0.05	0.00	0.01	—	—
CMSX-10	2.0	3.0	0.4	5.0	8.0	6.0	0.1	5.7	0.2	0.03	—	—	—	—	—
<i>Dövme Süperalaşımlar</i>															
IN 718	19.0	—	3.0	—	—	—	5.1	0.5	0.9	—	—	0.02	—	—	18.5Fe
Rene' 41	19.0	11.0	10.0	—	—	—	—	1.5	3.1	—	0.09	0.005	—	—	—
Nimonic 80A	19.5	—	—	—	—	—	—	1.4	2.4	—	0.06	0.003	—	0.06	—
Waspaloy	19.5	13.5	4.3	—	—	—	—	1.3	3.0	—	0.08	0.006	—	—	—
Udimet 720	17.9	14.7	3.0	1.3	—	—	—	2.5	5.0	—	0.03	0.03	—	0.03	—
<i>Tozdan Üretilmiş Süperalaşımlar</i>															
Rene' 95	13.0	8.0	3.5	3.5	—	—	3.5	3.5	2.5	—	0.065	0.013	—	0.05	—
Rene' 88 DT	16.0	13.0	4.0	4.0	—	—	0.7	2.1	3.7	—	0.03	0.015	—	—	—
N18	11.2	15.6	6.5	—	—	—	—	4.4	4.4	0.5	0.02	0.015	—	0.03	—
IN100	12.4	18.4	3.2	—	—	—	—	4.9	4.3	—	0.07	0.02	—	0.07	—

Çözelti ve dağılım kinetiği nedeni ile γ fazı solvüs sıcaklığı boyunca soğutulduğunda çok hassastır. Yaklaşık 40 K/dk soğuma hızında oluşan süper alaşım mikroyapısında tek tip bir ince γ fazı dağılımı oluşur ve çökeltiler 300-500 nm aralığındadır. Daha düşük soğuma hızlarında katmanlı bir γ çökeltisi oluşacaktır [21].



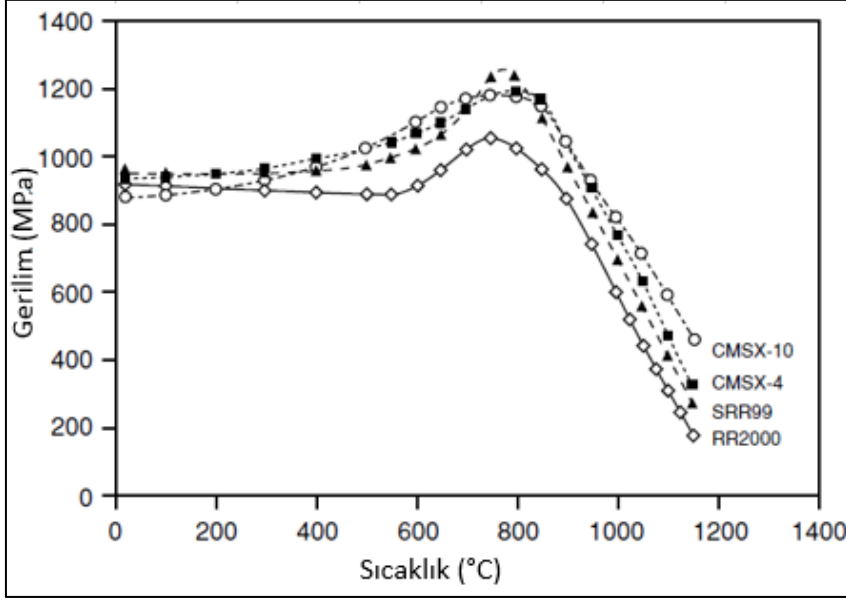
Şekil 2.9. Ni bazlı bir süper alaşımın mikroyapısı. Kübik görümlü olan yapılar γ fazının çökeltileridir

Ni bazlı süper alaşımlarda γ fazının katı hal çözünürlüğü için elektriksel ve yapısal özellikleri çok farklı olan W, Nb ve Re gibi refrakter alaşım elementleri yapıya eklenir. Ayrıca Ti, Ta ve Nb ilavesi de dizilime katkıda bulunarak $Ni_3(Al, Ti, Ta, Nb)$ γ fazının güçlenmesini sağlar. Nikel-Demir bazlı süper alaşımlar ise yaygın kullanıma sahip önemli bir süper alaşım grubudur. Bu grubun kullanımı en yaygın olan alaşımı ise IN 718 olarak bilinmektedir. Alaşımlama elementleri olarak Cr, Y ve La ilavesi ise alümina fazının dizilimini optimize ederek alaşımın korozyon direncini artırır.

Bazı elementlerin düşük miktarda ilavesi ise tane sınırlarının kontrolüne büyük oranda katkı sağlayarak tane sınırlarının büyük etkisi olan mekanik özelliklerinde iyileşmesine katkı sağlar. B, C, Hf ve Zr elementlerinin çok düşük miktarlarda ilavesi sonucunda tane sınırlarında borür ve karbür çökmesini sağlayarak malzemenin maksimum çalışma sıcaklığına geldiğinde tane sınırlarında plastik deformasyonların oluşmasını engeller. Yapıdaki C elementi Hf, Zr, Ta, Ti, Nb, W, Mo, V ve Cr için aktif davranır ve bu elementlerle birleşerek MC (M= metal atom) karbürlerini oluşturur.

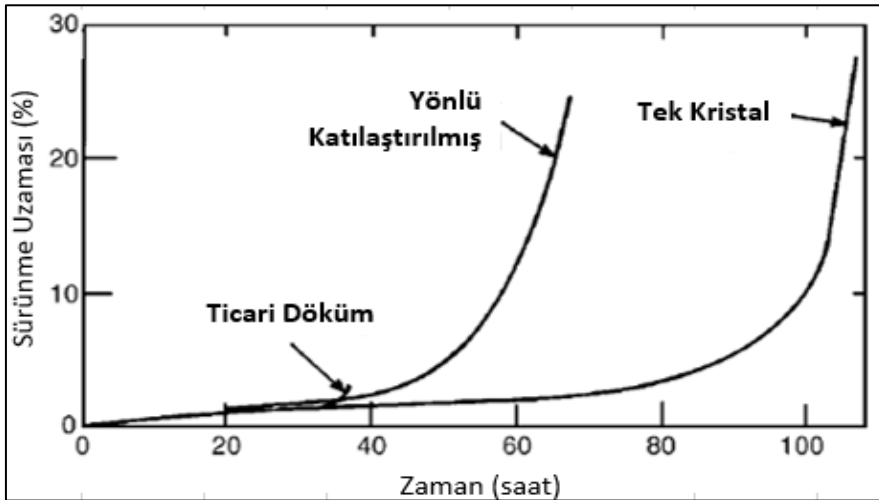
2.3. CMSX-4 SLS ve CM247 LC Süper Alaşımları

CMSX-4 SLS yönlendirilmiş katılaştırılma metodu ile üretilmiş nikel bazlı, tek kristalli ve ikinci nesil bir süper alaşımdır. SLS ifadesi alaşım içerisindeki sülfür kompozisyonunun 2ppm ve altında olduğunu belirtmektedir. Malzeme içerisindeki sülfür içeriği segregasyona neden olacağı için malzemenin mekanik ve korozyon özelliklerini olumsuz anlamda etkileyecektir. Yüksek mekanik, korozif ve sıcaklık dayanımları nedeni ile yaygın olarak modern havacılık motorlarında yüksek basınç türbini bıçaklarında kullanılırlar. Kimyasal içeriği için (Bkz. Çizelge 2.1) ikinci nesil olan bu süper alaşımı önceki nesillerinden ayıran karakteristik niteliklerden biri içeriğindeki %3'lük Re ilavesidir. Bu ilavenin sebebi tane sınırlarının güçlendirilmesi ve dolaylı olarak sürünme, oksidasyon gibi dirençlerinde artırılmasıdır. Birinci nesil süper alaşımlar da bu işlevi yerine getirmesi için sertlik kazandıran Ta, Ti, Al ve tane sınırı güçlendiren C ve B gibi elementler kullanılıyordu. Y, Hf, Re gibi nadir toprak elementlerinin süper alaşımların tane sınırlarına ve korozyon dayanımlarına olan etkilerinin keşfedilmesi ile diğer tane sınırı güçlendirici elementlerin güncel alaşımlarda kullanımı minimize olmuştur. Üçüncü nesil tek kristal bir süper alaşım olan CMSX-10'da ise Re ilavesi %6'ya çıkarılmıştır.

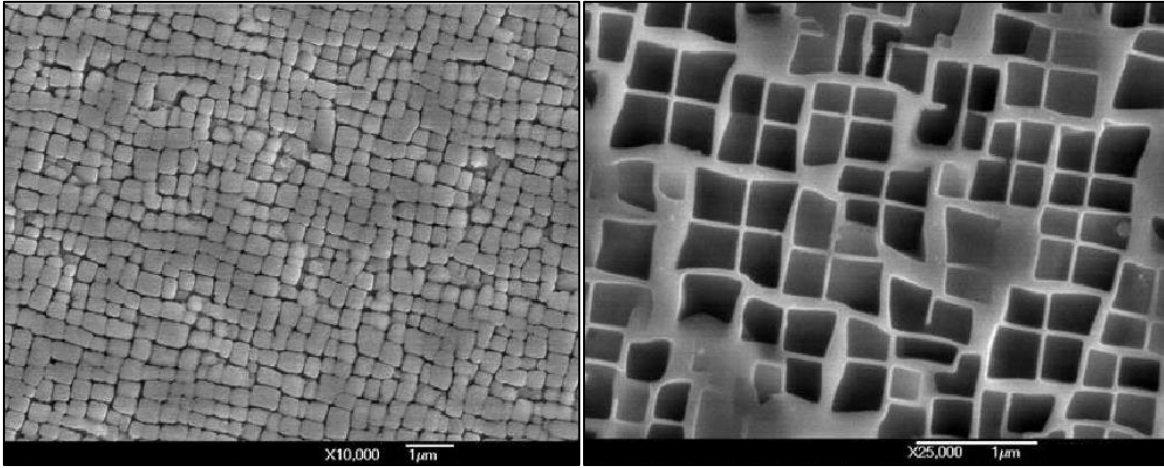


Şekil 2.10. CMSX-4 ve yaygın bazı tek kristalli süper alaşımların sıcaklığa bağlı akma dayanımlarının gösterimi [6]

CMSX-4 gibi tek kristalli süper alaşımların birinci nesil ve çok taneli süper alaşımlara göre ne gibi avantajları olduğu incelendiğinde en büyük avantajlarının mikroyapısında tane sınırı bulundurmadığı için sürünme, akma, kopma dayanımı gibi mekanik özelliklerin diğer süper alaşımlardan üstünlüğü olduğu görülmüştür. Tek kristalli malzemelerde mekanik yükler tane sınırlarında yığılmayacaktır ve zayıf olan bu bölgelerden mekanik deformasyon başlamayacaktır. Bu sebeple malzemenin statik ve dinamik yüklenmelere karşı dayanımı daha yüksek olacaktır. (Bkz. Şekil 2.11)

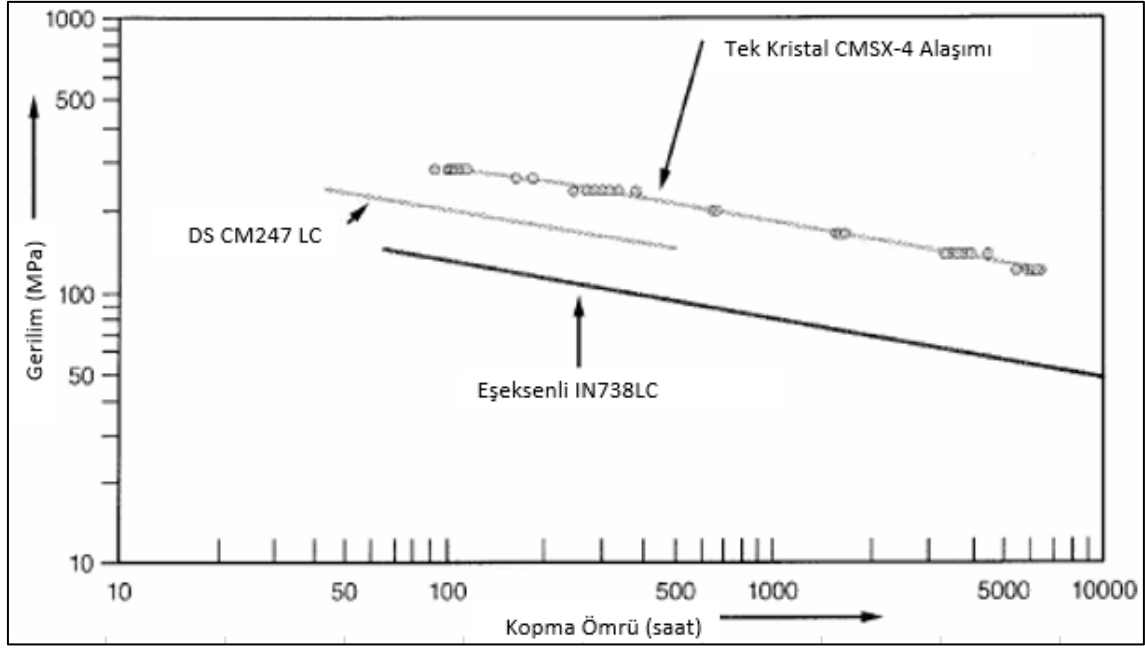


Şekil 2.11. Mar-M200 malzemesinin 260 MPa ve 982 °C'de sürünme dayanımlarının tane yapılarına göre kıyaslanması (Ticari döküm, sütunsal yönlendirilmiş katılaşma, tek kristal)



Şekil 2.12. CMSX-4 süper alaşımının mikroyapısı 10.000X büyütme (solda) ve 25.000X büyütme (sağda)

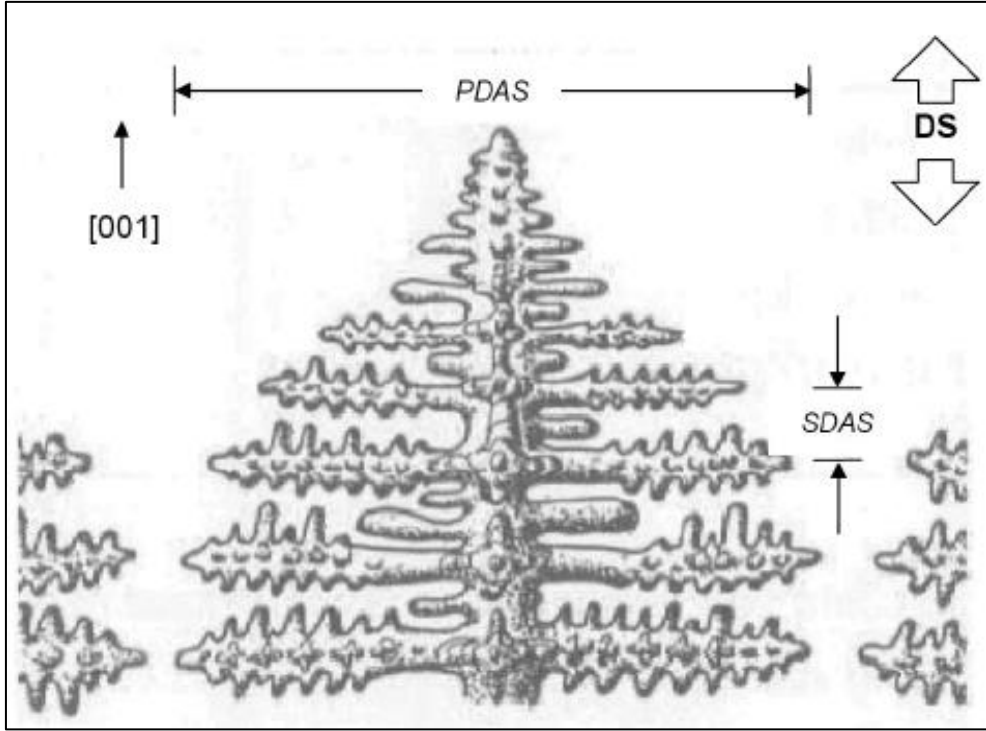
CM247-LC Cannon-Muskegon tarafından yönlendirilmiş katılaştırma tekniği ile üretilmiş Ni bazlı bir süper alaşımdır. CMSX-4'ün aksine tane sınırları içerir. Fakat bu tane sınırlarının oryantasyonları standart ticari malzemelerdeki gibi eş eksenli yapıda değildir. Tane sınırları alaşımın dökümü sırasında kontrol altında tutulan soğutma parametrelerine bağlı olarak anizotropik bir dizilim sağlamıştır. Tane sınırları birbirlerine ve söz konusu türbin kanatçığının yük eksenine paralel olarak yönlendirilir. Bunun nedeni tane sınırlarına dik gelen yüklerin düşük bağlanma kuvvetlerinden dolayı tane sınırlarını birbirlerinden ayırarak sürünme ve ilerleyen seviyelerde yorulma kırılmasına neden olmasını engellemektir. CM247 LC alaşımı mekanik özellikler bakımından CMSX-4 ve muadili tek kristalli malzemelerden daha düşük özellikler sergilemektedir. (Bkz. şekil 2.13)



Şekil 2.13. CMSX-4, CM 247 LC ve IN738 LC alaşımlarına 982°C’de statik kuvvet altında yapılan çekme deneyi ve kopma dayanımları

Bununla birlikte daha düşük üretim maliyetleri ve diğer eş eksenli tanelere sahip süper alaşımlara göre yüksek olan sürünme, yorulma gibi önemli mekanik özellikleri sayesinde gaz türbini olarak yaygın kullanım alanına sahip olmuştur. (11 farklı motorda 22 türbin ve vane uygulaması vardır)

CM247LC gibi yönlendirilmiş taneli alaşımların katılaştırılması sırasında birincil dentritler katılaşma yönüne paralel olarak büyürler. İkincil ve üçüncül dentrit kolları ise dışa doğru [100] ve [010] yönlerine doğru büyürler. Şekil 2.12 de birincil ve ikincil dentrit kollarını ve kol açıklıklarını gösteren şematik bir gösterim verilmiştir.



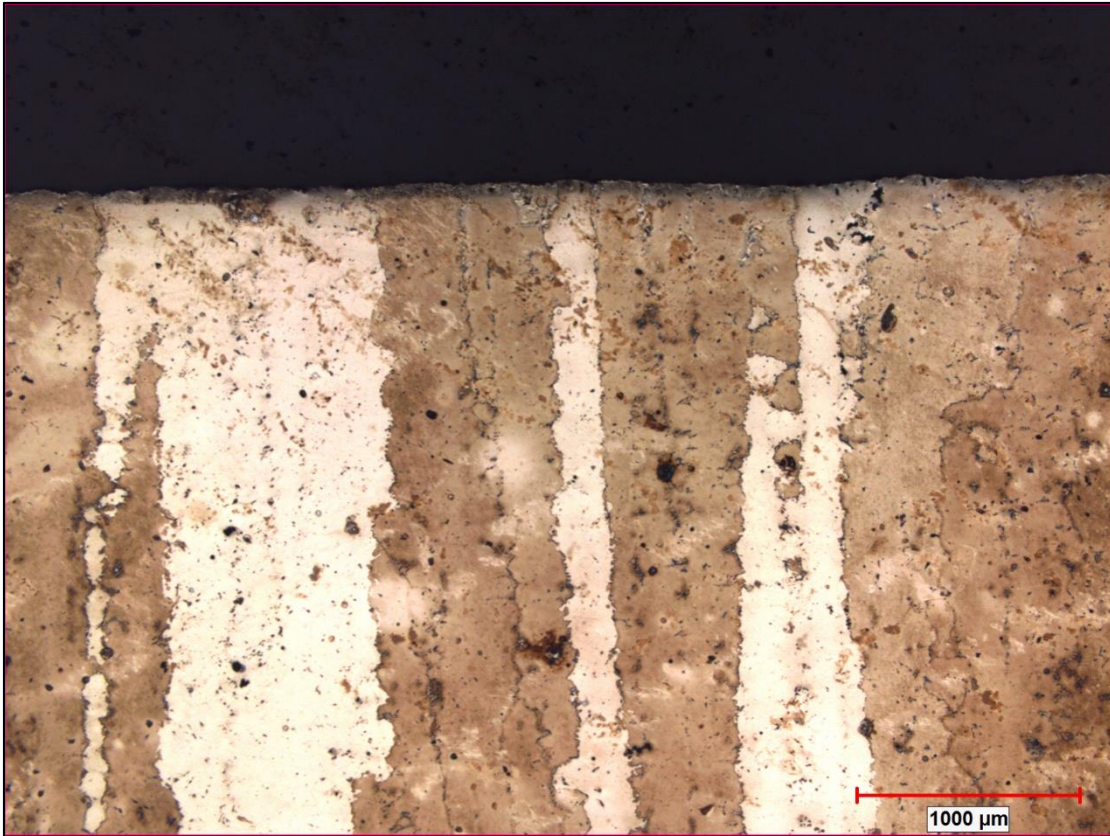
Şekil 2.14. Dendrit kolları şematik gösterimi [22]

Yapı içerisindeki dendritlerin uzun olması yayılma eğiliminde olan çatlakların saptırılmasını sağlayarak tokluğu artırıcı bir mekanizma olarak görev yapar. CM247LC alaşımı hacimsel olarak yaklaşık %65 oranında γ' fazından oluşur. Katılaşıma yönüne paralel olan tanelerin en boy oranları 10 genişlikleri ise yaklaşık 0,5 mm'dir. Alaşım MARM247 alaşımı üzerinde çalışarak bu alaşımın yönlü katılaştırılma, esneklik, yorulma dayanımı ve karbür kararlılığı geliştirilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Çizelge 2.2'de alaşımların kimyasal kompozisyonu verilmiştir. MARM247 ile CM247LC kıyaslandığında C oranının düşürüldüğü görülmektedir. Bunun sebebi tane sınırlarına çökelen karbürlerin engellenmesidir. Ayrıca Ti, Zr elementlerinde ağırlıkça düşürülmüş olmasının nedeni tane sınırlarının çatlak ilerlemesine karşı olan direncini arttırmaktır. W ve Mo seviyelerinin düşürülmesinin nedeni ise ısı sebepleriyle tetiklenen ve istenmeyen ikincil M_6C çökeltileri, α fazı ve W çökeltilerini engellemektir [23].

Çizelge 2.2. CMSX-4 ve CM247-LC süper alaşımlarının kimyasal kompozisyonları [24]

<i>Element/ Malzeme</i>	%Al	%B	%C	%Co	%Cr	%Hf	%Mo	%Re	%Ta	%Ti	%W	%Zr	%Ni
CMSX-4	5,6	-	-	9,6	6,5	0,1	0,6	3	6,5	1	6,4	-	Kalan (60,7)
CM247-LC	5,6	0,015	0,07	9,2	8,1	1,4	0,5	-	3,2	0,7	9,5	0,015	Kalan (61,7)

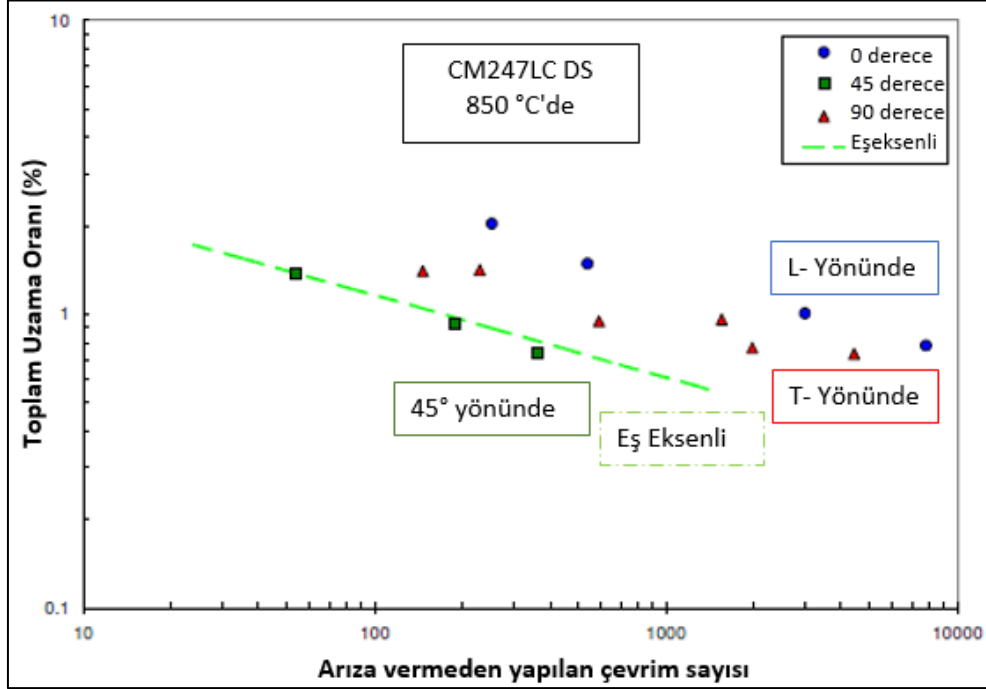
CM247LC alaşımı da Ni bazlı bir süper alaşım olduğu için mikroyapısı γ - γ' fazlarından oluşur. Fakat γ' fazının hacimsel oranı ve tanelerin büyüklüğü soğuma hızı ile yakından ilgilidir.



Şekil 2.15. CM247LC alaşımının mikroyapısı (25X) [25]

Yönlendirilmiş taneli alaşımlarda kritik bir öneme sahip olan bir başka parametre ise tane sınırlarının birbirleri ile yaptığı açıdır. Bu açıya bağlı olarak malzemenin anizotropiklik seviyesi değişmektedir. Yani parçanın belirli bir yönde göstermiş olduğu dayanım doğrudan taneler arasındaki açı ile ilintilidir. Dolayısı ile bu gibi malzemeler kullanım alanlarında

değerlendirilmek istendiğinde mutlak olarak mikroyapısı incelenmeli ve tane sınırları arasındaki açı tespit edilmelidir.



Şekil 2.16. CM247LC alaşımının tane sınırı oryantasyonlarına göre düşük çevrim sayılarındaki yorulma dayanımları [24]

2.4. Sürünme Direncini Belirlemede Larson-Miller Prensibi

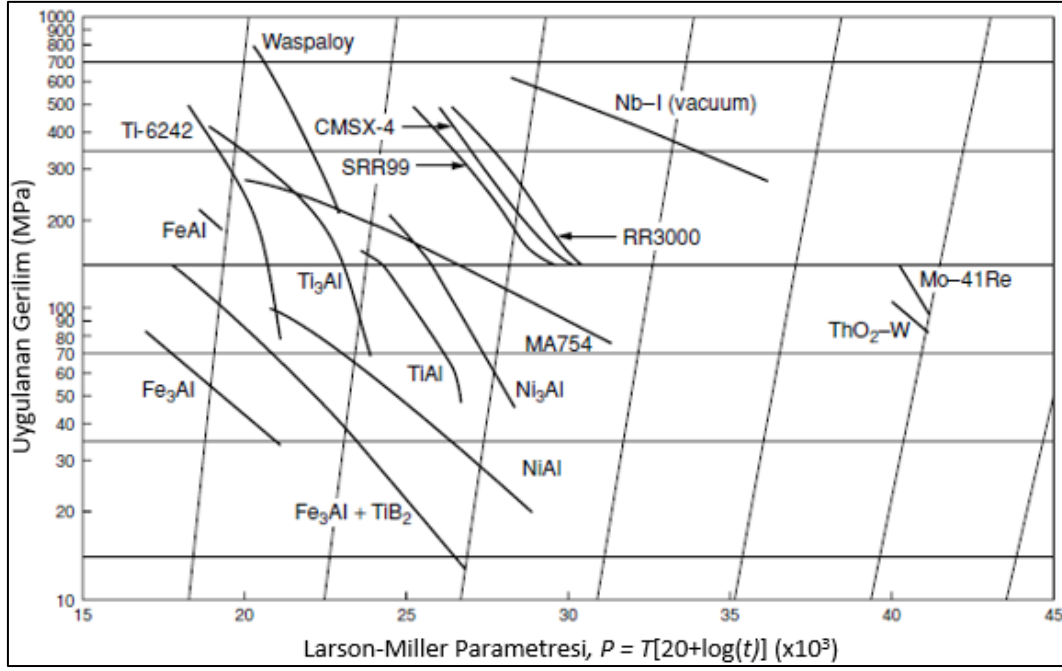
Türbin uygulamalarında kullanılacak süper alaşımlarda kullanım şartlarına göre malzeme seçmeden önce genellikle Larson-Miller prensibine göre alaşımın sürünme direnci belirlenir ve uygulamaya karar verilir. Bu prensibe göre; P_{LM} değeri ve kopma dayanımı en yüksek süper alaşımlar yüksek sıcaklıklarda sürünme direnci en iyi olan alaşımlardır. Larson Miller prensibi Eş. 2.1'de verilmiştir. [26-28].

$$P_{LM} = T (C + \log t) \quad (2.1)$$

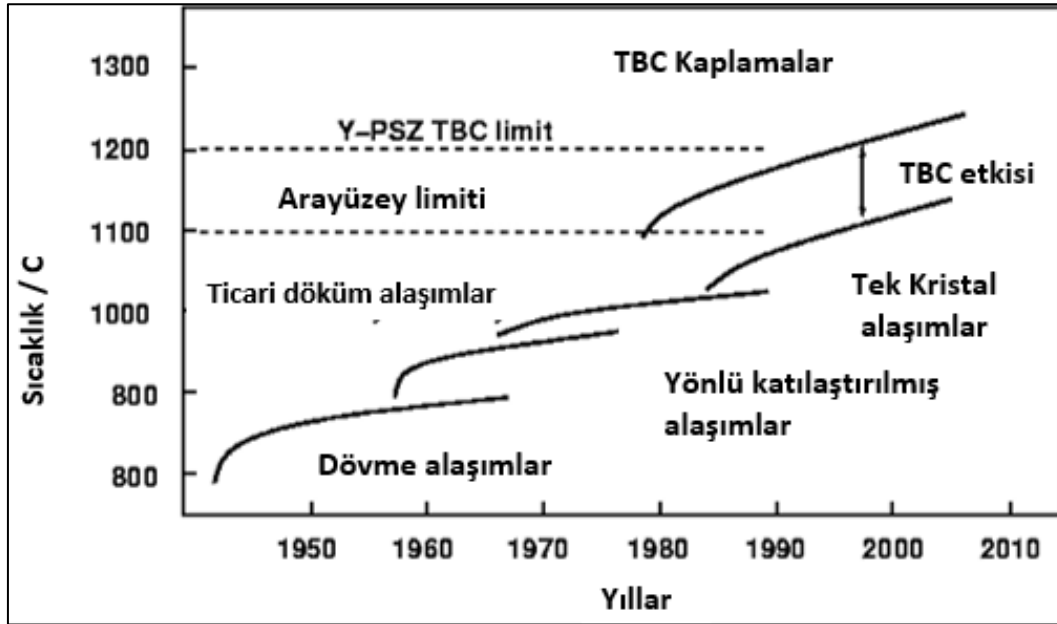
C: 20-30 (Larson Miller Sabiti. Her bir malzeme grubu için farklılık gösterir)

T: Test Sıcaklığı (Kelvin)

t: test sıcaklığında numunenin kopma süresi zaman (saat)



Şekil 2.17. Bazı yaygın süper alaşımların Larson-Miller parametrelerinin kıyaslanması [6]



Şekil 2.18. Yıllara göre türbin bıçaklarının maruz kaldığı çalışma sıcaklıkları ve TBC etkisi [9]

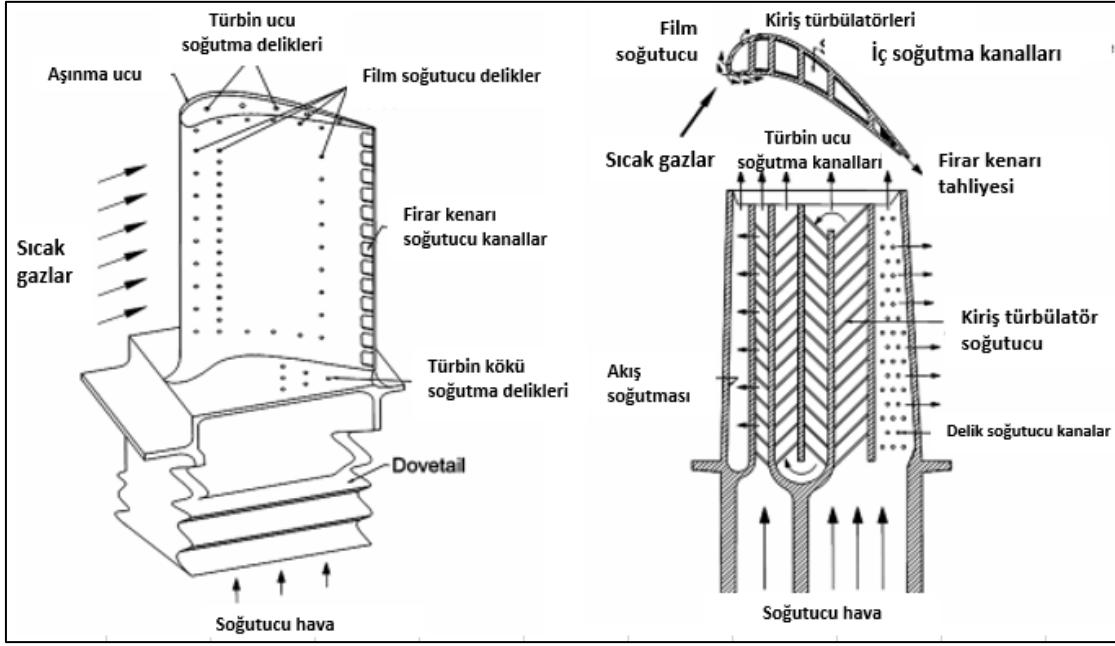
3. TÜRBİN UYGULAMALARINDA KULLANILAN SÜPER ALAŞIM KAPLAMA METODLARI

Günümüzün ekonomik ve çevresel kaygıları, havacılık motorlarının sürekli olarak daha verimli, yüksek performanslı ve düşük emisyonlu olmasını gerektirmektedir. Buna bağlı olarak da motorların çalışma sıcaklıklarının yükseltilmesi bu alandaki en kritik rekabet faktörlerinden biri haline gelmiştir. Böylelikle motorların termodinamik olarak verimliliği artmakta ve atmosfer kirletici emisyon oranları azalmaktadır. Bu kapsamda yapılan geliştirme çalışmalarının ilk yıllarında, yüksek sıcaklıklar için alternatif malzeme arayış çalışmaları oldukça yoğun bir şekilde sürmekteydi. 1950'lerin başlarında yeni süper alaşım gruplarının geliştirilmesinin yanında süper alaşım döküm teknolojilerinde de kökten gelişmeler yaşandı. Bunun üzerine 1960'larda türbin kanatçıkları için soğutma sistemlerinin geliştirilmesi, türbin bıçakları çalışma sıcaklıklarının 20 °C'nin üzerinde artmasına izin veren önemli adımlardı [29, 30].

Geçtiğimiz 20-30 yıl içerisinde ise süper alaşım teknolojisindeki geliştirilmelerin yanı sıra yönlendirilmiş katılaşma ve tek kristal alanlarında yaşanan kritik ilerlemeler yanma odalarının ve türbin bıçaklarının çalışma sıcaklıklarında artış sağlamıştır. Fakat salt bu ilerlemenin yeterli olmayacağı görülerek malzemelerin termal özelliklerinin kaplamalar ile daha yüksek oranlarda geliştirilebildiği görüldü ve termal koruyucu kaplamalar hızla araştırmaların merkezindeki yerini aldı. Termal koruyucu kaplamalar vasıtasıyla termal ve oksidasyon özellikleri geliştirilen bu alaşımlar gaz türbinli havacılık motorları, enerji üretim jeneratörleri, denizcilik motorları gibi alanlarda yoğun olarak kullanılmaya başlandı. Malzeme ve kaplama geliştirilmesindeki temel amaç türbin bıçaklarının daha yüksek sıcaklıkta dengeli olarak çalışmasını sağlamaktır. Tabii ki bu şartlar türbin bıçaklarının daha zorlu çevresel ve mekanik zorlanmalara maruz kalmasına neden oluyordu. Şartlardaki değişimler, söz konusu malzemelerin kendi özgül oksidasyon ve korozyon dayanımlarının da arttırılması gerekliliğini doğuruyordu. Kaplamaların oksidasyonu dayanımlarını arttırdığı görülmüş fakat malzemelerin yüksek sıcaklıktan dolayı yapısal bozunmalara uğrayarak mekanik dayanımlarının da düştüğü tespit edilmiştir. Bu süreçte süper alaşımların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi adına alaşımlama ile yapılan bazı iyileştirmeler söz konusu malzemelerin korozyon direncinin düşmesine neden olmuştur.

Söz konusu termal koruyucu kaplamaların temel amacı yüksek sıcaklıklarda düşük korozyon dayanımı gösteren ana metalin korozyon dayanımını arttırmak olarak belirtilebilir. Bunu sağlayan kaplamalara yayılım(difüzyon) kaplamaları adı verilir.(aluminit, Pt-aluminit, MCrAlY). Genelde yayılım kaplamaların üzerine ikinci bir katman olarak termal dayanımı çok yüksek olan seramik bir katman uygulanır. Bu kaplama sistemlerine ise literatürde ve endüstride ‘Termal Barrier Coating’ (TBC) adı verilir. Bu kaplama çeşidinde metal yüzeyi 1-5mm arası çok düşük ısı iletkenlik özelliğine sahip çeşitli seramik bileşenleri ile katmanlı yapılar halinde kaplanır. Bu sayede uygulamaya bağlı olarak çalışma sıcaklığının 100-300°C aralığında artması sağlanır [31, 32].

Şekil.2.5’de Rolls-Royce Trent 800 motoru için malzeme kullanımının şematik gösterimi verilmiştir. Şema incelendiğinde görece düşük sıcaklıklarda çalışan düşük basınç kompresör grubunda ve fan bölgesinde titanyum alaşımlarının kullanıldığı görülmektedir. Diğer yandan yanma odası ve yüksek basınç türbinleri incelendiğinde ise nikel bazlı süper alaşımların yoğun olarak tercih edildiği görülebilir. Sıkıştırma ve yanma sonrasında yüksek basınç türbini bölgesine gelen havanın 1400 °C’ye ulaşması bu bölgede Ni bazlı süper alaşımların tercih edilmesine neden olmuştur. Fakat türbin bıçaklarının yüzeylerindeki TBC kaplamanın seramik katmanı düşük termal iletim özellikleri sayesinde bu sıcaklığı yaklaşık 300 °C düşürerek seramik kaplamanın bittiği difüzyon kaplama bölgesinin başladığı bölgenin sıcaklığının 1100 °C civarında kalmasını sağlar. Buna ilave olarak türbin bıçakları üzerindeki soğutma sistemi sayesinde bu sıcaklığın 100-200 °C arasındaki bir kısmı da soğutma sayesinde yüzeyden uzaklaştırılır (Bkz. Şekil 3.1). Bu sayede türbin bıçağı ana metal yüzeyinin yaklaşık 930 °C’de kalması sağlanır.



Şekil 3.1. Modern bir gaz türbini ve güncel soğutma sistemlerinin gösterimi [33]

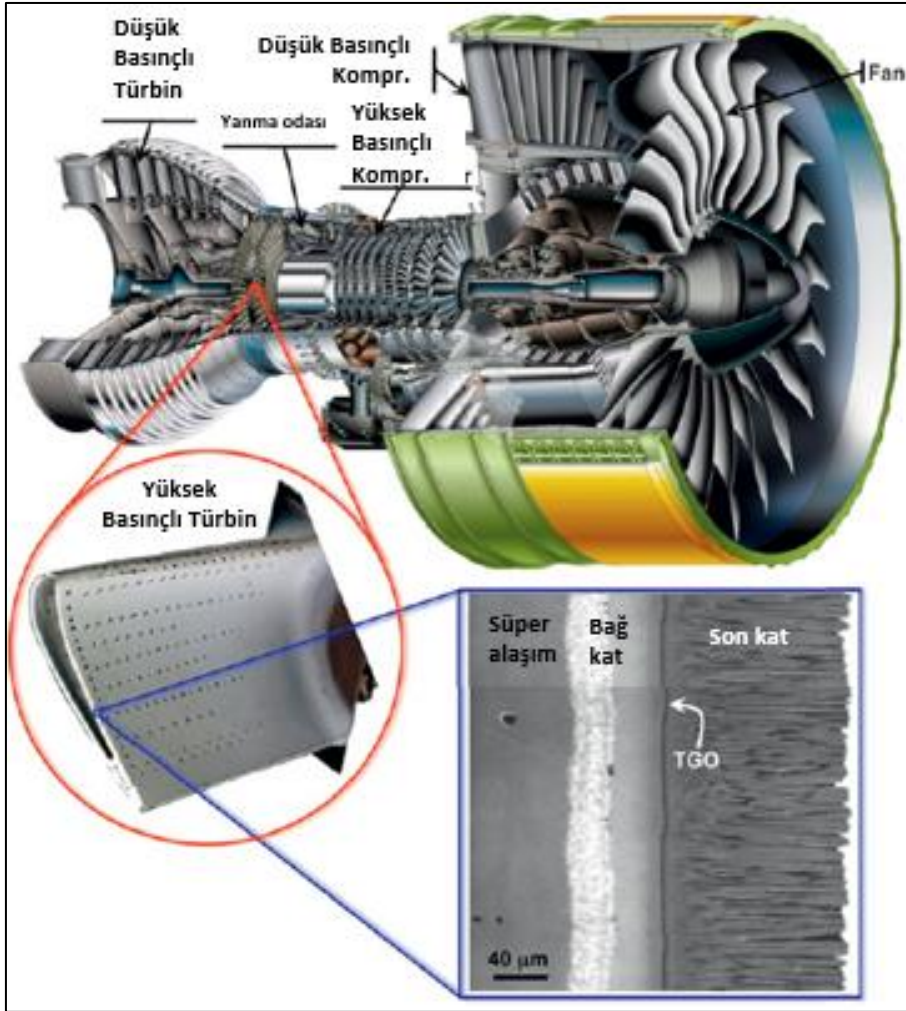
Türbin bıçaklarına uygulanan kaplamaların geliştirilmesindeki temel amaç bıçakların ve imal edildikleri malzemenin mekanik özelliklerinin çalışma ortamındaki agresif çevresel şartlardan olumsuz anlamda etkilenmesini minimize etmektir. Ayrıca TBC kaplamalar; ısı bariyer görevi görme, sürünmeye bağlı plastik deformasyonu engelleyerek termal gradyanların düşmesini sağlarlar. Bununla birlikte bugüne kadar geliştirilmiş kaplama metotlarından hiçbirisi zorlu türbin çalışma şartlarından tamamen kurtulamamıştır. En temel bozunma nedenleri ise şu şekildedir;

- Yüksek sıcaklık oksidasyonu
- Sıcak korozyon
- Termal ve termo-mekanik yorulma hasarları
- Aşınma sonucu mekanik hasarlar
- Aşırı ısınma sonucu sürünme bozunması

Ayrıca türbin bıçaklarındaki malzeme yüzeyi ve çekirdeği arasında gerçekleşen difüzyon aktiviteleri sonucunda istenmeyen fazların oluşabileceği görülmüştür. Bu da ayrı bir bozunma türü olarak değerlendirilebilir [31].

3.1. TBC Kaplamalar

Güncel termal bariyer kaplamalar temelde iki katmandan meydana gelir. Bu katmanlar, metal bazlı bağ kat ve seramik bazlı son kattır. Bağ katmanın temelde iki kritik görevi olduğu söylenebilir, bunların ilki seramik son katmanın yapışması için uygun yüzeyi sağlamak diğeri ise süper alaşım malzeme yapısının çevre şartlarından etkilenerek bozunmasını engellemektir. Seramik temelli son katın ana görevi ise, kaplama altındaki bağ katmanın ve ana metal yüzeyinin yanma gazları tarafından oluşturulan ısının etkisinden izole ederek ısınmasını engellemektir [34].



Şekil 3.2. Engine Alliance GP7200 motoruna ait 10cm uzunluğundaki yüksek basınç türbin kanatçığının TBC kaplamalı kesitinin SEM mikroskobu ile çekilmiş görüntüsü [35] (Son kat olarak EB-PVD yöntemiyle ağırlıkça %7 YSZ kaplanmıştır)

Bağlayıcı katman için yaygın olarak β -NiAl fazını oluşturan aluminid kaplamalar ve β -NiAl - γ' -Ni₃Al karışımı veya γ fazını oluşturan MCrAlY (M = Ni, Co, or NiCo)

kaplamaları difüzyon kaplamalar olarak kullanılır. Seramik son kata rağmen türbin bıçağının yüzeyi 900°C ve üzerindeki sıcaklıklara çıkar bunun sonucu olarak bağ katman sıcak korozyon etkisiyle okside olur ve Şekil 3.2.'de görülebilecek, TGO (Isıl büyümüş oksit) adı verilen oksit tabakasının oluşmasına neden olur.

Son kat olarak yaygın kullanımı olan YSZ (ağırlıkça % 7~8 Y₂O₃ ile takviye edilmiş ZrO₂) başarılı bir son kat olabilmek için karakteristik ve üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikler; yüksek ergime sıcaklığı, düşük ısıl iletkenliği, yüksek ısıl genleşme katsayısı ve bağlayıcı katman üzerinde oluşan alümina ile teması halinde termodinamik olarak dengeli olması olarak sıralanabilir. Ayrıca YSZ'nin diğer seramiklerle kıyaslandığında 1200 °C altındaki sıcaklıklarda daha iyi bir faz kararlılığı gösterdiği ve aşınmaya karşı direncinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [35, 36].

TBC kaplamaların mekanik dayanım sınırlarını belirleyen temel unsurlar, çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve son kat ile bağ kat arasındaki birleşme seviyeleridir. Birleşmeler bağ kat/TGO veya son kat/TGO arasında oluşur. Gerilimler de TBC üzerindeki çatlak başlama mekanizmasının tetiklenmesinde önemli rol oynar. Gerilimler temel olarak TGO büyümesinden ve termal genleşme katsayısının iki yüzey arasındaki genleşme özelliklerinin farklılığından olmak üzere iki unsurdan oluşur. Bu sebeple bağ katın oksit dayanım seviyesinin olabildiğince yüksek olması beklenir. Bu gereklilikler paralelinde incelendiğinde, termal oksit tabakasının yavaş büyümesi ve yüzeye tutunma özelliklerinin yüksek olması sebebi ile alüminanın bağ kat olarak sıklıkla kullanıldığı görülebilir. TBC üzerindeki streslerin önemli bir nedeni de bağ katın yüzey pürüzlülüğüdür. TGO ve termal genleşmeye bağlı gerilmeler bağ katın düz olduğu yüzeylerde basma gerilmesi uygularlar. Termal uyumsuzluk gerilmesi aşağıda Eş. 3.1'de verilmiştir [35, 36].

$$\sigma_t = (\alpha_c - \alpha_{\text{yüzey}}) \Delta T E_c / (1 - \nu_c) \quad (3.1)$$

- σ_t : Termal Uyumsuzluk Gerilmesi
- α_c : Kaplamanın Termal Genleşme Katsayısı
- $\alpha_{\text{yüzey}}$: Metal Yüzeyin Termal Genleşme Katsayısı
- E_c : Kaplamanın Young Modülü
- ν_c : Kaplamanın Poisson Oranı

YSZ bağ katına göre daha düşük bir termal genleşme katsayısına sahip olduğu için ana metal yüzeyin soğuma sırasında basma gerilmesine maruz kalması beklenmektedir. Bunun sonucu olarak başlangıçta düz olan bağ kat yüzeyi zamanla maruz kaldığı ısı sonucunda TGO tabakası büyür ve kıvrımlı bir morfolojinin oluşmasına neden olur. Pürüzlü bağ katmanı bağ kat/TGO ve son kat/TGO yüzeylerinde düzlem dışı gerilim oluşturarak çatlak çekirdeklenmesini tetikler ve bu da TBC sisteminin etkisiz hale gelmesine neden olan başlıca nedenlerden biridir [37].

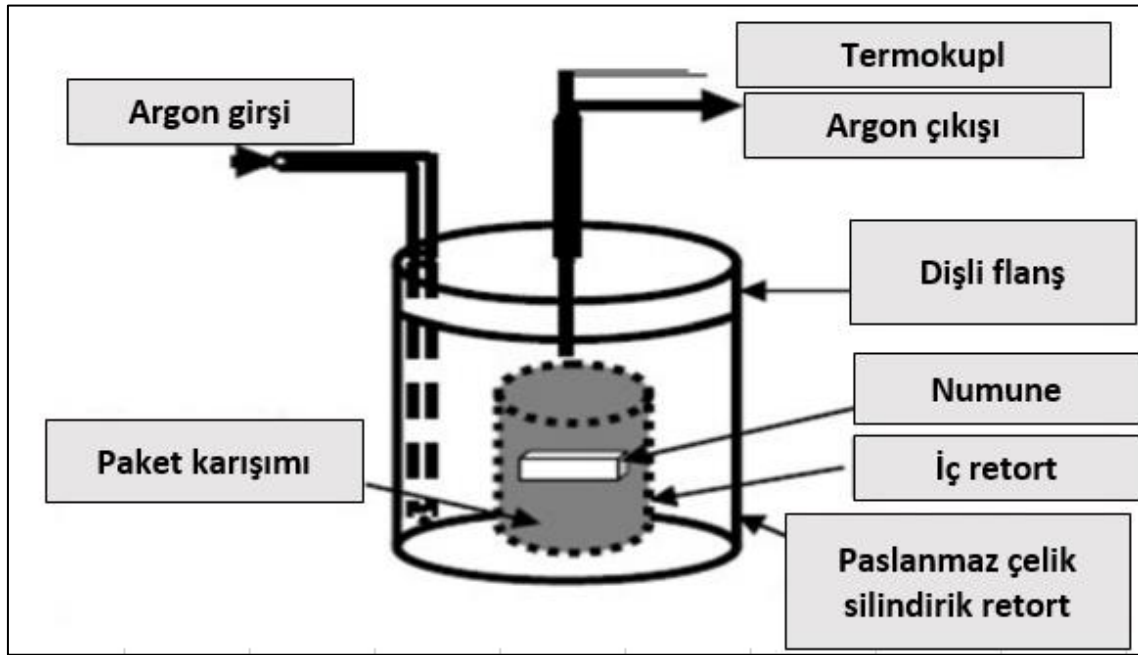
YSZ katmanının dağılmasında başlıca iki mekanizma vardır. Bunlar faz dönüşümü ve YSZ'nin sinterlenmesidir. Bu yapısal değişiklikler yüksek ısı maruziyet sonucu oluşur ve kaplamanın termal yorulma ömründe kısalmaya neden olur. Sinterlenme ayrıca ısı iletkenliğinin artmasına neden olarak bağ kat ve ana metale iletilen ısı miktarının artmasını sağlar. Yüksek sıcaklıklarda oluşan bu dayanım problemlerinin giderilmesi için başlıca iki yaklaşım öngörülmüştür. Birincisi YSZ bileşimindeki dengeleyici görevini üstlenen Y_2O_3 e alternatif bir takviye malzemesi bulmak, ikincisi de matris olarak ZrO_2 ye alternatif bir malzeme bulmak olmuştur.

3.2. Bağ Kat Kaplamalar (Bond Coat)

Türbin bıçakları üzerine bağ kat olarak temelde difüzyon alüminit kaplamalar ve $MCrAlY$ (katman) kaplamalar olmak üzere iki farklı kaplama türü uygulanır. Difüzyon alüminit kaplamada yaygın olarak kutu sementasyon ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) metotları kullanılmaktadır. Kutu sementasyon parçanın halojenür (genellikle NH_4Cl), alüminyum ve alüminyum oksit tozları içeren bir kutuya koyularak yüzeyin alüminyumca zenginleştirilmesi sonucu koruyucu ve inert bir film olan alüminyum oksit tabakasının oluşturulmasını sağlayan bir tür kimyasal buhar biriktirme metodudur. Oluşturulan difüzyon kaplamanın kalınlığı yaklaşık 40-60 μm 'dir. Dolgu malzemesi olarak belirtilen Al_2O_3 tozlarının ilave edilmesinin nedeni kutu iç yüzeyinde sinterlenme gerçekleşmesini engellemektir [38].

Reaktör içerisine söz konusu kaplanacak malzeme ve gerekli toz malzemeler eklenerek ısıtma başladığında gaz formunda alüminyum halojenürleri ($AlCl_3$, $AlCl_2$, $AlCl$) paket içerisinde yayınarak kaplanacak yüzeye ulaşır ve difüze olarak alüminit kaplamanın oluşmasını sağlarlar. İstenirse β -NiAl bağ katmanına platin eklenerek platin modifiyeli

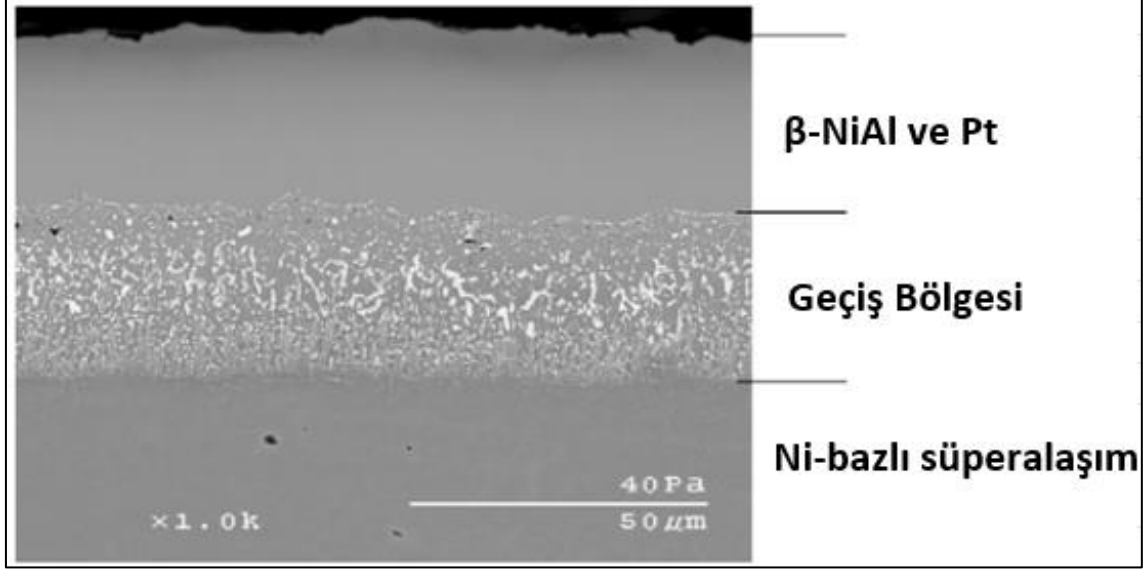
difüzyon aluminit kaplama (NiPt)Al katmanı da oluşturulabilir. Platin ilavesi için numuneler kutuya koyulmadan önce elektroliz kullanarak yaklaşık 6µm kalınlığında ince bir Pt tabakası ile kaplanır. Platin ilavesi sonucunda alümina katmanının yüzeye tutunma kuvveti ciddi derecede artarak dağılma azalır. Ayrıca yapılan araştırmalarda Ni₅₀Al₅₀ ve Ni₄₀Pt₁₀Al₅₀ tek kristalli alaşımlarda 900 ve 1100°C'de platinin $\theta \rightarrow \alpha$ Al₂O₃ geçişini yavaşlattığı ve buna bağlı olarak α -Al₂O₃ büyümesinin yarattığı stresin azalmasını sağladığı ortaya koyulmuştur [39]. Alüminyum kaplama süreci yüksek, orta ve düşük aktiviteli olmak üzere üç sürece ayrılabilir. Kaplamanın dış katmanındaki ana fazlar NiAl₃+Ni₂Al₃ (ağr.>40 % Al), NiAl (ağr.32-38 % Al) veya NiAl+Ni₃Al (ağr.<31 % Al) olarak sıralanabilir. Düşük aktivasyonlu proses sonucu oluşan kaplamalar daha yüksek sünekliğe sahiptirler. Tipik bir alüminyumlanmış (Ni,Pt)Al kaplama yüzeyi Pt modifiyeli ve hücresel yapıda büyük β -NiAl taneleri ihtiva eder [40].



Şekil 3.3. Kutu sementasyon prosesinin şematik gösterimi [41]

Düşük basınçlı plazma sprej kaplama (LPPS) ve EB-PVD MCrAlY (katman) kaplamasının bağ kat olarak uygulanmasında kullanılan yaygın kaplama metodlarıdır. NiCrAlY bağ katı belirtilen fazları ihtiva etmektedir; γ -Ni-bazlı katı çözelti, γ' -Ni₃Al, β -NiAl, ve α -Cr-bazlı katı çözelti. Oluşturulan kaplamanın kalınlığı yaklaşık 100µm'dir. NiCrAlY kaplamasına ilave olarak Co eklenmesi ise γ' fazının termal dengeliliğini azaltarak miktarının azalmasına

neden olur ve NiCoCrAlY nin $\beta + \gamma$ fazına dönüşmesine neden olur. NiCoCrAlY fazı bağ kat olarak sünek özellik gösterir [37, 38].



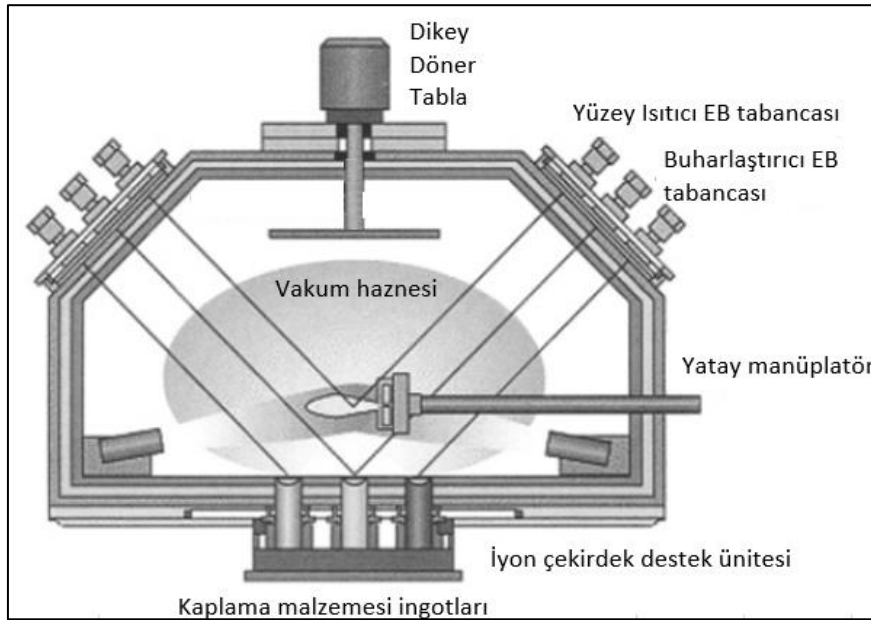
Şekil 3.4. Ni Bazlı süper alaşım üzerine Pt modifiyeli difüzyon kaplamanın SEM ile alınmış kesit görüntüsü [38]

Bağ katmanı olarak alüminyum difüzyon veya katman kaplama (MCrAlY) kaplamalarından hangisinin uygulanacağına karar vermek için son kat olarak uygulanacak YSZ'nin hangi metod ile uygulanacağını bilmek gerekir. Eğer son kat YSZ APS (Air plazma spray) metodu kullanılarak uygulanacaksa bağ katmanı olarak LPPS metodu ile uygulanan MCrAlY tercih edilir. Bu metod ile yüzeyde geliştirilen bağ katmanında pürüzlü bir yüzey olacağı için üzerine atılan YSZ katmanının daha iyi tutunmasını sağlayarak mekanik olarak güçlü şekilde yapışmasını sağlar. Son kat uygulamasında EB-PVD metodu kullanılacak ise bağ kat olarak her iki metod da kullanılabilir. APS metodunun aksine burada uygulanacak olan YSZ'nin yüzeyde birikebilmesi için bağ kat yüzeyinin mümkün olduğu kadar düzgün ve pürüzsüz olması gerekmektedir. EB-PVD prosesinin doğası gereği yüksek sıcaklık ve vakum altında yapılan biriktirme işlemi çok iyi bir kimyasal bağlanmayı sağlayarak APS'nin mekanik bağlanma için gerektirdiği pürüzlü yüzeyi gerektirmez. Bu yüzey gerekliliklerini sağlamak için genelde kumlama, taşlama ve shot peen metotları kullanılmaktadır [37, 42].

Genel olarak MCrAlY yapısındaki yüzeye ilave olarak yapılan kaplamaların kompozisyonları ve nitelikleri kolaylıkla değiştirilerek amaca yönelik modifiye edilebildiği için difüzyon kaplamalara göre daha yüksek bir koruma sağlarlar. Fakat maliyetlerin daha

düşük olması ve prosesin uygulanmasının çok daha basit olması nedeni ile bağ kat için yaygın olarak difüzyon kaplama metodu kullanılmaktadır. Bağ kat olarak uygulanan katman kaplamaları için EB-PVD veya LPPS metodu kullanılabilir. EB-PVD LPPS'ye göre daha kaliteli kaplamalar oluştururken maliyet açısından bakıldığında LPPS daha avantajlıdır. Fakat her iki kaplama metodu da kutu sementasyon ile kıyaslandığında 2-4 kat arasında daha yüksek maliyete sahiptir [38].

Kumlama yapılmış ve ardından kaplanmış numunelerin yüzeyindeki $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ faz yoğunluğunun kumlama yapılmamış olan numunelere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kaplanmış yüzeye kumlama yapılması EB-PVD sırasında katmanların arasında boşlukların oluşmasını ve büyümelerini engelleyici bir özellik gösterirken YSZ tabakasının daha kolay çekirdeklenmesini ve büyümesini sağlayarak prosese katkı sunar. Kumlamanın katmanlar arasındaki boşluğun büyümesine engel olması ise yüzeydeki sülfür bulaşmış tabakasının kumlama sırasında uzaklaştırılmasının bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Aynı mekanizma sayesinde kaplanmış bağ kat yüzeyini hafifçe zımpara ve parlatma işlemine tabi tutmak TBC kaplamanın ömrünü kritik derecede artırır.



Şekil 3.5. EB-PVD kaplama sisteminin şematik gösterimi [43]



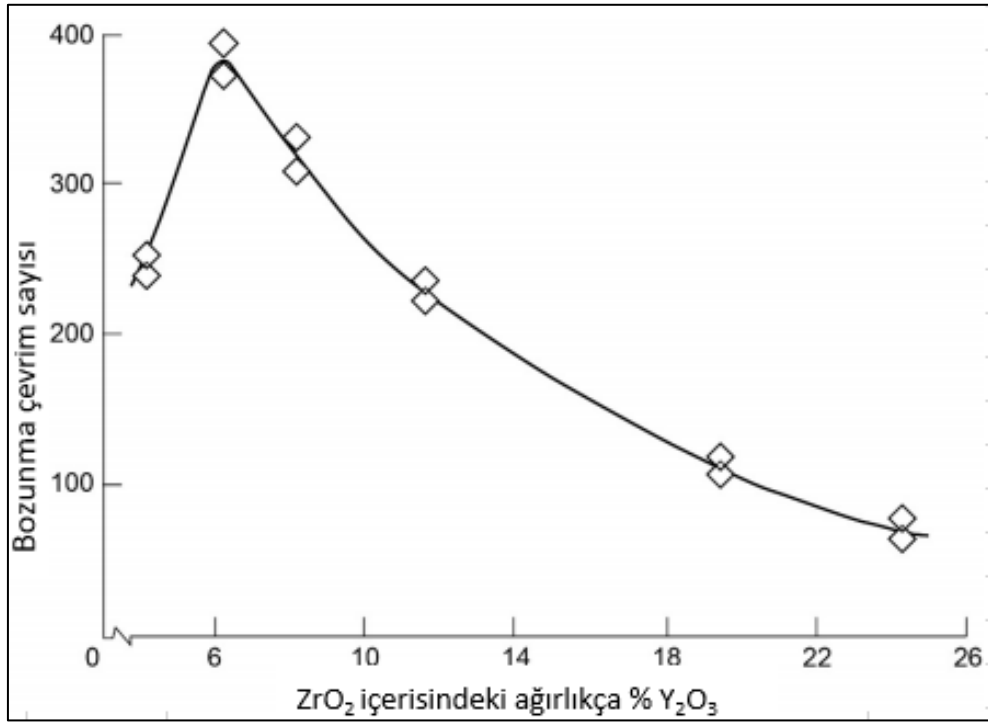
Şekil 3.6. CODEP kaplama sırasında kullanılan hidrojen fırını ve CODEP tozu [44]

3.3. Son Kat Kaplamalar (Top Coat)

Oksidasyona karşı ana metalin korunmasındaki birincil görev bağ kata düşmektedir. Fakat bağ katın maruz kaldığı sıcak gaz atmosferi ne kadar engellenebilirse buna bağlı olarak oksidasyona uğramadan operasyonda kalacağı süre uzayacaktır. TBC kaplamaların ortaya çıkmasındaki temel prensip de buna dayanır. Son kat uygulamalarında yaygın bir şekilde geliştirilmiş seramik bazlı malzemeler kullanılmaktadır. Bunun sebebi düşük ısı iletkenlikleri sayesinde sıcak gaz atmosferi ortamında oluşan yüksek ısının bağ katmanına taşınarak yüksek sıcaklıklarda ısınmaya neden olmasını engellemektir. Bu sayede geçmişteki uygulamaların aksine çok katmanlı TBC kaplamalar geliştirilmiş ve uygulamaya başlanmıştır.

Günümüzde TBC uygulamalarında son kat olarak kullanılan yaygın malzeme YSZ'dir. Bu seramiğin son kat malzemesi olarak seçilmesindeki en büyük etkenler ise düşük termal iletkenliğinin yanında yüksek ergime sıcaklığı, sinterlenmeye karşı direnç göstermesi, yüksek sıcaklık çalışma şartları altında uzun süre bütünlüğünü koruyarak direnç göstermesi ve yüzeye uygulanabilirlik özelliklerinin alternatif malzemelere göre daha etkileyici olmasıdır. Yttrium ile zenginleştirilmiş ZrO_2 nin oksit yakıt pilleri, oksijen sensörleri, sahte elmaslarda kullanılan diğer ZrO_2 den temel farkı yarı kararlı durumda tetragonal fazdan oluşmasıdır. Kesici takımlarda ve rulmanlarda kullanılan seramik-çelik adı verilen seramiklerdeki toklaştırma mekanizması martenzitin fazından gelen gerilmeler sonucu

oluşan dönüşüm tokluğudur. Fakat YSZ seramiğinde tokluğun çok daha yüksek olmasını sağlayan mekanizme ferroelastisitedir. Dönüşüm tokluk mekanizmasından farklı olarak ferroelastik tokluğun yüksek sıcaklıklarda çalışma özellikleri de daha iyidir. Bunun yanı sıra türbin bıçaklarında ki yüksek dönme hızından dolayı yüzeyde oluşan santrifüj kuvveti de kaplamaların yüzeyden dağılmasına neden olabilmektedir. Bu sebeple ferroelastik özellik gösteren YSZ'nin bu şartlar altında koparak yapıdan ayrılması daha güç olacaktır. YSZ ya da 7YSZ olarak belirtilen seramik bazlı bileşik temelde ağırlıkça %7 Yttrium ile zenginleştirilmiş ZrO_2 'den (zirkon) oluşur. ZrO_2 'nin termal bariyer sisteminde tercih edilme nedeni ise yaklaşık $2700^{\circ}C$ gibi yüksek bir ergime noktasına ve düşük bir termal iletkenliğe ($2 - 2,5 W/m-K$) sahip olmasıdır. Ayrıca termal genleşme katsayısı da yüksektir. Bu sebeple yüksek sıcaklıklarda nikel bazlı süper alaşımların oksidasyondan korunmasında ZrO_2 'nin Y_2O_3 , Yb_2O_3 , Gd_2O_3 gibi nadir toprak elementlerinin oksitleri ile zenginleştirilmiş halleri kullanılmaktadır [45].

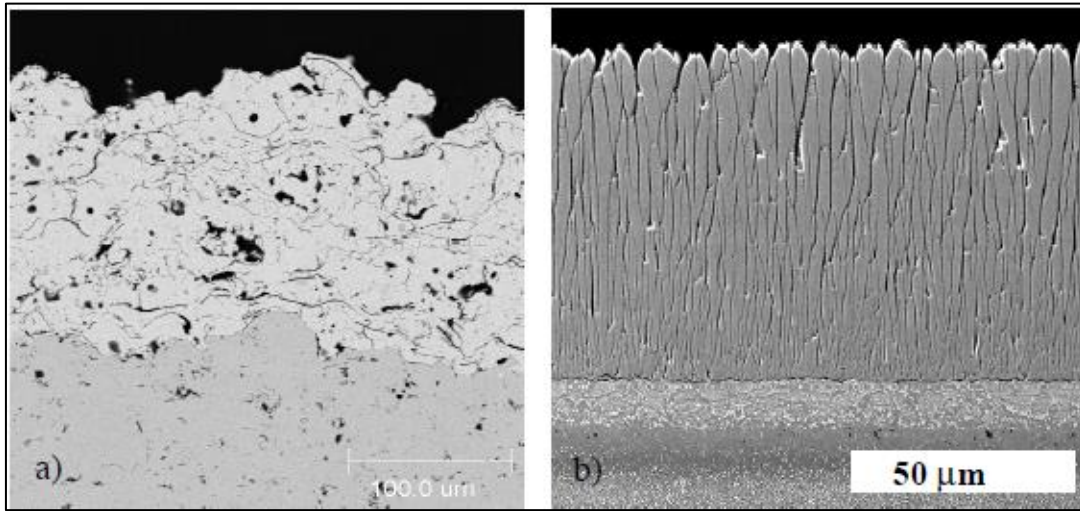


Şekil 3.7. Ağırlıkça Y_2O_3 içeriğine göre TBC kaplamanın çevrimsel oksidasyon testine dayanımı [45]

YSZ'nin sahip olduğu tüm avantajlara rağmen motor performansları ve çalışma sıcaklıklarındaki artış talebi sebebi ile sürekli olarak alternatif bir son katman malzemesi arayışı devam etmektedir. Mevcut çalışmalarda bu eğilimin düşük ısıl iletkenliğe sahip

oksitler üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Termal iletkenlik mekanizmasının tam anlamıyla incelenmeye başlanmasının çok uzun bir geçmişi olmadığını görüyoruz. Bu alanlarda yapılan çalışmaların ana amacı termal iletkenlik mekanizmasına kristal yapının ve atomlar arası bağların etkisini incelemek ve bu ilişkilerin net bir şekilde oluşturulmasını sağlamaktır. Özellikle bu alanda umut vadeden poli-iyonik oksitlerin fonon yapıları hakkında neredeyse hiç bir şey bilinmiyor. Isıl iletimin karakteristikleri bu gibi oksitlerde fononlar ve onların saçılmaları ile belirlenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda bu fononların aktif olması ve iletimi gerçekleştirme beklenmektedir [35, 46].

Türbin komponentlerine YSZ'nin uygulanmasında yaygın kullanılan iki ana metot EB-PVD ve APS'dir. Yapılan güncel çalışmalarda SPS ve PS-PVD metotları da geliştirilerek uygulamaya alınmıştır. APS metodunda ergitilmiş YSZ taneleri kaplanacak yüzeye püskürtülürler. Yüzeye çarpan taneler anlık soğuma sonrasında katılarak yüzeye yapışır ve koruyucu YSZ katmanının oluşmasını sağlarlar. EB-PVD'de ise kaplama buharlaştırılmış kaplama malzemesinin kaplanacak yüzeye biriktirilmesi ile yapılır. Buharlaştırılmanın yapılabilmesi için odaklanmış elektron tabancaları kaplama malzemesine yönlendirilir. Elektron tabancalarının malzeme üzerinde yarattığı anlık yüksek ısınma sonucu YSZ malzeme gaz fazına geçer ve kaplanacak yüzeye yapışarak birikmeye başlar.

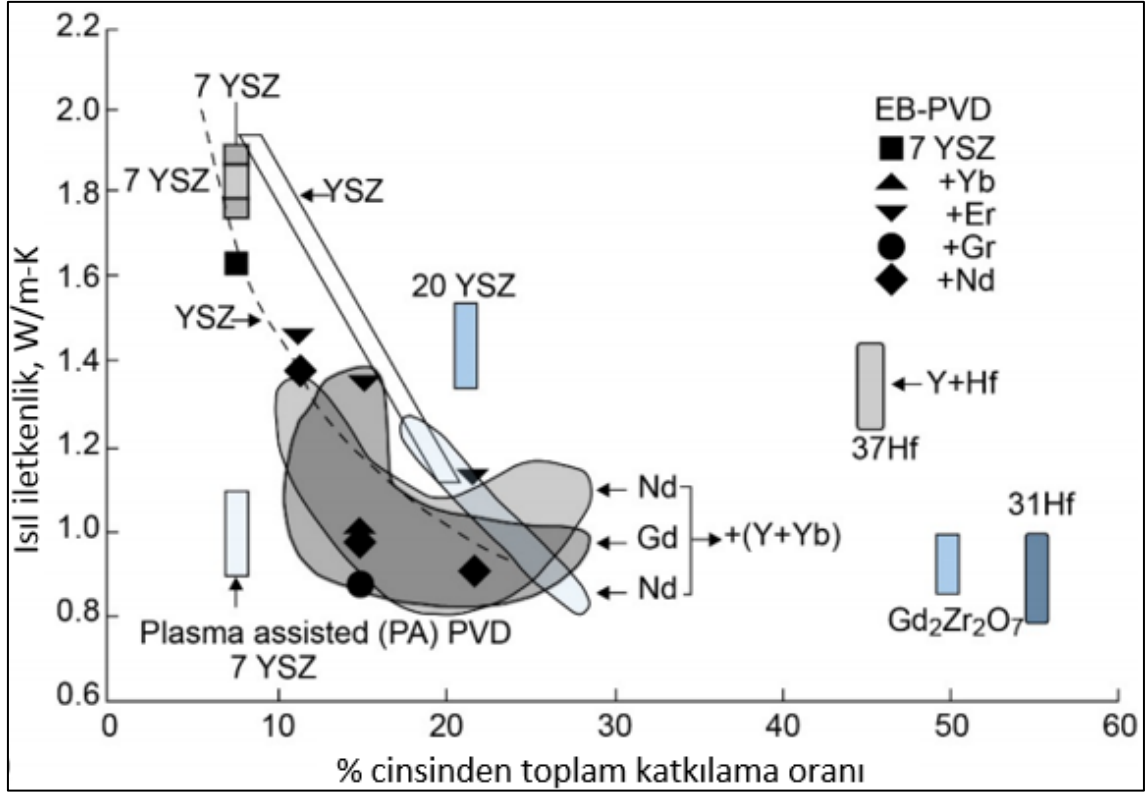


Şekil 3.8. APS ve EB-PVD metodu ile yüzeye biriktirilmiş YSZ katmanları. (a) APS, (b) EB-PVD [37]

APS metodu ile püskürtülen ergimiş damlacıkların boyutu EB-PVD'de biriktirilen gaz fazı ile kıyaslandığında çok daha büyüktür. Ayrıca biriktirme işleminin plazma halinde ve çok yüksek hızda yapıldığı düşünüldüğünde çarpma etkisi ile kaplama alanında ciddi bir

türbülans oluşumu gözlenecektir. Bunun neticesi olarak APS ile yapılan kaplamada porozite yoğunluğunun ve çatlak benzeri görünümlerin çok yoğun olduğunu görebiliyoruz. Bunun aksine EB-PVD ile biriktirilen kaplamalarda gaz fazında yani çok küçük moleküler yapılar olarak biriktirilen taneler ilave bir itici güç olmadan kendileri kaplanacak yüzeye yapışır. Bu sayede çok daha homojen bir kaplanmış alan elde edilir. Şekil3.6.'da görülebileceği gibi EB-PVD ile kaplanmış alandaki porozite yoğunluğu ve yapı üzerindeki çatlak benzeri yapılar çok daha azdır. EB-PVD'de taneler arası sınırların metal yüzeyine dik bir şekilde biriktirme eksenine doğru ilerlediğini görürken APS ile yapılan biriktirmede sınırların dağınık ve çoğunlukla da metal yüzeyine paralel olduğunu gözlemliyoruz. Bu morfolojinin nedeni yüksek hızda çarpan taneciklerin katılaşmadan önce çarptığı yüzeyin şeklini alarak aniden katılaşması olarak açıklanabilir. APS ile kaplanan yapının bol miktarda porozite ve boşluklar içermesindeki temel nedenlerden biri de yüzeye yapışmadan önce tamamen ergimeyen parçacıklardır. Bu boşluklu yapı sayesinde bu metotla kaplanan YSZ'nin termal iletkenlik özelliğinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Fakat mekanik ve ısıl şartlar altında aşınma direncinin daha düşük olması sebebiyle havacılık motorlarının türbin uygulamalarında yaygın bir kullanımı yoktur. EB-PVD kaplamanın boyuna olan tane yapıları pürüzsüz yapısı sayesinde iyi bir aerodinamik ve mekanik aşınma özelliği sağlasa da tane arasındaki boşluklardan ısı akışının metal yüzeyine erişmesi sebebiyle termal iletkenliği artmaktadır.

Türbin bıçakları ve vaneler gibi dönen parçalar için yapılan TBC kaplamaların kalınlıkları 100-250 µm olarak değişirken yanma odası gibi dönmeyen parçalarda bu kaplamanın 250-500 µm aralığında olması istenir [45].



Şekil 3.9. Uygulama metodu ve kimyasal içeriklerine göre seramik bazlı son kat kaplamaların termal iletkenlik özellikleri [45]

Türbin bıçaklarının korozyon ve oksidasyonu sürecinde yüksek sıcaklığa ek olarak en kritik korozyon etkenlerinden biri daha önce bahsedildiği gibi mekanik aşınma veya parçacık erozyonudur. Parçacık erozyonu ergime derecesi görece düşük olan kalsiyum, magnezyum, alüminyum silikat tozları ve volkanik küllerin ergiyerek türbin bıçakları yüzeyine çarpması sonucunda meydana gelen aşınmalardır. Çalışma sıcaklığı arttıkça oksit büyüme hızı ve buna bağlı olarak oksit miktarı artacaktır. Oksit miktarının artması katmanlar arasındaki stresin hızla yükselmesine ve buna bağlı olarak yapıda hasarlar oluşmasına neden olur. Parçacık erozyonu ise çalışma sıcaklığının artması ile bir nebze düşürülebilir. Bunun sebebi tetragonal yapıdaki 7YSZ'nin tokluk ve esnekliğinin sıcaklığın artması ile artmasıdır. Kaplamada zaman içerisinde meydana gelebilecek kusurların büyük bir çoğunluğu motor çalışma şartları, kaplama kompozisyonu, kaplama mikroyapısı ve tasarımı gibi nedenlerden oluşur. Yenilikçi malzemeler geliştirilmeden basınç, çalışma sıcakları gibi parametrelerin artırılması birbirine bağlı bu sistemlerde denge problemlerine neden olarak kaplama ömürlerinin kısalmasına neden olacaktırlar. Yeni nesil TBC kaplamaların geliştirilmesi de büyük oranda yüksek sıcaklık ve sık termal çevrim şartları altında kaplama davranışlarının ve hata türlerinin anlaşılması sayesinde olacaktır [45].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. İncelenen Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan CMSX-4 SLS ve CM247-LC numuneler Canon-Muskegon firmasından ingot olarak tedarik edilmiştir. İngotlar dilimlenerek 25mm çap ve 5mm yüksekliğe sahip disk numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numunelerden 4 adet CMSX-4 SLS ve 4 adet CM247-LC kutu sementasyon (CODEP) metodu ile kaplanırken aynı şekilde 4'er adet numune de IP1041 metodu ile kaplanmıştır. Kaplama uygulamaları ardından yöntemlerin yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı dayanımlarını belirleyebilmek ve kıyaslayabilmek için çevrimsel oksidasyon testi uygulanmıştır. Çevrimsel oksidasyon testi öncesinde ve sonrasında da metalografik inceleme yapılarak kaplama etkinlikleri incelenmiştir.



Şekil 4.1. Kesilmiş ve yüzeyi hazırlanmış disk numune

4.2. Kaplama Uygulamaları

4.2.1. Kutu sementasyon (CODEP) uygulaması

CODEP kaplama uygulamasının yapılması için disk numuneler Amerika Birleşik Devletlerin'de bulunan havacılık otoriteleri tarafından onaylı bir şekilde kaplama hizmeti veren Hitemco firmasına gönderilmiştir. Kaplamanın gerekli spesifikasyonlara göre burada uygulanması sağlanmıştır. Kaplamanın uygulama basamakları aşağıda verilmiştir.

General Electric firması tarafından kutu sementasyon metodu kullanılan malzemeler ve kaplamanın yapıldığı ortam şartlarının spesifik hale getirilmesi ardından ticari bir kaplama isimi olan CODEP olarak adlandırılmıştır. Kaplamanın basamakları [2];

1. Kaplanacak malzemenin yüzeyinin temizlenmesi
2. Kaplanacak numune ile aynı özellikte test numunelerinin hazırlanması
3. Paket içeriğinin hazırlanması, aşağıda verilen malzemelerin karıştırıcı ekipmana koyularak 30 dk boyunca karıştırılacak ve aktifleyicinin ilavesinden sonra 30 dk daha karıştırılacaktır.
 - Alüminyum Oksit - B (kalın toz)
 - Alüminyum Oksit - C (ince toz)
 - CODEP tozu
 - Amonyum florür (aktifleyici) (50°C'lik fırında en az 48 saat beklemiş)
4. Karışım kutulara doldurularak parçalar, test numunesi ve parça sıcaklıklarını ölçecek termokupl tamamen üzerleri örtülecek şekilde tozların içerisine gömülecektir.
5. Kutular hidrojen fırınına yüklenerek kaplama prosesine başlanır. Fırın yaklaşık 90 dk içerisinde 1050°C'ye çıkarılarak ısınma süreci tamamlanır. Bu süreçte 760°C'ye kadar olan kısımda koruyucu atmosfer olarak argon gazı kullanılır. 760°C üzerinde ise hidrojen gazı kullanılır. Parçaların 1050°C'ye ısınmasının ardından bu sıcaklıkta yaklaşık 4 saat bekletilerek difüzyon işleminin tamamlanması sağlanır.
6. Fırının soğuması ardından parçalar ve numune kutulardan çıkarılarak temizliğe tabii tutulur.

Çizelge 4.1. CODEP uygulamasında kullanılan malzemeler ve özellikleri [44, 47]

Malzeme Adı	Ana malzemesi / Şartnamesi
Argon	MIL-A-18455 (-62°C veya daha düşük çığlenme noktalı)
Hidrojen	BB-H-886 (-62°C veya daha düşük çığlenme noktalı)
Aseton	O-A-51
Alüminyum Oksit Tozu	GE Spec. A50TF100 Class B
Alüminyum Oksit Tozu	GE Spec. A50TF100 Class B
Amonyum Florür	GE Spec. A50TF101 Class A
CODEP B tozu	GE Spec. B50TF93 (Metco - AMDRY993 TiC Al)
Eldiven	HH-G-450
Yapıştırıcı	Nicrobraze 200 veya 500 Wall-Colmonoy Corp.
Seyreltici	Alloy Surfaces Company
Fırça	H-B-420
M1 maskeleyici	Alloy Surfaces Company
M7 maskeleyici	Alloy Surfaces Company
Balmumu	Kalamazoo parafin WW-0060 veya Adawax 165, Type HM-4899

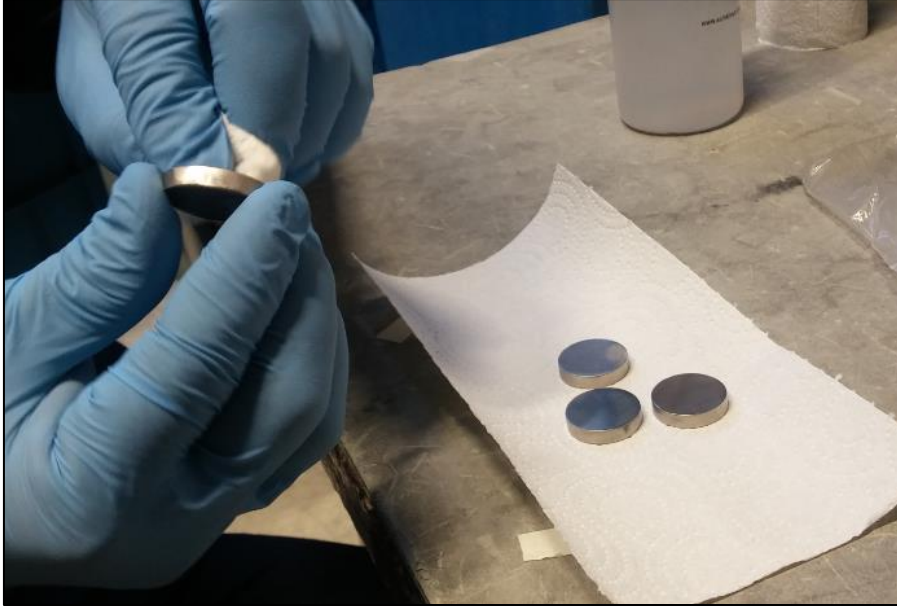
4.2.2. Solüsyon ile difüzyon kaplama (IPAL IP1041)

IP1041 kaplaması Indestructible Paint firması tarafından geliştirilmiş bir solüsyondur. Bu solüsyon kaplama bileşiği olarak Al ve dengeleyici olarak Si içerir. Kaplamanın koruyuculuk prensibi kutu sementasyon ile aynıdır. Solüsyonun yüzeye uygulanmasının ardından bir difüzyon işlemi gerçekleştirilerek yapılan kaplama içeriğindeki alüminyumun ana metal yüzeyine difüze olması sağlanır. Difüze olan katman ise metal yüzeyinin hemen altında koruyucu bir intermetalik birleşik filmi oluşturarak malzemenin oksijene karşı daha inert bir davranış sergilemesini ve korozyon direncinin artmasını sağlar. Bu kaplama yönteminde hazır alınan IPAL IP1041 solüsyonu kullanılarak kaplama işlemi yapılmıştır. İçerik ve koruyuculuk yönünden CODEP ile benzerlikler gösterse de zaman, maliyet ve işçilik açısından büyük farklılıklar göstermektedir [40, 48].

Uygulama adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

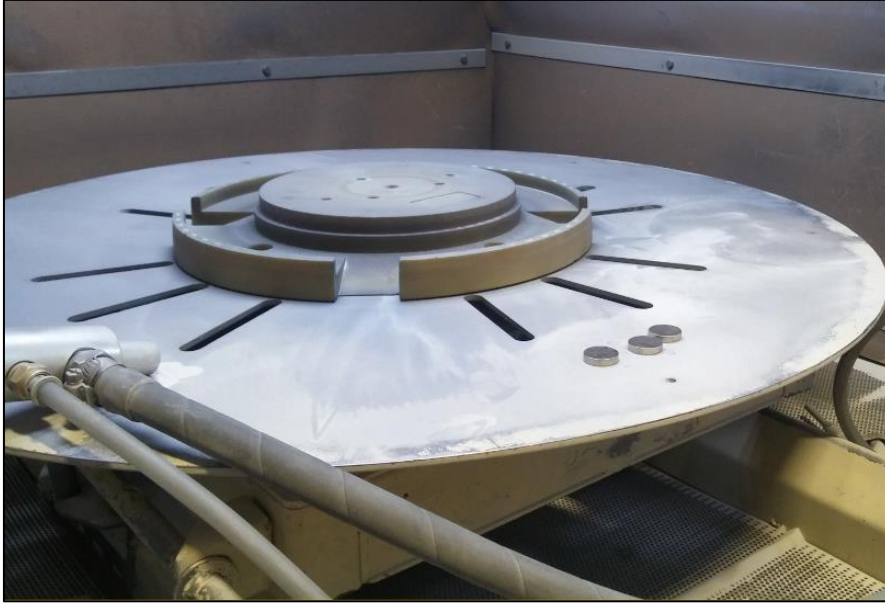
- 1) Kaplanacak alan belirlenerek yüzey alanı hesaplanır.

- 2) Difüze olmuş kaplama kalınlığı ne kadar olmalı belirlenir. (25-37 mikron arası)
- 3) Arzu edilen kalınlığa ulaşmak için ilgili alana ne kadar sprej sıkılması gerektiği hesaplanır. (Örnek: Tipik 25-37.4 mikron kalınlık için 19-24 mg/cm² uygulanmalıdır)
- 4) 1,1,1-Trikloreten veya muadili kullanarak numunelerin yüzeyindeki nem ve kirlilikler tamamen temizlenmiştir.



Şekil 4.2. CMSX-4 ve CM247-LC disk numunelerin kaplama öncesi temizlenmesi

- 5) Kaplanmayacak alanlar maskelenir.
- 6) 60 psi hat basıncı ve 150-200mm nozül çalışma mesafesindeki temiz, yeni 120/220 mesh Al₂O₃ (alüminyum oksit) kullanarak yüzey kumlanarak kaplamaya hazır hale getirilir.



Şekil 4.3. Numunelerin kaplama öncesi 60psi basınçta 120/220 mesh Al_2O_3 tozları ile kumlanması

7) Maskeleme sökölür ve kumlama sonrasında yüzeyde kalmış olabilecek tüm kumlar temiz bir fırça ve temiz basınçlı havayla temizlenir. (temizlik kaplama kalitesini etkileyen çok kritik bir faktördür)

8) Kumlama ve temizleme yapılmış numunelerin ağırlıklarını ölçerek kaplama öncesindeki ağırlıkları tespit edilir. Ağırlık ölçümleri 0,1 mg çözünürlüklü Shimadzu marka hassas terazi ile yapılmıştır.

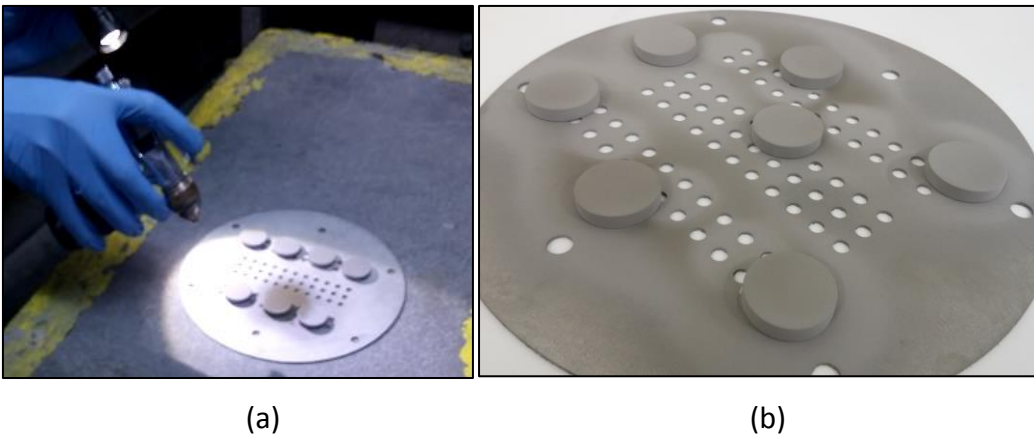
9) Kaplanmayacak alanlar tekrar maskelenir.

10) Solüsyon yoğun şekilde katı partiküller içerdiği için uygulamadan yaklaşık 24 saat kadar önce karıştırıcıda karışması sağlanır. Bu sayede homojen bir solüsyon elde edilecektir.



Şekil 4.4. Solüsyonun karıştırılmasını sağlayan döner rulo karıştırıcı

11) Kumlanmış alana basınçlı boya tabancası ile IP1041 püskürtülür. İnce düz katlar uygulanarak ve her uygulama arasında kaplamanın mat griye dönmesi beklenir. Metal yüzeyi ıslatmak için başlangıçta bir sis tabaka (çok ince) olarak uygulanır. Bu kat mat griye kurduğunda, daha kalın katlar uygulanabilir.



(a)

(b)

Şekil 4.5. (a) IP1041 solüsyonunun basınçlı boya tabancası ile uygulandığı (b) Uygulama sonrasında kurumuş numuneler

12) Nem seviyelerinin düşük olduğu iklimlerde, uygulanan kaplamanın akışına yardımcı olmak için% 10'a kadar de-mineralize su ilavesi yapılabilir. Parçalar üzerinde kurumuş spreyin varlığı, su ilavesine ihtiyaç duyulduğunun iyi bir göstergesidir

13) Numune ağırlıkları kontrol edilir ve daha önceki adımlarda belirlenmiş olan solüsyon miktarının numunelere uygulanıp uygulanmadığını teyit edilir. Uygun ağırlığa erişilinceye kadar uygulamaya devam edilir. Ağırlık ölçümleri 0,1 mg çözünürlüklü Shimadzu marka hassas terazi ile yapılmıştır.

14) 15 dakika süreyle 175 ° F (80 ° C) ± 25 ° F'de numuneler ön kurutma için fırınlanır. Ardından maskeleme kaldırılır.

15) Kaplama, 650 ° F (340 ° C) ± 25 ° F (parça sıcaklığı) sıcaklıkta 30 dakika süreyle kürlenir.

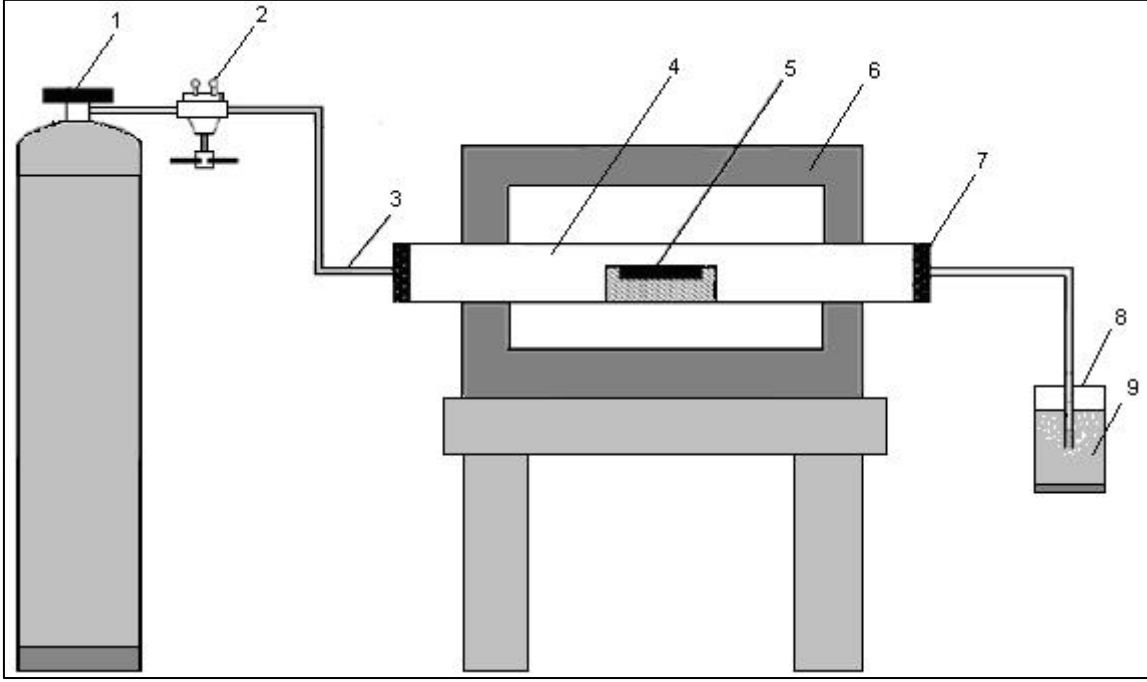


Şekil 4.6. Kurutma ve kürlenme işleminin gerçekleştirildiği Reta marka kurutma fırını ve fırın içerisinde numuneler

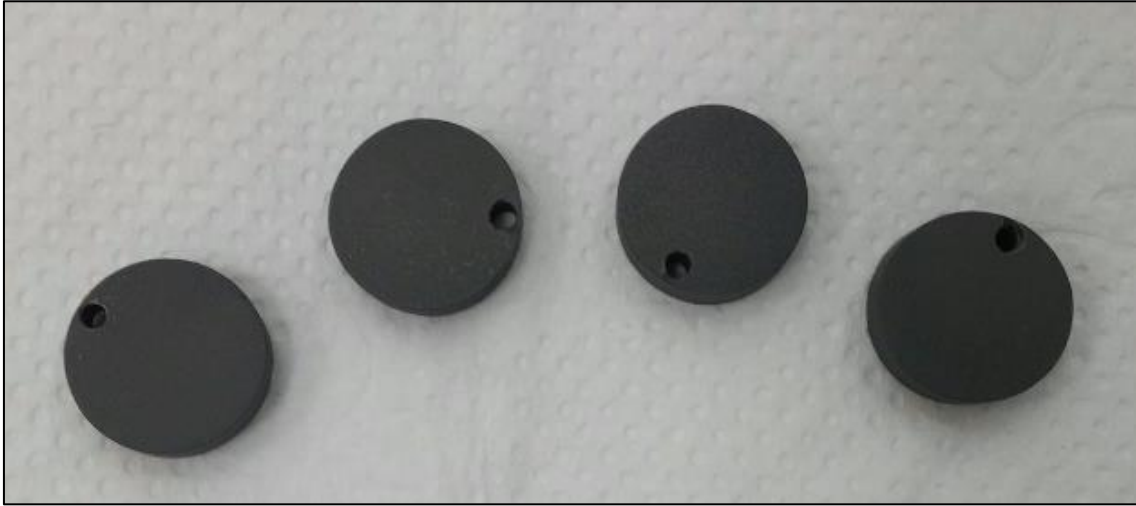
16) Kaplama çatlama, çamur şeklinde çatlama veya diğer görünür yüzey kusurları açısından incelenir ve uygun parçalar difüzyon işlemine ilerletilir.

17) Difüzyon işlemine başlamak için kaplanmış alanların işlemin yapılacağı fırın rafı vb bir yüzeyle temas etmemesi sağlanır.

18) Parçalar fırına yerleştirilmeden önce fırın kalıntılarının temizlenmesi için bir saat boş çalıştırılır. Ardından numuneler yerleştirilerek fırın 900°C'ye set edilir. Difüzyon işlemi çığlenme noktası -40 °C'nin altında olan argon atmosferinde saatte 6 fırın hacmi argon debisi olan bir fırın ortamında yapılmıştır. Difüzyon işlemi Protherm marka tüp fırında dakikada 15°C ısıtma hızında ısıtılarak yapılmıştır. Numuneler 900°C'de 2 saat boyunca difüzyona tabi tutulmuştur.



Şekil 4.7. Difüzyon işleminin gerçekleştirildiği atmosfer kontrollü Protherm marka tüp fırının şematik gösterimi. 1) Argontüpü 2) Manometre 3) Gaz taşıyıcı hortumlar 4) Seramik tüp 5) Numune 6)Fırın gövdesi 7) Kapaklar 8) Gaz çıkış kontrol kabı 9)Su [49]



Şekil 4.8. Difüzyon işleminin gerçekleştirilmesinin ardından numunelerin görünümü

19) Difüzyondan sonra parçalar iyi havalandırılan bir bölgede tutulur.

20) Parçalar soğuduğunda, ortaya çıkan bisque kalıntısı, 10 psi'de cam boncuklarla hafifçe püskürtülerek yüzeyden temizlenir.

4.3. Çevrimsel Oksidasyon Testi

Tüm numuneler kaplama işlemleri bittikten sonra çalışmanın ana hedefi olan yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı dayanımlarının belirlenmesi amacı ile çevrimsel oksidasyon testine tabi tutulmuşlardır. Bu testin uygulanmasındaki amaç türbin palelerinin motor üzerindeki çalışma şartlarını hızlandırılmış bir biçimde simüle ederek söz konusu kaplama ve malzeme ikilisinin bu şartlar altında bütünlüğünü ve fonksiyonelliğini yitirmeden ne kadar süre ile hizmet verebileceğini belirlemektir [50, 51].

Çevrimsel oksidasyon testinin uygulanmasında literatürde farklı süre ve sıcaklıklar üzerinden deneyler yapılmıştır. Çevrim süreleri ve sıcaklıklar genellikle testin gerçekleştirileceği ve kaplama sisteminin kullanılacağı şartlara göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada çevrimsel oksidasyon testi numunelerin atmosfer kontrolsüz hava ortamındaki fırında 1100°C'ye ısıtılması ve bu sıcaklıkta 3 saat bekletilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Fırınlama süresinin tamamlanmasının ardından numuneler açık hava ortamına çıkarılarak 30 dk soğumaya bırakılmıştır. Bu süre sonunda numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile tartılarak her çevrim sonunda ağırlıklarındaki değişim gözlemlenmiştir. Yapılan kontrollerde baz alınan değer numunelerin ağırlığında kaçınıcı çevrim sonucunda ne kadar değişiklik olduğudur. Numunelerin ağırlıklarındaki değişim miktarına göre yüksek sıcaklık korozyonuna karşı olan dayanımları değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmaların değerlendirme prensibi, kaplama katmanında dağılma olmadan koruyucu oksit filmde meydana gelecek kalınlaşmanın kararlı bir ağırlık artışına neden olacağı yönündedir. Ağırlık kaybı ise kaplamanın koruyucu özelliğini yitirerek dağılmaya başladığını ve beraberinde ana metalin oksit birleşiklerinin de yapıdan ayrılarak kütle kaybına neden olduğunu göstermektedir [52, 53].



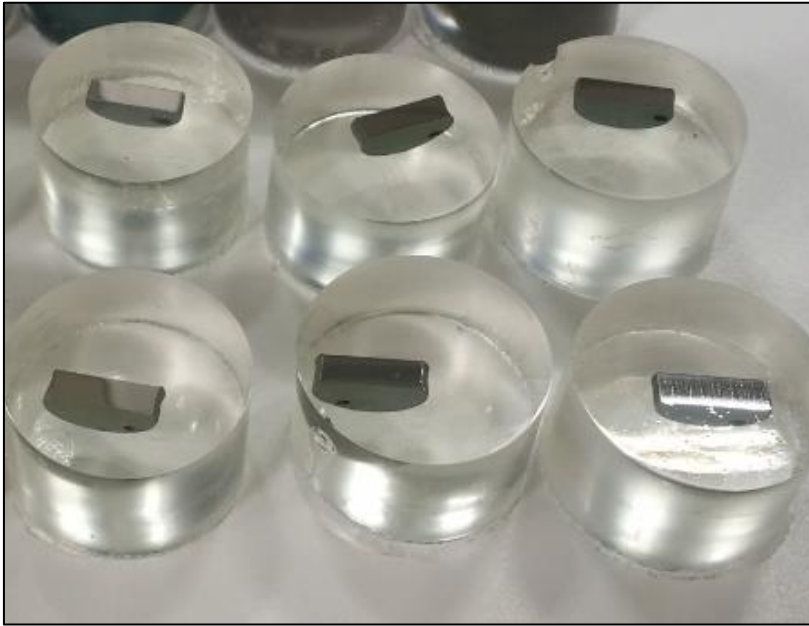
Şekil 4.9. Çevrimsel oksidasyon testinin gerçekleştirilmesinde kullanılan Heraus marka muffle tipi fırın ve test düzeneği



Şekil 4.10. Çevrimsel oksidasyon testi uygulanan soğuma evresindeki numuneler

4.4. Metalografik İnceleme

Çevrimsel oksidasyon testi tamamlanmış numuneler testin kaplama ve malzeme üzerindeki metalografik etkilerini görebilmek için metalografik incelemeye hazırlanmışlardır. İncelemelerde numuneler kaplama eksenine dik bir şekilde soğuk akriliğe gömülmüşlerdir. Akriliğin kuruması ardından kaplama yüzeyinin net bir şekilde görülebileceği kadar zımparalanarak parlatılmışlardır. Malzemelerin yüksek sertlik ve dayanımda olması ayrıca geometrik olarak küçük boyutlarda olması sebebi ile bu metot kesmeye tercih edilmiştir.



Şekil 4.11. Akriliğe gömülmüş ve zımparalanarak parlatılmış numunelerin nihai görüntüsü

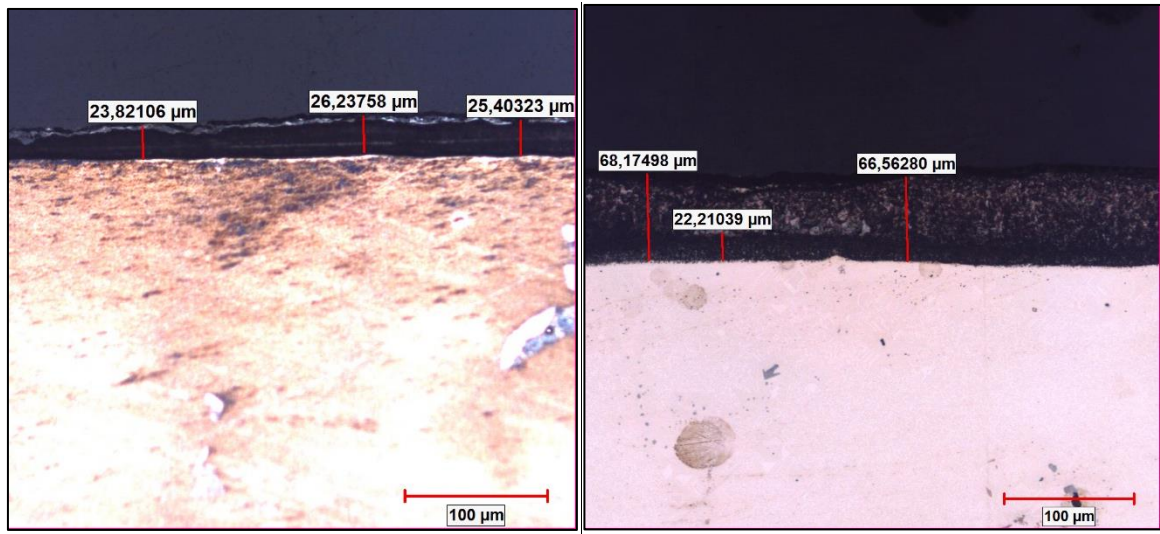
Yapılan çalışmada temel amaç kaplama ve ana metal ara yüzeyindeki koruyucu oksit filminin hangi kaplamada ne kadar büyüdüğünü ve bütün bir yapı sergilediğini tespit etmektir. Koruyucu oksit filmi ya da TGO (thermally grown oxide) olarak adlandırılan bu film tabakasının oksidasyon testine karşı büyüme miktarı ve formu kaplamanın oksidasyon direncine karşı çok önemli bilgiler vermektedir. Oksit filminin kalınlaşma süreci filmin kritik bir kalınlığa erişmesine dek devam eder. Kritik kalınlığa erişilmesinin ardından oksit filmi ve ana metal ara yüzeyindeki bağlılık kopar ve kaplama tabakasının fiziksel olarak metal yüzeyinden döküldüğü görülebilir. Yüzeyden ayrılma (spallation) miktarları yukarıda belirtilen çevrimsel oksidasyonu testinde ağırlık ölçümleri ile tespit edilebilir.

Deneysel çalışma kapsamında yapılan metalografik incelemeler dağlayıcı olmadan ve nikel bazlı süper alaşımların dağlanması için kullanılan hidroklorik asit ve hidrojen peroksit içerikli özel bir dağlayıcı kullanarak dağlanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda her iki farklı kaplamanın iki farklı malzeme üzerinde çevrimsel oksidasyonu testi öncesinde ve sonrasındaki metalografik durumu incelenmiştir. Burada kaplama kalınlıklarındaki değişim form bozulması ve malzemenin iç yapısındaki yeniden kristalleşme vb etkiler incelenmiştir. Metalografik incelemeler Nikon Eclipse MA-200 optik mikroskop kullanılarak 25X, 50X, 100X, 200X ve 500X büyütmelemlerde yapılmıştır.

5. TARTIŞMA

5.1. Oksidasyon Testi Öncesi Kaplama Kalınlıklarının Belirlenmesi

Numuneler bölüm 4.4’de tanımlandığı gibi hazırlandıktan sonra optik mikroskop yardımı ile çeşitli büyütme oranlarında incelenmiştir. Bu incelemedeki amaç kaplamaların homojen bir biçimde yüzeye yayılıp yayılmadığının ve test öncesinde gerekli difüzyon kalınlıklarına ulaşmış olup olmadığına tespit edilmesidir.



Şekil 5.1. Kaplama sonrası CMSX-4 üzerinde IP1041(solda) ve CODEP(sağda) kaplamaların kalınlık ölçümleri

Yapılan mikroyapı incelemelerinde test öncesi her iki kaplamanın da nüfuziyet derinliği ve toplam kaplama kalınlığı incelenmiştir. İnceleme sonucunda CODEP kaplamanın ortalama 67 µm kalınlığa eriştiği görülmüştür. IP1041 kaplamanın ise ortalama kaplama kalınlığı 25 µm olarak belirlenmiştir. İki kaplama içinde söz konusu kalınlıkların kaplama proseslerinin gerekliliklerine uygun olduğu belirlenmiştir. Proses doğası ve parametreleri göz önünde bulundurulduğunda kutu sementasyon ile yapılan kaplamanın daha kalın bir tabaka oluşturabilmesi beklenmekte olan bir durumdur. Mikroyapı görsellerinde de görülebileceği gibi CODEP numunesinde iki katmanlı bir kaplama morfolojisi göze çarpmaktadır. İki kaplama arasındaki sınır ana metalin yüzeyini göstermektedir. Bunun altında kalan kısım tam difüze olmuş kalınlığı gösterirken üstündeki katman ise dış kaplama katmanını göstermektedir. Numunelerin etraflıca incelenmesi sonucunda her iki kaplamanın da

homojen olarak yüzeye işlediği ve herhangi bir inceltme açılma veya kaplamada eksik bölge olmadığı tespit edilmiştir.

5.2. Çevrimsel Oksidasyon Testi Sonuçları

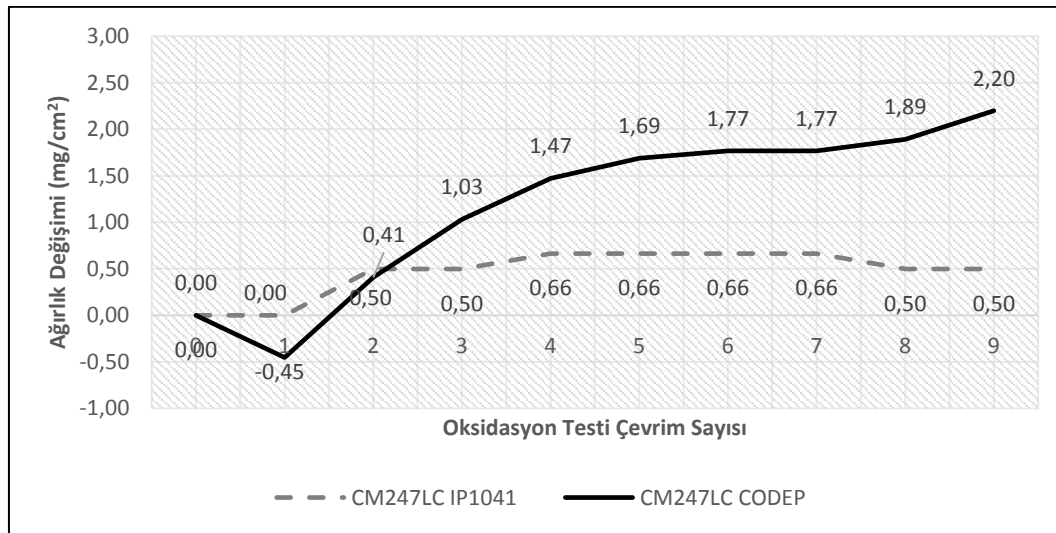
Numuneler bölüm 4.3.'de açıklanan şekilde toplamda 9 çevrim olacak şekilde çevrimsel oksidasyon testine tabii tutulmuşlardır. Test esnasında ve ardından kriter olarak numunelerin ağırlık kontrolü ve görünümleri olmak üzere iki ana karakteristik belirlenmiştir. Bunlardan ilki numune ağırlıklarının testin her çevriminden sonra hassas terazi ile kontrol edilerek değişikliklerin izlenmesidir. Görünüm kontrolü ise numune yüzeylerinde test süresince meydana gelen oksidasyon, aşınma, soyulma, renk değişimi vb. oluşumların takip edilerek önceki çevrimler ile ve diğer malzeme/kaplama grupları ile kıyaslanmasını içermektedir.

5.2.1. CMSX-4 ve CM247-LC numunelerin çevrimsel oksidasyon test sonuçlarının değerlendirilmesi

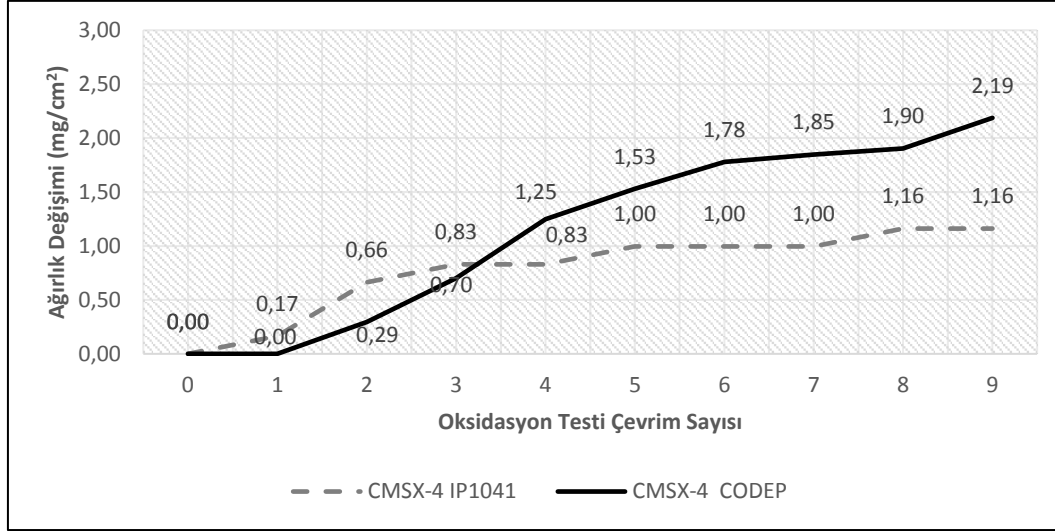
Şekil 5.2. ve Şekil 5.3.'de verilmiş çevrimsel oksidasyon test sonuçları incelendiğinde; CMSX-4 ve CM247 LC numunelerin ikisi içinde birim alan başına ağırlık artışı CODEP kaplanmış numunelerde lineer bir şekilde gerçekleşirken IP1041 kaplanmış numunelerde kısa süreli bir artıştan sonra sabit seyreden veya ağırlık kaybı gerçekleşen grafikler gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler kapsamında sonuçlar yorumlandığında deney sonuçlarındaki farklı eğimlerin başlıca sebeplerinden biri bölüm 5.3.1'de verilen ve metalografik inceleme sonuçlarında da görülebilen IP1041 kaplamanın bütünlüğünü ve homojenliğini koruyamamış olması olarak belirtilebilir. Yapılan mikroyapı incelemesinde ısı olarak büyümüş oksit tabakasının (TGO) kalınlığı ve morfolojisi kaplamanın yüksek sıcaklık oksidasyon performansı hakkında bilgi vermektedir. Morfolojiler incelendiğinde CODEP kaplamada 16-18 µm kalınlığında üçüncül bir tabaka olduğu gözlemlenmiştir. Bu katman TGO olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca söz konusu katmanın morfolojisi incelendiğinde de kaplamanın oksidasyon testinden sonra yüzeyde homojen bir biçimde kalmaya devam ettiği görülmüştür. Burada TGO olarak belirtilen katman oksidasyon testi esnasında maruz kalınan yüksek sıcaklığın etkisi ve yüzeyden difüzyon vasıtası ile gelen oksijenin kaplama birleşimi içerisindeki alüminyum, titanyum gibi metal atomları ile birleşik oluşturarak metal oksitlerin yapı içerisinde çoğalmasını ve bu birleşimlerin kaplama

sınırında birikerek malzeme içerisine doğru ilerlemesini göstermektedir. Katmana verilen TGO (Thermally grown oxide) isimlendirmesi bu sebeple yapılmıştır.

CODEP ve IP1041 kaplama proseslerinin uygulanması ilgili bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır. Proses karakteristikleri incelendiğinde CODEP uygulamasında kullanılan kutu sementasyon prensibinin kaplanacak ana malzeme ve yüzeyinin ortam şartlarından izole kalmasını sağladığı görülebilir. IP1041 solüsyonunun yüzeye uygulanması esnasında koruyucu bir ortam gerekliliği mevcut değildir. Dolayısı ile uygulama esnasında kaplama katmanında oluşabilecek hava boşluğu, porozite, oksit vb süreksizliklere karşı daha korumasız bir prosesdir. Nitekim CODEP prosesinde 760°C - 1050 °C aralığındaki sıcaklıklarda koruyucu atmosfer olarak argon yerine hidrojen kullanılmasının başlıca nedeni hidrojenin oksijene karşı olan aktifliği sayesinde sementasyon kutusu içerisinde kalmış olması muhtemel oksijen ve diğer muhtemel impuritelere hidrojen ile birleşik yaparak ortamdan uzaklaştırılmasıdır. Bu sebeplere ek olarak iki kaplamanın difüze olmuş katmanları arasındaki kalınlık farkı da numunelerin yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı olan dirençlerini etkilemiştir. Bu konuda IP1041 kaplamanın CODEP kaplamaya benzer şekilde daha yüksek sıcaklıkta ve/veya uzun sürelerde, daha inaktif bir atmosfer içerisinde difüzyon işlemine tabii tutulması difüze olmuş kaplama kalınlığını artırarak kaplamanın etkinliğini olumlu yönde etkileyebilecektir.

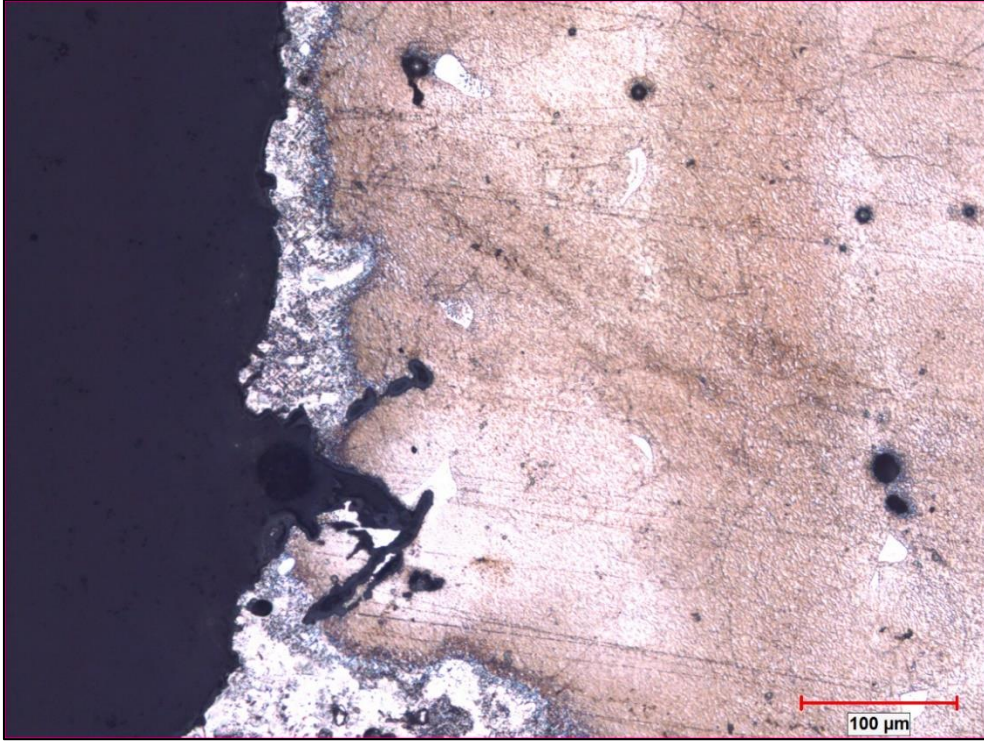


Şekil 5.2. IP1041 ve CODEP kaplı CM247LC numunelerin 1100°C’de yapılan çevrimsel oksidasyon testi sırasında birim alan başına ağırlıklarındaki değişim

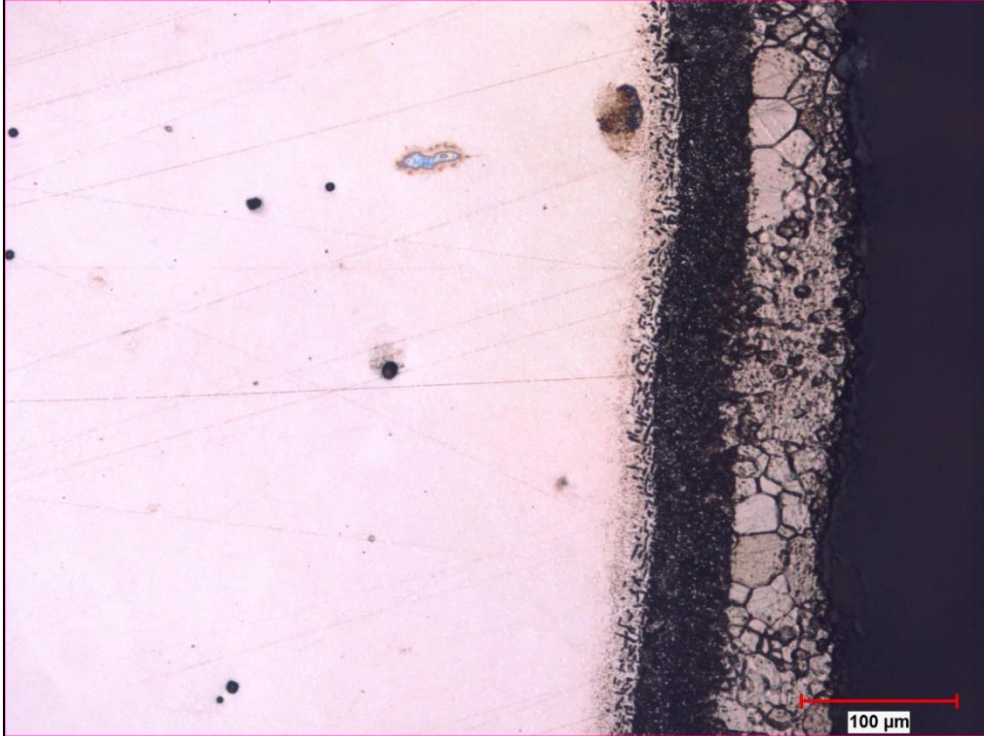


Şekil 5.3. IP1041 ve CODEP kaplı CMSX-4 SLS numunelerin 1100°C’de yapılan çevrimsel oksidasyon testi sırasında birim alan başına ağırlıklarındaki değişim

Grafiklerde görülen ağırlık artışlarının sebebi test sırasında oksijenin numune içerisine difüze olması ve burada oksit birleşiklerinin oluşumuna neden olmasıdır. CODEP kaplamaların eğrileri incelediğinde kütle artışının IP1041’e kıyasla daha lineer ve kararlı bir şekilde gerçekleştiği görülebilir. IP1041 kaplanmış numunelere ait olan eğrilerin daha kararlı bir davranış sergilemesinin başlıca nedeni ise oluşan oksit tabakalarının test süresi ilerledikçe zaman zaman yüzeyden ayrılarak kopmasıdır. Bazı çevrim sayılarında IP1041 kaplama için numune ağırlıklarında herhangi bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Değerler metalografik inceleme sonucu elde edilen mikroskop görüntülemeleri ve makro boyutta yapılan görsel muayene sonuçları ile beraber değerlendirildiğinde söz konusu çevrim sonuçlarında numune yüzeyinde ve içeriğinde oluşan oksitlenme miktarı ile yüzeyden dökülen/dağılan oksit birleşimi miktarının yakın ağırlıklarda olduğu ön görülmüştür. Buna binaen ağırlık ölçümleri esnasında kayda değer bir farklılık gözlemlenmemiştir.



Şekil 5.4. IP1041 kaplamada oluşan deformasyon ve oksit cebi morfolojisi



Şekil 5.5. Çevrimsel Oksidasyon testi sonrası CODEP kaplama morfolojisi

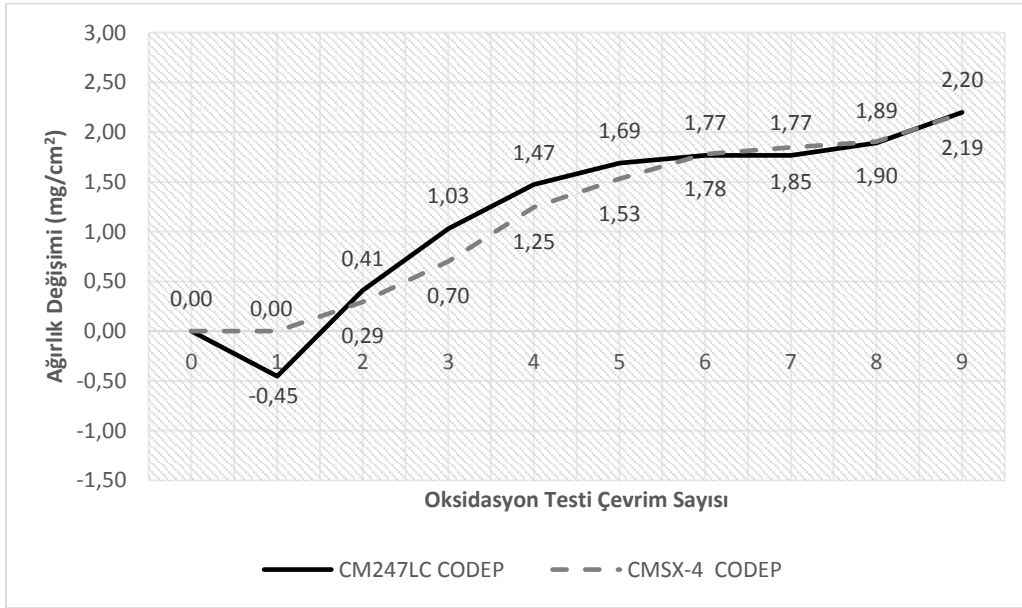
5.2.2. CODEP kaplamının CMSX-4 ve CM247-LC numunelerdeki çevrimsel oksidasyon test sonuçlarının kıyaslanması

Deneysel çalışmalar kapsamında aynı kaplamaların CMSX-4 ve CM247-LC malzemeleri üzerindeki farklı etkilerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda test sonuçları aynı kaplamalar farklı altlık malzemeler olacak şekilde de kıyaslanmıştır. Bu bağlamda Şekil 5.7'deki grafikler oluşturulmuştur.

Şekil 5.7 incelendiğinde CODEP kaplamının çevrimsel oksidasyon testi sonrası CM247-LC ve CMSX-4 üzerindeki ağırlık değişimine olan etkilerinin kıyaslandığı görülebilir. Grafik incelendiğinde ağırlık değişim oranlarının ve grafik eğim karakteristiklerinin oldukça yakın olduğu görülebilir. Aradaki minör farklar değerlendirilerek sebeplerinin irdelenmesi sağlanmıştır. Malzeme metalografik yapıları incelendiğinde iki malzeme grubu arasındaki en temel farkın tane oryantasyon morfolojileri olduğu belirlenebilir. CM247-LC yönlendirilmiş katılaştırılma metodu ile üretilmiş bir alaşımken CMSX-4 tek kristalli bir morfoloji sergilemektedir. Bu sebeple CMSX-4'ün tane sınırı ihtiva etmediği görülebilir (Bkz Şekil 2.12) (Bkz. Şekil 2.15) Bu temel fark CM247-LC'nin kimyasal bileşiminde bulunan B, C ve Zr gibi tane sınırı güçlendirici alaşım elementlerinin varlığına neden olmaktadır (Bkz. Çizelge 2.2). Tane sınırları kimyasal birleşimleri açısından malzemenin nominal kimyasal birleşiminden büyük oranda farklılıklar gösterirler. Bu farklılıklar genellikle tane sınırlarının hareketlerini engelleyerek malzeme mukavemetini arttıran elementler olarak tanımlanabilir fakat segregasyon olarak anılan N, S, P gibi bazı istenmeyen elementlerde tane sınırlarında esas malzeme içeriğine göre çok daha yoğun olarak ihtiva olunurlar. Ayrıca bu elementel birleşim karışıklığının ve kimyasal kirliliğin sonucu olarak tane sınırları genellikle kristal yapılı bir özellik göstermemektedirler. Bahsedilen oksijen ilgisi yüksek elementlerin varlığı ve amorf yapısı nedeni ile tane sınırları her zaman malzemelerin oksidasyona karşı en düşük direnci gösteren bölgeleri olacaktır. Dolayısı ile CM247-LC numunelerdeki tane sınırlarında yüksek sıcaklık etkisi altında oksidasyon başlamış ve oksit birleşikleri oluşmuştur (Bkz. Şekil 5.6). Fakat testin gerçekleştirildiği çevrim sayısında CODEP kaplamalarda ağırlık değişimine neden olacak seviyede bir yüzey deformasyonu olmadığı için oluşan oksit birleşikleri kaplama katmanı altında kalmış ve grafiğe ağırlık artışı olarak yansımışlardır [54].



Şekil 5.6. CM247-LC Malzemede oluşmuş alüminyumca zengin iğnemsli oksit yapıları



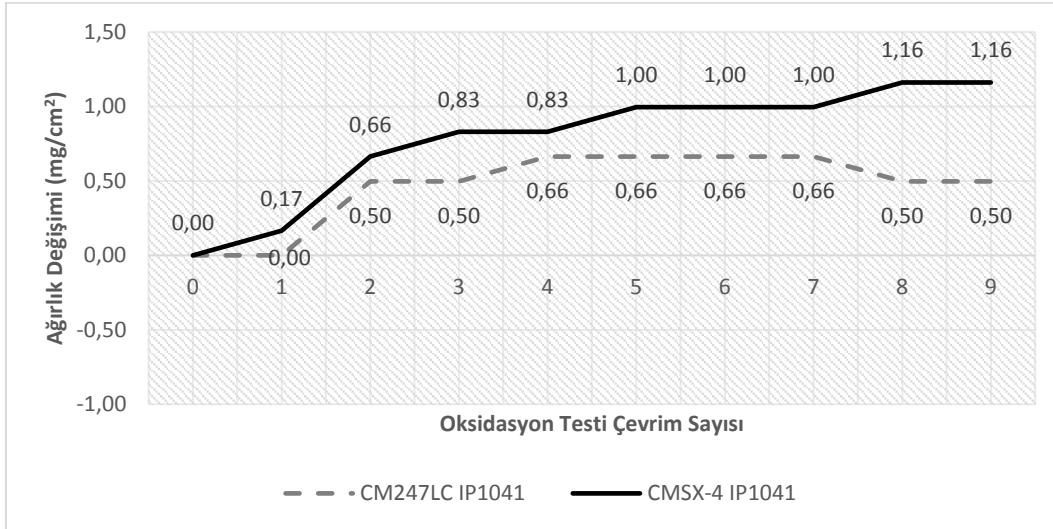
Şekil 5.7. CODEP kaplı CM247-LC ve CMSX-4 SLS numunelerin 1100°C'de yapılan çevrimsel oksidasyon testi sırasında birim alan başına ağırlıklarındaki değişim

5.2.3. IP1041 kaplamanın CMSX-4 ve CM247-LC numunelerdeki çevrimsel oksidasyon test sonuçlarının kıyaslanması

Şekil 5.9 incelendiğinde IP1041 kaplamanın CM247-LC ve CMSX-4 üzerindeki ağırlık değişimine olan etkilerinin kıyaslandığı görülebilir. Grafik incelendiğinde grafik karakteristiklerinin benzerlik sergilediği görülebilir. İki eğri arasındaki farklılıkların sebepleri eldeki veriler kapsamında araştırılmıştır. Bölüm 5.2.3’de açıklandığı gibi tane sınırındaki süreksizlikler ve tane sınırı destekleyici elementlerin varlığı CM247-LC’nin göreceli olarak oksidasyon direncinin CMSX-4’e göre daha düşük olmasına neden olmaktadır. Fakat grafik incelendiğinde CM247-LC numunedeki ağırlık artış trendinin CMSX-4’e göre daha düşük kaldığı görülmektedir. Bu durumun nedenleri irdelendiğinde CODEP kaplamada koruyucu oksit filmi tabakasında ağırlık kaybına neden olacak bir deformasyon olmadığı fakat IP1041 kaplı yüzeylerde dağılma ve yüzeyden kalkma olduğu gözlemlenmiştir. Söz konusu durum metalografik incelemelerle de teyit edilmiştir (Bkz Şekil 5.8). Kaplama yüzeyinde meydana gelmiş bu deformasyonlar esas malzemenin ve CM247-LC için tane sınırlarının daha yüksek hızda oksidasyona uğramalarına neden olmaktadır. Bunun devamında ise koruyucu kaplamanın bütünlüğünü ve koruyuculuğunu yitirmiş olması nedeni ile yüzeyden koparak ayrılan oksit birleşikleri CM247-LC’nin 8. Çevrim sonrasında ağırlık kaybına uğramasına neden olmuştur [55].



Şekil 5.8. CM247-LC tane sınırlarında ilerleyen korozyon ve kaplama yüzeyinde meydana gelen dökülmeler



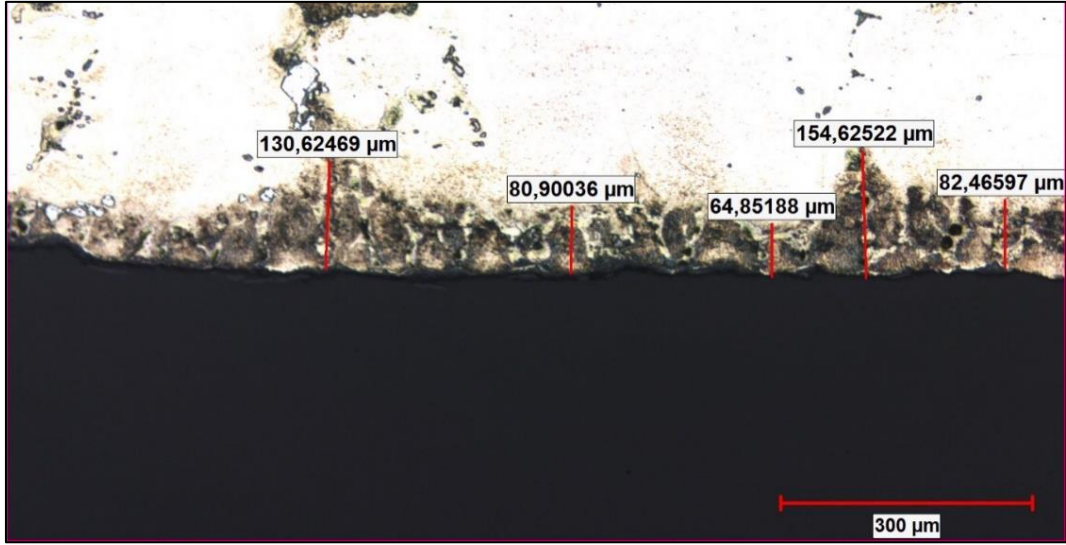
Şekil 5.9. IP1041 kaplı CM247-LC ve CMSX-4 SLS numunelerin 1100°C'de yapılan çevrimsel oksidasyon testi sırasında birim alan başına ağırlıklarındaki değişim

5.3. Çevrimsel Oksidasyon Testi Sonrası Metalografik İnceleme Sonuçları

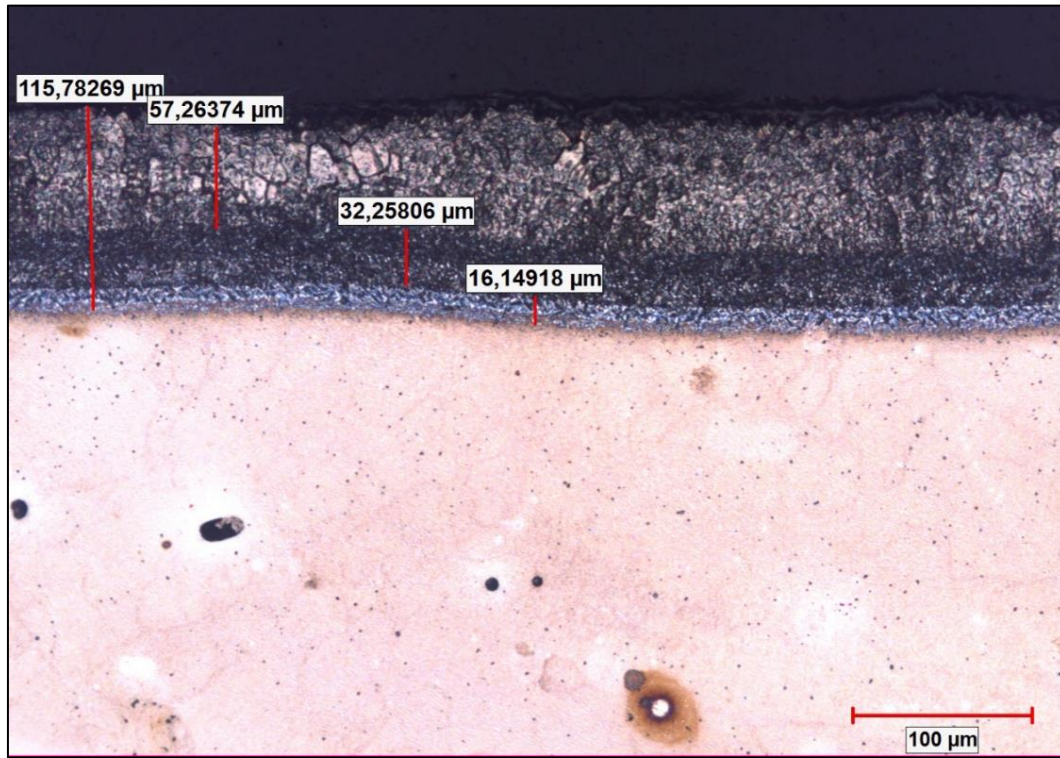
Oksidasyon test sonuçlarının kök nedenlerinin irdelenebilmesi ve kaplama morfolojilerinin test sonrasında ne şekilde değiştiğinin görülebilmesi için tüm numune ve kaplama çeşitleri için metalografik inceleme yapılmıştır.

5.3.1. CODEP ve IP1041 kaplamanın metalografik morfolojilerinin kıyaslanması

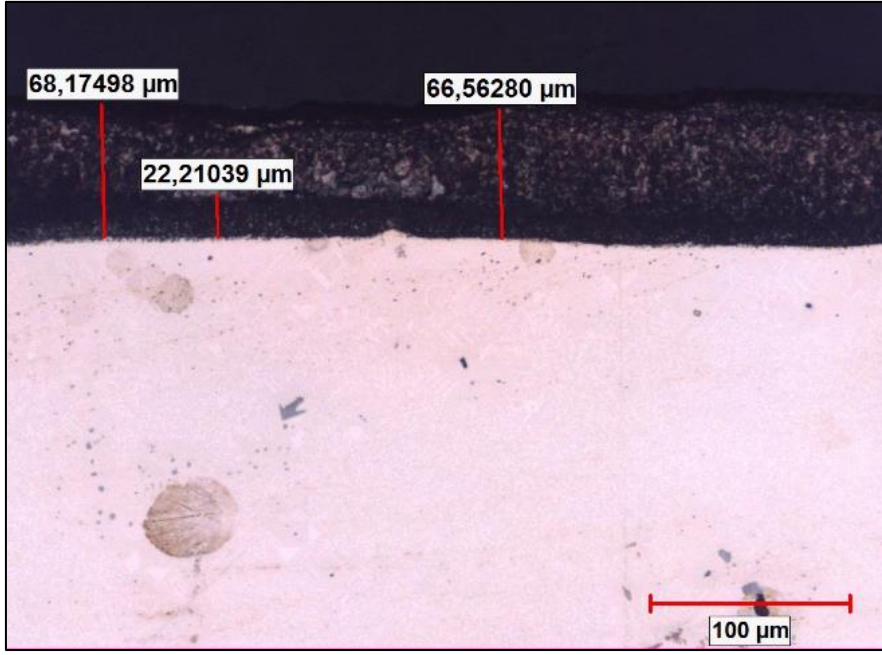
Yapılan metalografik inceleme sonrasında elde edilen sonuçlarda tespit edilen kritik farklılık CODEP kaplamanın oksidasyon testi sonrasında dahi bütünlüğünü ve homojenliğini korumasının aksine IP1041 kaplamada bölgesel olarak bozulmalar ve dağılmaların meydana gelmesi sonucunda oksidasyon/korozyon direncini numune üzerinde eşit olarak sağlayamamasıdır. Şekil 5.10'a bakıldığında termal etki ve oksijen maruziyeti sonucunda kaplama yüzeyinde oluşan oksitlerin malzeme içerisine doğru ilerlediği görülebilir. Oksit ilerleme derinliklerinin farklı noktalarda birbirlerinden büyük oranda farklı olduğu görülebilir. Nitekim kaplamanın oksidasyon direncini homojen bir şekilde sağlayamadığı tespiti bu morfoloji görüntüsü sonucunda ortaya çıkmaktadır. Ayrıca her iki kaplamanın da test öncesi ve sonrası morfolojik yapıları kıyaslanarak hangi malzeme üzerinde hangi kaplamanın nasıl bir oksidasyon direnci sağladığının tayin edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 5.10 ve 5.11 kıyaslandığında IP1041 kaplamada oksit katmanının dengesiz bir şekilde büyüme eğilimi gösterdiği görülmüştür. Çevrimsel oksidasyon testi sonrası elde edilen bu morfoloji ile oksidasyon testi yapılmamış numune morfolojisi kıyaslandığında test sonrasındaki TGO ilerlemesinin ne denli kritik seviyede olduğu görülebilir. Başlangıçta 25µm olan kaplama tabakasının (Bkz. Şekil 5.13) test sonrasında yer yer 154µm'ye kadar ilerlediği görülebilmektedir.



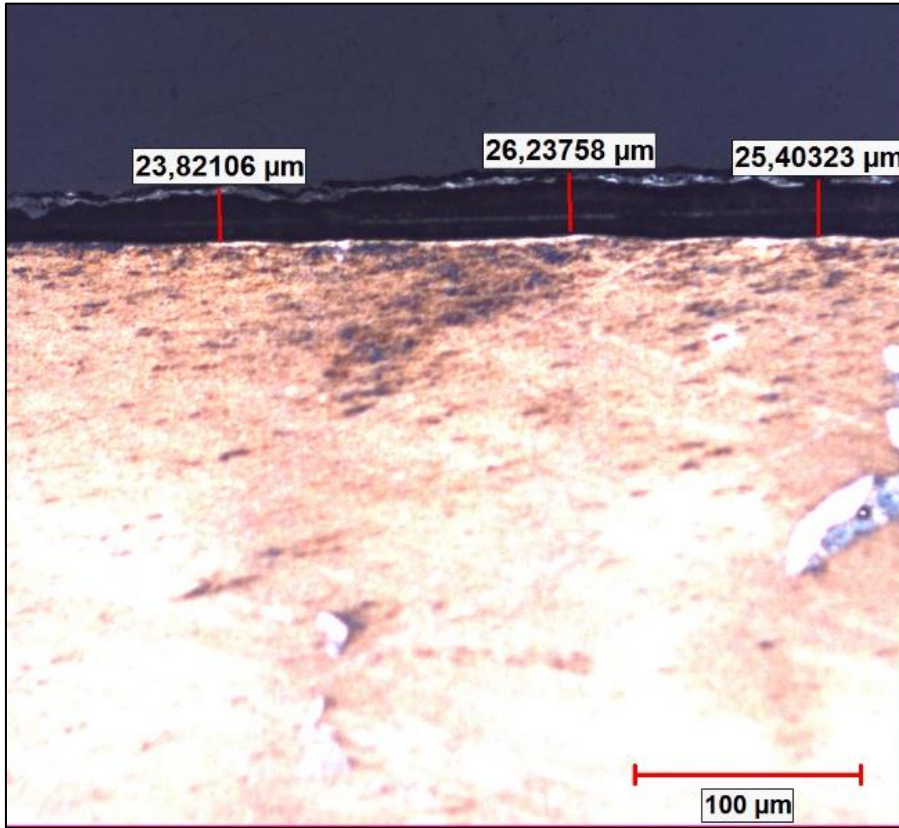
Şekil 5.10. IP1041 kaplı CM247-LC numunesinin mikroyapısı (9 çevrim termal oksidasyon testi sonrası)



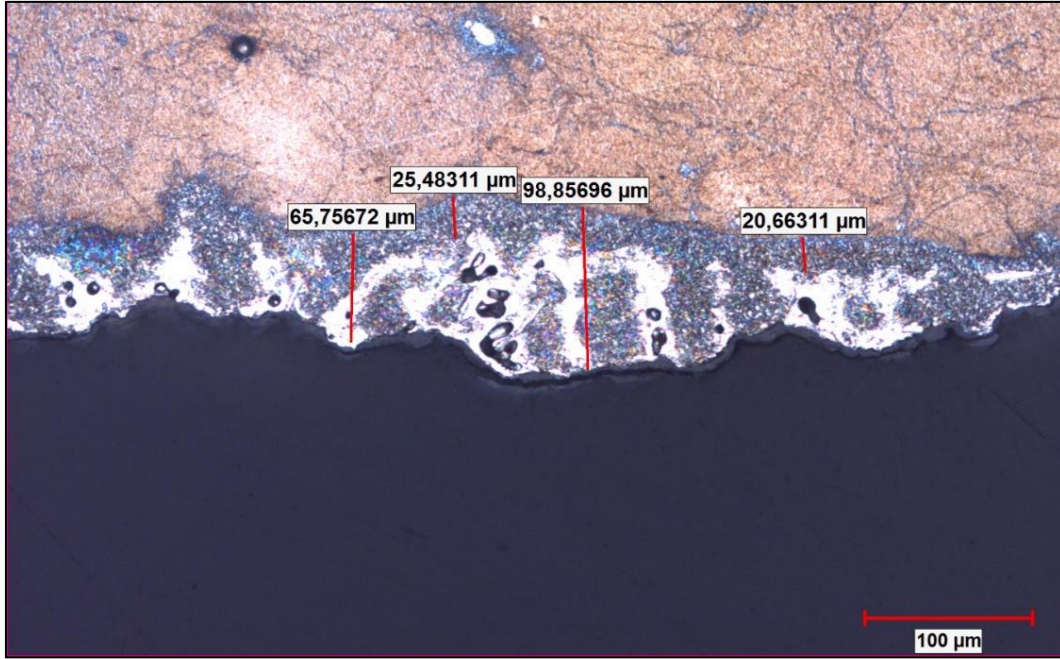
Şekil 5.11. CODEP kaplı CM247-LC numunesinin mikroyapısı (9 çevrim termal oksidasyon testi sonrası)



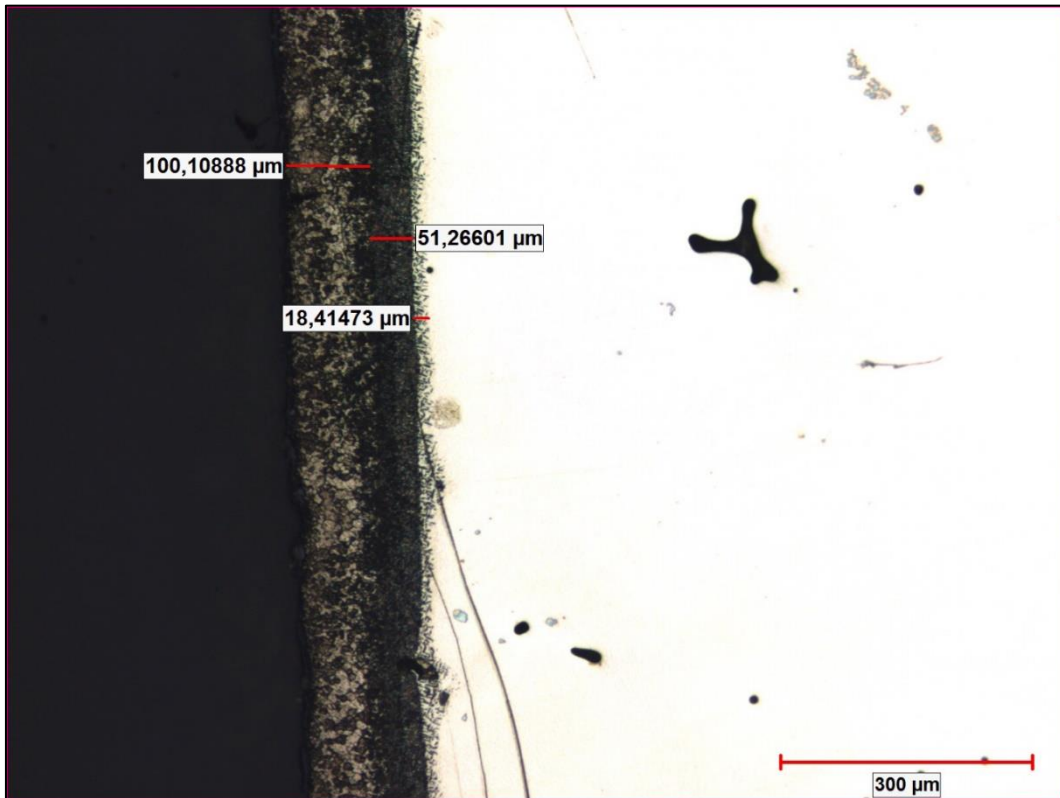
Şekil 5.12. CODEP kaplı CM247-LC numunesinin mikroyapısı (Termal oksidasyon testi öncesi)



Şekil 5.13. IP1041 kaplı CMSX-4 numunesinin mikroyapısı (Termal oksidasyon testi öncesi)



Şekil 5.14. IP1041 kaplı CMSX-4 numunesinin mikroyapısı (9 çevrim termal oksidasyon testi sonrası)



Şekil 5.15. CODEP kaplı CMSX-4 numunesinin mikroyapısı (9 çevrim termal oksidasyon testi sonrası)

5.3.2. CODEP kaplamanın CMSX-4 ve CM247-LC üzerindeki performansının kıyaslanması

Yapılan kıyaslamada (Bkz. Şekil 5.11), (Bkz. Şekil 5.15) kaplama morfolojilerinin iki malzeme üzerinde de bütünlüğünü koruduğu gözlemlenmiştir. Kaplama ve ana metal arasındaki geçiş yüzeyleri daha yakından incelendiğinde iki numune arasındaki temel farklılığın TGO katmanlarının morfolojisinde olduğu görülmüştür. Metalografik görüntülerde CM247-LC üzerinden alınan test sonrası görüntülerde TGO katmanının çok daha net bir şekilde ve homojen olarak ilerlediği görülmektedir. Oluşan Al_2O_3 katmanı net bir kontrast farkı yaratarak TGO katmanı sınırlarının kolaylıkla ayırt edilebileceği bir görüntülemeye izin vermiştir. Fakat CMSX-4 üzerinden alınan görüntülerde söz konusu TGO katmanının daha düşük bir kontrast farkı yaratan lamelar benzeri bir yapıda ilerlediği gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 5.15). İki malzeme için TGO katmanının kapladığı alanlar kıyaslandığında CM247-LC’de oluşan alanın CMSX-4’den yaklaşık 3 kat daha büyük olduğu tayin edilmiştir. Nitekim CM247-LC’nin CMSX-4’e göre oksitlenmeye karşı daha düşük bir dayanım göstermesi çevrimsel oksidasyon testi sonuçlarında da açıklanmıştır. CM247-LC’nin tane sınırları mekaniğinden dolayı oksitlenmeye karşı daha düşük dirence sahip olmasının nedeni bölüm 5.2.2’de detaylı olarak açıklanmıştır.

5.3.3. IP1041 kaplamanın CMSX-4 ve CM247-LC üzerindeki performansının kıyaslanması

İnceleme sonucunda bölüm 5.2.2’de detaylı olarak açıklanmış tane sınırı morfolojisi ve segregasyona neden olan elementlerin varlığından dolayı IP1041 kaplamanın uygulandığı iki numunede CMSX-4’ler üzerinde oluşan TGO tabakasının daha lineer bir forma sahip olduğu gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 5.10) (Bkz. Şekil 5.14). CMSX-4 üzerinde test sonrasında yapılan TGO ilerlemesi ölçümünde ortalama TGO film kalınlığının $64\mu m$ olarak belirlenirken aynı TGO kalınlığı ölçümü CM247-LC numunesinde yapıldığında ise ortalama kalınlığının $102\mu m$ olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda CMSX-4 malzemesi üzerindeki IP1041 kaplamanın CM247-LC’ye oranla yaklaşık %35 oranında daha koruyucu olduğu gözlemlenmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada havacılık motorlarında kullanılan yüksek basınç türbinlerinin çalışma şartları sebebi ile maruz kaldığı ileri derecede mekanik ve termal etkilere karşı korunmasını sağlayan CODEP ve IP1041 difüzyon kaplamaların uygulama ve performans açısından kıyaslamaları yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler değerlendirildiğinde CODEP kaplamanın korozyon performansı konusunda genel anlamda IP1041 kaplamaya kıyasla üstünlük sağladığı belirtilebilir. Fakat IP1041 kaplamanın da uygulama kolaylığı ve maliyeti göz önüne alınarak değerlendirildiğinde kayda değer bir sıcak korozyon direnci sağladığı görülebilir. Dolayısı ile bir havacılık motorunun yüksek basınç türbininde kullanılacak olan kaplama teknolojisinin seçilmesinde en önemli kriter motor karakteristikleri olacaktır. CODEP kaplama üzerinde yapılan uygulama adımları ve kaplama mikroyapıları literatürde daha önce yapılan çalışmalar ile kıyaslanmış ve kaplamaların uygunluğu teyit edilmiştir. Fakat IP1041 nispeten yeni bir kaplama olduğu için literatürde kaplama performansı ve mikroyapısı üzerinde yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Kaplama performansları her iki kaplama içinde CMSX-4 ve CM247-LC olmak üzere iki farklı malzeme üzerinde test edilmiştir. Bu konuda yapılan incelemelerde CMSX-4 malzemesinin tane sınırlarına sahip olmaması ve bundan kaynaklı kimyasal birleşimindeki impuritelere çok daha az olması sebebi ile daha yüksek bir oksidasyon direncine sahip olduğunu söylemek mümkündür. Bununla beraber CM247-LC'nin üretilmesi CMSX-4'e oranla daha düşük maliyet ile gerçekleştirilebilmektedir. Her iki malzemede daha önce farklı motorlarda yüksek basınç türbini uygulamalarında kullanılmışlar ve özelliklerini kanıtlamışlardır. Malzemelerin yüksek sıcaklık oksidasyon dirençleriyle ilgili belirtilmiş farkların yorumlanarak malzeme seçiminin yapılması motor tasarımını yapan mühendislik ekibi tarafından motor karakteristiklerinin, malzeme teknik verileri ile kıyaslanması sonucunda karar verilebilecek bir olgudur. Çalışmanın temel amacı her iki malzemenin iki farklı kaplama uygulamasında göstereceği yüksek sıcaklık oksidasyon dayanımlarının gözlemlenmesi ve kıyaslanmasıdır.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde yapılması gerekebilecek araştırmaların ve akademik çalışmaların konu başlıkları aşağıda verilmiştir.

- IP1041 kaplamasının uygulama basamaklarında yapılacak parametre düzenlemeleri ve optimizasyonları ile difüze olmuş kaplama kalınlığının artırılmasının kaplama performansına etkileri ve CODEP kaplama ile kıyaslanması incelenmelidir. Özellikle difüzyon süresinin ve sıcaklığının EK 1’de verilen üretici firmaya ait olan dokümana göre daha yüksek belirlenmesi difüze olmuş kaplama kalınlığını ve homojenliğini artırarak kaplama niteliğinin artmasını sağlayabilir.
- Kaplanmış numunelerin çevrimsel oksidasyon testi öncesinde ve sonrasında XRD metodu ile katman katman haritalanması sayesinde kaplamaların element hareketlerine olan etkisi incelenerek oluşan farklı fazlar gözlemlenebilir. Bu sayede kaplamaların karakteristikleri ile ilgili daha fazla destekleyici bilgi edinilebilir.
- IP1041 kaplamanın uygulama metodunu boya tabancası ile yüzeye uygulamak yerine vakumlu ortamda kutu ve solüsyon içerisinde fırınlama metodunun denenmesi.
- Çevrimsel oksidasyon testinde uygulanan çevrim sayılarının artırılarak kaplamaların uzun vadede ağırlık değişimi ve yüzey morfolojisi açısından performanslarının kıyaslanması.

KAYNAKLAR

1. Argence, D., Vernault, C., Desvallees, Y., and Fournier, D. (2000). MC-NG: A 4th generation single-crystal superalloy for future aeronautical turbine blades and vanes. superalloys. *Superalloys* 829-837.
2. Aydınmakina F. (2014) *Jet Motoru Türbin Kanatçıklarının Alüminit Kaplamalarının Element Hareketlerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 4-70
3. Ken, H. and Wahl, J. B. (2004). Improved single crystal superalloys, CMSX-4 (SLS)[La+Y] and CMSX-486, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 45-48.
4. Donachie, M. J. and Donachie, S. J. (2002). *Superalloys A Technical Guide* (Second Edition). Ohio: American Society of Metals International, 1-4
5. Bhat, N. B., Curreri, P. A. (Editors). (2018). *Aerospace Materials and Applications*, Huntsville: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 505-530.
6. Reed, R. C. (2006). *The Superalloys Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1-18
7. Lock, D., Caron, P., Lavigne, O., Bacos, M. P., Poulain, M., Dorvaux, J. M., Rio, C., Setif M. H. and Mevrel R. (2011). High Temperature Materials, *Journal Aerospace Labarativies*, (3), 2-9.
8. Bradley, E. F., (1988), *Superalloys:Technical Guide*, United States: American Society of Metals International, s.280.
9. Heidmann, J. (2011, 4-7 January), *Improving engine efficiency through core developments*. Paper presented at the 49th American Institute of Aeronautics and Astronautics Aero Science Meeting, Orlando, Florida
10. Betteridge, W., Shaw, S. W. K. (1987). Development of superalloys, *Materials Science and Technology*, 3(9), 682-694.
11. Sims, C. T., Stoloff, N.S. and Hagel, W. C. (1987). *Superalloys II: High Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power*. (First Edition). United States: John Wiley and Sons 540-575
12. Hashizume, R., Yoshinari, A., Kiyono, T., Murata, Y. and Morinaga, M. (2007). Development of Ni based single crystal superalloys for power generation gas turbine blades, *Energy Materials*, 2(1), 5-12.
13. İnternet: Product Information Gas Turbines From 4 to 593 MW, URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:10f4860b140b2456f05d32629d8d758dc00bcc30/gas-turbines-siemens-interactive.pdf>, Son Erişim Tarihi: 04.10.2019.
14. Özdemir, E. (2017). *Bir Gaz Türbini Çevriminin Termodinamik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 45-70.

15. Zohuri, B. (2015). *Combined Cycle Driven Efficiency for Next Generation Nuclear Power Plants*. (First Edition). Switzerland: Springer International Publishing, 149-174
16. Sims, C. T., Stoloff, N. S. and Hagel, W. C. (1987). *Superalloys II*. (First edition). Canada: John Wiley & Sons, Inc., 297-302
17. Pollock, T. M. and Tin, S. (2006). Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties, *Journal of Propulsion and Power* 22(2), 361-363
18. Schafrik, R. and Sprague, R. (2004). Saga of Gas Turbine Materials Part III, *Advanced Materials & Processes*, 162(5), 29-33
19. Çadırlı, E., Aker, A., Kaygısız, Y. and Şahin, M. (2017). The influences of growth velocity and Fe content on the microstructure, microhardness and tensile properties of directionally solidified Al-1.9Mn-xFe ternary alloy. *Materials Research ID MR-2017-004*, 2-4
20. Durand-Charre, M. (1997). *The Microstructure of Superalloys*, (First Edition). Amsterdam: Gordon and Breach Sci. Publishing, 125-200
21. Whittenberger, J. D., (1992). A Review of: "SUPERALLOYS II" edited by C.T. Sims, N.S. Stoloff, and W.C. Hagel A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons., *Materials and Manufacturing Processes*, 7(3), 463-468,
22. Page, G. A. (2006). *Crack Initiation Modeling Of A Directionally-Solidified Nickel-Base Superalloy*, Ph.D Thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia 8-15
23. Erickson, G. L. and Harris, K. (1994, October), *DS and SX Superalloys For Industrial Gas Turbines*. Paper presented at the 5th Liege Conference on Materials For Advanced Power Engineering, Liège, Belgium.
24. Moore, Z. J. (2008). *Life Modeling Of Notched CM247LC DS Nickel-Base Superalloy*, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia, 6-13
25. Chiou, M., Jian, S., Yeh, A., Kuo, C. M. and Juang, J. Y. (2015). High temperature creep properties of directionally solidified CM-247LC Ni-based superalloy. *Materials Science & Engineering: A*. 3-4
26. Zhu, X., Cheng, H., Shen, M. and Pan, J. (2013). Determination of C parameter of Larson-miller equation for 15CrMo steel. *Advanced Materials Research*, (791-793). 374-375.
27. Li, X., Cabrillat, M. T. and Lejeail, Y. (2006). Study of modified 9Cr-1Mo welds. *International Nuclear Information System*. (43), 82-84.
28. Bolton, J. (2018). Larson and Miller exonerated - a reflection on the principles of creep rupture extrapolation applied to data for a TiAl alloy. *Aerospace Materials and Applications*, 505-530.


29. Vinoth, K. A., Vijay, A. M., Jerish, D. J., Archana, S., Srinivasan, K. and Sanal, K. (2012). *Experimental studies on thermal protective coating for low pressure gas turbine blades*. Paper presented at the 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Malta.
30. Carlos, A. M. (2007). New technology used in gas turbine blade materials.. *Scientia Et Tehcnica*, 13(36), 297-300.
31. Jaroslav, P. and Marta, K. (2010). Damage and performance assessment of protective coatings on turbine blades, *Gas Turbines*, 284-287.
32. İnternet; Sourmail, T. *Coatings for high temperature applications*, University of Cambridge, UK. Available: <http://Thomassourmail.net/coatings/index.html>, Son Erişim Tarihi: 04.10.2019
33. Han, J. C. (2004). Recent studies in turbine blade cooling. *International Journal of Rotating Machinery*, (10), 443-445.
34. National Aerospace Agency. (1997). Thermal Barrier Coating Workshop; NASA CP-1998-207429, *NASA Lewis Research Center*, Cincinnati, Ohio, 1-4.
35. Clarke, D. R., Oechsner, M. and Padture, N. P. (2012). Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *Material Research Society Bulletin*, 37(10), 891-896.
36. Gayathari, N., Ramesh, B. R., Shanmugantan, V. K. and Raphael, T. (2015). Surface analysis of ceramic-coated turbine blade, *International Journal of Applied Engineering Research*, (10), 1-3.
37. National Energy Technology Laboratory. (2006). *Gas Turbine Handbook*, Pittsburg: Department Of Energy National Energy Technology Laboratory, 419-426.
38. Gleeson, B. (2006, March). Thermal Barrier Coatings for Aeroengine Applications. *Journal of Propulsion and Power*, (22), 375-378.
39. Cadoret, Y., Monceau, D., and Bacos, M.P. (2005). Effect of Platinum on the growth rate of the oxide scale formed on cast Nickel Aluminide intermetallic alloys, *Oxidation of Metals*, (64), 185-205.
40. Fernando, P., Kennedy, A. D., Kopecek, J., Moretto, P. (2006). Investigation of the microstructure of platinum modified aluminide coatings. *Surface and Coatings Technology*, (200), 4032-4039.
41. Alkadir, I. A. and Jawhar, M. N. (2018). Improvement of oxidation resistance of Inconel 600 alloy by pack cementation process. *International Journal of Advancements in Technology*, 9(3), 1-2.
42. Sandia National Laboratories. (2003). *High Efficiency Turbine Blade Coatings*, Springfield, U.S. Department of Energy, 8-15.
43. Zhang, D. (2011). Thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD). *Journal of the American Ceramic Society*, 90(2), 533-535.

44. Sertoglu, T., 1nci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı Jet Revizyon Müdürlüğü (2004). Paket Semantasyon Metodu ile Alüminayt Kaplamaları Codep Kaplama Uygulaması ve Jet Revizyon Müdürlüğündeki Uygulamaları, Bölüm 14, 1-15.
45. National Aerospace Agency. (2018). Aerospace Ceramic Materials: Thermal, Environmental Barrier Coatings and SiC/SiC Ceramic Matrix Composites For Turbine Engine Applications, National Aerospace Agency/TM—2018-219884, *Glenn Research Center*, Cleveland, Ohio, 2-8.
46. Winter M.R., (2007). Oxide Materials with Low Thermal Conductivity. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(2). 533-535,
47. İnternet: Flyer – Pack Diffusion Alloy Materials – Issue 1 (2014), Oerlikon Metco, URL: https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_FLY-0037.1_PackDiffusionAlloys_EN.pdf&download=1, Son Erişim Tarihi: 04.10.2019.
48. İnternet: Technical Data Sheet – IP1041-IPAL Diffusion Coating – Rev 1 (2019), Indestructible Paint, URL: <https://indestructible.co.uk/download/ip1041-ipal-diffusion-coating>, Son Erişim Tarihi: 17.10.2019.
49. Kurt, H. (2010). *Alüminyum-Alüminakompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 85-90
50. Nicholls, J. and Bennett, M. J., (2000). Cyclic oxidation - guidelines for test standardisation, aimed at the assessment of service behaviour. *Materials at High Temperatures*. 17(3). 413-428.
51. Postolenko, V. (2008). *Failure Mechanisms of Thermal Barrier Coatings for High Temperature Gas Turbine Components under Cyclic Thermal Loading*, Ph.D Thesis, Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch -Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 5-25
52. Duhamel, C., Chieux, M., Molins, R., Rémy, L., Monceau, D., Vande, A. and Guédou, J. Y. (2012). Thermal cycling behaviour of thermal barrier coating systems based on first- and fourthgeneration Ni-based superalloys, *Materials at High Temperatures*, 29(2), 136-144,
53. Swadźba, R., Hetmańczyk, M., Wiedermann, J., Swadźba, L., Moskal, G., Witala, B. and Radwański Duhamel, K., (2012). Microstructure degradation of simple, Pt- and Pt+Pd-modified aluminide coatings on CMSX-4 superalloy under cyclic oxidation conditions, *Surface and Coatings Technology*, 215, 16-23.
54. Khakpour, I., Soltani, R. (2015). Microstructure and high temperature oxidation behaviour of Zr-Doped aluminide coatings fabricated on nickel-based super alloy. *Procedia Materials Science*, 11, 515–521

55. Lee, K. N., Barret, C. A., Smith, J. (1999). Long-term cyclic oxidation behavior of uncoated and coated Re108 and IN939 at 980 and 870 °C, *Journal of Thermal Spray Technology*, 9, 121-127

EKLER

EK-1. IPAL IP1041 Kaplama Teknik Özellikleri ve Uygulama Adımları

<h1>Technical Data Sheet</h1> 	
Product Name:	IPAL Diffusion Coating
Product Number:	IP1041
Product Description:	<p>Ipal IP1041 diffused aluminide coating is designed as a protective coating for gas turbine hot section parts at temperatures up to 1000°C. Ipal 1041 is used for sulphidation protection in industrial and marine gas turbines. Often used on nickel based turbine alloy materials the coating imparts a high temperature oxidation resistant aluminide coating for turbine components in all areas of industrial and aero gas turbine use.</p>
EU REACH Status	<p>This coating contains Chromium Trioxide (Chromic Acid): CAS No: 1333-82-0. This is classified as a SVHC, and under annex XIV has a sunset date of September 2017. Continued use of this coating after this date will be restricted to authorised uses (uses 1, 4 & 5 as defined in authorisation) under the REACH chemical restriction process, for a defined time period: 4 years for industrial uses and 7 years for aerospace use.</p>
Chrome Free Alternative	<p>The result of a major development programme, in conjunction with prime users of diffusion coatings, CF-IPDIFF is a chrome free alternative to IPAL IP 1041, currently undergoing application and field trials with key applicable clients. Full approvals are yet to be confirmed.</p>
Approvals/Specifications:	<ul style="list-style-type: none"> - MSRR1041 (RPS603) - Omat 7/129A
Performance:	<p>Exceeds 140 hours testing at 900°C (1600°F) cyclic burner rig testing with a 2 parts per million dosing of salt.</p>
Components:	<p>Single component coating. May require the addition of de-mineralised water in low humidity environments for spray application.</p>
Application:	<p>Annex 1 of this Technical data sheet</p>

EK-1. (devam) IPAL IP1041 Kaplama Teknik Özellikleri ve Uygulama Adımları

Technical Data Sheet

Indestructible

® specialist coatings manufacture


Technical Properties:

Supply Viscosity:	23-27 seconds ISO4 cup @ 23±2°C
Flash Point:	N/A
VOC Content:	0 g/litre
Colour:	Grey
Pack Size:	1 Litre
Density:	1.6 kg/litre
Thinner:	De-mineralised water
Clean Up:	Water
Theoretical Coverage:	8.4 sq m/litre @ 50 micron non-diffused condition

Storage:

Water based corrosive and environmentally hazardous material.
 Ensure product is stored in a warm, dry environment, with a minimum temperature above 5°C (40°F). Do not allow to freeze.
 Ensure storage complies with local environmental controls.

Shelf Life: 12 months temperate; 6 months tropical

Before use, refer to Product Safety Data Sheet

Disclaimer:

The information printed in this publication is based upon the research and experience of Indestructible Paint Ltd. No representation of warranty is made, however, concerning the accuracy or completeness of the information presented in this publication. Indestructible Paint Ltd make no warranty or representation of any kind, express or implied. Including without information limitation any warranty or merchantability or fitness for any particular purpose, and no warranty or representation shall be implied by law or otherwise. Any products sold by Indestructible Paint Ltd are not warranted as suitable for any particular purpose to the buyer. The suitability of any products for any purpose in particular to the buyer is for the buyer to determine. Indestructible Paint Ltd assumes no responsibility for the selection of products suitable to the particular purpose of any particular buyer. Indestructible Paint Ltd shall in no event be liable for any special, incidental or consequential damages.

Safety Data Sheets:

For Safety Data Sheets please contact our Sales Department:

Tel: +44(0)121 702 2485

Email: sales@indestructible.co.uk

EK-1. (devam) IPAL IP1041 Kaplama Teknik Özellikleri ve Uygulama Adımları

Application procedure**PRODUCT: IP1041 IPAL****DESCRIPTION**

A spray applied, heat cured, inorganic slurry which when heated in a non-oxidising atmosphere diffuses to form a silicon stabilised aluminide coating.

This coating can be used on nickel, cobalt, & iron base super alloys as well as austenitic stainless steels. The minimum allowable diffusion temperature is 1625°F (885°C) for nickel alloys & 1835°F (1000°C) for cobalt & iron base alloys.

PROPERTIES OF BASIC COMPOUND – IP1041 IPAL

Principal pigments	- Aluminium & Silicon
Total solids by weight - percentage	- 56-62
Density	- 1.6 g/ml
Colour, when thoroughly mixed	- Grey-Green
Viscosity @ 25°C, N°2 Zahn cup	- 16-18 seconds
Viscosity @ 23°C, ISO 4 flow cup	- 25-30 seconds

SAFETY PRECAUTIONS

IP1041 IPAL slurry contains hexavalent chrome making it toxic if ingested and requires care in handling. Avoid contact with skin, eyes & mucous membranes. In case of contact, immediately irrigate affected area with running water. If contact is severe, obtain medical attention. Self-contained or air fed respirators should be worn while spraying the coating. Well ventilated spraying areas with a high exhaust rate should be used.

EK-1. (devam) IPAL IP1041 Kaplama Teknik Özellikleri ve Uygulama Adımları

Technical Data Sheet



Phosphine Gas: During diffusion metallic phosphides

can be produced in the coating. These compounds hydrolyse in the presence of airborne water vapour. Phosphine is highly toxic and parts should be placed in a well ventilated area with an RH of 50-60% after diffusion. Ventilation should be at the rate of 1-2 air volume changes per hour. Personnel handling freshly diffused parts should be equipped with air fed respirators. The diffused parts should be aged for 24 hours in the ventilated area prior to handling.

A phosphine gas detector can be used to monitor the working and storage area.

APPLICATION PROCEDURE

1.

- 1.1 Determine the surface area of parts which is to be coated.
- 1.2 Ascertain what resultant diffused coating thickness is required (per applicable specification).
- 1.3 Determine the coating weight per unit area which should be applied to obtain proper coating thickness. As a guideline, to achieve a typical diffused film thickness of 25-37.5 microns a target coating weight of 19-24 milligrams/cm² should be applied. However, the exact relationship between the weight of applied coating & aluminide thickness can only be determined by sectioning diffused parts.
- 1.4 Determine the total weight of coating to be applied by multiplying the weight per unit area value (from step 3) by the total surface area to be coated (from step 1).

2.

- 2.1 Vapour degrease thoroughly using 1,1,1-Trichlorethane or equivalent.

NOTE: From this point on, parts may be handled only with lint free double cotton gloves. It has been noted from numerous trials that latex gloves leave a finger print that will affect the quality of the coating.

- 2.2 Mask surface areas not to be coated.
- 2.3 Grit blast, using clean, new 120/220 mesh Al₂O₃ (aluminium oxide) at 60 psi line pressure & 6-8 inch (150-200mm) nozzle work distance.
- 2.4 Remove all masking.
- 2.5 Remove all residual grit by alternate brushing with a clean bristle brush & by blowing off with clean compressed air.

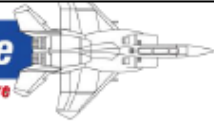
NOTE: Cleanliness of part surface to be coated is critical & contamination will produce seriously defective coatings.

3.

EK-1. (devam) IPAL IP1041 Kaplama Teknik Özellikleri ve Uygulama Adımları

Technical Data Sheet

Indestructible
® specialist coatings manufacture



3.1 Determine bare (grit blasted) weight of part or parts to be coated.

NOTE: Assign appropriate number of control samples to each batch of parts, & determine the area to be coated & the bare weight & process the control samples simultaneously with parts.

3.2 Re-mask areas not to be coated.

4.

4.1 Before removing any of the contents from the container of IP1041 IPAL, shake, stir or use some means of mixing the solution until all of its solids are entirely and uniformly dispersed into the solution.

4.2 Spray IPAL IP1041 on grit blasted area. Apply thin even coats and allow to flash off to matt grey between each application.

4.2.1 IP1041 is applied initially as a mist coat to wet the metal substrate. When this coat has dried to a matt grey, additional thicker coats may be applied.

4.2.2 In climates where humidity levels are low, an addition of up to 10% demineralised water may be added to aid flow of the applied coating. The presence of dry spray on parts is a good indicator that a water addition is required.

4.3 Weigh part, and by difference, determine amount of coating weight which has been applied.

4.4 Repeat steps 13/14 until the proper weight (as determined in step 4) has been applied.

4.5 Oven dry at 175°F (80°C) ± 25°F for 15 minutes minimum. Remove masking.

4.6 Cure coating at 650°F (340°C) ± 25°F (part temperature) for 30 minutes at temperature.

4.7 Inspect coating for crazing, mud cracking or any other visible surface defects. Defective parts must be stripped & reprocessed.

4.8 Perform final pre-diffusion inspection.

DIFFUSION TREATMENT:

5.

5.1 Rack coated parts in a manner such that the coated area is not in contact with rack or retort. Diffuse parts in one of the following atmospheres:

5.2 Argon (dew point less than -40°) at a flow rate sufficient to guarantee six (6) furnace volume changes per hour. Purge furnace for one (1) hour before heating parts.

or – 5.2.1 Hydrogen (dew point less than -40°).

or - 5.2.2 Vacuum with an argon backfilled partial pressure of
5 x 10⁻² Torr.

EK-1. (devam) IPAL IP1041 Kaplama Teknik Özellikleri ve Uygulama Adımları

Technical Data Sheet



Caution; evaporated aluminium may contaminate the furnace and reduce the usefulness of the equipment for other processes.

DO NOT USE A NITROGEN ATMOSPHERE.

NOTE: The coating will diffuse at temperature from 1625°F (885°C) up to the solutioning temperature of the base metal, diffusion time & temperature schedules can be tailored to match the heat treatments for the alloys.

The two-phase coating structure can be produced using the alloy solutioning treatment as the diffusion treatment; however, the parts must be allowed to equilibrate at 1625°F (885°C) for ½ hour

during heating to the diffusion temperature. The heat treatment of the alloy must be completed after the diffused parts have been cooled & cleaned.

If the single phase aluminide is desired on nickel base alloys, coated parts should be diffused at 1625°F for two hours. DO NOT DIFFUSE COBALT PARTS AT TEMPERATURES BELOW 1800°F (980°C).

Questions concerning diffusion treatments should be directed to the manufacturer of the component or to IPC

6.

6.1 After diffusion treatment, place parts in a well ventilated area.

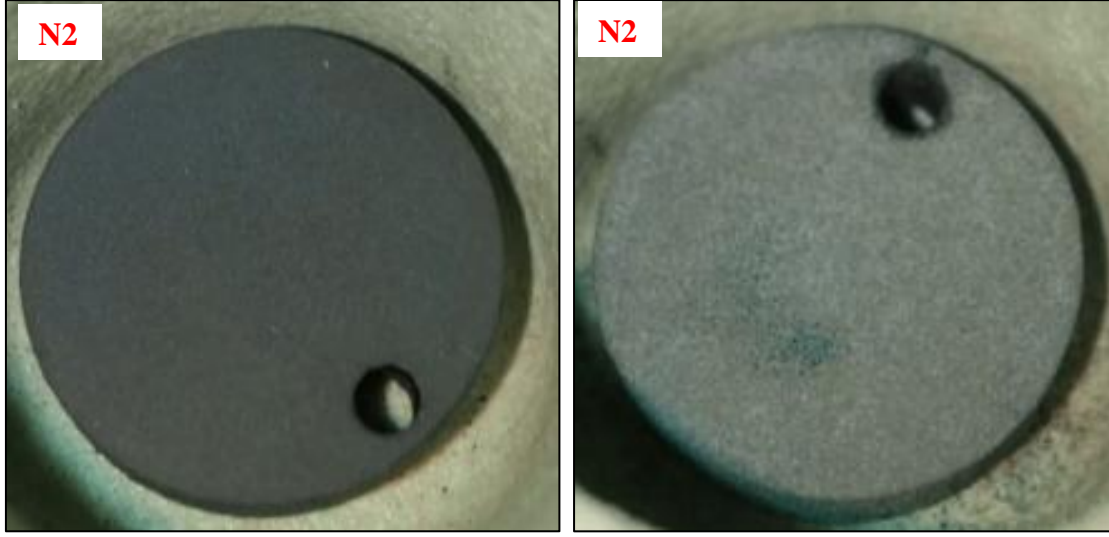
6.2 When the parts have cooled, the resulting bisque residue should be removed by light blasting at 10 psi with glass beads.

Removal of the bisque can be enhanced by placing the coated parts in a humidity chamber, typically with a RH >90% and a temperature >40°C

7.

7.1 Complete alloy heat treatment for any diffused parts which have been exposed to solutioning temperatures. Refer to manufacturers procedures for the necessary conditions and heat parameters.

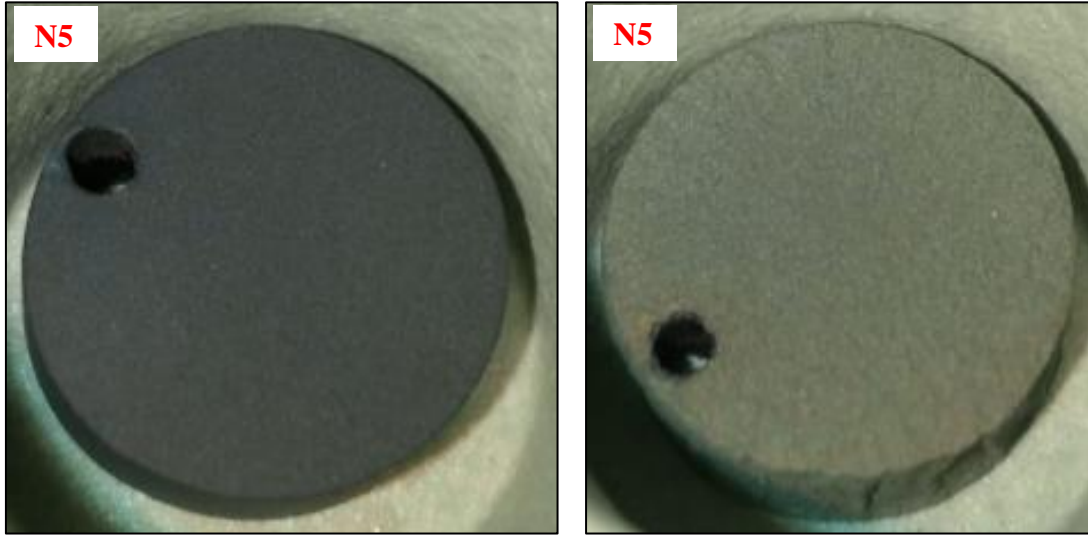
EK-2. IP1041kaplı CM247-LC numunelerin çevrimsel oksidasyon testinden önce ve sonra görüntülerinin kıyaslanması (a) önce, (b) sonra



(a)

(b)

EK-3. IP1041kaplı CMSX-4 numunelerin çevrimsel oksidasyon testinden önce ve sonra görüntülerinin kıyaslanması (a) önce, (b) sonra



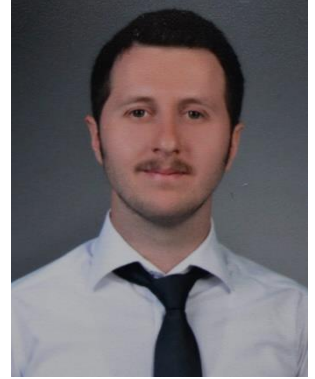
(a)

(b)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DEMİR, Erkin
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 25.09.1993, Eskişehir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 554 667 67 45
 e-mail : erkindmr@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Met. ve Malz. Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Met. Ve Malz Mühendisliği	2015
Lise	Eskişehir Salih Zeki Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş	Kalite Müh.
2017-2018	Erkunt Traktör Sanayii A.Ş	Kalite Müh.
2015-2017	Bozankaya Raylı Sistemler A.Ş	Kalite Müh.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Demir, E., Yalçın, N. (2019) Kutu Sementasyon İle Difüzyon Kaplamanın CMSX-4 ve CM 247-LC Malzemeleri Üzerindeki Sıcak Korozyona Etkisinin İncelenmesi, 2. Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi. 2, 653-660

Hobiler

Gitar, Akordeon, Uzay ve Havacılık



GAZİ GELECEKTİR..