

Jet Motoru Türbin Kanatçıklarının Alüminit Kaplamalarının Element Hareketlerinin  
İncelenmesi

Fazıl Aydınmakina

**DOKTORA TEZİ**

Metalürji Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2014

Mechanism of Element Movements of Diffusion Aluminide Coatings on Jet Engine  
Turbine Baldes & Vanes

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Metalurgical Engineering

June 2014

Jet Motoru Türbin Kanaçıklarının Alüminit Kaplamalarının Element Hareketlerinin  
İncelenmesi

Fazıl Aydınmakina

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliğı Uyarınca  
Metalürji Mühendisliğı Anabilim Dalı  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Macit Yaman

## ONAY

Metalürji Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Fazıl Aydınmakina'nın DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Jet Motoru Türbin Kanatçıklarının Alüminit Kaplamalarının Element Hareketlerinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Macit YAMAN

İkinci Danışman : -

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Macit YAMAN

Üye: Prof. Dr. Remzi GÜLER

Üye: Y. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Üye: Prof. Dr. Nuran AY

Üye: Prof. Dr. Servet TURAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .....tarih ve .....

Sayıli kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü



## ÖZET

Bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklığa uzun süre maruz kalan gaz türbini sıcak bölgelerinde sabit ve hareketli kanatçıklarındaki yüzey yayılım kaplamasının etkileri incelenmiştir.

Nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar, sabit ve hareketli kanatçıklar gibi gaz türbini sıcak bölge elemanlarında yüksek sıcaklık ve mekanik yüklere karşı yaygın olarak kullanılmaktadır. Türbin kısmı sabit ve hareketli kanatçık metalografik yapılarında, oksidasyon ve sıcak korozyona karşı direnci ve kararlılığı için gerekli yüzey kaplamaları kullanılır. Yaygın olarak kullanılan yüzey kaplama yöntemlerinden birisi de “Paket Yayılım Kaplama”dır.

Çalışmanın birinci aşamasında, gerçek kullanım şartlarında uzun süre kullanılmış sabit ve hareketli kanatçıklardaki mevcut kaplamanın element mikroyapıları elektro mikroskop (SEM) kullanılarak görüntülenmiş ve değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, “Paket Yayılım Kaplama” yöntemi ile yeniden kaplanmış kanatçıklarda yayılım bölgesindeki element hareketleri ve mikroyapıdaki değişiklikler incelenmiş ve analiz edilmiştir.

Çalışma sonunda, “Paket Yayılım Kaplama” uygulanarak yeniden kaplanan kanatçıklarda daha kararlı bir mikroyapı olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Paket Yayılım Kaplama, Türbin Hareketli Kanatçıkları, Türbin Sabit Kanatçığı, Oksidasyon, Sıcak Korozyon.

## SUMMARY

In this study, the effects of surface diffusion coatings on the gas turbine blades and vanes which are used in elevated temperatures for a long period of time have been searched and analyzed.

Nickel and cobalt based superalloys are widely used on gas turbine engine hot section components as turbine blades and vanes which are withstanding elevated temperatures and mechanical loads. The necessity of oxidation and hot corrosion resistance and stability on metallurgical structure for the turbine section blades and vanes can only be attained with surface coatings. One of the widely used coating method is “Pack Diffusion Coating”.

On the Phase-I, the elemental microstructure of the present coatings on the blades and vanes which used in real operating conditions of the jet engines were searched by scanning electron microscopy (SEM) technique.

On the Phase-II, the blades and vanes are recoated with “Packed Diffusion Coating” application and searched and analyzed the effects of diffusional elemental movements and the changes in the microstructure of the blades and vanes coated area.

After recoating operation with Pack Diffusion Coating, it was observed that a more stable microstructure have been generated on the blades and vanes.

**Keywords :** Pack Diffusion Coating, Turbine Blades, Turbine Vanes, Oxidation, Hot Corrosion,

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca, bilgi ve tecrübelerini açık gönüllükle paylaşan, hoşgörü ve yardımlarını hep yanımda bulduğum, üzerimde çok büyük emeği olan ve kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum, saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Macit Yaman'a en derin şükranlarımı sunarım. Bu tez çalışmalarının hazırlanması, yönlendirilmesi ve değerlendirilmesinde yaptıkları bilimsel katkı ve değerleri görüşleriyle bana yol gösteren tez izleme jürimdeki değerli hocalarım Prof. Dr. Nuran Ay ve Yrd. Doç. Dr. Nedret Aydınbeyli'ye teşekkür ederim. Dünya çapındaki teknolojik saygınlığını gizleyen ve fedakarlıkla aktaran Prof. Dr. Nihat G. Kınıkoğlu'na yüce Tanrı'dan rahmetler diliyorum.

Tezimin Elektron Mikroskop ağırlıklı çalışmalarında özveri ve fedakarlıkla katkı sağlayan, rehber olan ve çalışmalara bilfiil iştirak eden Prof. Dr. Servet Turan'a ve uygulamaların yapıldığı Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü Elektron Mikroskopu Laboratuvarı'nda Uzm. Sinem Başkurt'a, Seramik Y. Müh. Pervin Dağ Taşdelen'e ve Malzeme Y. Müh. Eda Küçüköğlü'na teşekkürlerimi sunarım.

Alüminit yayınımla kaplama teknolojisinin bu tez çalışmasında kullanılmasına müsaade eden T.C. Genelkurmay Başkanlığı'na, tezde kullanılan deney plaketteerinin hazırlanması, kaplanması ve korozyon laboratuvar çalışmalarının yapılmasında destek sağlayan 1. HİBM Komutanlığı'na ve Dr. Seyid Fehmi Diltemiz ile Y. Müh. Serkan Kaptan'a ve tesis çalışanlarına teşekkür ederim.

Entekno Şti. İşletme Müdürü Dr. Oktay Uysal'a tez doküman bilgilerinin literatür bilgilerine dönüşüm ve örneklenmesindeki gayret ve katkıları nedeniyle, Y. Müh. Ziya Özkan'a tez süresince hazırladığım "Doktora Tez Geliştirme Rapor"larının ve "Doktora Tez Taslağı"na dönüştürülmesinde, uzmanlık alan ders ödevleri ve takdimlerindeki tez şablonuna uyumunda, karakterizasyon verilerinin literatür verilerine uyumunun sağlanmasında, aile fertlerinden, oğlum Metalürji Y. Müh. Birant Aydınmakina'ya, eşim Güler Sevinç Aydınmakina'ya ve diğer aile fertlerine göstermiş oldukları sonsuz sabır ve destek için yürekten teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xx</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. SÜPERALAŞIMLAR</b> .....	<b>4</b>
2.1 Süperalaşım lar.....	4
2.2 Süperalaşım Uygulamaları.....	7
2.3 Gaz Türbin Uygulamaları .....	8
2.4 Süperalaşım ların Kaplama İhtiyacı .....	10
<b>3. YAYINIM KAPLAMASI</b> .....	<b>13</b>
3.1 Paket Sementasyon Yayınım Kaplama .....	14
3.1.1 Paket yayınım kaplama prensipleri - alüminyumlama.....	15
3.1.2 Alüminyum ve diğer elementlerin eşzamanlı çökeltmesi (Codeposition)	21
3.2 Süperalaşım larında Yayınım Kaplamalarının Özellikleri.....	23
3.2.1 Kaplama oluşum mekanizmaları.....	23

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.2.2 Kaplama koruması ve özellik kaybı .....	28
3.3 Paket Sementasyon Üretim Teknolojisi .....	30
3.4 Temassız Kaplama Süreci .....	31
3.5 Tamir.....	32
3.6 Pratikte Uygulamalar.....	32
3.6.1 Uçak gaz türbin kanatçıkları.....	32
3.6.2 Karada ve denizde konuşlu gaz türbin kanatçıkları.....	33
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR... ..</b>	<b>35</b>
4.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Laboratuar Techizatı .....	35
4.1.1 İncelenen malzemeler .....	35
4.1.2 Kaplama işlemlerinde deneylerin yapıldığı cihazlar .....	37
4.1.3 Kaplama işlemi sarf malzemeleri .....	39
4.2 Kaplama İşleminin Yapılışı .....	40
4.2.1 Kaplama öncesi kanatçıkların kontrolü .....	40
4.2.2 Isıl renk değişimi (Heat-Tint ) uygulaması .....	40
4.2.3 Paket yayının kaplama hazırlıkları ve kaplamanın yapılması .....	41
4.3 Karakterizasyon İşlemleri .....	42
4.4 Kaplama Etkinliği İncelemesi – Oksidasyon Testi .....	45
<b>5. KARAKTERİZASYON SONUÇLARI .....</b>	<b>47</b>
5.1 Kaplama Kalınlığının Belirlenmesi .....	47
5.2 Oksitlenme Test Sonuçları .....	49

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.3 Karakterizasyon Sonuçları .....	50
5.3.1 Kaplama öncesi J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığı karakterizasyon sonuçları .....	51
5.3.1.1 “Ana Malzeme Bölgesi” analizi değerlendirmesi .....	53
5.3.1.2 “Kaplama Komşu Ana Malzeme Bölgesi” analizi değerlendirmesi .....	53
5.3.1.3 “İç Bölge” analizi değerlendirmesi .....	54
5.3.1.4 “Dış Bölge” analizi değerlendirmesi .....	55
5.3.1.5 Kaplama öncesi kalınlık ölçümü .....	57
5.3.1.6 J79 kanatçığı kaplama öncesi haritalama analizi sonuçları.....	58
5.3.1.7 Kaplama öncesi J79 ikinci kademe sabit kanatçıklarında haritalama analizi ve elementlerin çizgi analizi.....	59
5.3.2 Yeniden yapılan kaplama sonrası J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığı karakterizasyon sonuçları .....	62
5.3.2.1 “Ana Malzeme Bölgesi” analizlerinin değerlendirmesi .....	64
5.3.2.2 Ana malzemede kaplamaya komşu “Yayınım Destek Bölgesi (X Bölgesi)” analizlerinin değerlendirmesi .....	67
5.3.2.3 “İç Bölge (Düzgün Bant İçi)” analizlerinin değerlendirmesi... ..	69
5.3.2.4 İç bölge (Düzgün Bant Üstü) “İlk Yüzey” analizlerinin değerlendirmesi .....	72
5.3.2.5 Yeniden yapılan kaplama sonrası kalınlık ölçümü .....	73
5.3.2.6 J79 kanatçığı yeniden yapılan kaplama sonrası haritalama analizlerinin incelemesi .....	74

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

5.3.2.7	Yeniden yapılan kaplama sonrası J79 ikinci kademe sabit kanatçık üzerinde “Haritalama Analizi” ile “Çizgi Analizi” nin incelenmesi.....	77
5.3.3	J79 motoru “Türbin İkinci Kademe Sabit Kanatçıkları”nın yeniden paket sementasyon alüminit yayılım kaplama öncesi ve sonrası analiz sonuçlarının değerlendirmesi .....	79
5.3.4	J79 motoru türbin sabit kanatçığının yayılım kullanılmış kaplamada ve yeniden yapılan kaplama sonrası çizgi analizi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	79
5.4	J85 Motoru Türbin İkinci Kademe Hareketli Kanatçıklarının Karakterizasyon Sonuçları .....	81
5.4.1	Hareketli kanatçık “Kurtağzı Bölümü”nün incelenmesi .....	81
5.4.2	J85 motoru ikinci kademe hareketli kanatçık kullanılmış kaplama karakterizasyon sonuçları .....	83
5.4.2.1	“Kök Bölümü” nün kaplama öncesi incelenmesi.....	83
5.4.2.2	J85 kullanılmış kaplamada “Uç Bölümü”nün incelenmesi.....	85
5.4.2.3	J85 motoru kanatçığı kullanılmış kaplama kalınlık ölçümleri..	88
5.4.2.4	“J85 Türbin İkinci Kademe Hareketli Kanatçık” kullanılmış kaplamada haritalama analizi sonuçları .....	88
5.4.2.5	J85 kanatçığı üzerinde kaplama öncesi “Renkli Haritalama Analizi” ve “Çizgi Analizi” sonuçlarının incelenmesi .....	91
5.4.3	J85 motoru kanatçıkları yeniden yapılan kaplama sonrası karakterizasyon sonuçları .....	93
5.4.3.1	“Kök Bölümü” nün yeniden yapılan kaplama sonrası incelenmesi .....	94

**İÇİNDEKİLER (devam)****Sayfa**

5.4.3.2	J85 motoru kaplama sonrası “Uç Bölümü”nün incelenmesi...	96
5.4.3.3	J85 motoru kanatçığı kaplama sonrası kalınlık ölçümleri.....	98
5.4.3.4	Yeniden kaplama sonrası J85 türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının “Renkli Haritalama Analizi” ve “Çizgi Analizi” sonuçları.....	99
5.4.4	J85 motoru kanatçıklarının yayınım kaplama öncesi ve sonrası ölçüm sonuçları .....	101
<b>6.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>103</b>
	<b>KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>109</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>115</b>
	<b>EK AÇIKLAMALAR – A</b>	
	<b>EK AÇIKLAMALAR – B</b>	
	<b>EK AÇIKLAMALAR – C</b>	
	<b>EK AÇIKLAMALAR – D</b>	



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bazı süperalaşımın sıcaklık kapasitesi ve tarihi gelişimleri (Reed, 2006)...	5
2.2 Sıcaklığa bağlı olarak süperalaşımın sürünme kopma dayanımı (Donachie ve Donachie, 2002).....	6
2.3 F110-GE-129 jet motoru kesiti.....	7
2.4 Bir uçakta bulunan gaz türbini motorun kullanım koşullarında karşılaştığı türbin giriş sıcaklığı değişimi örneği (Reed 2006).....	8
2.5 Rolls Royce Trent 800 jet motorunun farklı kademelerindeki farklı sıcaklık ve basınç değişimleri (Cervenka 2000).....	9
2.6 Kaplamaya ihtiyaç duyan gaz türbini kanatçık örnekleri (Boone, 1980). ....	10
2.7 Alçak irtifada deniz seviyesinde 2500 saat çalışan kaplamasız ve NiAl kaplanmış türbin kanatçıkları (Eskner, 2004). ....	11
3.1 Paket sementasyonun şekilsel gösterimi (Yu 2004) .....	16
3.2 Alüminyumlamada belli başlı gaz partiküllerinin akışının şematik gösterimi (Levine ve Caves 1974, Gupta ve Seigle 1980) .....	17
3.3 Saf alüminyum, krom ve silisyum ihtiva eden NaCl ile aktive edilmiş paket içerisindeki gazların kısmi basınçlarda ve H <sub>2</sub> ortamındaki denge durumu (Walsh 1973, Kung ve Rapp 1989) .....	22
3.4 Al-Ni faz diyagramı (Vol.3 ASM Handbook 1992,s.2.49) .....	23
3.5 Nikel süperalaşımını üzerinde alüminyum kaplamalarının mikroyapısı (Goward ve Boone 1971). ....	24
3.6 NiAl içindeki alüminyumunun bir fonksiyonu olarak nikel ve alüminyumun “Yayınım Katsayısı Oranı” (Shankar ve Seigle 1978) .....	25
3.7 Saf nikel içerisinde alüminit yayınım oluşumu (Bose, 2007) .....	26

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.8 Nikel esaslı süperalaşımın üzerine krom yayılımı kaplaması (Gauje ve Morbioli, 1983) .....	27
3.9 Tipik paket sementasyon süreci için akış diyagramı (Goward ve Cannon, 1988).....	30
3.10 Temassız alüminyumlama işleminde kaplama odacığının şematik görünümü (Gauje ve Morbioli, 1983) .....	31
3.11 Ticari uçak motorlarında (Rolls Royce Motorları) yıllara göre performans karakterlerinin değişimi (Reed 2006) .....	34
4.1 J79 motoru türbin kademesi .....	35
4.2 J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçıkları.....	36
4.3 J85 motoru türbin kademesi.....	36
4.4 J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçıkları.....	37
4.5 Türbin kanatçıkları hücum ve firar kenarları. ....	37
4.6 Hidrojen fırını ve kontrol paneli. ....	38
4.7 CODEP paket tozlarını hazırlama/karıştırma cihazı, mumlama makinesi, amonyum florür kurutma fırını .....	38
4.8 Kutu dolum - maskeleme ve boşaltım istasyonu. ....	38
4.9 Kanatçıkların ve test numunelerinin kaplama kutusuna yerleştirilmesi.....	41
4.10 Struers marka Secotom 10 model hassas kesme cihazı .....	42
4.11 Buehler marka Simplimet 2000 model sıcak kalıplama cihazı. ....	43
4.12 Buehler marka Phoenix 4000 model otomatik zımparalama-parlatma cihazı..	43
4.13 Epoksi reçine kalıplama yapılan test numuneleri .....	44
4.14 Nikon marka Optiphot 100 model optik mikroskop. ....	44

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.15 “Zeiss SUPRA 50VP” model sabit taramalı elektron mikroskop ve beraber çalışan “EBSD-Oxford Instruments INCA Energy” model EDX-WDX detektörü. ....	45
4.16 Oksidasyon testinin yapıldığı fırın. ....	46
5.1 J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçığı kaplama optik mikroskop görüntüleri .....	47
5.2 J85 türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının kullanılmış kaplama görüntüleri.....	48
5.3 J85 türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının yeniden yapılan kaplama sonrası görüntüleri. ....	48
5.4 J79 türbin sabit kanatçık hücum kenarı kaplamada batma ve oksit cebi görüntüsü oksitlenme hasarı (100X) .....	49
5.5 Bir Ni esaslı süperalaşımında dış yayılım ile elde edilen NiAl tip kaplama yapısının şematik resmi (Düşük Aktivasyon Süreci)(Lang 1983).....	50
5.6 Test numuneleri inceleme bölgeleri .....	50
5.7 Test numuneleri inceleme bölgelerindeki mikroyapılar.....	51
5.8 Kaplama öncesi J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçık test numunesi.....	52
5.9 Yeniden kaplama öncesi J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçık test numunesi üzerinden alınan görüntü bölgeleri.....	52
5.10 J79 sabit kanatçığı kaplama öncesi ana malzeme bölge görüntüsü.....	53
5.11 Kaplamaya komşu, “Ana Malzeme Bölgesi (X-Bölgesi)” görüntüsü .....	54
5.12 Kullanılmış kaplamada “İç Bölge”den alınan görüntüler.....	54
5.13 J79 sabit kanatçık kaplama öncesi “Dış Bölge” görüntüsü .....	55

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.14 J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçığı kaplama öncesi numunesinin ana malzemedden kaplama yüzeyine doğru farklı kaplama bölgelerinden elde edilen element ağırlık oranları grafiği .....	56
5.15 J79 kanatçık kaplama öncesinin kalınlık ölçümleri.....	57
5.16 J79 kanatçık kaplama öncesi yayılım kaplama haritalama analizi sonuçları...59	59
5.17 J79 türbin ikinci kademe kullanılmış kaplamalı sabit kanatçıkta elementlerin çizgi analizi grafiği .....	60
5.18 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığın kullanılmış kaplamadaki elementlerin çizgi analizi sonucu grafikleri.....	60
5.19 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığın kaplama öncesi numunesinin haritalama analizi grafikleri.....	61
5.20 Elektron mikroskobunda görüntüsü alınan test numune bölgesinin görünümü	62
5.21 Yeniden yapılan kaplama sonrası J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçık test numunesi üzerinden alınan EDX analiz bölgeleri .....	63
5.22 Ana malzemenin görüntüleri .....	65
5.23 Ana malzeme bölgesi görüntüleri .....	66
5.24 Ana malzeme bölgesi elementleri ve ağırlık oranları grafiği .....	66
5.25 Ana malzeme nokta alan analizi görüntüleri .....	67
5.26 X bölgesindeki elementler ağırlık oranları grafiği .....	68
5.27 Kaplama öncesi ve sonrası X-Bölgesi element ağırlık oranları grafiği .....	68
5.28 İç bölgede açık renkli parçacıkların görüntüsü .....	69
5.29 İç bölge açık renk görünümlü yapı element ağırlık oranları grafiği.....	70

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Şekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.30 İç bölgede gri renkli yapıların görüntüsü .....	70
5.31 Düzgün bant iç bölge gri yapı elementleri ve ağırlık oranları grafiği.....	72
5.32 İç bölge ilk yüzey düzgün bant üstü görüntüleri .....	73
5.33 İç bölge düzgün bant üstü- ilk yüzey element ağırlık oranları grafiği .....	73
5.34 Yayınım kaplama kalınlık ölçümleri.....	74
5.35 J79 yayınım kaplama sonrası (320x260µm'lik görüntü alanı) haritalama analizi.....	75
5.36 J79 yeniden yapılan yayınım kaplama sonrası kanatçık haritalama analizi .....	76
5.37 J79 yeniden yapılan kaplama sonrası (67x44µm'lik görüntü alanı) haritalama analizi .....	76
5.38 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığın yeniden yapılan kaplama sonrası elde edilen çizgi analizi sonucu.....	77
5.39 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığın yeniden yapılan kaplama sonrası elde edilen çizgi analizi sonucu.....	78
5.40 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığın yeniden yapılan kaplama sonrası Elde edilen haritalama analizi sonucu.....	78
5.41 J85 motorunda kanatçığı türbin rotoruna bağlayan kurtağzı kesimi görüntüsü	82
5.42 Kurtağzı bölgesi görüntüsü ve element ağırlık oranları.....	82
5.43 J85 hareketli ve J79 hareketsiz kanatçık element ağırlık oranları grafiği.....	82
5.44 J85 motorunda ikinci kademe hareketli kanatçığın “Kök Bölümü” görüntüsü.....	84

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.45 J85 motoru ikinci kademe hareketli kanatçığın “Kök Bölümü”nde kullanılmış kaplamadaki görüntüleri.....	84
5.46 “Kök Bölümü” kullanılmış kaplama ölçülmüş element ağırlık oranları grafiği.....	85
5.47 J85 motorunda ikinci kademe hareketli kanatçık “Uç Bölümü” görüntüsü.....	86
5.48 J85 motoru kanatçık “Uç Bölümü”nde kullanılmış kaplamada görüntülenen bölgelerin EDX analizleri.....	86
5.49 “Uç Bölümü” kullanılmış kaplamada ölçülmüş element ağırlık yüzde oranları grafiği.....	87
5.50 J85 kanatçık kök bölgesi kullanılmış kaplama kalınlık ölçümleri .....	88
5.51 J85 kaplama öncesi kanatçık “Kök Bölgesi” haritalama analizi.....	89
5.52 J85 kaplama öncesi kanatçık “Uç Bölgesi” haritalama analizi.....	90
5.53 J85 Türbin İkinci Kademe Hareketli Kanatçığın Kaplama Öncesi “Çizgi Analizi” sonuçları.....	91
5.54 J85 kanatçığının kaplama öncesi kesitte görüntülenen her bir elementin dağılım grafikleri.....	92
5.55 J85 Türbin ikinci kademe hareketli kanatçığı kaplama öncesi numunesinin haritalama analizi.....	93
5.56 Kanatçık “Kök Bölgesi” görüntüleri.....	94
5.57 J85 yeniden yapılan kaplama sonrası kanatçık “Kök Bölgesi” uzunlamasına kesit EDX analizi.....	95

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.58 “Kök Bölümü” uzunlamasına kesit kaplama sonrası ölçülmüş element ağırlık yüzde oranları grafiği.....	96
5.59 “Uç Bölümü” enlemesine kesit yeniden kaplama sonrası analiz yapılan bölgeler .....	97
5.60 “Uç Bölümü” enlemesine kesit yeniden kaplama sonrası ölçülmüş element ağırlık yüzde oranları grafiği .....	98
5.61 J85 kaplama sonrası kalınlık ölçümleri.....	98
5.62 J85 kanatçığının kaplama sonrası numunesinin çizgi analizi.....	99
5.63 J85 kanatçığında kaplama sonrası kesitte görüntülenen her bir elementin dağılım grafikleri .....	100
5.64 J85 kanatçığında kaplama sonrası görüntülenen her bir elementin haritalama analizleri.....	101
6.1 Yeniden kaplama yapılan J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığı görüntüsü	102

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 1093°C sıcaklıkta çeşitli alüminyumlama paketlerinde başlıca yayınım gazlarının $\Delta P_i$ değerleri (Levine ve Caves1974).....	19
4.1 Kaplama işleminde kullanılan sarf malzemeler.....	39
5.1 Yeniden kaplama öncesi ölçülmüş element ağırlık oranı değerleri.....	52
5.2 Numune malzemede farklı bölgelerde ölçülmüş element ağırlık oranı değerleri..	63
5.3 RENE serisi süperalaşım ile Kurtağzı bölgesi element ağırlık oranlarının karşılaştırması.....	83
5.4 “Kök Bölümü” kullanılmış kaplama ölçülmüş element ağırlık oranı değerleri...	85
5.5 “Uç Bölümü” kullanılmış kaplamada ölçülmüş element ağırlık oranı değerleri...	87
5.6 “Kök Bölümü” uzunlamasına kesit yeniden kaplama sonrası ölçülmüş element ağırlık oranı değerleri .....	94
5.7 Yeniden yapılan kaplama sonrası kanatçık “Uç Bölümü” enlemesine kesit ölçülmüş element ağırlık oranı değerleri.....	96



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
CODEP	Paket Semantasyon Yöntemi ile Alüminayt Kaplama
CVD	Kimyasal Buhar Çöktürmesi
d	Etkin yayılım aralığı (cm)
$D_i$	Yayılım Katsayısı
EDX	Energy Dispersive X-Ray
G	Gibbs serbest enerji sabiti (kJ/mol)
HİBM	Hava İkmal Bakım Merkezi
HPC	Yüksek Basınç Kompresörü
HPT	Yüksek Basınç Türbini
HRC	Rockwell Sertliği
IPT	Orta Basınç Türbini
$J_{Al}$	Alüminyum taşıma hızı ( $\text{mol}/\text{cm}^2$ )
$K_g$	Gaz katsayısı
LPC	Alçak Basınç Kompresörü
LPT	Alçak Basınç Türbini
M	Alüminyum gram-atomik ağırlığı
$N_i$	i seviyesindeki alüminyumdaki gram atomlarının sayısı
$P_i$	i içeriğindeki atm cinsinden kısmi basınç (atm)
$P_i$	Kısmi Basınç (atm)
R	ideal gaz sabiti ( $\text{cm}^3 \cdot \text{atm}/\text{mol} \cdot \text{deg}$ )
T	Sıcaklık (K)

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)****Simgeler Açıklama**

t	Zaman (s)
WDX	Wavelength Dispersive X-Rays
$W_g$	Ana malzemeye yayınan Alüminyum ağırlığı ( $gr/cm^2.s$ )
$\alpha_i$	Aktivite edicideki olası yoğunlaşma düzeltme faktörü
$\beta$	AlNi fazı
$\gamma$	AlNi <sub>3</sub> fazı
$\epsilon$	Porozite doğrulama katsayısı
$\rho$	Alüminyum konsantrasyonu ( $g/cm^3$ )

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Savunma sanayi ve havacılık alanında kullanılan gaz türbinli motorlarda, yüksek sıcaklıklarda ve yüksek dinamik yüklerde altında çalışan oksidasyon ve sıcak korozyona dayanımlı “ileri teknoloji malzemeleri” kullanılmaktadır. (Furrer, 1999)

Modern gaz türbinlerinde ömür botu maliyeti düşürmek ve kanatçıkların sorunsuz ve uzun ömürlü olmaları hususunda devamlı uğraş verilmektedir. Yapılan çalışmalarda termodinamik çevrim değerleri geliştirilirken yüksek sıcaklıkta gaz akışına maruz parçaların imalatında kullanılacak ileri malzemelerin sıcak korozyon, yüksek sıcaklık oksidasyonu ve termal yorulma gibi hasarlara karşı korunmaları ve malzemenin sürekliliğinin korunması esas alınmaktadır. Bu donanımına sahip tasarımlar “İleri Teknoloji Ürünü” olarak adlandırılmaktadır. Günümüz çalışmalarında performans artırıcı ürün geliştirmenin temelinde, malzeme üstünlüğü ile ürün geliştirme öncelik arz etmekte ve bu konudaki çalışmalar önem kazanmaktadır. (Williams, 1994)

Daha güvenilir hava araçlarının tasarımında 1960’ lı yıllarda süperalaşım malzeme seçiminde “alüminit yayını kaplamaları” ile sağlanan ısısal stabilite sayesinde yüksek sıcaklık ve gerilim şartlarında görev yapabilme üstünlükleri sayesinde tercih edilmektedir.

Dövme ve döküm süperalaşımlarda, demir ve kobalt alaşımların yanı sıra özellikle nikel esaslı alaşımlarda çok farklı malzemeler ortaya çıkmış ve bunlar farklı üretim yöntemleri geliştirilerek yaygın olarak kullanılmıştır. Farklı süperalaşımlar ile ilgili uygulamalarda alüminit yayını kaplama süreçlerinde farklı uygulamalar geliştirilmiştir.

Kobalt esaslı süperalaşımlar nikel esaslı malzemelerdeki alüminit yayını kaplamaların sahip olduğu intermetalik yapılanmanın sağladığı termal stabiliteye sahip olamadıkları için önceleri uzay araçlarında kullanılmış olmasına rağmen uzun süreli stabil çalışmayı gerektiren gaz türbinlerinde kullanımı yaygınlaşmamıştır.

Alüminit yayını ve benzeri kaplamalarla ilgili yüzün üzerinde patent devreye girmiştir. 1980' li yıllarda süperalaşımarda "Yönlendirilmiş Katılaşma" ve "Tek Kristal" malzemeler geliştirilmiştir. Yeni geliştirilen bu malzemeler daha yüksek sıcaklıklarda görev yaptıklarından gaz türbin performansında üstünlük sağlamışlardır. Isıya karşı dayanımlı olan bu malzemeler Termal Bariyer Kaplama (TBC)lar ile kaplanmışlardır. Tek Kristal ve Yönlendirilmiş Katılaşma yöntemiyle imalat çok pahalı olması nedeniyle günümüzde tasarlanan gaz türbinlerinde belirli parçalarda alüminit yayını kaplama uygulanmaktadır.

Yüksek sıcaklık altında zorlu yüksek sıcaklık şartlarında kullanılan gaz türbin sıcak kısım malzemeleri; metalin metale sürtmesi, çalışma ortamında yaratılan olumsuz birikimler, yüksek sıcaklık, mekanik aşınmalar, yorulma, oksitlenme, sıcak korozyon, termal şok ve 650°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süre dayanım üstünlüğünü (süneklik) koruyamaması gibi malzemede kullanım ömrünü kısaltıcı unsurların gaz türbin performansına etkisi esas alınarak devamlı olarak izlenmek durumundadır. Bu aksaklıklardan her biri gaz türbin kullanımında ömür boyu maliyeti artıran bir olumsuzluk olarak değerlendirilmektedir. Malzemelerin ve dolayısıyla parçaların performansını doğrudan etkileyen sorunların önlenmesinde termal stabilitenin sağlanması için malzemelerde en uygun süreç belirlenerek alüminit yayını kaplaması kilit rol oynamaktadır.

Israrlı çalışmalar sonucu elde edilen tasarım ve ileri teknoloji malzemelerde sağlanan teknolojik üstünlük ile gaz türbin performanslarında umulananın üzerinde gelişmeler elde edilmiştir. Gaz türbinlerinde süperalaşım kullanımlarında ağırlıkça %60' ın üzerinde kullanımı yaygınlaşmıştır. İleri malzemelerden süperalaşım malzemeler ve uygulanan kaplamalarla ilgili yurt dışında sayısız teorik araştırma ve akademik tez yayınlanmış olmasının karşın, gaz türbin tasarlayan şirketlerin araştırma sonuçlarını ticari gizlilik statüsünde değerlendirip yayınlanmamış olmaları ve ileri teknoloji malzemelerin üretildiği tesislerde sağladıkları sıkı gizlilik sebebiyle teknolojik değer taşıyan bilgiler kamu ve akademiye yeterince açıklanamamıştır. Bu da yurt içinde yeterince akademik çalışma yapılmasını engellemiştir.

Ülkemizde 1975' ten sonra uygulanan yurtdışı orijinli teknolojik kısıtlamalardan en çok etkilenen gaz türbinleri olmuştur. Kullanılmakta olan gaz türbinlerinin periyodik bakımları, kullanımda arızalananların onarımı, bunların uzun dönem güvenilir şartlarda çalışmalarını garanti edecek fabrika seviyesi bakımlarını ileri teknoloji içeren süreçler geliştirerek yapmak kaçınılmaz olmuştur. Gaz türbinlerinin dış kaynaklara muhtaç olmadan sorunsuz olarak kullanabilmek amacıyla ihtiyaç duyulan kritik parçaların ülke içindeki tüm kurum ve kuruluşların sahip olduğu ileri teknoloji imalat süreçlerinden istifade ederek üretilmesi kaçınılmaz olmuştur. Bu kapsamda Eskişehir Hava İkmal Bakım Merkezi' nde jet motor parçalarında alüminit yayılım kaplama sürecini uygulayacak "Paket Sementasyon Yöntemi ile Alüminit Yayılım Kaplama Tesisi" motor imalatçı firma ile sağlanan ticari anlaşma sonucu uygulanır olmuştur.

Bu tez çalışmasında tez konusunun belirlenmesinde Eskişehir Hava İkmal Bakım Merkezindeki "Paket Sementasyon Yöntemi ile Alüminit Yayılım Kaplama Tesisi" ndeki teknolojik süreçten istifadeye olanak sağlayacak "Jet Motoru Türbin Kanatçıklarının Alüminit Kaplamalarının Element Hareketlerinin İncelenmesi" konusu seçilmiştir.

Tez kitapçığında giriş bölümünü takip eden ikinci bölümde "Süperalaşım" ların tanımının yapılması, gaz türbinlerinde yüksek sıcaklık şartlarında kullanılırken çevresel etkilerden oksidasyon ve sıcaklık korozyonu karşısında termal stabilitenin sağlanmasının önemi ve süperalaşımlara uygulanan kaplamalar hakkında bilgilendirme yapılması planlanmıştır.

Tezin üçüncü bölümü "Yayılım Kaplaması" olarak belirlenmiştir. Bu bölümde gaz türbinlerinde, uçuş güvenliğini, bakım etkinliğini artıracak kullanımında ömür boyu maliyeti düşüren ve yüksek sıcaklık altında çalışan elemanlarda termal stabiliteyi sağlayacak "Paket Sementasyon Yöntemi ile Alüminit Yayılım Kaplama" sının amacı, özellikleri ve teorisinin açıklanması ele alınmıştır.

Tezin dördüncü bölümü "Deneysel Çalışmalar", beşinci bölümü "Deneysel Sonuçlar" , altıncı bölümü ise "Sonuç ve Öneriler" olacaktır.

## BÖLÜM 2

### SÜPERALAŞIMLAR

#### 2.1. Süperalaşımalar

Süperalaşım terimi ilk kez, İkinci Dünya Savaşı sonrası yüksek sıcaklıkta-yüksek performans istenen türbinli uçak motorları için geliştirilmiş alaşım grubunu tanımlamak amacıyla kullanılmıştır. Günümüzde en çok kullanıldıkları alanlar turbojet, turbofan, turboprop motorlar ve roket motorları gibi hava ve uzay araçları, gaz türbinle çalışan kara ve deniz araçları ile güç üretim türbinleridir.

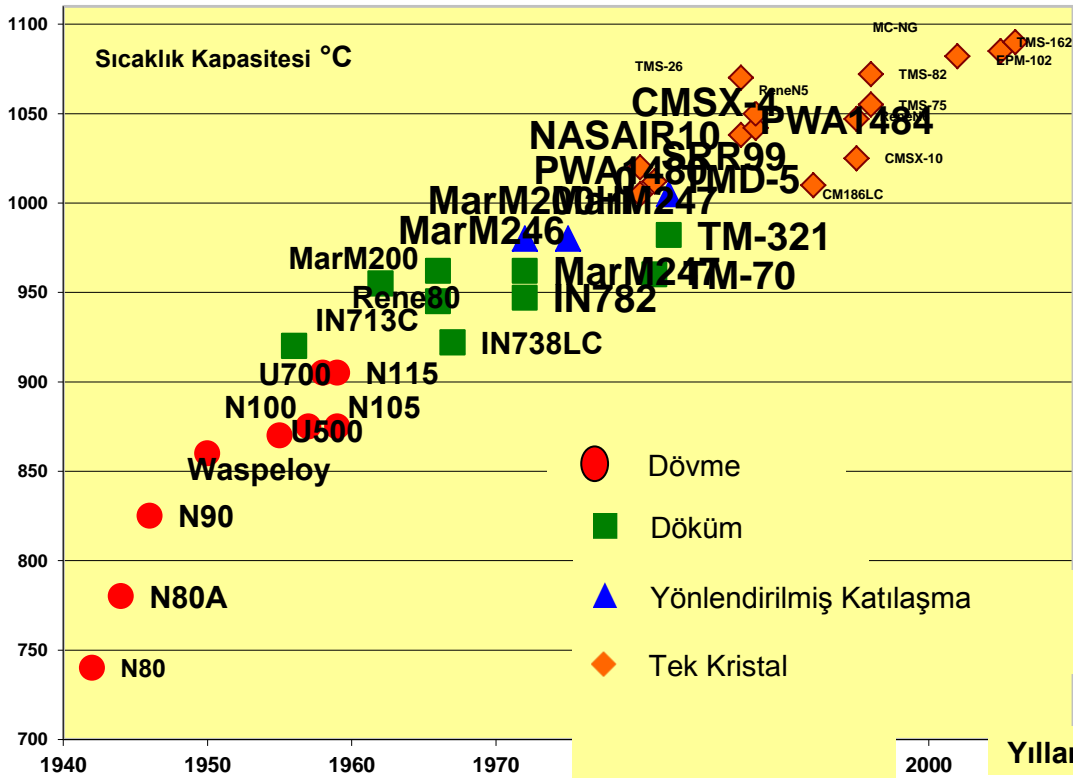
Süperalaşımalar, “Yüzey kararlılığı isteyen ve zorlu mekanik gerilmelerin olduğu yerlerde servis sıcaklığını yükseltmek için geliştirilmiş malzemelerdir. Nikel, kobalt, titanyum, niobiyum ve/veya demir elementlerinin en az birinin zenginliğine sahip, yüksek sıcaklıkta, yüksek gerilim altında ve zorlu çevresel şartlarda malzeme yüzeyinde, özelliklerde ve yapıdaki kararlılığı devam ettiren alaşımlardır” olarak tarif edilmiştir (Tein ve Caulfield, 1989). 35 HRC üzerinde sertliğe sahip malzemelerdir. En önemli özellikleri; 650°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süre dayanımlı (sürünme dayanımı) olmaları ile sıcak korozyon ve aşınma dirençlerinin iyi olmasıdır (Joseph, 1963).

Süperalaşımalar;

- Krom ve nikel içeren veya karmaşık demir-nikel-krom-kobalt içeren demir esaslı alaşımlar,
  - Karbür kuvvetlendirmeli kobalt esaslı alaşımlar,
  - Katı çökeltme sertleştirmeli nikel esaslı alaşımlar,
- olmak üzere üç grupta toplanır. Genellikle dövme ve döküm formlarında kullanılmaktadır (Bradley, 1988).

Genel olarak demir esaslı demir-nikel-krom-kobalt alaşımları; nikel esaslı katı çökeltme kuvvetlendirmeli alaşımlar ve kobalt bazlı alaşımlar ile karşılaştırıldığında 650°C üzerinde daha düşük dayanım değerleri vermektedir. Ergime noktalarının yüksek olması nedeniyle kobalt alaşımları, 1100°C'nin üzerinde nikel alaşımlarından daha dayanımlıdır. Karmaşık karbür içeren ve yüzey merkezli kübik olarak karakterize edilmiş dökme kobalt alaşımları gaz türbin motorlarındaki kanatçıklar için uygulamada başarılı bir geçmişe sahiptir (Bradley, 1988).

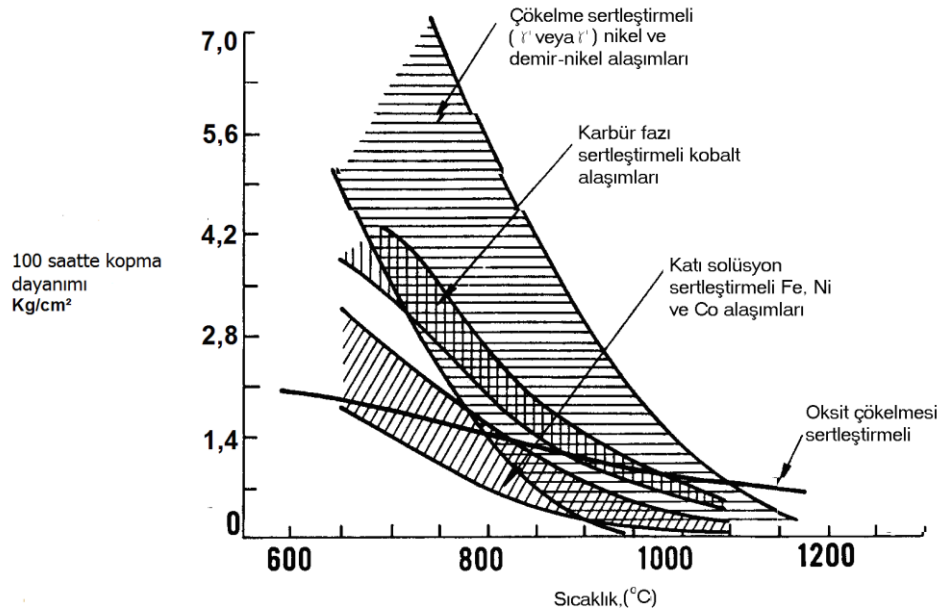
Süperalaşımların sıcaklık kapasitesinin tarihi gelişimi Şekil 2.1'de verilmiştir (Reed, 2006).



Şekil 2.1. Bazı süperalaşımların sıcaklık kapasitesi ve tarihi gelişimleri (Reed, 2006)

Katı çökeltme sertleştirmeli alaşımlar, özellikle bazı gaz türbini uygulamalarında kullanılmak için tasarlanmıştır. Süperalaşımlarda sıcaklığa bağlı olarak sürünme kopma dayanımı ve sağladığı üstünlükler Şekil 2.2'de görülmektedir (Donachie ve Donachie, 2002).

1980 yılına kadar yapılan uygulamalarda ikincil çökeltme fazı ile kuvvetlendirilmiş nikel esaslı süperalaşım bilinen süperalaşımın arasında en yaygın olarak kullanılanı olmuştur.



Şekil 2.2. Sıcaklığa bağlı olarak süperalaşımın sürünme kopma dayanımı (Donachie ve Donachie, 2002)

Nikel esaslı süperalaşımlarda Cr, Co, Mo, W, Ti gibi katkı elementleri bulunmaktadır. Bu alaşımlar; Inconel, Rene, Waspalloy, Hastelloy, Udimet v.b. ticari isimlerle tanımlanırlar. Kobalt esaslı süperalaşımlarda katkı olarak Cr, W gibi elementler bulunmakta ve bunlar; Stellite, Airesist, Haynes gibi ticari isimlerle adlandırılmaktadır. Demir esaslı süperalaşımlarda Cr, Ni, Mo elementleri katkı elementi olarak yer almakta olup A-286 ve Incoloy gibi ticari isimlerle adlandırılırlar (Met. Hand. Tenth Edition, 1990 p.1013). 2000'li yıllarda kullanılan süperalaşımın tipleri ve yapı bileşenleri Ek Açıklama-A'da verilmiştir (Reed, 2006).

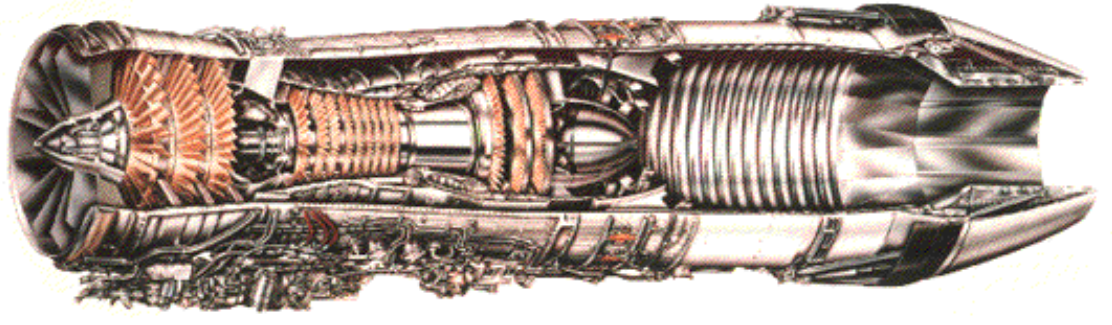
Süperalaşımın yüksek sıcaklıklardaki öncü uygulamaları; uçaklar, kimyasal fabrika teçhizatı ve petrokimya teçhizatı alanında olmuştur. Örneğin, 1950'li yıllarda turbojet motorlu bir uçağın toplam ağırlığının yalnızca yaklaşık %10'u süperalaşımlardan yapılırken bu oran 1985'te %50'ye ve 1993'te de %60'a çıkmıştır.



## 2.2 Süperalaşım Uygulamaları

Günümüzde, süperalaşımların yaygın kullanım alanları;

- Uçak ve endüstriyel gaz türbinleri:  
Diskler, cıvatalar, şaftlar, kapaklar, türbin hareketli ve sabit kanatçıkları, yanma odaları, ikincil art yanma hücresi (after burner), egzoz sistemleri, motor hava fren sistemleri, v.b. (Şekil 2.3.).



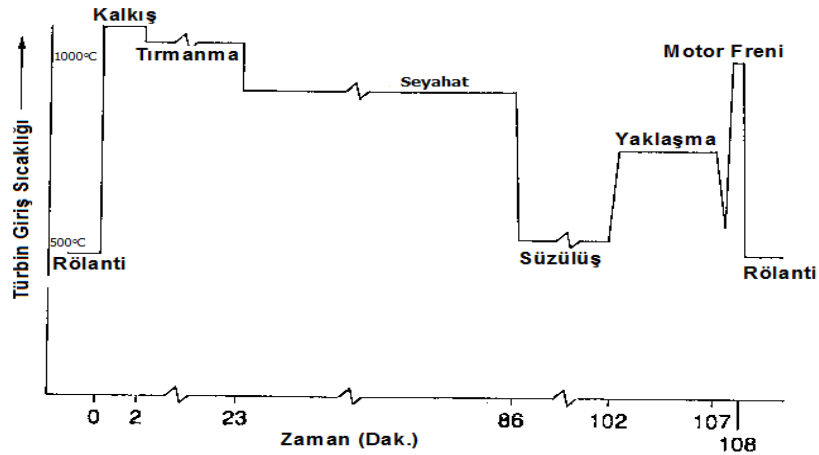
Şekil 2.3. F110-GE-129 jet motoru kesiti

- Buhar ve doğalgaz ile çalışan türbinli güç tesisatları:  
Cıvatalar, kanatçıklar, baca gazı yeniden ısıtıcıları.
- Metal işleme:  
Sıcak iş takımları ve kalıpları, dökme kalıpları.
- Uzay araçları:  
Aerodinamik koruyucu kalkanlar, roket motor parçaları.
- Isıl işlem ekipmanları:  
Tablalar, aparatlar, taşıyıcı bantlar, sepetler, fanlar, egzoz sistemleri.
- Nükleer güç sistemleri:  
Vana gövdeleri, yaylar, koruyucu kapaklar, kontrol çubuğu sürücü mekanizmaları.
- Kimya ve petrokimya endüstrileri:  
Cıvatalar, vanalar, reaksiyon kapları, borular, pompalar.
- Pistonlu motorlar:  
Egzoz supapları, supap yatakları

- Tıbbi uygulamalar:  
Dişçilik alanları, yapay uzuvlar.
- Çevre kirlenme kontrol cihazları:  
Gaz temizleyici ekipmanlar.
- Metal işleme tesisleri:  
Fırınlar, art yakıcılar, egzoz pervanesi.
- Kömür gazlaştırma ve sıvılaştırma sistemleri:  
Isı dönüştürücüler, yeniden ısıtıcılar, borular. (ASM Met. Handbook 1990).

### 2.3 Gaz Türbin Uygulamaları

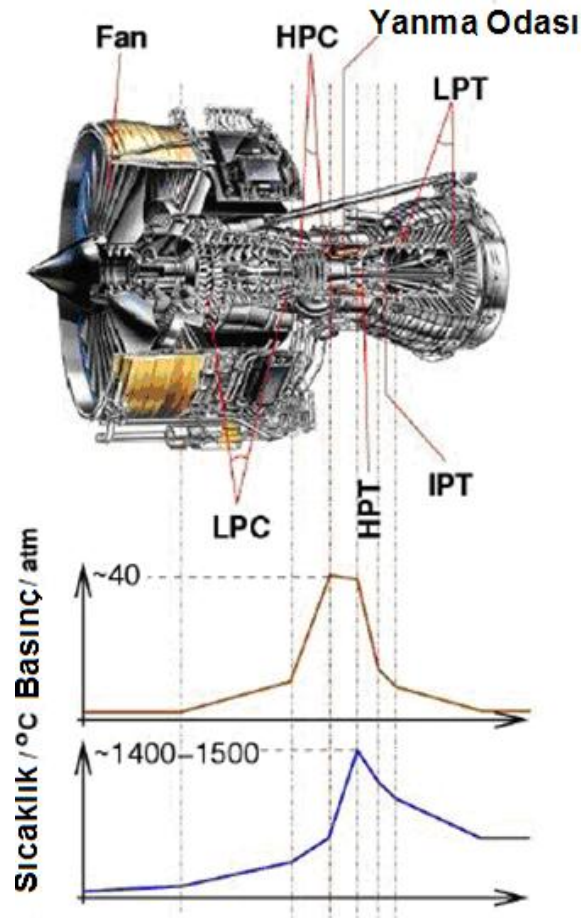
Bir gaz türbinindeki parçalar; yüksek sıcaklık, korozyon yaratan gazlar, titreşim ve merkezkaç kuvvetlerinin oluşturduğu yüksek mekanik yükler sebebiyle olumsuz koşullarda görev yaparlar. Ayrıca, uçaklarda kullanılan türbin motorları, yerde kullanılanların aksine çok daha zor servis şartlarında çalışmaktadır. Örneğin, bir motor; uçağın her kalkış ve inişinde ivmelenmekte, yüksek sıcaklığa çıkmakta, yavaşlamakta, durmakta, hangarda tekrar soğumaktadır. Söz konusu çevrim uçağın her yolculuğunda yinelenmektedir (Şekil 2.4.). Bu durum motor parçalarında düşük çevrimli yorulmalara da sebep olmaktadır.



Şekil 2.4. Bir uçakta bulunan gaz türbin motorunun kullanım koşullarında karşılaştığı türbin giriş sıcaklığı değişimi örneği (Reed 2006)

Motorlarda yanma odası ve türbin kademeleri, maruz kaldıkları yüksek sıcaklık nedeni ile “Sıcak Bölge” olarak adlandırılır. Özellikle yanma odasındaki parçaların korozyona ve 1100°C'ye kadar çıkan servis şartlarına dayanıklı olması gereklidir. Bir uçak motorunda parçaların maruz kaldığı sıcaklık ve basınç değişimi Şekil 2.5'de verilmiştir. Burada motorun ana bölümleri;

- Alçak Basınç Kompresörü (Low Pressure Compressor - LPC),
- Yüksek Basınç Kompresörü (High Pressure Compressor - HPC),
- Yüksek Basınç Türbini (High Pressure Turbine - HPT),
- Orta Basınç Türbini (Intermediate Pressure Turbine - IPT),
- Alçak Basınç Türbini (Low Pressure Turbine (LPT) olarak tanımlanır.



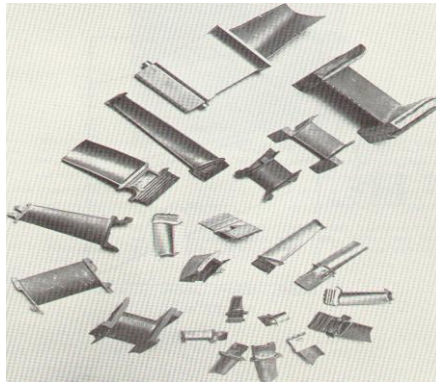
Şekil 2.5. Rolls Royce Trent 800 jet motorunun farklı kademelerindeki farklı sıcaklık ve basınç değişimleri (Cervenka, 2000)

Tüm motor parçalarının güvenli koşullarda kullanım için tasarım ve üretiminde bu değerler göz önüne alınmakta ve pratikte ancak süperalaşımlarla sağlanabilmektedir. Motor parçalarının yapısal kararlılık ömürleri; fiziksel özelliklerini ve mikro yapılarını korumaları esas alınarak, ilgili havacılık otoritelerince belirlenmektedir.

Deniz araçları üzerinde de hava araçlarında geliştirilen gaz türbin sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu araçlarda kullanılan süperalaşımların yüzeyleri, deniz ortamında bulunan tuz zerreciklerine maruz kaldığından farklı koruyucu kaplamanın yapılmasına gerek duyulmuştur. Deniz araçlarında kullanılan türbin kanatçıklarında da, hava araçlarında yaygın kullanılan alüminit yayımlı kaplamaların kullanımı için yeni arayışlar ve farklı yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu metodla, türbin kanatçıklarına alüminit yayımlı kaplama öncesi çok ince platin kaplanarak yayımlı kaplamasında güvenilirlik ve kararlılık sağlanmıştır (Rudolph 1987).

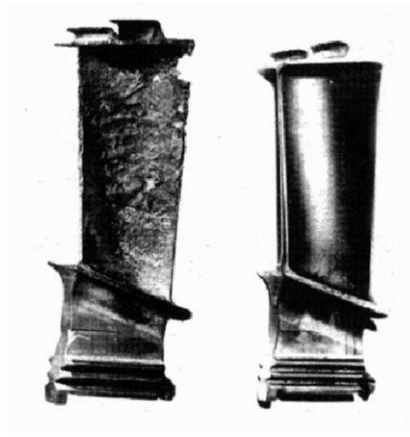
#### 2.4 Süperalaşımların Kaplama İhtiyacı

Süperalaşımlarda kaplamanın amacı; malzemenin sahip olduğu üstünlüklerin kullanım sürecinde dengeli muhafazası ve ana malzemenin korozyon ve oksidasyon yaratıcı etkilere karşı korunmasıdır. Uçak motorunda çevresel etkilere karşı korumayı sağlayan kaplamalara gereksinim duyan parça örnekleri Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Kaplamaya ihtiyaç duyan gaz türbini kanatçık örnekleri (Boone, 1980)

Süperalaşım lar üzerinde geliştirilen oksitlenme ve korozyona karşı koruyucu kaplamalar uçak ve uzay araçlarında uygulanmaktadır. Bu kaplamalar 1010°C ve üzeri artan sıcaklıklarda yapısını koruduğundan zamanla geliştirilen tasarımlarda tercih edilmiştir (Bradley, 1988). Yüksek sıcaklıkta ve eşdeğer şartlarda çalışmış, koruyucu kaplamalı ve kaplamasız türbin kanatçıkları arasındaki farklar Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. Alçak irtifada deniz seviyesinde 2500 saat çalışmış kaplamasız ve NiAl kaplanmış türbin kanatçıkları (Eskner, 2004)

Gaz türbin teknolojisinde istenen mekanik özellikleri korumak esastır. Süperalaşım ların zamanla oksitlenme ve korozyon dirençlerinde kısmi azalmalar meydana gelir. Kaplamalar, türbin kanatçıkları gibi süperalaşım parçaları çevresel etkilerden korumak amacıyla uygulanır. Petrol fiyatlarındaki artış, yakıt ekonomisi amaçlı Ar-Ge çalışmalarını hızlandırmıştır. Bu çalışmalar, daha çok gaz türbini teknolojisi ve süperalaşım larında yaygın kaplamalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Çalışmalarda hava – deniz araçları ve güç türbinlerinde kaplanmış süperalaşım uygulamaları öncelikli olarak ele alınmış ve devamında da önemini korumuştur.

Süperalaşım larına yapılan kaplamaların uygulama mantığı, kromca ya da alüminyumca zengin oksitler oluşturarak yüksek sıcaklıkta korozyona karşı dayanımı

artırmaktır. Süperalaşım malzeme servise verildiğinde, koruyucu kaplama bölgesindeki krom içeriği %20 civarındadır. Zor kullanım şartlarında krom içeriği %5-15 seviyesine düşebilmekte, malzemenin mikroyapısı ve yüksek sıcaklığa dayanımında kayıplar olmaktadır. Bu nedenle malzemedeki kaplanmış bölgeye krom veya alüminyum içeren ilaveler yapacak koruyucu kaplama işlemleri uygulanmaktadır (Met. Hand., Ninth Ed., 1982).

Gaz türbinlerindeki süperalaşımlarda uygun kaplama teknolojisinin seçimi önem arz eder. Türbin kısmında çalışma şartlarına bağlı olarak çevresel etkiyle oluşan ve malzeme için zararlı etkiler yaratan iki oluşum dikkati çeker. Bunlar oksitlenme ve sıcak korozyondur. Sıcak korozyon ise, iki şekilde sınıflandırılır. Bunlar:

- “Tip-1” - Yüksek sıcaklık (800-950°C) korozyonu ve
- “Tip-2” - Düşük sıcaklık (670-750°C) korozyonudur (ASM International 2007).

Sıcak korozyon; yakıtta kükürt ve saflığı bozan pislikler sebebiyle ortaya çıkar. Sıcak korozyon ve oksitlenme, metal parçanın çevresel şartlardan etkileşimini ve bu etkileşim ile parçanın zamanla aşınmasını kapsar. Kaplamalar, türbin uygulamalarında çevresel şartlara karşı ana malzemeyi korumak amaçlı tasarlanırlar. Deniz araçlarındaki gaz türbinlerinde; sıcak korozyonun mevcudiyeti dikkat ile izlenmelidir. Uçak gaz türbinlerinde ise oksitlenme her durumda mevcuttur. Eğer uçaklar deniz ortamında alçak irtifalarda uzun süreli görevlendiriliyor ise; tuz buharı ve bunun gibi saflığı etkileyen dış etkiler nedeniyle yüksek sıcaklık korozyonuna maruz kalmaları, söz konusudur (Met. Hand., Ninth Ed., 1982).

Kaplamalar, ana malzeme ile uyumlu olmalıdır. Kaplama elemanlarında ve kaplama uygulama yönteminde; kaplama ile ana malzeme arasında istenmeyen reaksiyonların oluşumu engellenmelidir. Bu tür reaksiyon fazlarının oluşumu sonucu, ana malzemedeki boşluklar oluşur. Bu durum ara yüzeyde çatlamalara ve kaplamanın pul pul dökülmesine yol açar. Kaplama ve ana malzeme arasındaki termal genişlemenin uyuşması da önemlidir. Bu nedenle, kaplamalarda yanmaya, kavrulmaya ve türbin çalışmalarında küçük katı parçaların aşınmasına dayanabilecek malzeme ve süreç seçimi en kritik özelliklerdir.

## BÖLÜM 3

### YAYINIM KAPLAMASI

Metallerin dış etkenlere karşı korunması ve dirençlerinin artırılması amacıyla farklı ihtiyaçlar için çeşitli kaplama işlemleri uygulanmaktadır. Yüksek sıcaklığa karşı koruma sağlamak için ise temel olarak üç farklı tip kaplama türü mevcuttur;

- Kaplanan malzemenin difüzyon ve/veya ana metalle reaksiyonuyla kimyasal kompozisyonun sürekli bir yayılım gösterdiği difüzyon kaplamalar (diffusive coatings),
- Kaplama malzemesinin ana malzemenin yüzeyine biriktirildiği, ilave kaplamalar (overlay coatings),
- Termal bariyer kaplamalar (Hillary, 1996; Eliaz et al., 2002).

Süperalaşımlardaki yayılım kaplamaları ana malzemenin yüzeyinde 10-100µm'lik kalınlıklarda Al, Si, Cr veya kombinasyonundaki oksitlerle zenginleştirilmiş tabaka oluşturulmasını amaçlar. Bu elementler ana malzeme olarak değerlendirilecek süperalaşımlar üzerinde intermetalik bağ kurarak belirgin bir oksit tabakası oluşturur. Yayılım kaplamalarında kaplanması istenen elementler buhar ortamında yüzeye nüfuz ederek yüzeyde harici etkenlere karşı üstünlük sağlarlar. Alüminyum kullanılarak yapılan yayılım kaplamaları, özellikle oksidasyona karşı direnç sağlaması nedeni ile uçak motor türbinlerinde tercih edilmiştir.

Yayılım kaplamaları üç farklı yöntem ile gerçekleştirilir;

- Asal gaz atmosferinde parçaların ısıtılarak toz formundaki kaplama malzemesi ile ısıtılma tabii tutulması (Paket Sementasyon Yayılım Kaplama),
- Parçaların gaz formundaki kaplama malzeme bileşenleri ile ısıtılması (Temassız gaz fazı çöktürme – CVD (Chemical Vapor Deposition - Kimyasal Buhar Çöktürme),
- Başlangıç aşamasında kaplamanın mekanik yöntem ile yapılması ve ardından yayılım işleminin oluşumuna esas olan ısıtılma uygulama yöntemleridir.

### 3.1 Paket Sementasyon Yayınım Kaplama

Yayınım kaplama yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılanı “Paket Sementasyon Metodu”dur. Diğer uygulamalarda ise kaplanacak parçaların üzerinin çeşitli çamur veya toz boyama ile kaplanması yer almaktadır.

Paket sementasyon metodunda en çok kullanılanlar alüminyum (alüminyumlama), krom (kromlama) ve silisyum (silikonlama) elementleridir. Kaplama yapılan ana malzemeler arasında ise; nikel ve kobalt esaslı süperalaşım, çelikler, refrakter metaller yer almaktadır.

Gaz Türbin Motorlarının yüksek sıcaklık kısımlarında kullanılan nikel ve kobalt esaslı süperalaşım malzemelerini içeren sabit ve hareketli kanatçıklar “Yüksek Sıcaklık Korozyon Direnci” elde etmek amacıyla yayınım kaplanırlar. Yaygın olarak kullanılan kaplama malzemeleri NiAl ve CoAl içeren intermetalik bileşiklerdir. Bu bileşikler alüminyumun, nikel ve kobalt alaşımlarına yayınımı yöntemiyle oluşurlar. Bunların yanı sıra, yayınımda yer alan krom erimiş tuzların oluşturduğu kaplamada “Yüksek Sıcaklık Korozyonu Dayanım”ı sağlar. Yayınım kaplamalarının çoğu paket sementasyon yönteminde oluşturulan gaz fazı veya temas-dışı gaz fazı çökeltmesi yöntemiyle gerçekleştirilir (Goward, 1994, ASM).

Paket sementasyon yöntemiyle yayınım kaplaması ilk olarak, 1957 yılında kobalt esaslı türbin sabit kanatçıklarına uygulanmıştır (Seeling ve Stuber, 1978). Türbin hareketli kanatçıklarının ilk alüminyumlanması, kaplanacak malzemenin sıvı alüminyuma batırılma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (Nichols, 1965).

Çelikte kromlama ile ilgili kapsamlı inceleme, 1951 ve 1952 yılında yayınlanmıştır (Samuel ve Lockington, 1952 ve Drewitt, 1951). Kromlanmış çeliklerde alüminyumlama yöntemiyle “Yüksek Sıcaklık Oksidasyon Dayanımı”nı arttıran kaplama çalışmalarına 1953 yılında patent alınmıştır (Gibson, 1957). Gaz türbin parçalarında kromlama yöntemi ile kaplamaların yaygın olarak kullanımı kesin olarak bilinmemekle birlikte Avrupa’da 1960’lı yılların başında olduğu tahmin edilmektedir (Schneider, et al., 1978 ve Burgel, 1986). Ferro silisyum, alüminyum klorür ve alümina

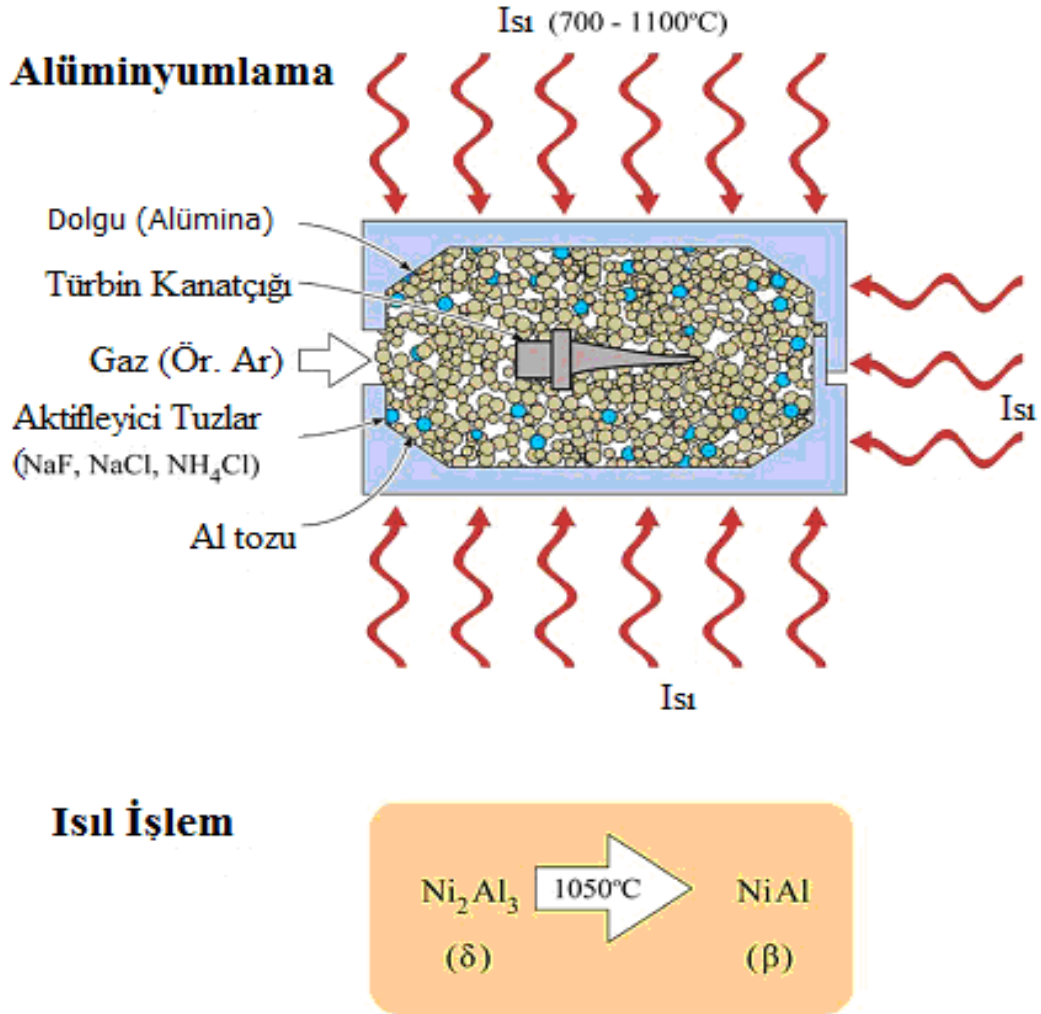


toz karışımları ile demir ve çeliklerin paket sementasyon yöntemiyle silisyumlanması 1954 yılında tamamlanmıştır (Fitzer, 1954). Nikel ve kobalt esaslı süperalaşımların silisyumlanması, düşük ergime sıcaklığına sahip ve kırılğan fazlar oluşturduğundan pratikte kullanıcılar tarafından fayda sağlayan kaplamalar olarak değerlendirilmiştir (Bauer ve Grunling, 1982). Süperalaşımlardaki alüminit kaplamalara eser miktarda silisyum takviyesi ile “Sıcak Korozyon Dayanımı” geliştirilmiştir.

Süperalaşım ve çeliklerin yayınım kaplamalarındaki gelişmeler; 1975-1995 yılları arasında alüminit yayınım kaplamalarına, krom (Godlevski ve Godlevska, 1986), platin (Lehnart ve Meinhardt, 1972) ve çok az miktarda silisyum ile elektroliz kaplayarak bir kısım üstünlükler sağlanmıştır. Alüminyum, krom, silisyum ve reaktif metal olarak adlandırılan itriyum, hafniyum v.b. malzemelerdeki uygulamalarda eşzamanlı çökeltme teorisi yeniden tanımlanmış, bunlara özgü en uygun prosesler geliştirilmiştir (Bianco ve Rapp, 1983). Temassız Gaz Fazı Kaplamanın (CVD – Kimyasal Buharla Çökeltme); türbin kanatçıklarında karmaşık soğutma kanallarının kaplanması yanı sıra genel olarak çok yönlü, çevre dostu ve maliyet etkinliği sağlanmıştır (Smith ve Boone 1990, Gauje ve Morbioli 1983 ve Parzucowski 1979). Halen gaz türbinleri sıcak bölgelerindeki hareketli ve sabit kanatçıklarda yayınım kaplaması olarak paket sementasyon yöntemi %90 düzeyinde kullanılmaktadır.

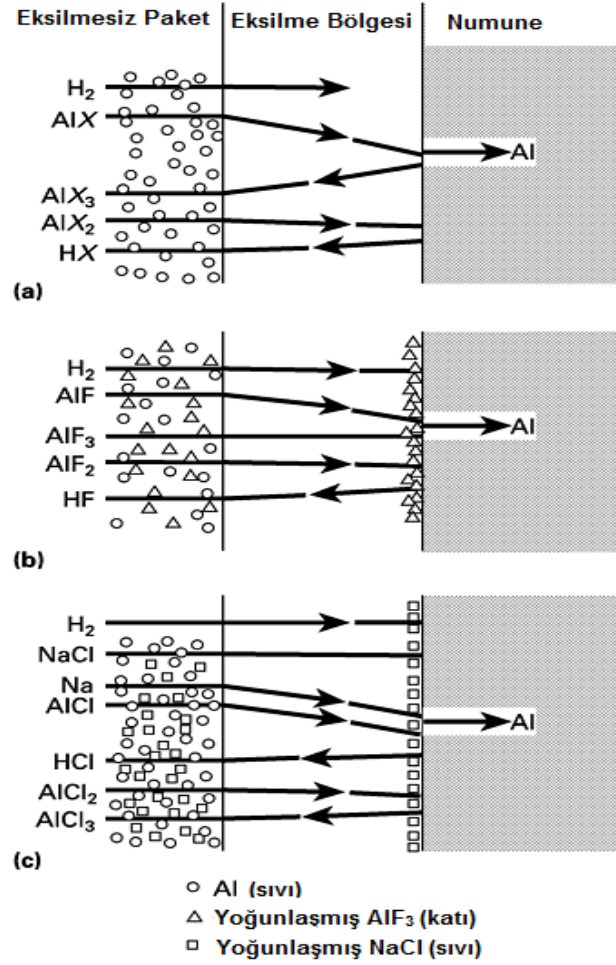
### **3.1.1 Paket yayınım kaplama prensipleri - Alüminyumlama**

Paket yayınım kaplama, bir paketin içindeki toz karışımı yardımıyla yapılan “Temaslı CVD” yöntemidir. Bu yöntemde paket olarak adlandırılan toz karışım içerisine ana malzeme olarak adlandırılan kaplanacak parçalar daldırılır. Aktifleyici olarak halojen tuzları ve dolgu olarak da alümina kullanılmaktadır. Karışım ısıtıldığında; öncelikle aktifleyici konumundaki halojen tuzlar buharlaşarak yayınım kaplamaya olanak sağlayan atmosfere dönüştürülür. Oluşturulan atmosferin kaplanacak ana malzeme içine ve dışına aktarımı ile yayınım gerçekleşir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Paket sementasyonun şekilsel gösterimi (Yu 2004)

Şekil 3.2’de nikel ve kobalt bazlı süperalaşımarda alüminit yayılım kaplama işleminin yayılım bölgelerinin şematik diyagramları gösterilmektedir. Şekilde üç farklı bölge vardır. Bunlardan bir tanesi, numunenin kendisidir. Diğer numunenin içine gömüldüğü toz formundaki pakettir. Üçüncüsü de iki bölge arasında kalan alüminyumca eksilme yaşanan bölgedir. Kaplanacak malzeme üzerinde kaplanması istenen element (alüminyum), aktifleyici tuzlar (halojen tuzları) ve asal seyreltici malzeme olan alümina bu toz paketini oluşturmaktadır. Alüminyumca eksilmiş bölge, bu bölgedeki alüminyumu kaplama ile paket arasındaki kısmi basınç farklılıklarının yarattığı alüminyumun işlem sıcaklığında taşınması sonucu oluşur.



Şekil 3.2 Alüminyumlamada belli başlı gaz partiküllerinin akışının şematik gösterimi

(a)  $\text{NH}_4\text{X}$  ( $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}$  veya  $\text{I}$ ), (b)  $\text{NH}_4\text{F}$  ve (c)  $\text{NaCl}$   
 (Levine ve Caves 1974, Gupta ve Seigle 1980)

Aktifleyici, işlem sıcaklığında alüminyum ile reaksiyona girer.  $\text{H}_2(\text{g})$  (hidrojen gazı) ve  $\text{Na}(\text{g})$  (sodyum gazı) bir seri buharlaşabilir alüminyum halojenleri oluşturur. Burada hangi elementlerin taşınımıyla numune içerisine yayınacağı “serbest oluşum enerjileri (Free Energy of Formation)” ve kompozisyona dayalı aktivitelerine göre belirlenir.

Gaz fazındaki halojen tuzlarının yayınımlı paket ve kaplama yüzeyi arasında bulunan kısmi basınç farklılığının yarattığı hareket ile alüminyumun kaplama işleminde taşınımı sonucu oluşan “Alüminyum eksik bölge” üzerinden gerçekleşir (Levine ve Caves, 1974 ve Gupta ve Seigle, 1980).

$D_i$  “i” bileşenin yayılım katsayısıdır. Burada alınan alüminyumdur, krom ve iridyum da olabilir. Paket ve kaplama yüzeyindeki kısmi basınç farklılığının çarpımına orantısıdır.

$$D_i (P_i - P_i') = D_i \Delta P_i \quad (3.1)$$

Paketten kaplamaya olan alüminyum transferinin anlık hızı katkısı yapan her bir alüminyum tuzunun toplamıyla elde edilmekte olup aşağıdaki şekilde formüle edilebilir;

$$J_{Al} = (\varepsilon / dRT) \sum \alpha_i N_i D_i \Delta P_i \quad (3.2)$$

Bu formülde;

- “ $J_{Al}$ ” mol/cm<sup>2</sup>.s cinsinden alüminyum taşınım hızı,
- “d” cm cinsinden etkin yayılım aralığı,
- “ $\varepsilon$ ” paket içindeki porosite doğrulama katsayısı,
- “ $\alpha_i$ ” aktive edicideki olası yoğunlaşma düzeltme faktörünü,
- “ $N_i$ ” i’nci sıradaki alüminyumdaki gram atomların sayısı,
- “ $P_i$ ” i içeriğindeki atm cinsinden kısmi basınç,
- “R” cm<sup>3</sup>xatm/mol.deg cinsinden gaz sabiti,
- “T” Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

Yüksek alüminyum kaynaklı statik paketle yapılan alüminyumlama işleminde kısa bir süre sonra kaynaktan farklı bir değerde, kaplama yüzeyinde sabit alüminyum konsantrasyonuna/yoğunluğuna ulaşılır. Bu şartlarda ana malzemeye taşınan alüminyum ağırlığı  $W_g$  (g/cm<sup>2</sup>.s) t(s) koşulunda aşağıdaki parabolik yapıya sahiptir (Gupta, et al., 1976). “t(s)” ana malzemeye taşınım zamanıdır.

$$W_g^2 = K_g.t \quad (3.3)$$

Burada; “ $K_g$ ” kompozisyona bağlı gaz katsayısıdır. Paketin içindeki alüminyum konsantrasyonu “ $\rho$ ”(g/cm<sup>3</sup>)’nun artmasıyla gaz tuzlarının anlık akışındaki artışı gösterir. Bu artış,  $\rho$  ile doğrudan orantılı değildir.

$$K_g = (2\rho\varepsilon M/RT) \sum \alpha_i N_i D_i \Delta P_i \quad (3.4)$$

“M” alüminyum gram-atomik ağırlığıdır. Alüminyum kaplama içinde yayılım ayrıca aşağıdaki parabolik gösterimle de ifade edilebilir.

$$W_s^2 = K_s.t \quad (3.5)$$

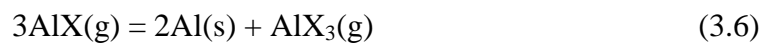
“K<sub>s</sub>” katıdaki yayınma sabitidir ve kaplama içindeki fazların yayınım katsayıları bilinmemesi durumunda değerlendirilir. Hem “K<sub>g</sub>” hem de “K<sub>s</sub>” kaplamadaki yüzey kompozisyonlarıdır. Denge durumunda K<sub>g</sub>=K<sub>s</sub> olmaktadır.

Şekil 3.2(a), paketi esas alarak aktive eden, NH<sub>4</sub>X (X = Cl, Br veya I)’nin artan kısmi basıncı ve her bir türe özgü yayınım yönünü göstermektedir. Termodinamik hesaplamalar AlX(g) ve AlX<sub>3</sub>(g)’ün diğer tuzlara göre daha büyük ΔP<sub>i</sub>’ye sahip olduğunu gösterir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 1093°C sıcaklıkta çeşitli alüminyumlama paketlerinde başlıca yayınım gazlarının ΔP<sub>i</sub> değerleri (Levine ve Caves 1974)

1093°C de ΔP <sub>i</sub> (atm) değerleri							
Aktivatör	AlX	AlX <sub>2</sub>	AlX <sub>3</sub>	NaX	Na	HX	H <sub>2</sub>
NH <sub>4</sub> Cl	1,27 x 10 <sup>-1</sup>	1,59 x 10 <sup>-2</sup>	-0,93 x 10 <sup>-1</sup>	...	...	-5 x 10 <sup>-3</sup>	4,41 x 10 <sup>-2</sup>
NH <sub>4</sub> Br	7,66 x 10 <sup>-3</sup>	...	-3,70 x 10 <sup>-3</sup>	...	...	-1,93 x 10 <sup>-5</sup>	1,52 x 10 <sup>-5</sup>
NH <sub>4</sub> I	1,38 x 10 <sup>-3</sup>	...	-3,01 x 10 <sup>-4</sup>	...	...	-3,21 x 10 <sup>-4</sup>	2,21 x 10 <sup>-5</sup>
NH <sub>4</sub> F	1,96 x 10 <sup>-1</sup>	1,40 x 10 <sup>-2</sup>	0	...	...	-3,38 x 10 <sup>-4</sup>	0,2108
NaF	7,85 x 10 <sup>-2</sup>	1,94 x 10 <sup>-3</sup>	-3,15 x 10 <sup>-3</sup>	0	8,22 x 10 <sup>-2</sup>	-1,81 x 10 <sup>-4</sup>	...
NaCl	4,34 x 10 <sup>-3</sup>	2,21 x 10 <sup>-5</sup>	-0,69 x 10 <sup>-6</sup>	0	3,74 x 10 <sup>-3</sup>	-1,51 x 10 <sup>-4</sup>	...
NaBr	1,71 x 10 <sup>-3</sup>	...	6,79 x 10 <sup>-6</sup>	0	9,95 x 10 <sup>-4</sup>	...	...
Nal	4,52 x 10 <sup>-3</sup>	...	4,9 x 10 <sup>-9</sup>	0	3,53 x 10 <sup>-3</sup>	-5,12 x 10 <sup>-5</sup>	...
Not: Paket içindeki α <sub>Al</sub> = 1, Kaplama Yüzeyindeki α <sub>Al</sub> = 0,01 Aktive edilmiş paketteki NH <sub>4</sub> Br, NH <sub>4</sub> I ve NaBr değerleri (Levine ve Caves 1974).							

Halojen tuzların yayınım katsayıları molekül ağırlığı arttıkça azaldığından amonyum kloridin, amonyum iyot veya amonyum floridin aktive ettiği paketlerde alüminyum temel olarak AlX(g)’nin kaplama yüzeyine yayınımı aracılığıyla taşınır. Oluşan reaksiyon aşağıdaki biçimde gösterilebilir.



Katı haldeki alüminyum (Al(s)) kaplama oluşturmak için yayınırken AlX<sub>3</sub>(g) geri yayınmaya uğrar ve (paket içindeki) Al(I) ile reaksiyona girerek AlX(g) oluşturur.

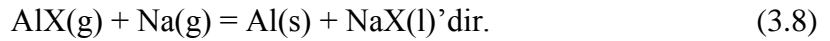
Bunu takiben  $AlCl_3$ 'nin  $\Delta P_i$  değeri  $AlBr_3$  ve  $AlI_3$ 'den yüksek olması sebebiyle amonyum kloridin bromit veya iyota kıyasla daha iyi bir aktivator olması beklenir.

$NH_4F$  (veya  $AlF_3$ ) (Şekil 3.2(b)),  $AlF_3$  ile aktive olan paketler işlem sıcaklığında katı haldedirler. Bunların buhar basınçları paket içerisinde eş dağılım göstermektedir. Bu bileşen bu nedenle gaz fazında yayınmaz. Şekil 3.2(b) ve Çizelge 3.1'deki  $\Delta P_i$  değerlerinde görüldüğü üzere kaplama yüzeyine alüminyum asıl olarak  $AlF(g)$  olarak yayınır. Kaplamadaki yeniden çökeltme (deposition) aşağıdaki reaksiyonla gerçekleşir.



$AlF_3(s)$  yüzeyde katı kristal formunda oluşmaktadır, bazı hallerde bir kısmı kaplama yüzeyine yapışır.  $AlF(g)$ 'nin kaynağı paketteki ters reaksiyon ile temin edilir.

$NaCl$  (Şekil 3.2(c))  $NaX(l)$  gibi sodyum tuzları ile aktive edilen paketler, paketin içinde yoğunlaşmış fazda görünürler. Alüminyum toplanması (deposition), kaplama yüzeyine ana olarak  $Na(g)$  ve  $AlX(g)$  yayınımları ile gerçekleşir. Bu reaksiyon,



$NaX(l)$ 'nin yüzeyde toplanarak oluşur.  $AlX(g)$ 'nin akışı paketteki ters reaksiyon ile sağlanır. Katı ve sıvı aktivatorların varlığı sebebiyle yoğunlaşmış tuz fazını içeren paketlerin işlem karakteristikleri amonyum klorid, amonyum bromit veya amonyum iyotun aktive ettiği paketlerden aşağıdaki farklılıkları içerir.

- Yoğunlaşmış aktivator fazı, kısmi izole olmuş kaplama ortamından tuz buharı şeklinde buharlaşma ile sızıntı için rezervuar ortamı sağlar ve bu da zamanla daha kararlı paket davranışına sebep olur.
- Tuz kısmi basınçları ve dolayısıyla alüminyum toplanma hızı sıcaklık arttıkça artar. Yoğunlaşmış fazın kısmi basıncı artan sıcaklık ile ilişkili olarak artar.
- Aktivator ile birlikte alüminyum kaplama yüzeyine taşınır. Ancak alüminyum akışındaki artış kaplama yüzeyinde alüminyum konsantrasyonunda artma olarak sonuçlanır. Bu nedenle, genel olarak alüminyum transfer hızı karmaşık etkiye sahip olarak değerlendirilir.

-

### 3.1.2 Alüminyum ve diğer elementlerin eşzamanlı çökeltmesi (Codeposition)

Başarılı bir eşzamanlı çöktürmede, paket içindeki kaplamayı gerçekleştirecek kaynak elementleri ve gaz fazındaki halojen tuzları arasında termodinamik denge sağlanmasında, taşınması istenen elementlerle ilişkili halojen tuzlarının sahip olduğu kısmi basınçların yüksek değerlerde olmaları gerekmektedir (Bianco ve Rapp, 1993). Kısmi basınçlar, halojen tuzların serbest enerji oluşumu ve kaplamayı yapacak kaynak alaşım element aktivitelerinin fonksiyonu sonucu gerçekleşir.

Şekil 3.3’de, alüminyum, krom ve silis eğrilerinin konumu ele alındığında; paket içindeki krom ve silis halojen tuzlarının kısmi basınçları, alüminyum halojen tuzlarının sahip olduğu kısmi basıncın altında olduğu görülmektedir. Bu da krom ve silis metallerinin eşzamanlı çökeltmede alüminyumun sahip olduğu üstünlüğe ulaşamadığı anlamını taşımaktadır. Eşzamanlı çökeltme oluşumu ile ilgili genel bir değerlendirme yapıldığında, iki elementli basit bir reaksiyon dikkate alınarak, “A” - “B” kaynak elementleri ile “AX” – “BX” gaz halojen tuzlarının ilişkisini “K” denge sabiti ile açıklamak mümkündür.



olarak ifade edilebilir.

Burada;

$$K = (P_{BX} / P_{AX})(a_A / a_B) \quad (3.10)$$

veya

$$K = \exp(-\Delta G^0/RT) \text{ 'dir.} \quad (3.11)$$

(“G”: Gibbs serbest enerji sabiti (kJ/mol); “R” ideal gaz sabiti)

$$\Delta G^0 = \Delta G_{f,BX} - \Delta G_{f,AX} \text{ 'dir.} \quad (3.12)$$

$P_{AX} = P_{BX}$  olduğu durumda aktivite oranı ise;

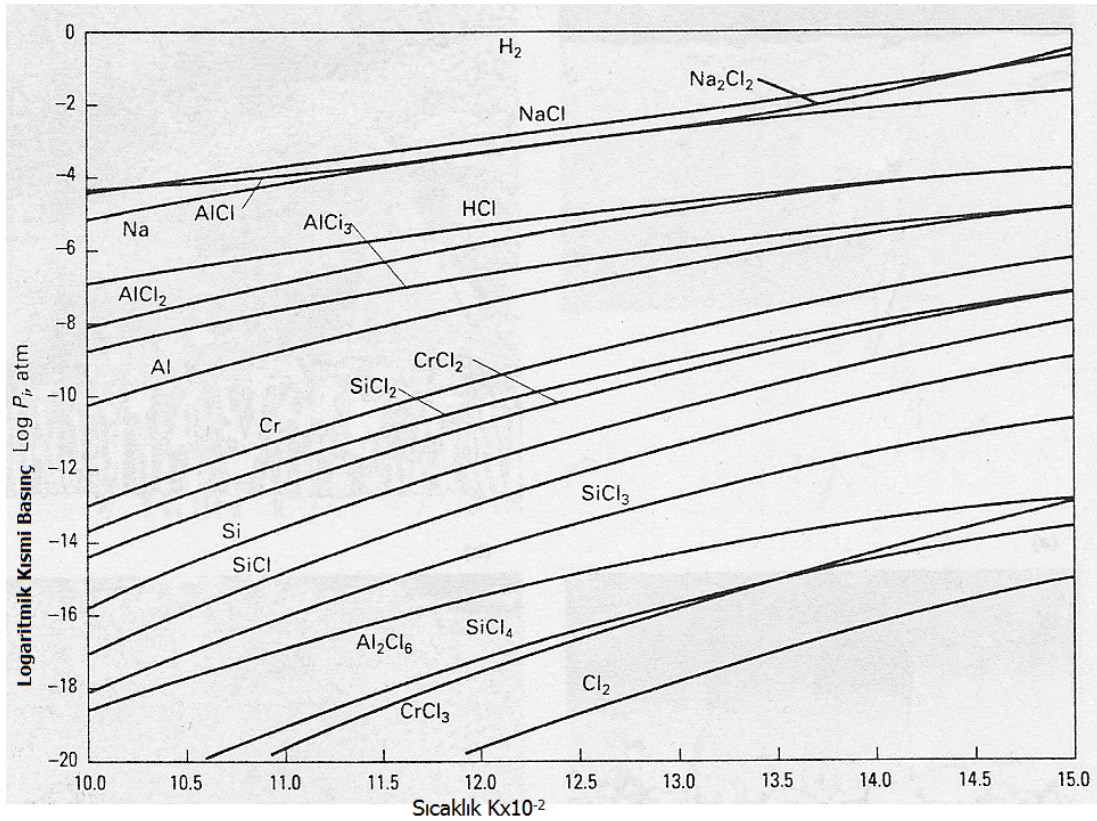
$$a_A / a_B = \exp(-\Delta G^0/RT) \text{ 'dir.} \quad (3.13)$$

Şayet AX, BX’den daha dengeli ise  $\Delta G^0$ ’nin işareti artı ve  $a_A / a_B < 1$  olacaktır. Aktivite oranı  $\Delta G^0$  ile hızla değişir. İki farklı örnek olarak,

$$T = 1300K, \quad \Delta G^0 = 50.000J/mol, \quad a_A / a_B = 9,8 \times 10^{-3} \text{ ve}$$

$$\Delta G^0 = 100.000J/mol; a_A / a_B = 9,6 \times 10^{-5}$$

durumu ele alındığında, aktivite oranını, kompozisyon oranına dönüştürmek için kaynak alaşım ile ilgili termodinamik özellik bilgilerine gerek duyulacaktır. Eğer bu ideal bir çözelti gibi davranıyorsa; kaynak alaşım tuzlarının oluşumunda açığa çıkan serbest enerji (Cl'un birim gram-atomu için) 50.000J/mol den fazla değişmesi halinde hesaplamalar eşzamanlı çökeltme gerçekleşmeyeceğini önermektedir. Kromun alüminyum ile eşzamanlı çökeltmesinin gerçekleşmesinde, içeriğinde %5–10 alüminyuma sahip yüksek kromlu kaynak alaşımına ihtiyaç duyulmaktadır (Bianco ve Rapp 1993, Kung ve Rapp 1989 ve Rapp 1983 ve Johnson, 1968). Bu şartlarda, krom-alüminyum alaşımında idealden büyük oranda sapma görülür (Hoar ve Croam, 1951). Bu da alüminyum ve krom tuzları arasındaki büyük serbest enerji farklılığının oluşumunun dengelenmesine yardımcı olur.



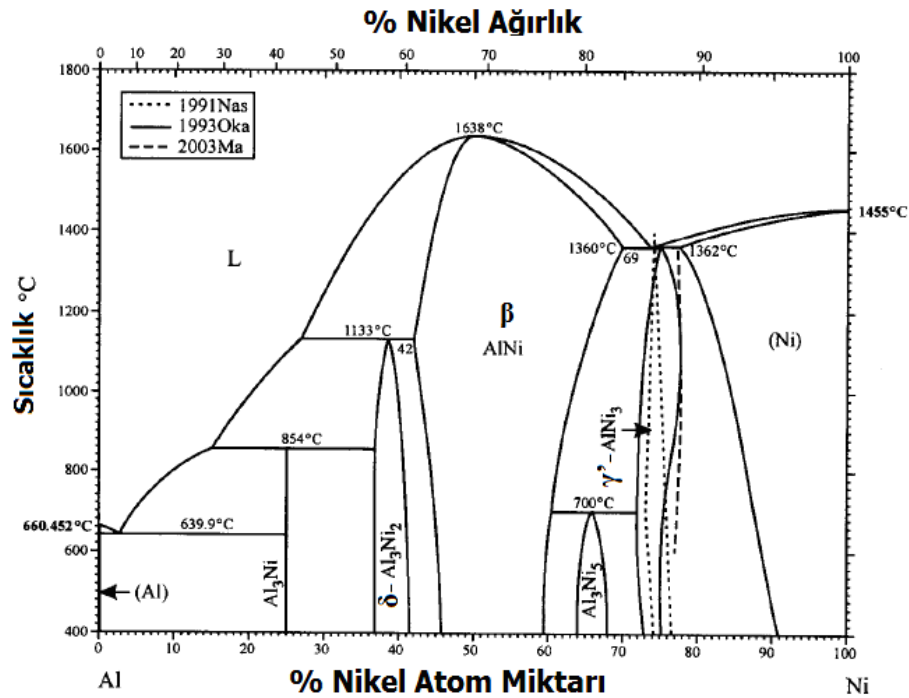
Sekil 3.3 Saf Alüminyum, krom ve silisyum ihtiva eden NaCl ile aktive edilmiş paket içerisindeki gazların kısmi basınçlarda ve H<sub>2</sub> artık ortamındaki denge durumu (Walsh 1973, Kung ve Rapp 1989)



## 3.2 Süperalaşımlarda Yayınım Kaplamalarının Özellikleri

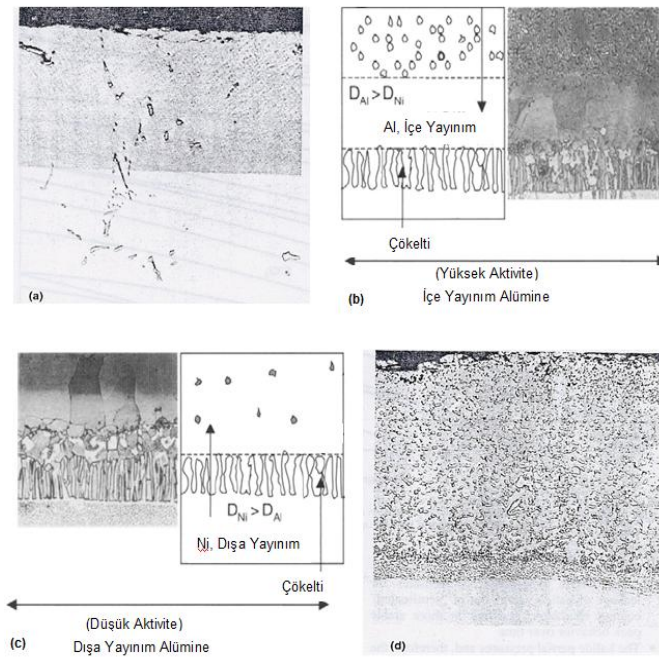
### 3.2.1 Kaplama oluşum mekanizmaları

Goward ve Boone'nin birlikte yürüttükleri çalışmalara göre süperalaşımlardaki "alüminit yayınım kaplamaları" mikroyapıya göre sınıflandırılırlar. Bunlar "içe doğru yayınım" veya "dışa doğru yayınım"dır (Goward ve Boone, 1971). Bu sınıflandırma nominal bileşimi Ni-15Cr-17Co-5Mo-4Al-3,5Ti olan UDIMET 700 tipi nikel süperalaşım, alüminit yayınım kaplamadan türetilmiştir. Saf alüminyum bulunan paketlerde, kaplamaların  $Ni_2Al_3$ 'e doğru ağırlıklı olarak "içe doğru yayınım"la oluştuğu gözlemlenmektedir (Şekil 3.4). Kaplama içlerine gidildikçe alüminyum ağırlıklı NiAl'e doğru (saf nikel için  $Ni_2Al_3$ 'e doğru "içe doğru yayınım" görülür) yayınım hızları aşırı derecede yüksektir. Pratikte 760°C de birkaç saat içerisinde kaplama kalınlığına ulaşılır. Şekil 3.5(a)'da tipik bir kaplama sonu mikro yapı görünmektedir. 1080°C de dört saatlik ilave ısıtım işlemi sonucundaki mikro yapı Şekil 3.5(b)'de gösterilmiştir. Kaplamanın matrisi şu an NiAl durumundadır.



Şekil 3.4 Al-Ni faz diyagramı (Vol.3 ASM Handbook 1992)

Kaplamanın merkezindeki tek fazlı bölge nikel ağırlıklı NiAl'dir. Ana malzeme alaşımında bulunan nikel dışa doğru yayılmakta ve üst tabakadaki alüminyum ile reaksiyona girerek büyümektedir. İç tabaka, diğer bir deyişle "iç yayılım bölgesi", refrakter metal (volfram, molibden, tantal v.b.), karbürler, NiAl ve/veya Ni<sub>3</sub>Al matris içindeki karmaşık intermetalik / içmetalik fazları ihtiva eder. Bunlar altta kalan alaşımdan nikelin çökeltmesiyle oluşur ve bu oluşum Ni - Ni<sub>3</sub>Al yapısının bu fazlara dönüşümüyle meydana gelir. Bunun aksine eğer kaynağın içindeki alüminyumun aktivitesi örneğin; Şekil 3.5(c)'de gösterildiği gibi kaplamanın yüzeyindeki nikel ağırlıklı NiAl oluşumuna sebebiyet verecek şekilde nikel veya krom seviyesi gibi alaşımlama ile azalır ana malzemeden nikelin dışa doğru yayınarak ana malzemede alüminyum ile reaksiyonu sonucunda Ek açıklama D de görüldüğü gibi NiAl'e dönüşümü gerçekleşerek büyür.

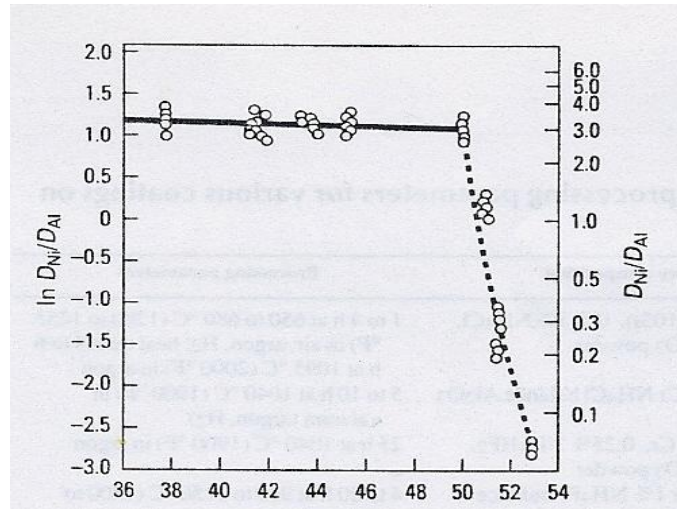


Şekil 3.5 Nikel süperalaşımaları üzerinde alüminyum kaplamalarının mikroyapısı

- (a) Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> (alüminyumca zengin NiAl) dayalı "İçeri Doğru Yayınımı".
- (b) 1080°C sıcaklık altında (a) ile aynı.
- (c) Nikel zengin NiAl alaşımlarda "Dışarı Doğru Yayınım".
- (d) Alüminyumca zengin NiAl içindeki Alüminyumun, "İçeri Doğru Yayınımı" (Goward ve Boone 1971)

Kaplamanın alt tabakasında yayılım hızı göreceli olarak düşüktür. Bu nedenle kaplama prosesi genellikle 1000°C'den büyük olacak şekilde yüksek sıcaklıklarda yapılmak zorundadır. Bu mekanizmalar Janssen ve Rieck'in (1967) ile Shankar ve Seigle'nin (1978) basit nikel alüminyum sistemlerinde kurguladıkları yayılım çalışmalarındaki gözlemleri ile tutarlılık göstermektedir.

Yüksek alüminyum içeren NiAl'de (Şekil 3.6), ağırlıklı olarak alüminyum hareketi ile yayılım gerçekleşir ve bu da Goward ve Boone'nun (1971) daha önce yaptıkları çalışmalarında doğrulanmıştır. Şekil 3.5(d) de bu yayılım mekanizmasıyla oluşmuş NiAl matrisli kaplama gözükmektedir.



Markalanmış yüzeydeki Al kompozisyon oranı

Şekil 3.6 NiAl içindeki alüminyumun bir fonksiyonu olarak nikel ve alüminyumun

“Yayılım Katsayısı Oranı” (Shankar ve Seigle 1978)

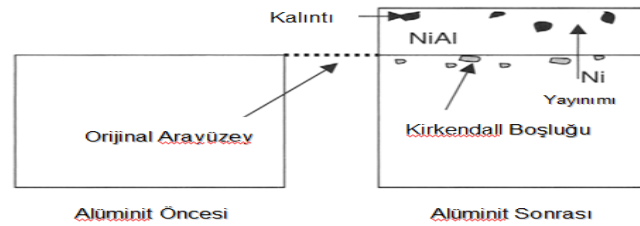
Şekil 3.5(b)'de ilave ısıl işlem ile kaplamanın stabilize edilmiş yapı hali gözükmektedir.

Yukarıdaki mekanizmalarda üç ayrı yöntem uygulanmaktadır;

- Yöntemlerden biri temas dışı kaplama veya CVD yöntemidir.

- İkinci yöntem seramik çamur (slip pack) olarak belirtilen yöntemdir (Gadd, et al., 1968).
- Üçüncü yöntem ise alüminyum alaşımı tozların çamursu püskürtme veya çamursu elektroforez yöntemleri ile süperalaşımlara uygulanmasıdır (Barber, et al., 1983).

Kaplama gerçekleştirilirken, püskürtme yöntemi elektroforez depozitleme uygulanmasında (Barber, et al., 1983, Howe 1925 ve Joseph, 1963) saf alüminyum veya Al-10Si gibi düşük ergime sıcaklığına sahip alüminyum alaşımları kullanılır. Yöntemde belirlenen ısı işlem uygulandığında, çözülen elementler erimiş sıvı sertleşene kadar süperalaşımlarda çözünme devam eder. Krom, platin ve silisyum ile modifiye olmuş nikel bazlı süperalaşımlardaki alüminit yayılım kaplamaları, yukarıda tanımlanan model mikro yapıya sahiptir. Saf nikel ve alüminyum içermeyen veya % 0,2'den az alüminyum içeren nikel esaslı alaşımlarda, içe doğru yayılım bölgesi oluşmaktadır. Saf nikel için kaplama ana malzeme (altlık) ara yüzeyinde ve nikelin içerisindeki oksijenin oluşturduğu Kirkendall boşlukları ve alümina oluşur (Goward ve Boone, 1971). Bu reaksiyon, kaplama dışa doğru gelişirken, nikelin dışa doğru yayılım hızı, alüminyumun içe doğru yayılım hızından fazla olduğu için, altlık ara yüzeyinde açığa çıkan oksijenler Şekil 3.7'de gösterildiği gibi Kirkendall boşluklarını oluşturur.

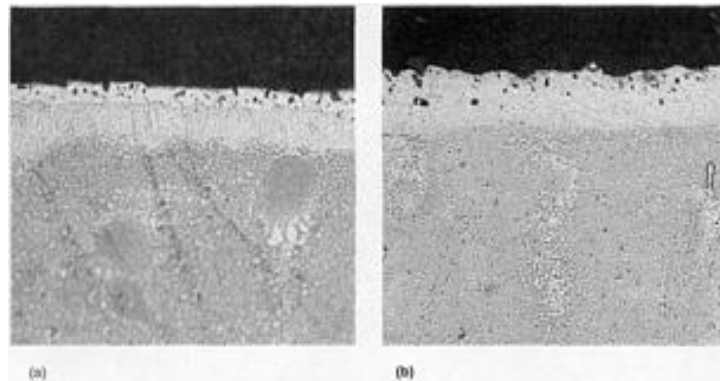


Şekil 3.7 Saf Ni içerisinde alüminit yayılım oluşumu (Bose, 2007)

Alüminyum içermeyen nikel alaşımları için boşluklar, refrakter metal tabakaları ve alümina ara yüzeylerinde oluşur (Goward ve Boone, 1971). Oluşan kaplamaların tutunurluğu düşüktür ve pratikte kullanışlı değildir. Benzer mekanizma kobalt esaslı süperalaşımların kaplamalarında da görünür. Birçok alaşımda alüminyumun yokluğu nikel esaslı süperalaşımda genel olarak görüldüğü gibi içe doğru yayılım bölgesinin

oluşumunu engeller. İlâveten, ana alaşımın birleşme noktalarında refrakter metal karbürler (volfram, krom) oluşur (Duret ve Pichoir, 1983). Oksijenle oluşan metal karbür ve alümina, nikel esaslı alaşımlarda bahsedildiği gibi alüminyum içermeyen alaşımlarda da, kaplamanın tutunurluğunu düşürebilir. Düşük alüminyum aktiviteli kaynaklarda (Low aluminum activity sources); yüksek sıcaklıklarda (1095°C), yavaş kaplama gelişimine sahip özel prosesler ile başarılı kaplama yapışkanlığı elde edilmektedir. %1-2 arasında alüminyumun kobalt esaslı süperalaşımlara ilavesi bu sorunun çözümüne yardımcı olmaktadır. Benzer şekilde, birçok nikel esaslı süperalaşımlarda dengeli iç yayılım bölgeleri elde edilmektedir (Goward ve Shankar, 1989).

Şekil 3.8’de nikel esaslı süperalaşımları üzerine paket sementasyon alüminit yayılım kaplama yöntemi ve temassız gaz işlemleri ile kromit yayılım kaplamalarının oluşturulması gösterilmiştir. Şekil 3.8.(a)’da gösterildiği gibi paket sementasyon alüminit yayılım kaplama yöntemi ile oluşturulan kaplama, ince bir alfa-kromium tabakası üzerine oluşmuştur. Kullanıcılar genelde bu oluşumu istemezler. Bu nedenle bu oluşumlar ya kimyasal olarak uzaklaştırılırlar ya da Şekil 3.8.(b)’de gösterildiği gibi temassız gaz yöntemi ile kaplama yapılır. Bu kaplamalar dış yüzeylerinde genel olarak %20-25 arasında krom içerirler. Krom-alümina-aktivatör paketleri (genelde amonyum klorür) veya temassız gaz kaynaklardan oluşan kaplamalar krom ve nikel yayılım açısından yaklaşık aynı yayılım hızına sahiptirler.



Şekil 3.8 Nikel esaslı süperalaşımlar üzerine krom yayılım kaplaması

(a) Paket sementasyon, (b) Temassız kaplama (Gauje ve Morbioli, 1983)

Bu nedenle, istenen kaplamalar nikel esaslı alaşımdaki kromun katı çözeltileridir. Alüminyum ve titanyum iç oksitleri oluşabilir. Çünkü oksijen potansiyelli kaynaklar normalde iç oksidasyona neden olmaya yeterlidir. Bu durum kromlama yerine alüminyumlama oluşumuna imkân sağlamak için kaynağın içine yeteri kadar alüminyum eklenmesi yöntemiyle engellenebilir (Brill ve Edwards, 1970). Rapp ve çalışma arkadaşları (Bianco ve Rapp, 1993), paket sementasyon ve ilgili proseslerle alüminyum, krom, silisyum ve reaktif elementlerde (itriyum ve hafniyum) eş zamanlı çökeltme teorisini güncellemişlerdir. Geliştirilen bu yöntemler ve kaplamalar yakın gelecekte yaygın uygulama alanları bulacaklardır.

### 3.2.2 Kaplama koruması ve özellik kaybı

Basit alüminyum karması kaplamaları, alümina koruyucu tabaka oluşumuyla yüksek sıcaklık oksidasyonuna direnç gösterir ve 1150°C'e kadar sıcaklıklarda kullanılabilir. Kaplamalar, çalışma ortamlarındaki yüksek sıcaklık değerleri ve çalışma ortamlarındaki sıcaklık değişimleri sonucu oluşan alüminyumun oksit dökülmeleri nedeniyle özelliklerini yitirirler. Alüminyumlama esnasında itriyum ve hafniyum gibi reaktif elementlerin ilave edilmesi (Bianco ve Rapp, 1993) koruyucu alüminanın yapışmasını sağlar ve kaplama özelliğini iyileştirir. 1000°C üzeri sıcaklıklarda ana malzeme (substrate) ile kaplamanın içe doğru yayılımı belirgin oranda özellik yitimine sebep olur (Smialek ve Lowell, 1974).

Kaplama ömrü, en yüksek sıcaklığa (870–980°C) kısa süreli çıkmak koşuluyla sağlıklıdır. Yüksek sıcaklıklara çıkma hızının yavaş olması ve/veya yüksek sıcaklıklarda uzun süreli kalınması, kaplama yapısı içerisinde mikro termal korozyon oluşturacağından, kaplamanın mevcut özelliklerinin yitirilmesine sebep olacaktır. Alüminyumlama öncesi yayılım kromlama ile yapılan krom modifikasyonları (Godlewski ve Godlevska, 1986) veya alüminyum ve kromun eşzamanlı çöktürülmesi ile yapılan krom modifikasyonları (Bianco ve Rapp 1993 ve Rolls Royce 1969 ve Marijnissen 1983) çeşitli formlarda oluşan erimiş halojen tuzu sıcak korozyonuna karşı gelişmiş dayanım özellikleri sağlar. Alüminyumlama öncesi platin ve bazı süperalaşımarda rodyum ile ince tabaka halinde elektro kaplaması (Lehnardt ve

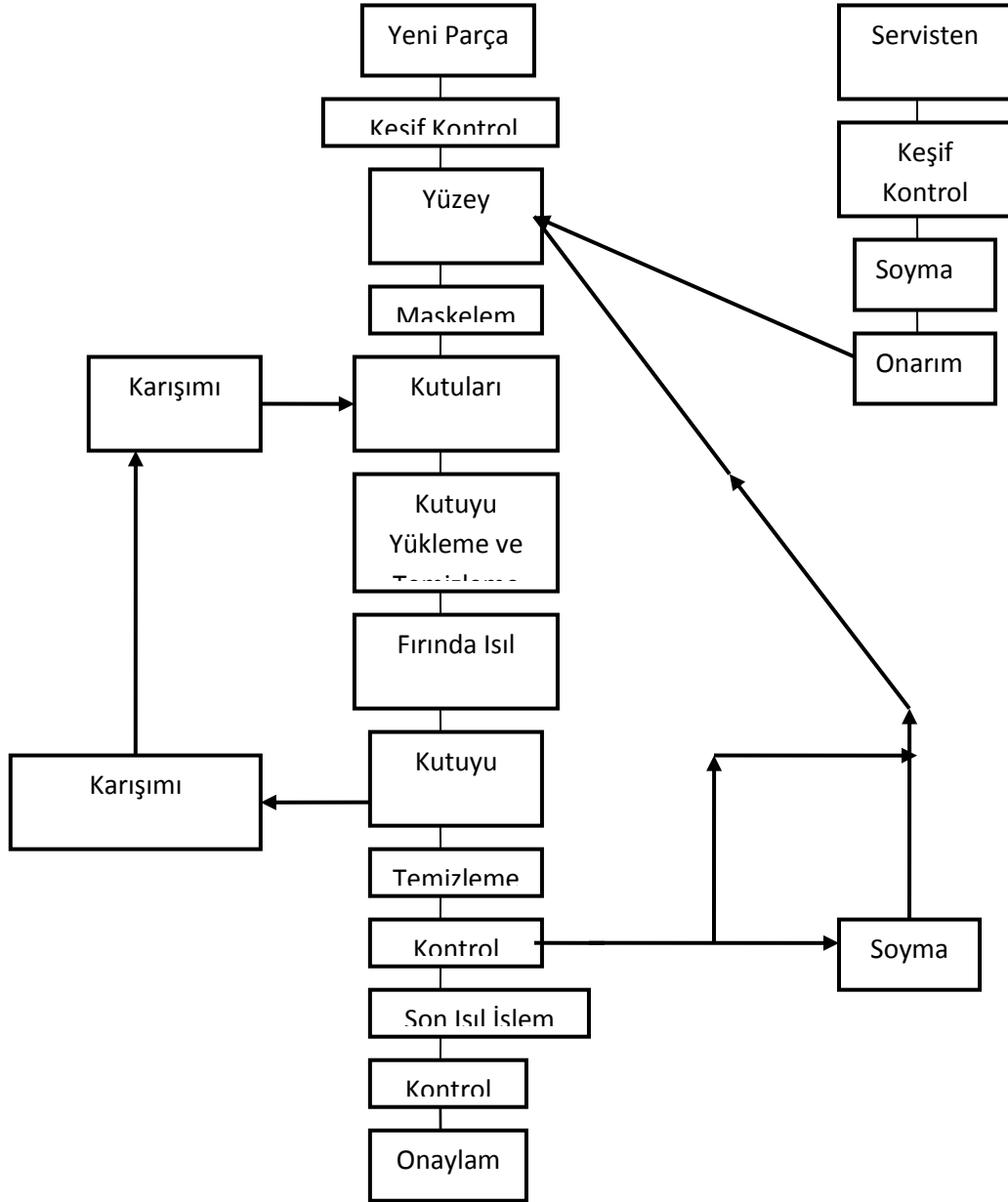
Meinhardt, 1972) yüksek sıcaklık (Tip I) erimiş tuz korozyonu dayanımına belirgin bir şekilde katkı sağlar. %5'e kadar silisyum ilavesi hem oksidasyon ve hem de korozyon direncini artırır (Bauer ve Grunling 1982). Silisyum, alüminyuma paket sementasyonla (Bianco ve Rapp 1983 ve Clark 1973) veya uygun temassız proseslerle birlikte eşzamanlı çöktürme yöntemi ile ilave edilebilir. Sıvı süspansiyon halinde alüminyum ve silisyum tozlarının alaşım yüzeyine uygulanıp, kurutulup ve yüksek sıcaklıklarda ateşe maruz kalmasıyla oluşan silisyumun çamursu (slurry) proses olarak tatbiki mümkündür (Joseph, 1963). Kaplamanın oksidasyon ve sıcak korozyon dayanımları ana malzeme alaşımının kompozisyonu ile doğrudan ilgilidir. Tantal ve hafniyum, tekrarlayan oksidasyon ve yüksek sıcaklık korozyon dayanımını artırır. Bu etkiyi, koruyucu tabakanın alüminaya tutuculuğunu arttırarak sağlar (Aldred,1975). Molibden ve volfram'ın, tantal ve hafniyum'a göre yüksek sıcaklık korozyonuna olumsuz etkisi vardır.

650-775°C sıcaklıklara kadar NiAl kırılğan davranış gösterdiğinden, tüm paket sementasyon alüminit yayılım kaplamaların bu sıcaklıkların altında kırılğan davranış gösterirken daha yüksek sıcaklıklarda sünek davranış gösterirler (Goward, 1970). Bu davranış, ısıl çevrim doğasına ve alaşım yapısına (eş eksenli - doğrusal katılmış veya tek kristal) bağlı olarak ısıl yorulma direncini artırır (Holmes ve Mc Clintock, 1990). Eğer bu etkiler sınırlayıcı ise, tasarımcılar daha pahalı olan MCrAlY(M-Co ve/veya Ni) kaplamaları ve/veya termal bariyer tipi kaplamaları (zirkonyum) kullanımı söz konusudur (Diltemiz, 2010)

Paket sementasyon işleminde uygulanan ısıl işlem sonucunda da karmaşık intermetalik fazlardan oluşan "İç Yayılım Bölgesi" yeniden yapılanmaktadır. Bu uygulamada alüminyum kaplanacak bölgede krom element ağırlık oranının %7-10'un altında olmaması gereklidir. Bu durumda krom desteğini sağlayacak işlemin uygulanması veya "Platin tadil edilmiş alüminit kaplama" yöntemi ile nikel esaslı alaşımların platin ile kaplanması gerekmektedir. Nikel esaslı alaşımlarda platinle tadil edilmiş kaplamalar  $PtAl_2$ ,  $Pt_2Al_3$  ve  $PtAl$  intermetalik içerik oluşturarak paket sementasyon alüminit yayılım kaplamaya üstün koruma sağlamaktadır (Reed, 2006).

### 3.3 Paket Sementasyon Üretim Teknolojisi

Tipik paket sementasyon üretimini gösteren akış diyagramı Şekil 3.9'da verilmiştir.

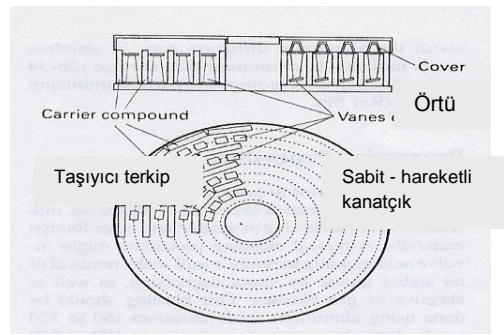


Şekil 3.9. Tipik paket sementasyon süreci için akış diyagramı (Goward ve Cannon, 1988)



### 3.4 Temassız Kaplama Süreci

Paket sementasyon sürecine alternatif olarak geliştirilmiş kaplama sistemidir. Temassız süreçte, parçaların yayılım kaplamasına hazırlanmaları paket sementasyon sürecindeki esaslara göre hazırlanır. Kaplanacak parçaların özel sepetlere yerleştirilmesi ve bu parçaların uygun malzemeler ile çepeçevre sarılması statik alüminit yayılım ve/veya kromize için gereklidir (Şekil 3.10, Gauje ve Morbioli, 1983).



Şekil 3.10 Temassız alüminyumlama işleminde kaplama odacığının şematik görünümü

(Gauje ve Morbioli, 1983)

Temassız süreçte, aktifleyici kimyasal tozlar özel kutulara yerleştirilen kaplanacak malzeme üzerine toz tanecikler şeklinde ince bir tabaka halinde püskürtülür. Kutu kapatılır ve özel fırına (retort) yerleştirilerek asal gaz yardımı ile ortamdaki oksijen yüzdesi düşürülür. Önceden belirlenmiş zaman - sıcaklık döngüsüne tabi tutulur. Yayılım kaplanacak gaz türbini sabit ve hareketli kanatçıkları üzerinde soğutma kanalları var ise, bu kanallarda kaplamanın gerçekleşmesi için uygun akışlı bir sisteme gereksinim duyulabilir (Parzuchowski, 1979). Bundan farklı olarak basınç değerlerinin düşürülmesi (Vandenbulke, et al., 1989) veya akışın kademelendirilmesi (Restall ve Wood, 1986) dar kanalların yayılım kaplanmasına yardımcı olur. Bu çalışmalarda, CVD (Kimyasal Buhar Çöktürmesi) süreci olarak adlandırılan hidrojen klorür veya hidrojen florür esaslı reaktif gazların yardımıyla kaplanacak yüzeylerde kimyasal buhar çöktürmesi sağlanır. Süreçte, hidrojen florür veya hidrojen klorür, yayılım kaplama uygulanacak malzemenin içinin ve dışının kaplanmasını sağlayacak şekilde malzeme üzerine uygulanır. (ASM Handbook, 1994). Paket sementasyon ve temassız süreçte akış diyagramı aynıdır.

### 3.5 Tamir

Belli bir süre uçan sabit ve/veya hareketli kanatçıkların tamir edilmesi yaygın olarak uygulanmaktadır. Tamir edebilmek için, uçuş sırasında deforme olan mevcut kaplamanın asit ile sökülmesi gerekir. Daha sonra parçaların kaynak ve/veya sert lehimleme (brazing) ile doldurulması ve tekrar işlenmesi gereklidir (Antony ve Goward, 1988). Ancak bazı motor imalatçıları bilhassa hareketli türbin kanatçıklarında mevcut kaplamanın sökülmeden temizleme sonrası direk kaplama yapılmasına izin vermektedir. Kaplama, bu işlemler sonrası Şekil 3.9'da gösterildiği gibi parça yüzeyine tekrar uygulanmaktadır.

### 3.6 Pratikte Uygulamalar

#### 3.6.1 Uçak gaz türbin kanatçıkları

Günümüz motorlarında, %12-15 arası krom içeren korozyona dayanıklı nikel süperalaşımlarından üretilmiş ve içe - dışa doğru yayılım kaplama yöntemi ile kaplanmış uçak gaz türbin kanatçıklarında, etkin bir koruma sağlamaktadır. Korozyona karşı daha az dayanıklı olan (%7-10 arası Cr içeren) süperalaşımlarda alüminyumlama öncesi kromlama işlemine tabi tutulur. Alüminyumlama, kaplamanın dış tabakasında yüksek krom konsantrasyonu oluşabilmesi için içe doğru yayılım usulü ile yapılmalıdır (Godlewski ve Godlewska, 1986). Silisyum (veya daha iyisi platin) eklenerek geliştirilmiş alüminit kaplamalar, deniz ortamında çalışan ve tuz sprey ortamlarına maruz kalan “Tip I Sıcak Tip Korozyon” ortamlarında daha etkin ve daha ucuz uygulama alanları oluşturur.

Yakıt etkinliğinin artırılması ve daha yüksek dayanım - ısı kapasite için yapılması planlanan, tek kristalli malzemeler gibi daha pahalı nikel bazlı süperalaşım tadilatlarında bilinen yayılım kaplama metodunun kullanılması, oksidasyon ve/veya termal malzeme yorgunluğu nedeni ile türbin servis ömründe öngörülen tasarım hedefini sağlamayabilir. Bu durumda, daha pahalı olan MCrAlY bindirme kaplamalar ve/veya seramik (zirkonyum bazlı) termal bariyer kaplama metotları kullanılmaktadır.

### 3.6.2 Karada ve denizde konuşlu gaz türbin kanatçıkları

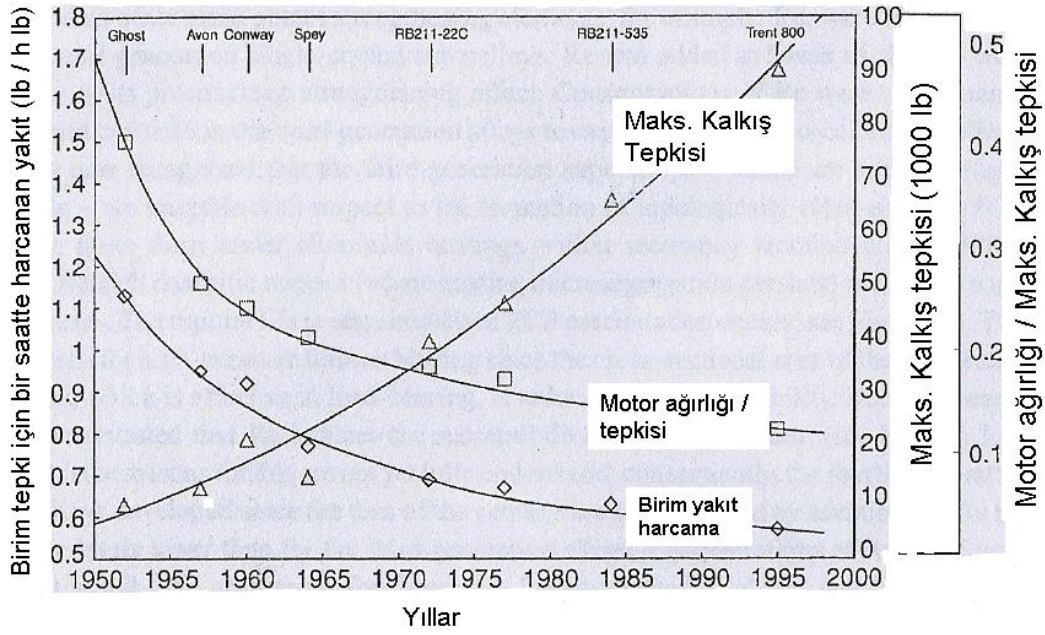
Karada ve denizde konuşlu gaz türbin kanatçıklarında sıcak bölge korozyonuna karşı maliyet etkinliği yaratacak koruma sağlanması, çevre şartları (tuz, sülfür oksit ve diğer sanayi atıkları) etkisi ve kullanılan yakıtlarda bulunan atıklardan (tuz, sülfür, vanadyum, vb.) dolayı daha karmaşık bir problemdir (Burgel, 1986). Kromlama işleminin, karada konuşlu gaz türbinlerinde kullanılan metal parçalarda 740°C sıcaklık seviyesine kadar oluşacak “Etkin Tip II Sıcak Korozyon” a karşı silisid, platin-alüminyumlama ve bazı MCrAlY tip kaplamalara karşı kıyaslandığında en iyi çözümlerden bir olduğu belirlenmiştir. Öte yandan 800°C üzerindeki sıcaklıklarda krom kaplamalar başarılı değildir. Platin alüminler “Etkin Tip II Sıcak Korozyon” a karşı kısmen yüksek sıcaklıklarda daha etkin koruma sağlarken, düşük sıcaklıklarda yeterli direnç gösterememektedir. Benzer davranışlar denizde konuşlu gaz türbinlerinde de görülmüştür (Harry, 1986).

Karada konuşlu gaz türbinlerinde genel eğilim yüksek krom ve silisyum eklenerek modifikasyona uğramış MCrAlY tipi kaplamalar yönündedir (Schilling 1984, Fishman 1988). En son üretilen yüksek sıcaklıklarda çalışan makinelerde, yakıt verimini arttırmak için yukarıda bahsi geçen kaplamalarda daha yoğun alüminyumlama yapılır (Rairden 1975, Walker ve Ross 1975). Aynı makinelerde iç soğutma kanalları da yüksek oksidasyon koşullarına direnç sağlaması amacıyla aynı şekilde alüminyumlanır.

Özellikle uçak motorlarında kullanılan paket sementasyon ve ilgili kaplama metotlarında ileriye dönük olarak daha verimli ve çevreye karşı daha duyarlı imalat metotları geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Buna ek olarak, hafniyum ve diğer oksijen-aktif elementler gibi yararlı elementlerin eklenmesiyle uygulanacak alüminit yayılım kaplama metotları yakın gelecekte daha pratik olarak uygulanabilecektir (Bianco ve Rapp, 1993)

1950’li yıllardan itibaren sivil ve askeri havacılıkta jet motorlarının kullanımına paralel olarak gaz türbin performanslarının artırılması, süperalaşımın gelişimi ile orantılı olmuştur. Günümüz tasarımı motorlar, ilk ticari uçuş olan COMET-1 uçağının motoru olan “Ghost” a göre üstünlüklere sahiptir (Şekil 3.11). Modern ticari turbofan motorlarına örnek olarak yeni nesil iki motorlu BOEING 777 yolcu uçağında kullanılan

“Rolls Royce’nin TRENT 800” veya “General Electric firmasının GE 90” motorlarında kalkış itme gücü 100.000lb.’ye ulaşmıştır. Bu motorlarda yakıt ekonomisi iki kat artmış, motor ağırlığı ise elde edilen itme gücüyle oranlandığında 4 kat azalmıştır.



Şekil 3.11 Ticari uçak motorlarında (Rolls Royce Motorları) yıllara göre performans karakterlerinin değişimi (Reed 2006)

Teknolojik başarının elde edilmesinde, süperalaşımlardaki gelişmelerin gaz türbinlerinin sıcak kısımlarında kullanılması öncülük etmiştir. Alaşımlarda terkipler geliştikçe sürünme ve yorulma gibi kritik özellikler belirgin şekilde iyileşmiş ve türbin giriş sıcaklığı 1700°C’ı geçmiştir (Bkz. Şekil 2.1). Bunun sağlanmasında; vakum ergitme, yönlendirilmiş katılaşma ve toz metalürji teknikleri gibi yeni proseslerin gelişmesi kilit rol oynamıştır (Reed, 2006).

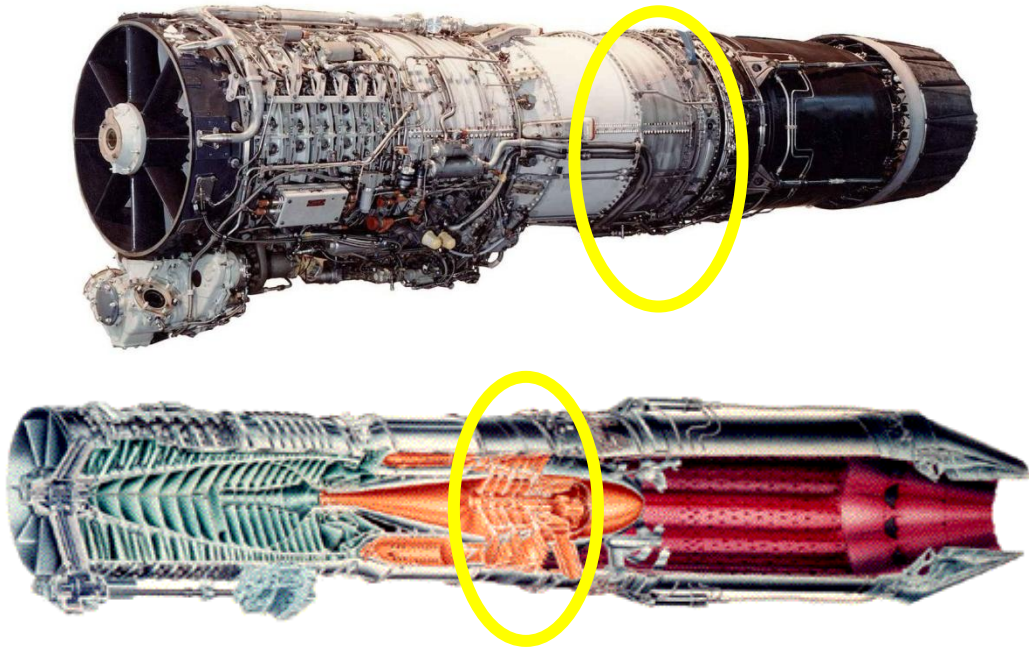
## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Laboratuvar Teçhizatı

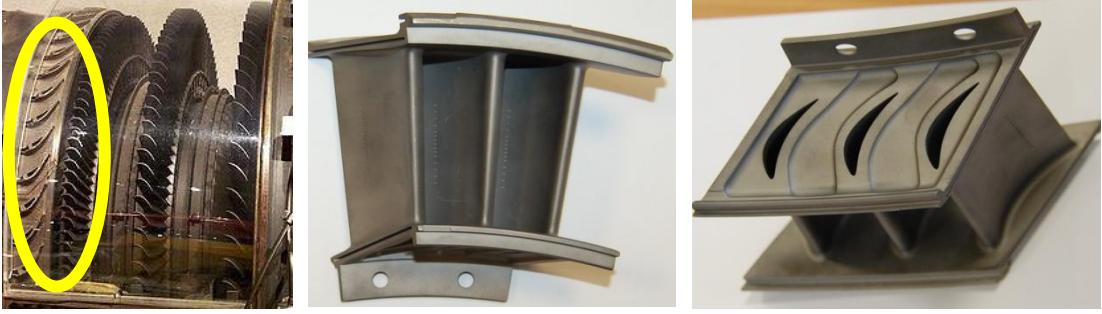
##### 4.1.1 İncelenen malzemeler

Deneyisel çalışmalarda, 1nci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı'nda revizyonları yapılan iki farklı jet motorunun türbinlerine ait ikinci kademe kanatçıkları ele alınmıştır. İmalatçı firma tarafından kaplama yapılarak motora takıldıktan sonra uzun süre kullanılan ve yeniden “Paket Sementasyon Alüminit Yayınım Kaplama” yapılan; J79 motoru (Şekil 4.1) “Türbin 2. kademe sabit kanatçık”ları (Şekil 4.2) ve J85 motorları (Şekil 4.3) “Türbin 2. kademe hareketli kanatçıkları”nın (Şekil 4.4) kullanılmış kaplamanın ve yeniden yapılan kaplama sonrası kaplama bölgesi element hareketleri incelenmiştir.



Şekil 4.1 J79 motoru türbin kademesi





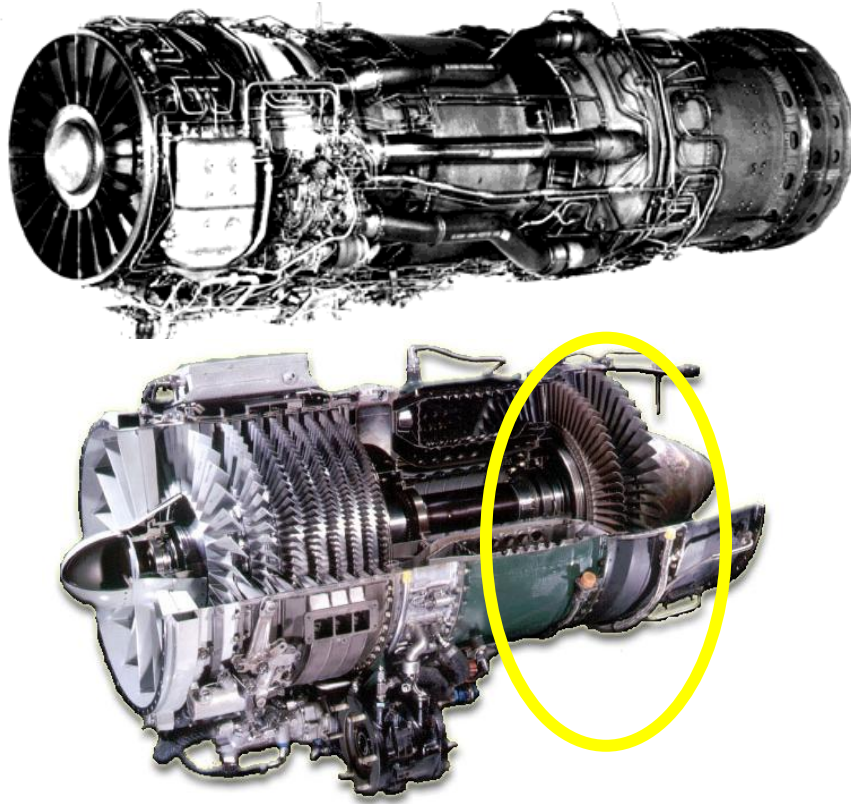
(a)

(b)

(c)

Şekil 4.2 J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçıkları

J79 motoru türbin ikinci kademede her kanatçık grubu üzerinde birbiriyle eşdeğer üç sabit kanatçık yer almaktadır (Şekil 4.2 (b), (c)). Her motorda 22 kanatçık grubu, dolayısıyla 66 adet ikinci kademe türbin sabit kanatçığı bulunmaktadır. (Şekil 4.2(a)) Tez çalışmasında 22 kanatçık grubu ve “Test Numunesi” yeniden kaplanır. J85 motoru türbin kademesi Şekil 4.3 ve türbin ikinci kademe hareketli kanatçıkları Şekil 4.4’tedir.

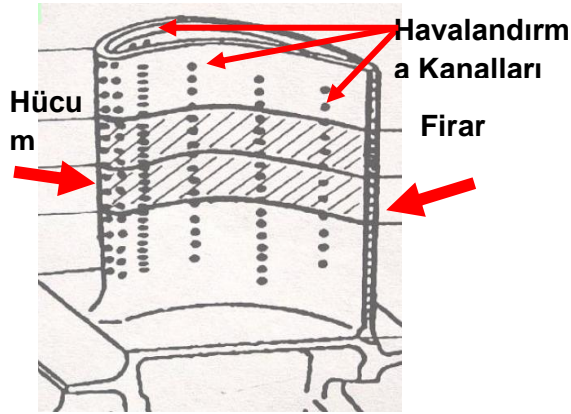


Şekil 4.3 J85 motoru türbin kademesi



Şekil 4.4 J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçıkları

Kanatçıklarda; hava fileleri ile ilk temas eden yüzey hücum kenarı, kanatçık üzerinden akan havanın ayrıldığı nokta ise firar kenarı olarak tanımlanır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Türbin kanatçıkları hücum ve firar kenarları.

#### 4.1.2 Kaplama işlemlerinde deneylerin yapıldığı cihazlar

Türk Hava Kuvvetleri 1'inci H.İ.B.M.K.'lığı Jet Motor Revizyon Müdürlüğü'nde, süperalaşımlara, General Electric firmasınınca CODEP olarak tanımlanan "Paket Sementasyon Alüminit Yayınım Kaplama" yapacak tesis lisans anlaşması ile kurulmuştur. Bu tesiste halen J79 motorlarına ait türbin sabit kanatçıklarına havacılık otoritelerince onaylanan kaplama işlemi yapılmaktadır. Deneysel çalışma bu tesiste gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği tesiste; paket yayınım kaplamanın hidrojen ortamında yapılabilmesi için hidrojen fırını (Şekil 4.6), kaplama tozlarının (CODEP-B),

alüminyum oksit ve amonyum florür tozlarının homojen bir şekilde karıştırılabilmesi amacı ile çift hazneli karıştırıcı (Şekil 4.7 (a)), kanatçık soğutma deliklerinin ve iç haznelerinin parafin mum ile maskelenmesi için mumlama makinesi (Şekil 4.7 (b)), amonyum florür kurutma fırını (Şekil 4.7 (c)), kutu dolum, maskeleme, boşaltma istasyonu (Şekil 4.8), kullanılmaktadır.



Şekil 4.6 Hidrojen fırını ve kontrol paneli



(a)

(b)

(c)

Şekil 4.7 (a) CODEP paket tozlarını hazırlama/karıştırma cihazı,  
(b) Mumlama makinesi,  
(c) Amonyum florür kurutma fırını



(a)

(b)

Şekil 4.8 Kutu dolum - maskeleme (a) ve boşaltım (b) istasyonu



### 4.1.3 Kaplama işlemi sarf malzemeleri

Kaplama işleminde kullanılan sarf malzemeler ve bu malzemelerin detay bilgileri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Kaplama işleminde kullanılan sarf malzemeler

Malzeme Adı	Ana malzemesi / Şartnamesi
Argon	MIL-A-18455 (-62°C veya daha düşük çiglenme noktalı)
Hidrojen	BB-H-886 (-62°C veya daha düşük çiglenme noktalı)
Aseton	O-A-51
Alüminyum Oksit Tozu	
Amonyum Florür	
CODEP B tozu	**
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

\*\* Ticari malzeme olduğundan muhteviyatı belirlenememiştir.

## **4.2 Kaplama İşleminin Yapılışı**

### **4.2.1. Kaplama öncesi kanatçıkların kontrolü**

Kaplama öncesi keşif kontrol işleminde, temizleme ilk adımdır. Kanatçık üzerinde çalışma sonucu oluşan oksitlenme ve atık malzeme birikimini uzaklaştırmak gereklidir. Bu maksatla yapılan temizleme işleminde, buharla yağ alma yöntemi uygulanmış, daha sonra 5,4 atm çalışma basıncında tane büyüklüğü 120–150 grit olan alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) ile kumlanarak temizlenmiştir.

### **4.2.2. Isıl renk değişimi (Heat-Tint) uygulaması**

Alüminyum oksit ile temizlenen kanatçıklara, fırında  $600^{\circ}C$ 'de bir saat süre ile ısıl renk değişimi işlemi uygulanmış, onarım için gelen kanatçıklar üzerinde oluşan altın sarısı–kahverengi ile lacivert arasında renk değişimi incelenmiştir. Kahverengi renk değişimi kaplamanın var olduğunu, lacivert renk ise kaplamanın mevcut olmadığını / aşındığını gösterdiğinden, kaplanması gereken sabit kanatçıklar bu yöntem sayesinde belirlenmiştir.

Kumlanan yüzeyler minimum 100 Watt beyaz ışık altında ve minimum “5 kez büyüten” mercek ile kontrol edilmiştir. Yüzeylerde kaplamayı etkileyecek herhangi bir kalıntı olmaması gerektiğinden, yeniden kaplanmasına karar verilen kanatçıklar ısıl renk değişimi öncesi uygulanan temizlik yöntemi tekrar uygulanarak kaplamaya hazır hale getirilmiştir.

### **4.2.3. Paket yayının kaplama hazırlıkları ve kaplamanın yapılması**

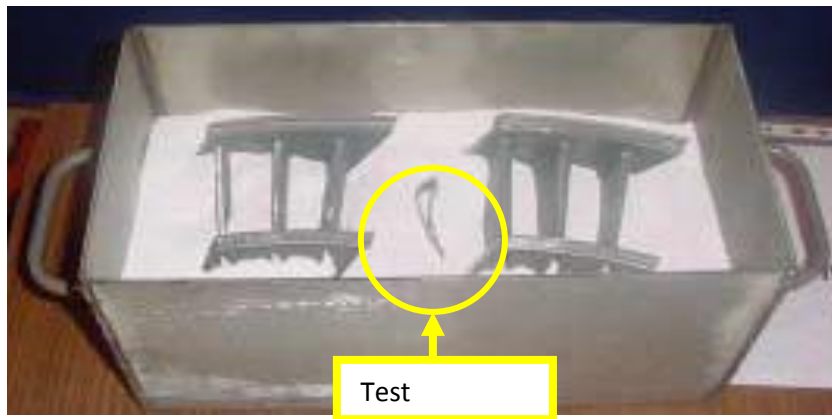
Alüminit yayının kaplama uygulamasında; onarım gören / kaplanacak kanatçıklar ile eşdeğer özelliklere sahip ve aynı ön hazırlık işlemlerini görmüş test numunesi olarak kullanılacak kanatçık da hazırlanmıştır.

Kaplama işlemi için paket içeriği olarak;

- Alüminyum Oksit - B (kalın toz) 6.020,0 gr .
- Alüminyum Oksit - C (ince toz) 2.580,0 gr .
- CODEP tozu 453,6 gr.
- Amonyum florür (aktifleyici) 18,144 gr. karışımı kullanılmıştır.

$Al_2O_3$  Class B,  $Al_2O_3$  Class C ve CODEP tozu, özel tasarımı karıştırıcı ekipmanda (Şekil 4.7 (a)) 30 dakika karıştırılmıştır. Bu karışıma daha sonra amonyum florür eklenerek 30 dakika daha karıştırılmıştır. “Aktifleyici” olarak adlandırılan amonyum florür’ün içinde nem bulunmaması gerekmektedir. Bu sebeple amonyum florür, kurutma fırını içerisinde (Şekil 4.7 (c))  $50^{\circ}C$ ’de en az 48 saat bekletilerek, nemi uzaklaştırılmıştır.

Hazırlanan karışım doldurma istasyonunda (Şekil 4.8(a)) kutulara doldurulmuştur. Kutuların içine kaplanacak kanatçıklar ve test numunesi gömülmüş ve etrafının toz karışımla örtülmesine özen gösterilmiştir (Şekil 4.9). Kaplanacak yüzeylerden hiçbir bölge açıkta bırakılmamıştır. Kaplanacak parçaların civarına ısı ölçümünü sağlayacak K-tipi (kromal-alümel) ısı algılayıcılar konmuş, kapakları kapanan kutular hidrojen fırınına (Şekil 4.6) yerleştirilmiştir.



Şekil 4.9 Kanatçıkların ve test numunesinin kaplama kutusuna yerleştirilmesi

Kaplama işleminde ilk safha parçaların ve kaplama malzemelerinin ısıtma işlemidir. İşlemde; 760°C'a kadar argon gazı, 760°C'ın üzerinde ise %99,999 saflıkta hidrojen gazı kullanılır. Taşıyıcı gaz içindeki hidrojen artık oksijeni azaltması ve süpürmesi sebebiyle alternatif gazlara tercih edilmiştir. Kaplama işleminde hidrojen,

- 760°C'nin üzerindeki sıcaklıkta gaz oksijeni uzaklaştır,
- Çok yüksek ısı transferini gerçekleştirir,
- Fiyatı kabul edilebilir seviyededir (Meetham,2000).

Isıtma işleminde fırın 90 dakikada 1050°C'a yükseltilmiş, bu sıcaklıkta 4 saat tutulmuştur. Fırın soğutulduktan sonra, parçalar ve test numuneleri kutulardan çıkarılarak üzerindeki tozlardan arındırılmış ve suyla yıkanarak temizlenmiştir.

### 4.3 Karakterizasyon İşlemleri

Deneyleerde; kullanılmış kaplamalı ve yeniden yapılan kaplama sonrası kanatçıkları temsil eden test numuneleri ikiye kesilerek, metalografik numune hazırlama adımlarından; kalıplama, zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiştir. Kesilen Numunelerden bir yarısı karakterizasyon testlerinde, diğeri oksidasyon testinde kullanılmıştır.

Kesme işlemi, kırılğan kaplama üzerinde minimum hasara yol açacak şekilde alüminyum oksit ince kesme diski kullanılarak Struers marka Secotom 10 model hassas kesme cihazında (Şekil 4.10) düşük devirlerle ve ilerleme hızlarında yapılmıştır.



Şekil 4.10 Struers marka Secotom 10 model hassas kesme cihazı

Kalıplama, Şekil 4.11’de görülen Buehler marka Simplimet 2000 model sıcak kalıplama cihazında, düşük büzülme değerine sahip, epoksi reçine kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11 Buehler marka Simplimet 2000 model sıcak kalıplama cihazı

Zımparalama, Buehler marka Phoenix 4000 model otomatik zımparalama-parlatma cihazında (Şekil 4.12) otomatik olarak düşük yük ve devir değerlerinde Struers marka silisyum karbür ve elmas disklerle kabadan inceye 3 kademedede gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.12 Buehler marka Phoenix 4000 model otomatik zımparalama-parlatma cihazı

Elde edilen parçalar (Şekil 4.13) 500 kez büyütebilen Nikon marka Optiphot 100 model optik mikroskop (Şekil 4.14) ile incelenmiştir.



Şekil 4.13 Epoksi reçine kalıplama yapılan test numuneleri



Şekil 4.14 Nikon marka Optiphot 100 model optik mikroskop

Paket sementasyon alüminit yayılım kaplama yapılmış olan parçalara ait test numune kesitleri üzerinde, Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Laboratuvarı'ndaki "Zeiss SUPRA 50VP" marka ve taramalı elektron mikroskop (SEM) ve beraber çalışan "EBSD-Oxford

Instruments INCA Energy” model EDX – WDX detektörü (Şekil 4.15) ile karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.15 “Zeiss SUPRA 50VP” marka ve model taramalı elektron mikroskop ve beraber çalışan “EBSD-Oxford Instruments INCA Energy” model EDX - WDX detektörü

#### 4.4 Kaplama Etkinliğinin İncelenmesi – Oksidasyon Testi

Kaplamanın etkinliğini ölçebilmek için, çalışma ömrünü ve kullanım şartlarını benzeten ve hızlandırılmış bir test olan oksidasyon testi, oksidasyon test numunesi üzerine uygulanmıştır. Bu testte; gaz türbininin periyodik revizyon / büyük bakım aralığına kadar geçecek sürenin, koşulların ağırlaştırılması ile kısa sürede sağlanması amaçlanmış ve numune, gerçek çalışma sıcaklığının çok üzerinde 1120°C sıcaklıkta, 23 saat süre ile atmosfere açık bir fırında (Şekil 4.16) bekletilmiştir.

Bu işlemden sonra numuneler, metalografik numune hazırlama adımlarından geçirilerek, kaplama üzerinde meydana gelen oksidasyon hasarının derinliği ve sıklığı optik mikroskop ile incelenmiştir.



Şekil 4.16 Oksidasyon testinin yapıldığı fırın



## BÖLÜM 5

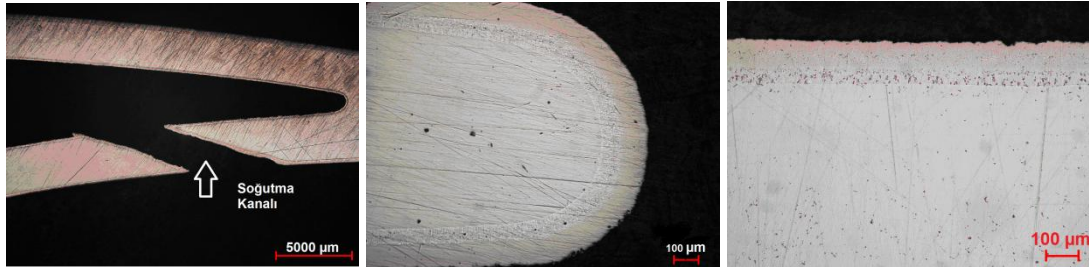
### KARAKTERİZASYON SONUÇLARI

Deneyleerde, kullanılmış J79 ve J85 motor türbin kanatçıklarına yeniden alüminit yayınıml kaplama uygulanmıştır. Kaplama işlemi sonucu test numune kanatçıkları ikiye kesilmiş, bu parçalar karakterizasyon işlemleri ve oksidasyon testi için kullanılmıştır.

#### 5.1 Kaplama Kalınlığının Belirlenmesi

Kaplama işlemi sonrası kaplama kalınlığı kontrolü, numunelerin metalografik hazırlık işlemlerinden sonra optik mikroskop altında 100 keze kadar büyütölerek yapılmıştır. Kaplama kalınlığının 25-110  $\mu\text{m}$  arasında olup olmadığı araştırılmıştır.

Yeniden kaplama sonrası J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçığının optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.1'de verilmiştir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 5.1 J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçık kaplamasının optik mikroskop görüntüleri

(a) “15X” kanatçığın firar kenarı bölgesi

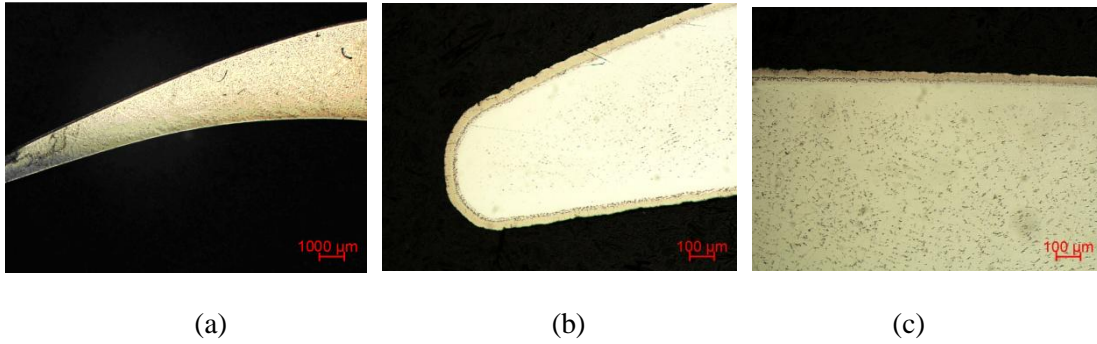
(b) “100X” firar kenarı ucu ,

(c) “100X” iç bükey yüzey

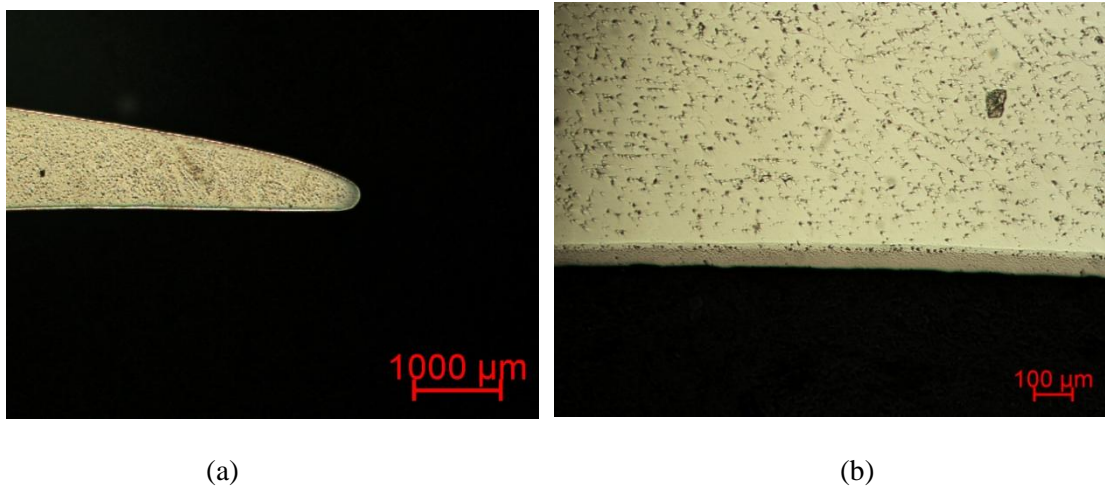
Şekil 5.1.a'da, kanatçığın firar kenarı bölgesi görölmektedir. Kesik olarak görünen bölüm kanatçığın soğutma kanalıdır. Kanatçık ucundan ve yüzeyden elde

edilen Şekil 5.1.b ve Şekil 5.1.c görüntülerinde de, kaplamanın iç - dış yayınımasının homojen, kaplama kalınlıklarının birbirine yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir.

J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının kaplama öncesi ve yeniden yapılan kaplama sonrası optik mikroskopta elde edilen görüntüleri Şekil 5.2’de ve Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.2 J85 türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının kullanılmış kaplama görüntüleri (a) 15X büyütme, (b) 100X büyütme, (c) 100X büyütme



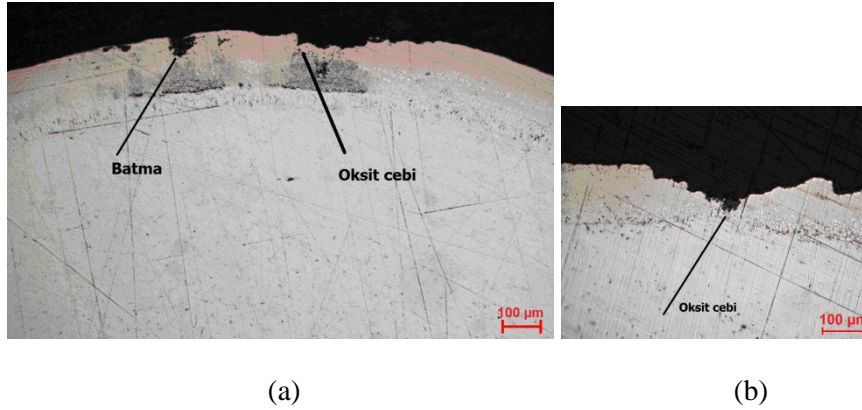
Şekil 5.3 J85 türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının yeniden yapılan kaplama sonrası görüntüleri (a) 15X büyütme, (b) 100X büyütme

Şekil 5.2’de verilen görüntüye göre; J85 hareketli kanatçıkların üzerinde imalatı esnasında yapılmış bir yayınım kaplamasının mevcut olduğu görülmüş, Şekil 5.3’de ise J85 kanatçıklarına ilk defa uygulanan paket sementasyon alüminit yayınım kaplama sonucu, J79’dakine benzer koruyucu bir kaplama elde edilmiştir.

## 5.2 Oksitlenme Test Sonuçları

Kaplamanın yeterli oksitlenme direncine sahip olup olmadığının kontrol edilmesi amacıyla, numuneler 1120°C sıcaklıkta hava sirkülasyonlu fırında oksitlenme testine tabi tutulmuştur.

J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçığı ile ilgili standartta (P29TF22-ClassB-Coating Material Specification After Oxidation); “Birbirine 25 mm’den daha yakın olmamak şartıyla, derinliği ilave paket sementasyon alüminit yayılım kaplama tabakası kalınlığının %50’sini aşan, maksimum iki “oksit cebi”ne (derinliğin genişlikten az olması) veya “batma”ya (derinliğin genişlikten fazla olması) izin verilir. İki oksit cebi, içe doğru yayılım tabakasına değmemek kaydıyla servise verilmesine engel teşkil etmez. Dışa doğru yayılım (ilave) tabakasının %50’sini aşmayan bütün oksit cepleri ve batmalar kabul edilir.” hükmü yer almaktadır. J79 kanatçıklarında rastlanan batma ve oksit cebi örnekleri Şekil 5.4’de verilmiştir. Şekil 5.4.a’da limitler dahilinde olan batma ve oksit cepleri, Şekil 5.4.b’de ise limitler dışında (Cep derinliği dışa doğru yayılım tabakasının %50’sini aşmakta ve hatta iç yayılım bölgesine girmektedir) olan oksit cebi görülmektedir.



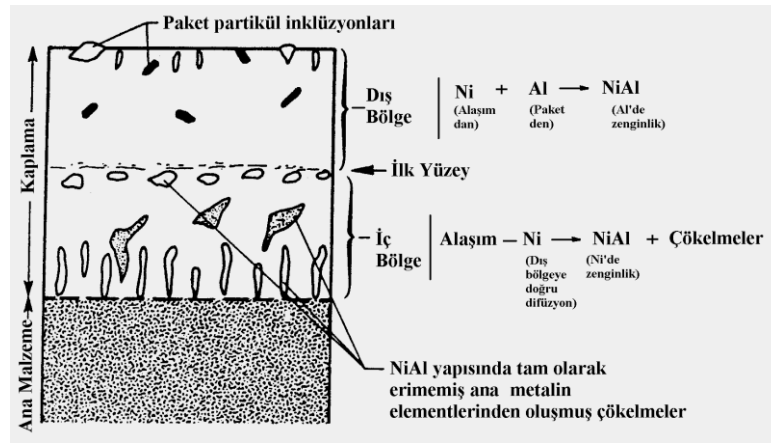
Şekil 5.4 J79 Türbin Sabit Kanatçık Kaplamada Batma ve Oksit Cebi Görüntüsü

Oksitlenme Hasarları (100X) (1inci HİBM.K.lığı Metalurji Lab. Arşivi)

Oksitlenme testinden çıkan test numunelerinin mikroyapı incelemeleri sonucunda herhangi bir oksit cebi veya batmaya rastlanmamıştır.

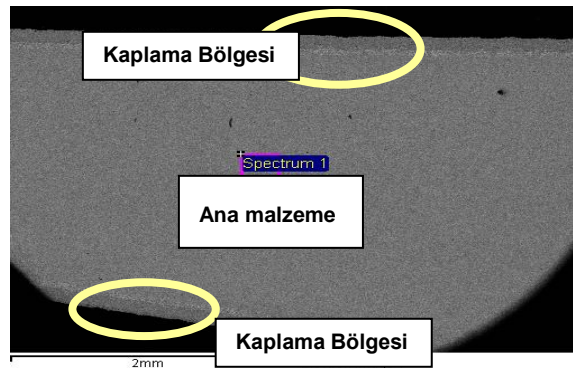
### 5.3 Karakterizasyon Sonuçları

Test numuneleri, karakterizasyon testleri için taramalı elektron mikroskobu (SAM) ile incelenmiştir. Element hareketlerinin izleneceği analiz bölgesi belirlenirken, 1983’de Lang’ın yayınladığı düşük aktivasyon sürecinde Ni esaslı IN100 süperalaşım malzemesinde dış yayılım ile elde edilen NiAl tip kaplamanın şematik ve görünümü (Şekil 5.5) referans olarak kullanılmıştır.

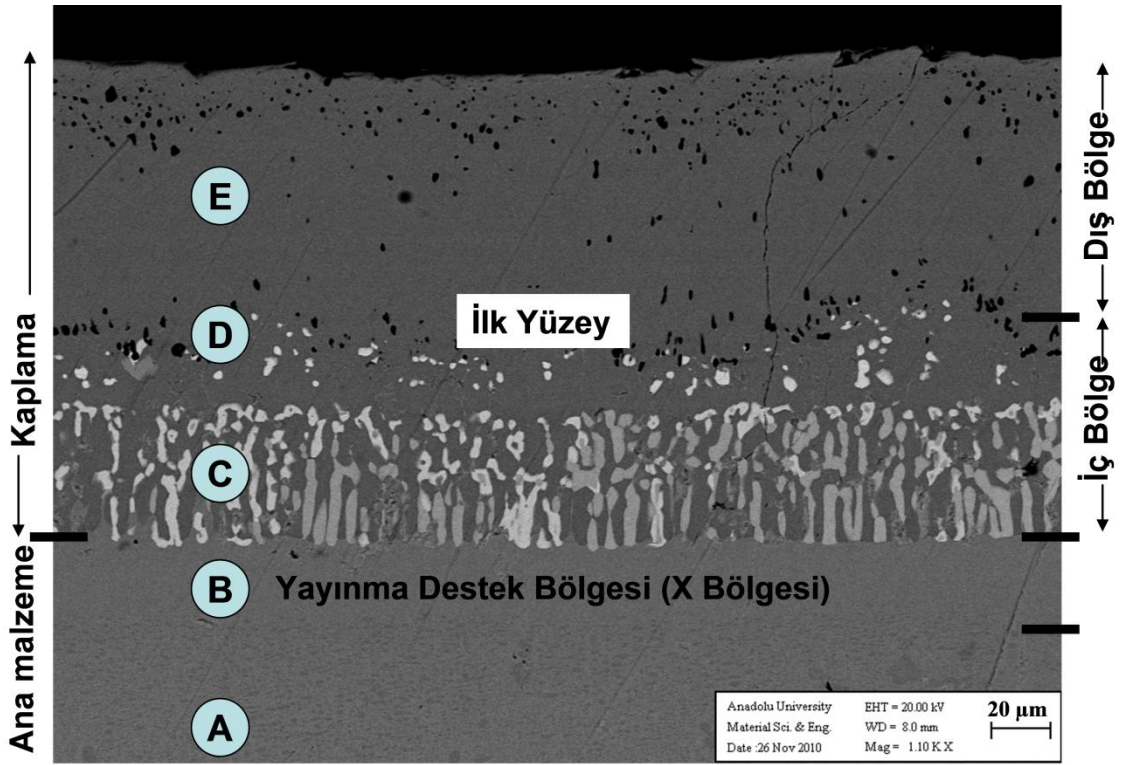


Şekil 5.5 Bir Ni esaslı süperalaşım malzemesinde dış yayılım ile elde edilen NiAl tip kaplamanın yapısal ve kimyasal detaylarını gösteren şematik resmi (Düşük Aktivasyon Süreci) (Lang, 1983).

Element hareketlerinin izlenmesi amacı ile test numune görüntüleme işlemleri, Şekil 5.6'nın üst kesimindeki "Kaplama Bölgesi"ne uygulanmıştır. Görüntü sonuçları Şekil 5.7'de görülmektedir.



Şekil 5.6 Test numunelerinin inceleme bölgelerini gösteren görüntü.



Şekil 5.7 Test numuneleri görüntüleme bölgelerindeki mikroyapılar  
 (A) Ana malzeme, (B) Yayınma destek bölgesi (X-bölgesi), (C) İç kaplama,  
 (D) İlk yüzey, (E) Dış kaplama bölgesi

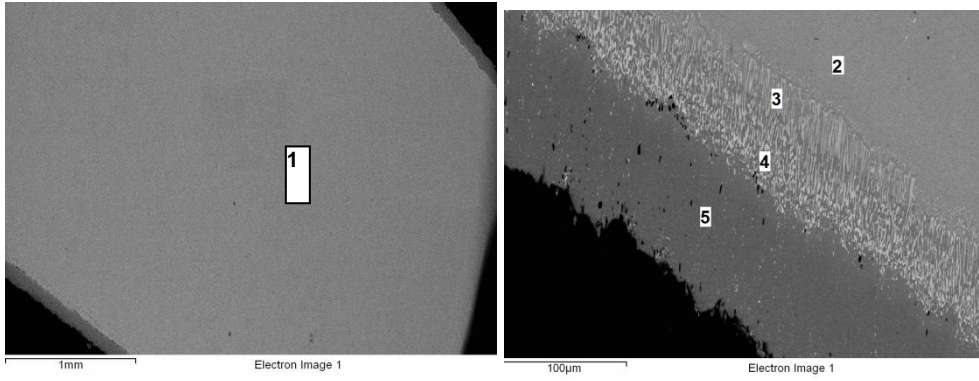
### 5.3.1 Kaplama öncesi J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığı karakterizasyon sonuçları

Yeni imal edilmiş ve kaplama yapılmamış bir kanatçık üretici firmadan tedarik edilememiştir. Elde edilen veriler, paket yayılım kaplandıktan sonra uzun süre ve güç şartlar altında kullanılmış, yeniden kaplanmak üzere gelen kullanılmış kaplamalı ikinci kademe türbin sabit kanatçıklarından alınan verilerdir. Bu nedenle hiç kaplama yapılmamış hali ile veri karşılaştırması mümkün olmamıştır. Bu amaçla hazırlanan numune (Şekil 5.8) üzerinde taramalı elektron mikroskop ile beş ayrı bölgeden (Şekil 5.9) görüntüleme ve EDX analizleri yapılmıştır. EDX analizi sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.





Şekil 5.8 Kaplama öncesi J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçık test numunesi



Şekil 5.9 Yeniden kaplama öncesi J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçık test numunesi üzerinden alınan görüntü bölgeleri

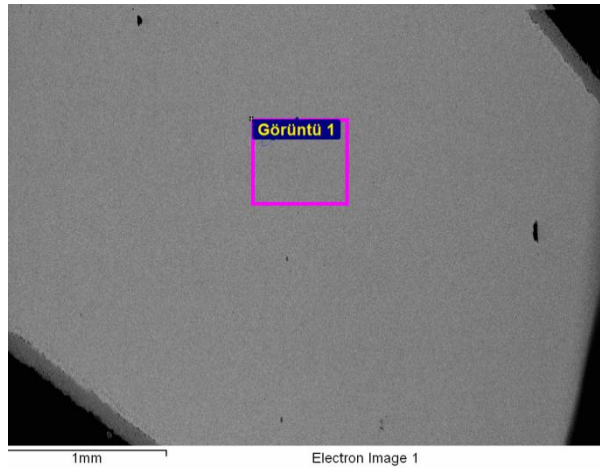
- Görüntü 1. Ana malzeme  
 Görüntü 2. Kaplamaya komşu ana malzeme bölgesi  
 Görüntü 3-4. İç kaplama bölgesi  
 Görüntü 5. Dış kaplama bölgesi

Çizelge 5.1 Yeniden kaplama öncesi ölçülmüş element ağırlık oranları

Element	RENE 80	Görüntü				
		1	2	3	4	5
Ni	Kalan	58,5	59,7	52,0	34,8	60,9
Al	3	2,9	2,8	4,0	7,7	28,8
Cr	14	14,2	14,0	15,2	18,2	2,3
Co	9	10,1	9,7	8,9	7,8	8,0
Ti	4,7	5,1	4,7	7,7	10,1	-
Mo	4	4,2	5,3	6,2	9,8	-
W	4	5,0	4,1	6,0	11,6	-

### 5.3.1.1 “Ana Malzeme Bölgesi” analizi değerlendirilmesi (Görüntü 1)

Kaplama öncesi test numunesi ana malzemesinin merkezinden alınan 560x500µm ölçüm alanındaki görüntü Şekil 5.10’ da, element ağırlık oranlar Çizelge 5.1’de verilmiştir.



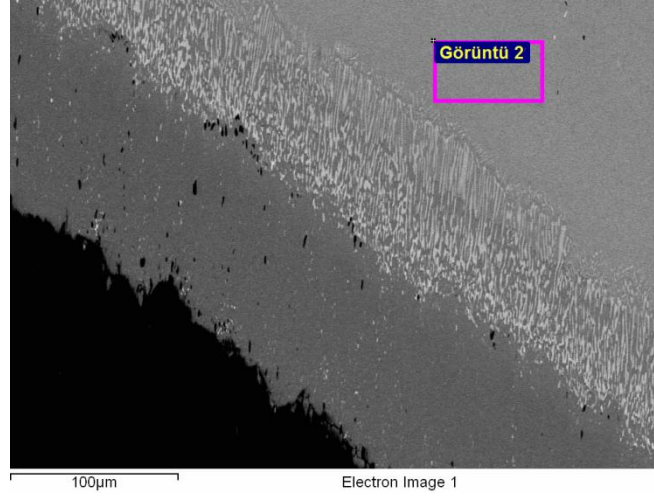
Şekil 5.10 J79 sabit kanatçığı kaplama öncesi ana malzeme bölge görüntüsü (Görüntü 1)

Kanatçık kesitinde, kaplamanın etkisinin en az olduğu değerlendirilen her iki dış yüzeye eşit mesafeden alınan ölçüm sonucunda, kanatçığın imal edildiği ana malzemenin doğrulanması hedeflenmiştir. Elde edilen element ağırlık yüzde oranları, ana malzeme olduğu bilinen Rene 80 süperalaşımın değerleri ile (Çizelge 5.1) karşılaştırıldığında numunelerin malzemesinin Rene 80 olduğu ve kaplamanın malzeme merkezine etkisinin minimum olduğu teyit edilmiştir.

### 5.3.1.2 “Kaplamaya Komşu Ana Malzeme Bölgesi” analizi değerlendirilmesi (Görüntü 2)

Kaplama öncesi kanatçık test numunesi üzerinde, ana malzeme bölgesi ile iç kaplama bölgesine komşu yayılım destek bölgesi (X-bölgesi) üzerinde taramalı

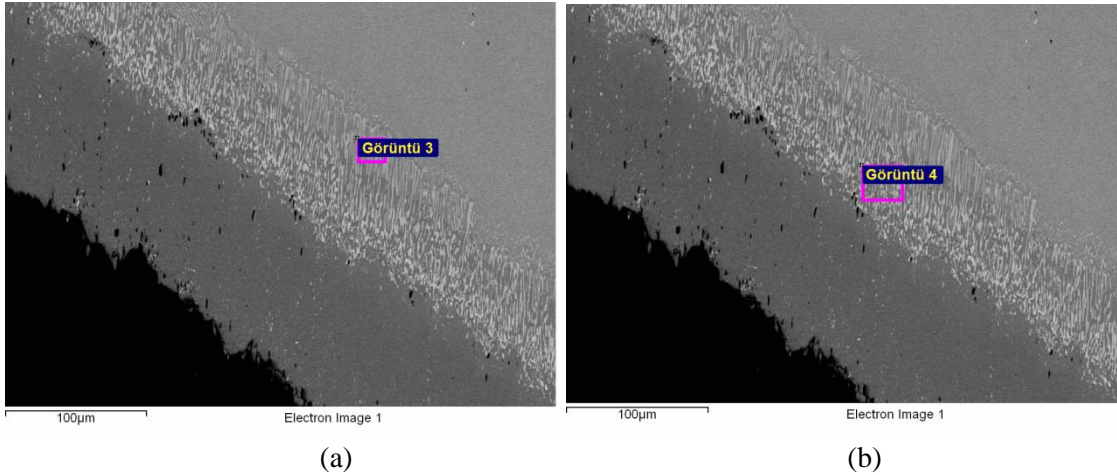
elektron mikroskop görüntüsü alınmıştır. Görüntü Şekil 5.11 de verilmiş olup dış cidardan 0,25 mm mesafede ve 64 x 34 $\mu$ m'lik bir alana aittir.



Şekil 5.11 Kaplamaya Komşu, Ana Malzeme Bölgesi (X-Bölgesi) Görüntüsü

### 5.3.1.3 “İç Bölge” analiz değerlendirmesi (Görüntü 3-4)

Kaplama öncesi J79 motoru ikinci kademe sabit kanatçığı test numunesine ait iç yayınım bölgesinde, dış satıh ile 0,16 mm mesafedeki 17x19 $\mu$ m'lik kesit alanından (Görüntü 3) ve 0,12 mm mesafede ilk yüzeye yakın 29 x 24 $\mu$ m'lik kesit alanından (Görüntü 4) alınan taramalı elektron mikroskop görüntüsü Şekil 5.12'dedir.

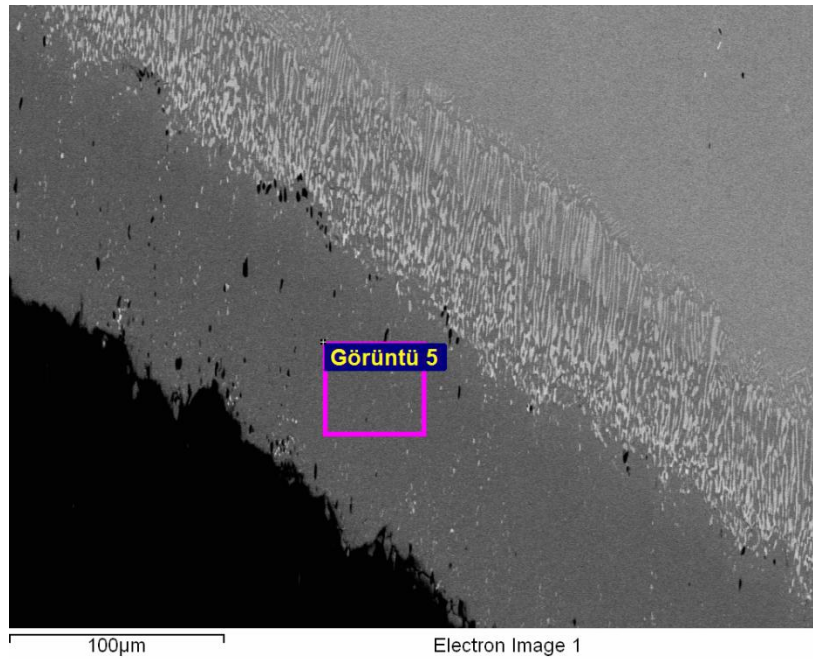


Şekil 5.12 Kullanılmış kaplamada İç Bölgeden, (a) 0,16 mm'de (Görüntü 3) ve (b) 0,12 mm'de (Görüntü 4) alınan görüntüler



### 5.3.1.4 “Dış Bölge” analiz değerlendirmesi (Görüntü 5)

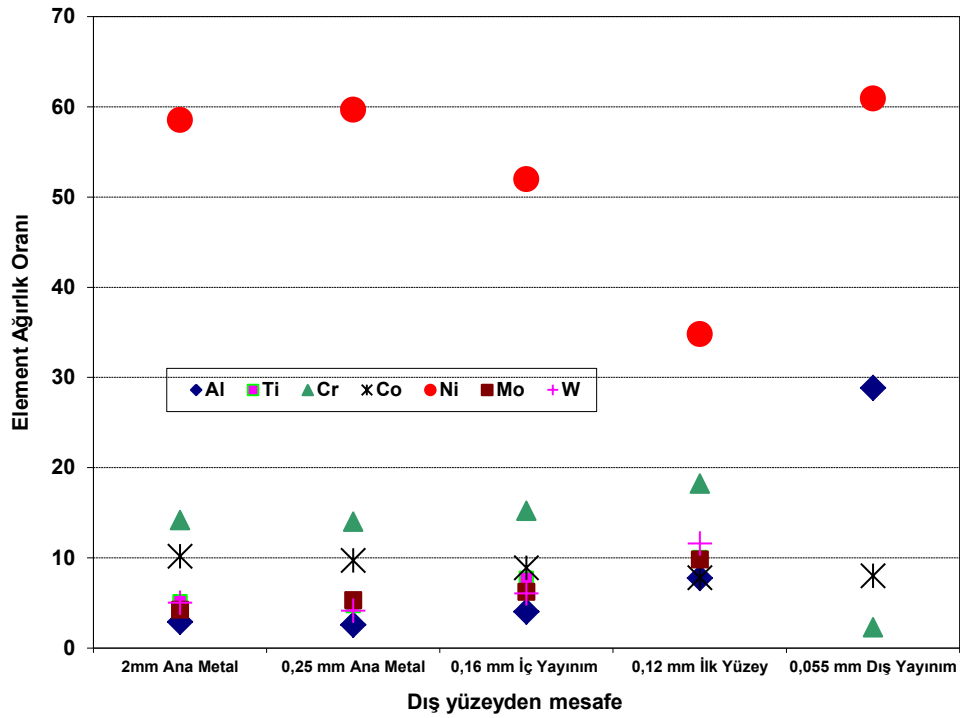
Kaplama öncesi sabit kanatçık test numunesinin dış kaplama bölgesine ait taramalı elektron mikroskop görüntüsü (Görüntü 5) Şekil 5.13’de verilmiştir. Görüntü ve analizler, imalatçı firma tarafından çok önceden uygulanan kaplamanın, dış sathına oldukça yakın 0,055 mm gibi bir kesiminden 47 x41  $\mu\text{m}$ ’lik bir sahada alınmıştır.



Şekil 5.13 J79 sabit kanatçık kaplama öncesi “Dış Bölge” görüntüsü (Görüntü 5)

Çizelge 5.1’de de verildiği üzere, dış bölgedeki element ağırlık oranlarında alüminyum, nikel, kobalt ve krom elementleri dışında herhangi bir elemente rastlanmamıştır.

J79 motorunda kaplama öncesi sabit kanatçığın mevcut durumunu ortaya koymak amacıyla farklı kaplama bölgelerinden elde edilen element ağırlık oranları bir grafik halinde Şekil 5.14’de derlenmiştir.



Şekil 5.14 J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçığı kaplama öncesi numunesinin ana malzemeden kaplama yüzeyine doğru farklı kaplama bölgelerinden elde edilen element ağırlık oranları grafiğı

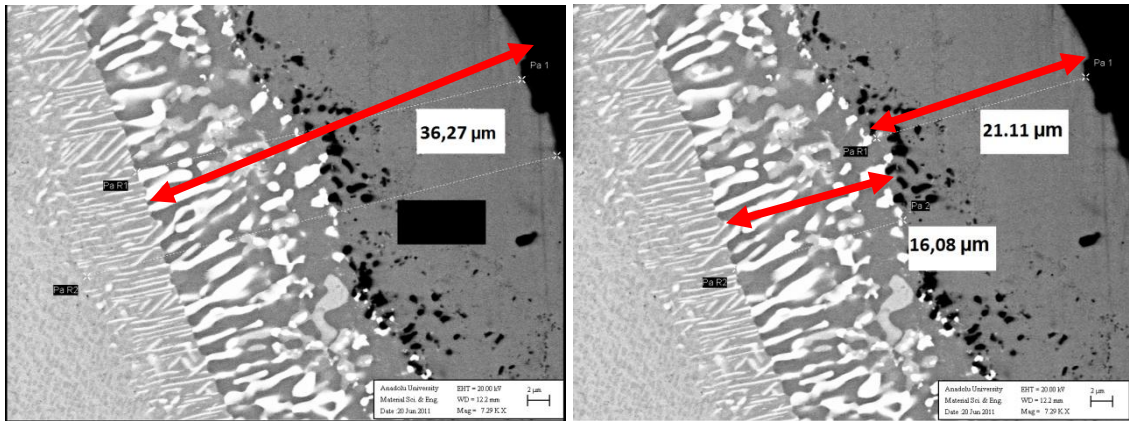
Şekil üzerinde element hareketleri incelendiğinde;

- Alüminyum elementinin, ana metal referans bölgesindeki ağırlık yüzdesinin iç yayınım bölgesine kadar değışiklik göstermediğı, iç yayınım ile dış yayınım bölgelerinde element ağırlık yüzdesinde artış görüldüğü, dış yüzeyde en yüksek değere çıktığı,
- Rene 80 içinde bulunan W, Mo, Ti elementlerinin ağırlıklarının; dış yüzeye yaklaştıkça artış gösterdiği, dış yayınım bölgesinde ilk yüzey olarak adlandırılabilcek bölgenin dışında ölçüm alınan noktada görülmeyişi,
- Kobalt elementinin, iç ve dış yayınım alanında içten dış yüzeye doğru yaklaşıldığında, ağırlık yüzdesinde bir miktar düşme olduğı,

- Krom elementi ağırlık oranının, yayınım kaplama bölgesine kadar dengeli geldiği, iç yayınım ve “ilk yüzey” bölgesinde yükseldiği, dış kaplama bölgesinde ise alüminyum ve nikel elementlerindeki yükselmeye bağlı olarak düştüğü,
- Nikel elementinin ağırlık oranının ana metal ile kaplama alanı ana metal kesimine doğru (dış yüzeyden 0,25 mm içeride) bir miktar arttığı, iç yayınım ve ilk yüzeye doğru düşme görüldüğü, dış kaplama bölgesinde ise ana malzemedeki nikel elementi oranı ağırlıkça yükseldiği, tespit edilmiştir.

### 5.3.1.5 Kaplama öncesi kalınlık ölçümü

Önceden paket sementasyon alüminit yayınım kaplanmış ve kullanım sonucu yeniden kaplanacak olan J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığının kaplama öncesi aşınmış kaplama görüntüleri Şekil 5.15’de verilmiştir. Yapılan ölçümlerde paket sementasyon alüminit yayınım kaplama kalınlığının 36,27 $\mu$ m olduğu, dış bölgedeki kaplama kalınlığının ise 20,11 $\mu$ m olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.15 J79 kanatçık kaplama öncesi kalınlık ölçümleri

### 5.3.1.6 J79 kanatçığı kaplama öncesi haritalama analizi sonuçları

Çalışmanın devamında; kanatçıklarda haritalama analizi incelemeleri yapılmıştır. Analiz yapılırken belirlenen analiz alanı üzerinde irdelenmesi hedeflenen elementlere özgü haritalama analizi sonuçları alınmıştır.

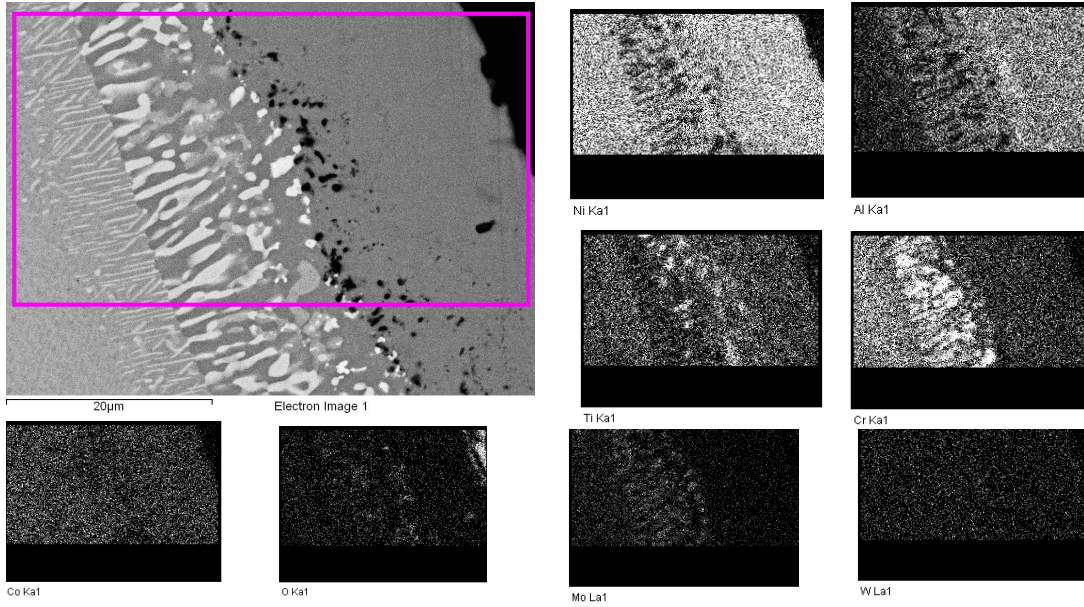
Değerlendirmeler yapılırken de Şekil 5.7'deki paket sementasyon alüminit yayılımı kaplama görüntüsü referans alınmış ve;

- Kaplamanın dışı doğru yayılımını gösteren “Dış Bölge”,
- Malzeme “İlk Yüzey”,
- Kaplamanın içe doğru yayılımını gösteren “İç Bölge”,
- Kaplama bölgesinin hemen altında Yayılım Destek Bölgesi “X Bölgesi”,
- Ana Malzeme Bölgesi (substrate),

Bölgelerindeki haritalama analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

J79 türbin kanatçığına ait 50x30µm'lik bir analiz alanını içeren haritalama analizi Şekil 5.16'da verilmiştir..

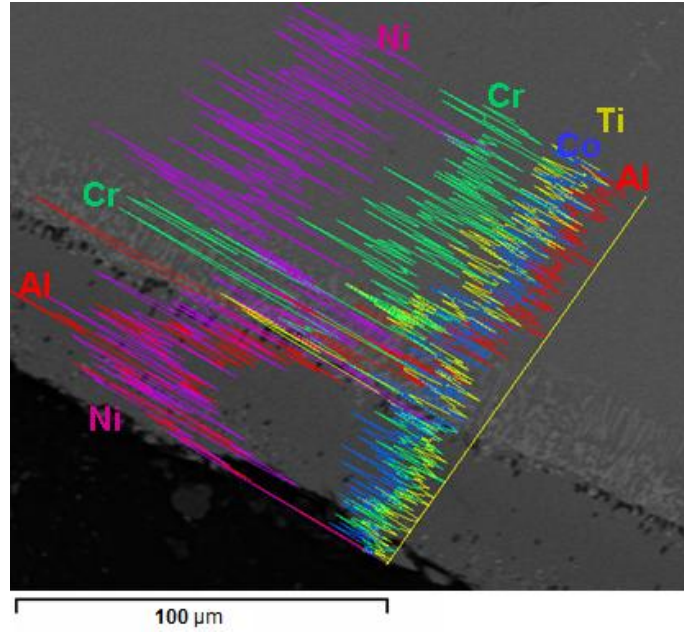
Haritalama analizi sonuçlarında değerlendirilmekte yarar görülen elementler olarak Al, Ni, Cr, Ti, Co, Mo, W, O seçilmiştir. Oksijen (O) normal şartlarda incelenen bir element olmamakla beraber eski paket yayılımı kaplama kalınlığı ilk yüzeyin dış bölge arasında siyah lekeler olarak görünen izler ile ilgili ipucu vermesi amacı ile ele alınmıştır.



Şekil 5.16 J79 kanatçık kaplama öncesi yayınım kaplama haritalama analizi sonuçları

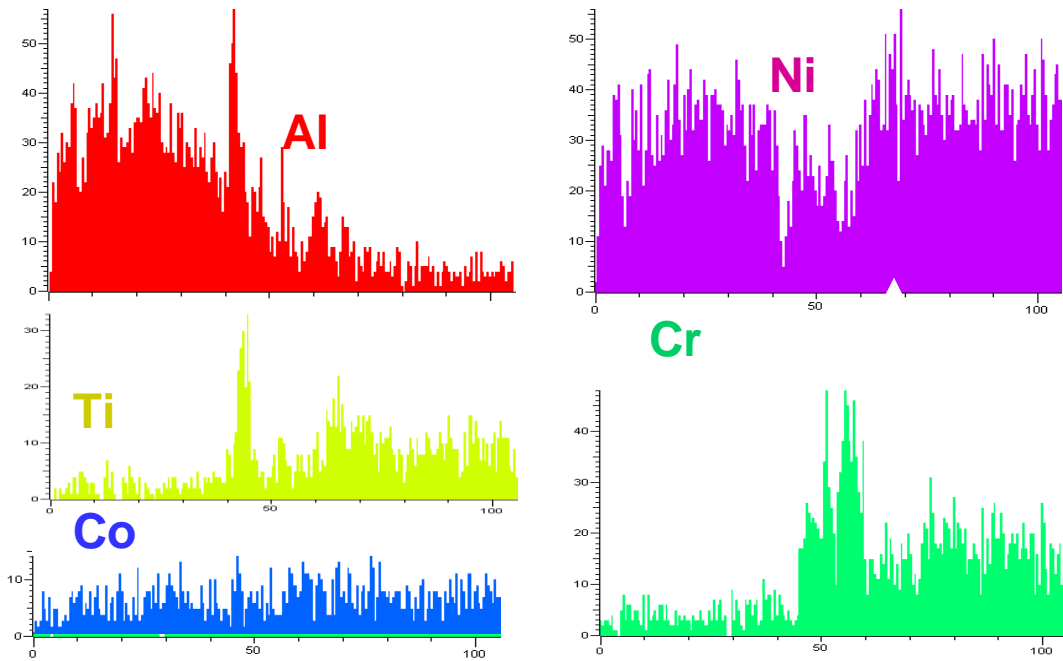
### 5.3.1.7 Kaplama öncesi J79 ikinci kademe sabit kanatçıklarında haritalama analizi ve elementlerin çizgi analizi

Kaplama öncesi J79 ikinci kademe sabit kanatçık numuneleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Numunelerdeki farklı bölgelere EDX kimyasal analizi uygulanarak elementlerin kütlece yüzdeleri belirlenmiş olup bu çalışmalar Ek Açıklamalar-C 'de verilmiştir. Alınan numunelerde çizgi analizi ve haritalama yapılarak element dağılımları incelenmiştir. Ayrıca, numunelerdeki kaplama öncesi elementlerin görüntüleri ve elementel dağılımları Şekil 5.17'de verilmiştir. Aynı görüntülerin farklı bir yaklaşımla kaplama bölgesinde ve ana malzemede element dağılımının çizgi analizi Ek Açıklamalar-D' de yer almaktadır. Analiz bölgesinde belirlenen hat boyunca kaplama kalınlığının dış bölgede 40 µm, iç bölgede 28 µm olduğu ölçümlenmiştir.



Şekil 5.17 J79 türbin ikinci kademe kullanılmış kaplamalı sabit kanatçıkta elementlerin çizgi analizi grafiği

Çalışmada her bir elementin belirlenen kaplama yüzeyine dik doğrusal bir yüzey kesiti boyunca elementlerin dağılımı Şekil 5.18’ de sunulmuştur.



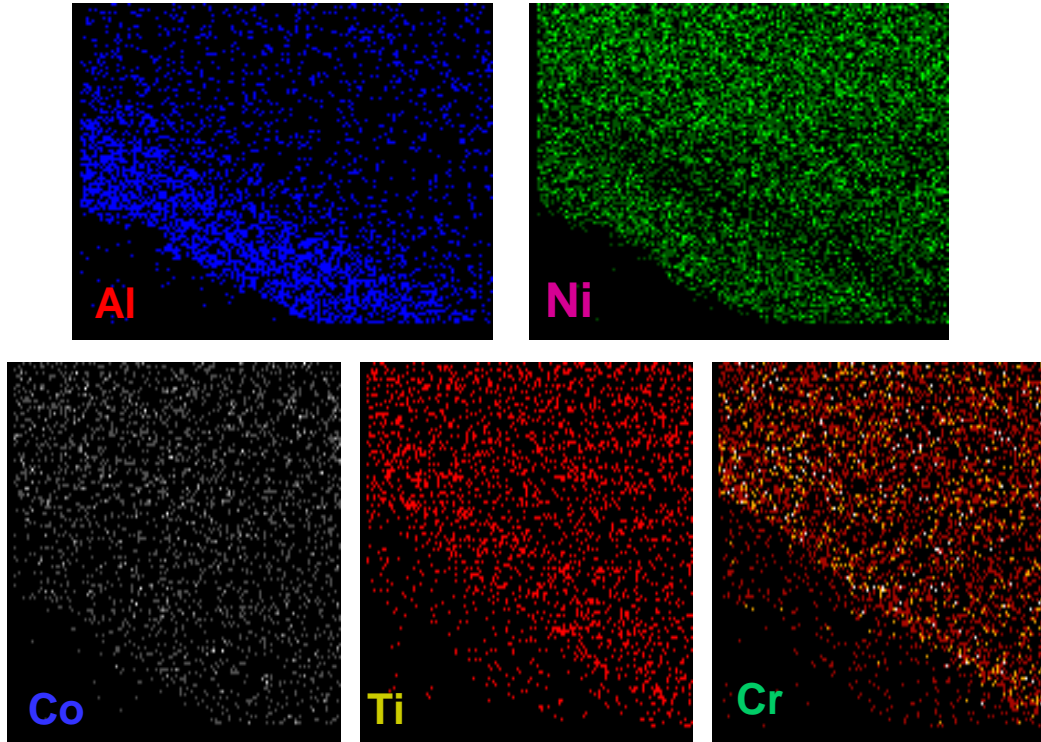
Şekil 5.18 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığın kullanılmış kaplamadaki elementlerin çizgi analizi sonucu grafikleri



Dış kaplamadaki alüminyum elementinin beklendiği şekilde yoğun olduğu, ilk yüzey bölgesindeki alüminyum elementinin yükselmesinin noktasal boşluk/heterojen dağılmadan kaynaklandığı düşünülmüştür. Nitekim aynı noktada nikel elementi mevcudiyetinin olmadığı, hatta titanyum elementinin de alüminyum element dağılımına benzer artmalar gösterdiği dikkat çekmektedir.

Nikel elementinin, ana malzemede alaşım elementi (nikel bazlı malzeme) olması sebebiyle, dış bölgede kaplama yayılımı sonucu çok yüksek olduğu, iç kaplama bölgesinde ise yoğunluğun azaldığı görülmüştür. Nikel elementi yoğunluğunun azaldığı iç bölgede ana malzemeden gelen kromu elementinde ciddi bir artış görülmektedir.

Numune kesitine uygulanan haritalama analizi ile elementel dağılım renkli olarak elde edilebilmiştir (Şekil 5.19). Haritalama analizinde de , çizgi analizinde görülen benzer elementel dağılımlar elde edilmiştir.



Şekil 5.19 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığının kaplama öncesi numunesinin haritalama analizi grafikler

### 5.3.2 Yeniden yapılan kaplama sonrası J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığı karakterizasyon sonuçları

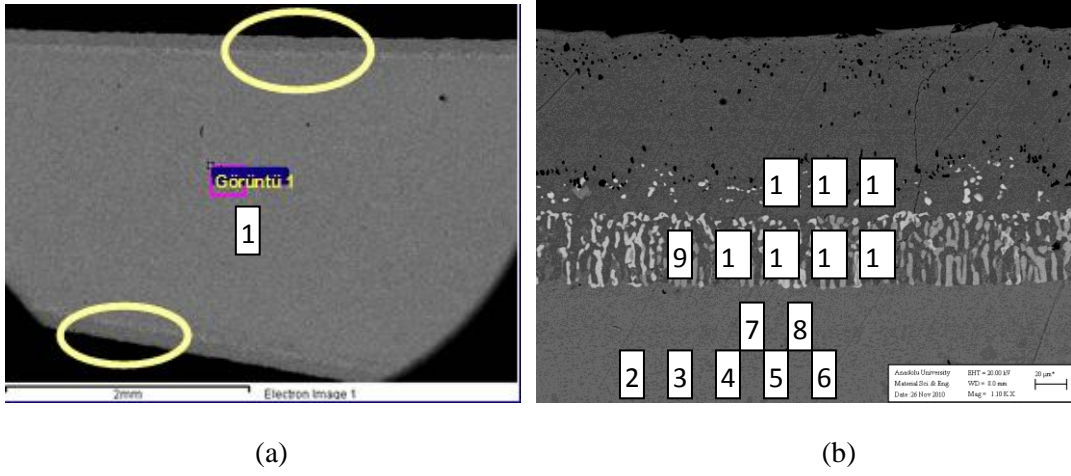
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile detaylı görüntüleri almak için, Rene 80 süperalaşımli J79 motoru ikinci kademe türbin sabit kanatçıklarının yeniden yapılan kaplama test numunesi kullanılmıştır (Şekil 5.20).



Şekil 5.20 Elektron mikroskobunda görüntüsü alınan test numune bölgesinin görüntüsü

Numune parça üzerinde farklı bölgelerde ve farklı ölçüm alanlarında (Spektrumlarda) elektron mikroskobu ile 16 ayrı görüntüleme (Şekil 5.21) ve EDX kimyasal analizleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda alınan değerler Çizelge 5.2'de derlenmiştir. Çizelgedeki element ağırlık yüzde değerlerindeki farklılık, ölçümlerin; numune malzemesinin farklı yerlerinden (ana malzeme (1), iç bölge (2-3-4-5-6), geçiş bölgesi (7-8), kaplama bölgesi (9-10-11-12-13-14-15-16), vb.), bu bölgelerdeki farklı malzeme yoğunluğunu gösteren bölgelerden (açık gri–koyu gri–beyaz) ve farklı kesit alanlarından alınmış olmasıdır.





Şekil 5.21 Yeniden yapılan kaplama sonrası J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçık test numunesi üzerinden alınan EDX analiz bölgeleri

Çizelge 5.2 Numune malzemede farklı bölgelerin EDX analizleri

Element	RENE 80	Görüntü															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ni	Kalan	58,6	58,3	57,7	59,8	56,1	76,8	47,7	51,2	16,6	21,8	17,9	56,6	60,9	54,2	60,5	60,3
Al	3	2,8	2,8	3	4	4,6	8	4,8	4,8	-	1,9	0,7	13,8	16,3	13,2	16,6	15,3
Cr	14	14,1	14,4	13,8	18,4	15,5	8,5	19	18,2	15,7	14,3	33,7	10,9	8,7	8,6	9,7	8,6
Co	9	9,7	8,7	9,3	8,4	10,3	-	13,8	10,3	7	5,9	10,7	8	8,7	7,5	8,2	8,7
Ti	4,7	5,2	5,9	5,4	4,3	4	6,7	3,4	5,1	3,7	3,5	0,7	3,7	4,2	3,2	3,5	3,6
Mo	4	4,4	4,7	4,9	5,2	4,1	-	5,2	5,1	27,4	24,1	19,8	2,1	1,2	5,1	1,4	2,1
W	4	5,3	5,3	6	-	5	-	6,1	5,2	29,6	28,5	16,6	5	-	8,3	-	1,4

Deneysel çalışmada elde edilen görüntü (Şekil 5.21 (b) ile Şekil 5.5 (Lang, 1983) karşılaştırıldığında; Şekil 5.5’de belirtilen “ilk yüzey hattı” Şekil 5.21(b)’de de aynı şekilde görülmüştür. Kaplamadaki boşlukların fazla olmadığı dikkati çekmiştir. Yaklaşık 80 µm’lik “iç bölge” olarak adlandırılan içe doğru yayılım kalınlığı ve 85 µm’lik “dış bölge” olarak adlandırılan dışa doğru yayılım kalınlığı ölçülmüştür.

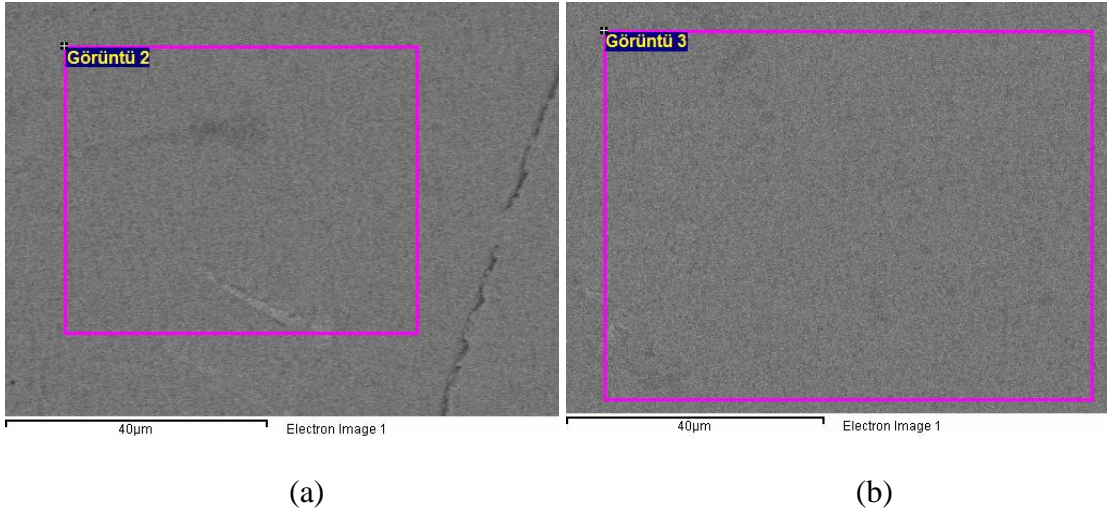
Yeniden yapılan kaplama sonrası oluşan dış bölgede ana malzemeden (alaşımdan) gelen Ni elementi, paketten gelen Al elementi ile reaksiyona girerek alüminyum bakımından zengin  $Ni_2Al_3$  oluşturmaktadır.

Şekil 5.21(b)'deki kaplama alanında "İç Bölge" olarak adlandırılan kesimin içerisinde, alaşım elementleri arasında dış bölgeye doğru yayılımı mümkün kılan Ni elementi bulunmaktadır. Bu sebeple NiAl içeriğinde Ni bakımından zengin  $AlNi_3$  oluşmaktadır. Ayrıca, aynı bölgede görülen çökelmeleri de içermektedir.

### **5.3.2.1 "Ana Malzeme Bölgesi" analizlerinin değerlendirilmesi (Görüntü 1-2-3-4-5-6)**

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan görüntü alma işleminde ilk olarak numune parçanın merkezinden (her iki kenara da eşit uzaklıktan) görüntü (Şekil 5.21(a)) alınmış ve ölçülen değerler Çizelge 5.2 Sütun 1'de verilmiştir. Elde edilen görüntüde, dış yüzeylerde (üst ve alt kenar) yaklaşık  $160\mu m$  kalınlıktaki kaplama bölgesi açıkça görülmektedir. Element atom ağırlık yüzdelerinin ölçüldüğü ölçüm alanı (spektrum) kesitin tam ortasında yer almakta olup  $280 \times 280 \mu m$ 'lik olan geniş bir bölgeye uygulanan alan analizidir. Çizelge 5.2'nin ilk sütunu "Rene 80" süperalaşımının element ağırlık referans değerlerini (Bkz. Ek Açıklamalar-A Çizelge A-1) göstermektedir. Kanatçık kesitinin merkezinden (her iki kenara eşit mesafeden) alınan ölçüm değerleri referans değerlere en yakın değerlerdir. Bu bölge kaplama işleminde yayınımdan en az etkilenen bölgedir.

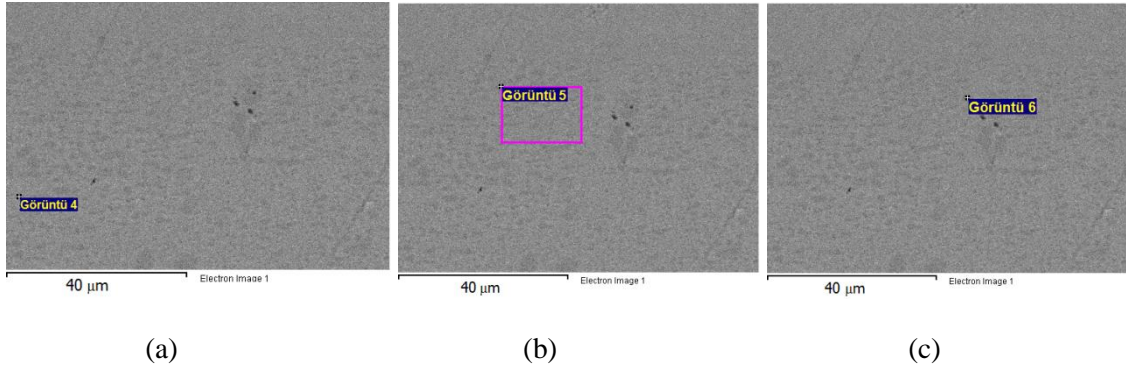
Takip eden görüntü alma işlemleri (Görüntü 2-3), paket sementasyon alüminit yayılımı kaplama bölgesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.21(b)). Ana malzeme üzerinde numunenin merkezinden kenarlara doğru, kesitin farklı noktalarında iki ayrı ölçüm alanı ( $60 \times 40 \mu m$  (2) ve  $75 \times 55 \mu m$  (3)) (Şekil 5.22) seçilerek gerçekleştirilmiştir. EDX analizi ile elde edilen element ağırlık yüzdeleri Çizelge 5.2'de (2) ve (3) sütununda verilmiştir.



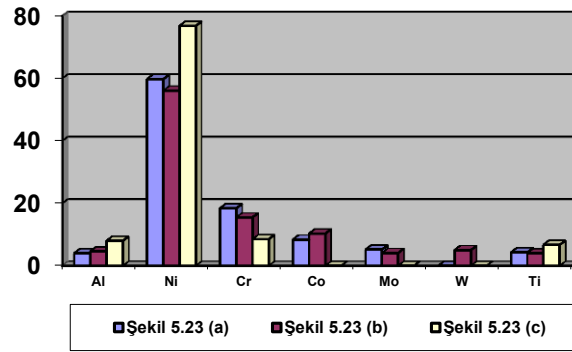
Şekil 5.22 Ana malzemenin (Altlıkta) (a) 60x40 $\mu\text{m}$  (Görüntü 2) ve (b) 75x55 $\mu\text{m}$  ölçüm alanı (Görüntü 3) görüntüleri.

Ana malzeme üzerinde, bölgede görülen açık-koyulu parçacık bölgelerinin, element ağırlık oranı sonuçlarına etkisini belirlemek amacı ile daha dar ölçüm alanları kullanılarak ölçüm yapılması ve dar/geniş ölçüm alanlarında (Şekil 5.21 (4), (5), (6)) elde edilen değerlerin irdelenmesi kararlaştırılmıştır.

İç kaplamaya komşu yayılım destek bölgesine (X-bölgesi) oldukça uzak (50 $\mu\text{m}$ ) bir noktada seçilen dar (1x1  $\mu\text{m}$ ) bir ölçüm alanında (Şekil 5.23(a)), X-bölgesine daha yakın (28 $\mu\text{m}$ ) ancak geniş bir ölçüm alanında (13x18 $\mu\text{m}$ ) (Şekil 5.23(b)), yine aynı mesafede (26 $\mu\text{m}$ ) seçilen küçük ölçüm alanında (1x1  $\mu\text{m}$ ) (Şekil 5.23(c)) elde edilen alan analizi sonuçları Çizelge 5.2’de Sütun 4-5-6 ve grafiklerle gösterimi Şekil 5.24’de verilmiştir. Şekil 5.23(c) noktasının seçilmesindeki bir diğer neden de, dar bölge ölçümlerinde bölgedeki farklı görünümdeki yapıların ölçüm değerine etkisini ortaya koymaktır.



Şekil 5.23 Ana malzeme bölgesi görüntüleri (Görüntü 4-5-6)



Şekil 5.24 Ana malzeme bölgesi elementleri ve ağırlık oranları grafiği

Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 ile ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda;

- Daha geniş ölçüm alanlarında elde edilen sonuçlarda (Şekil 5.22 ve Şekil 5.23(b));
  - Ni elementinin miktarının kaplamadaki yayılımı sonucunda azaldığı,
  - Ti, Mo, W'de Ni elementlerinin yayılımı sonucunda miktarlarında düşme olduğu,
  - Kaplama yayılımı nedeni ile, dışarıdan gelen Al elementi sonucunda kaplamaya yakın bölgede Al elementinin miktarının arttığı belirlenmiştir.
- Ancak, dar bölgede (1x1 µm - noktasal) yapılan EDX analizi sonuçları dikkate alınırsa, malzeme yapısı içindeki farklı element birikimleri ya da ölçüm / test için yüzey hazırlanırken bölgede kalan atıkların etkisi nedeni ile kararlı sonuçlar elde edilemeyeceği ortaya çıkmıştır. Öyle ki aynı malzeme içinden ölçüm yapılmasına

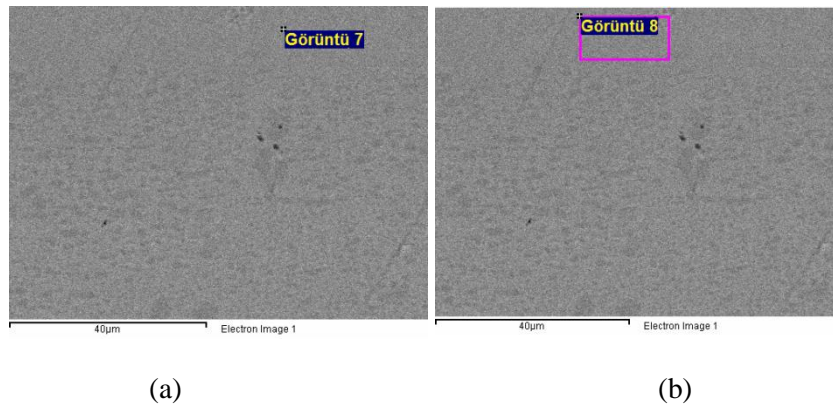
rağmen Çizelge 5.2 Sütun 6 ve Şekil 5.24'den de görüleceği üzere sadece Şekil 5.23(c) dikkate alınırsa Rene 80'de olması gereken değerlerden çok farklı sonuçlar elde edilmiş;

- Mo, Co, W gibi elementlerin ölçümlenemediği,
- Cr element ağırlık oranının düştüğü,
- Ni ve Al element ağırlık oranlarının beklenenin çok üzerinde olduğu görülmüş ve tez çalışmalarında değerlendirilmemiştir.

### 5.3.2.2 Ana malzemede kaplamaya komşu “Yayınım Destek Bölgesi (X Bölgesi)” analizlerinin değerlendirmesi (Görüntü 7-8)

Şekil 5.21 (b)'de; kalemsi-beyazımsı ve düzenli bir bant görünümündeki kaplama iç bölgesine komşu ana malzemenin üst kısmında “X Bölgesi” olarak adlandıracağımız 28  $\mu\text{m}$  kalınlıkta düzgün bir gri bölge bulunmaktadır. Yayınım Destek Bölgesi de denilen X bölgesinde elde edilen nokta ve alan analizlerinin görüntüleri Şekil 5.25'de, EDX kimyasal analizine göre element ağırlık oran değerleri ise Çizelge 5.2 Sütun 7-8 ve Şekil 5.26'da verilmiştir.

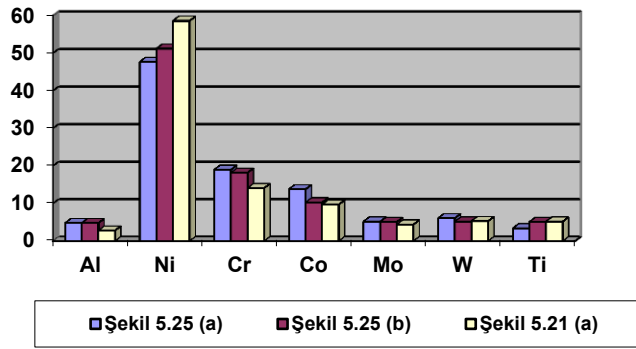
Şekil 5.25(a)'da verilen ölçüm işlemi yaklaşık  $1 \times 1 \mu\text{m}$ 'lik bir ölçüm alanında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.25(b)'de ise daha geniş bir ölçüm alanı ( $13 \times 23 \mu\text{m}$ ) kullanılmıştır.



Şekil 5.25 Ana malzeme nokta (a) ve alan (b) analizi görüntüleri (Görüntü 7-8)

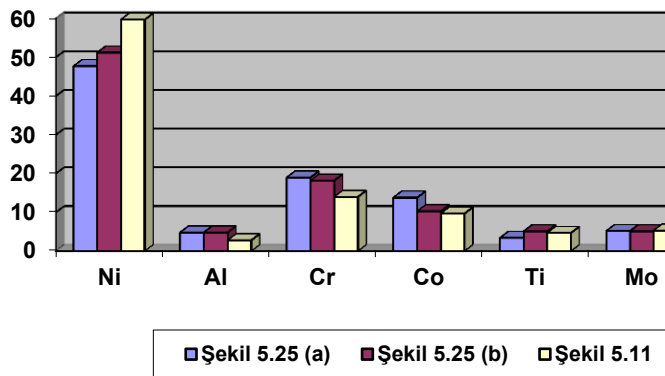
Şekil 5.25’de verilen görüntü ve EDX analizi sonuçları malzemenin merkezinden (ana malzemeden) alınan Şekil 5.21(a) sonuçları ile beraber değerlendirildiğinde X-bölgesinde;

- Al elementinin kütlece miktarının %2,8’den % 4,8’e yükseldiği ve dış bölgedeki alüminyumun önce iç bölgeye, buradan da ana malzemeye yayılım sonucu nüfuz ettiği,
- Ni elementi miktarının ise, ana malzemedeki nikel elementinin kaplama yüzeyine doğru yayılımı sonucunda % 58,6’dan % 47,7-51,2’ye düştüğü, belirlenmiştir..



Şekil 5.26 X bölgesindeki elementler ağırlık oranları grafiği

X-bölgesinin kaplama öncesi görüntüsü ve EDX analizi sonucu Şekil 5.11’de ve Çizelge 5.1’de verilmiştir. Kaplama sonrası aynı bölgeden elde edilen veriler ile beraberce değerlendirildiğinde, kaplama öncesi ve sonrası kanatçıkların element ağırlık oran değerlerinde farklılıklar dikkati çekmiştir (Şekil 5.27).



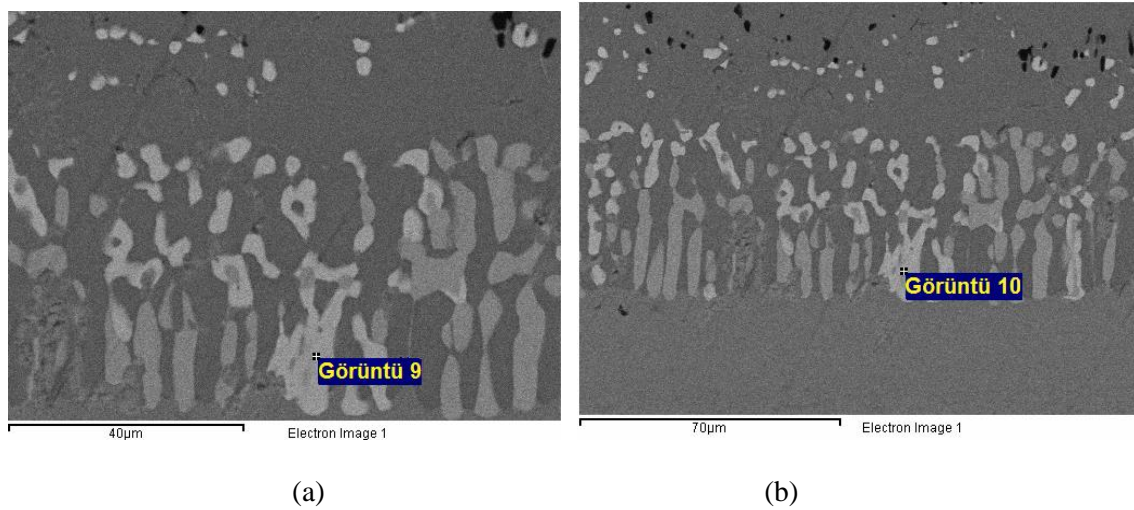
Şekil 5.27 Kaplama öncesi ve sonrası X-Bölgesi element ağırlık oranları grafiği

### 5.3.2.3 “İç Bölge” (Düzgün Bant İçi) analizlerinin değerlendirilmesi (Görüntü 9-10-11-12-13)

İç bölge, ana malzeme yayının destek bölgesinin (X-bölgesinin) hemen üstünde yer alan bant şeklinde çubuk benzeri kesitli parçacıklardan oluşan bir bölgedir (Şekil 5.21(b)). Elementler yığılma bölgelerine göre farklı renk tonları ile görüntülenmiştir. Bu yapının yorumlanması amacıyla farklı renk tonları üzerinde seçilen nokta analizleri (Görüntü 9-10-11-12-13) yapılmıştır.

En açık renkli yapılarda gerçekleştirilen iki farklı ölçüm ve görüntüde (Şekil 5.28) (Çizelge 5.2 Sütun 9-10);

- Alüminyum elementine Şekil 5.28(a)'da rastlanmamıştır. Ölçüm alanının yaklaşık 2 kat büyüdüğü Şekil 5.28(b)'de ise çok az miktarda (element ağırlık oranı % 1,9) olduğu saptanmıştır.

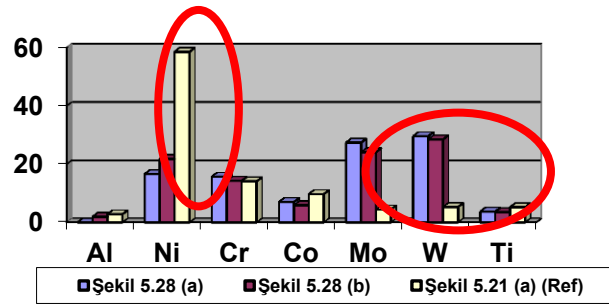


Şekil 5.28 İç bölgede açık renkli parçacıkların görüntüsü (Görüntü 9-10)

- Nikel elementinin bütün ölçümlerde elde edilen en az element ağırlık oran değerlerinde (% 16,6 - % 21,8') olduğu belirlenmiştir.
- Ancak aynı açık renkli bölgede Mo ve W elementlerinin ağırlık oranları ise (Mo: %27,4 - %24,1; W: %29,6 - %28,5') en yüksek değerlerdedir.

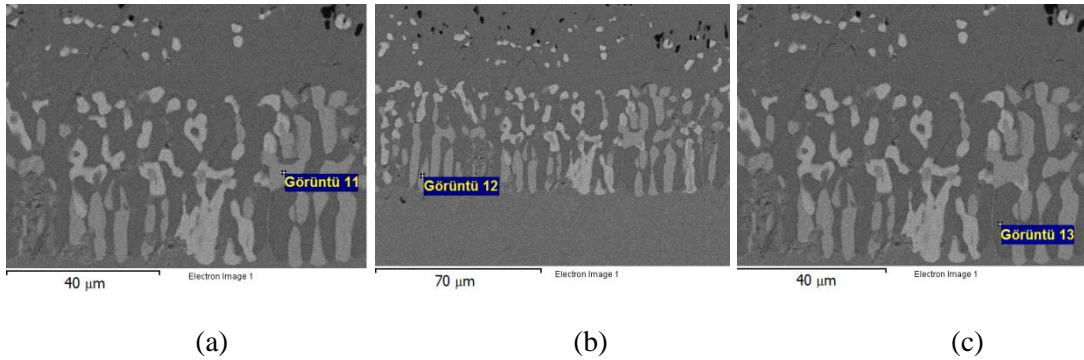


Elde edilen bu sonuçlara göre EDX analizi uygulanan en açık renk yapıların Mo ve W ağırlıklı yapıların görüntüsü olduğu belirlenmiştir. EDX analizi sonuçlarına göre elde edilen grafik Şekil 5.29’da verilmiştir.



Şekil 5.29 İç bölge açık renk görünümlü yapı element ağırlık oranları grafiği

Düzensiz bant görünümlü iç bölgede gri tonlarındaki yapılarda EDX analizleri yapılmıştır (Şekil 5.30). Elde edilen değerler Çizelge 5.2 Sütun 11-12-13 ve Şekil 5.31’de grafik formunda gösterilmiştir.



Şekil 5.30 İç bölgede gri renkli yapıların görüntüsü (Görüntü 11-12-13)

- Açık gri yapıda yapılan ilk EDX analizi ve görüntüleme sonucunda (Şekil 5.30(a)), (Çizelge 5.2 Sütun 11);
  - Ni element ağırlık oranının % 17,9’ ile düşük değerlerinden biri olduğu,
  - Al element ağırlık oranının da % 0,7’ ile düşük değerlerde olduğu,

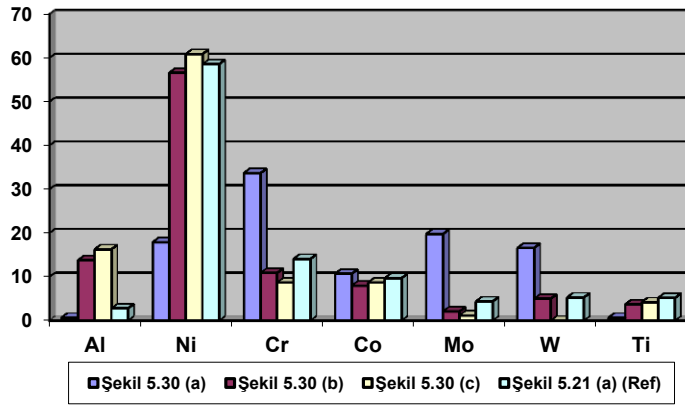


- Cr element ağırlık oranının ise % 33,7' ile en yüksek değerinde olduğu,
  - Farklılık gösteren diğer bir ayrıntının ise, Mo element ağırlık oranının %19,8', W element ağırlık oranının ise %16,6' ile yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir.
- İç bölgenin ana malzemeye yakın kesiminde 70 $\mu$ m'lik ölçüm referansında farklı tondaki gri yapıda ikinci bir EDX analizi yapılmıştır (Şekil 5.30(b)). Ölçüm sonucunda (Çizelge 5.2 Sütun 12);
- Al element ağırlık oranının %13,8' ile oldukça yüksek olduğu,
  - Ni element ağırlık oranının % 56,6' ile ortalama değere yakın olduğu,
  - Cr element ağırlık oranının % 10,9' ve Co atom ağırlık oranının % 8' ile düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir.

Bu sonuçlardan; EDX analizi uygulanan gri bölgenin alüminyum ağırlıklı bir bölge olduğu değerlendirilmiştir.

- İç bölgedeki düzgün kümelenme bandının ana malzemeye yakın bölgesinde koyu gri alanda farklı bir noktada yapılan EDX kimyasal analizinde Şekil 5.30(c)'de verilmiştir. EDX sonuçlarına göre (Çizelge 2 Sütun 13);
- Al element ağırlık oranının % 16,3' ile EDX analizinde tespit edilen en yüksek değerlerden biri olduğu,
  - Ni element ağırlık oranı % 60,9' ile bu bölgede ölçülen en yüksek değerine ulaştığı,
  - Cr element ağırlık oranının % 8,7' ile normalin çok altında olduğu,
  - Mo element ağırlık oranının %1,2' ile en düşük değerine sahip olduğu,
  - W elementine ise rastlanmadığı belirlenmiştir.

Buna göre, iç yayılım bölgesinde; elementler arasında oluşan farklı çökelmelerin oluşturduğu heterojen yapıdan dolayı farklı renk yapıları / farklı element yoğunluklarının bulunduğu ve bu bölgede yapılan EDX analizleri sağlıklı bir referans olmamaktadır.



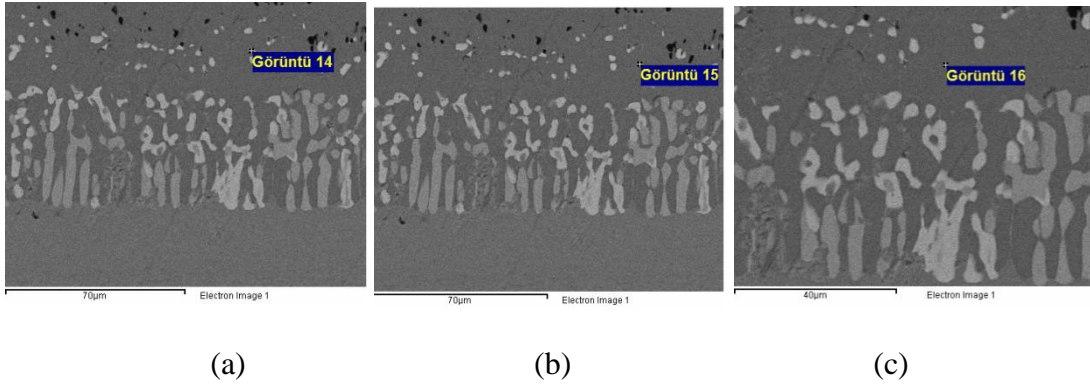
Şekil 5.31 Düzgün bant iç bölge gri yapı elementleri ve ağırlık oranları grafiği

Alınan nokta analizi sonuçlarının ağırlık oranı değerlerinde sapmalar görülmektedir. Taramalı Elektron mikroskobu ile yapılan ölçme işlemlerinin doğası gereği ölçüm yapılan görüntü yüzeyindeki renk / element farklılığı beklentisi doğaldır. Ancak aynı renk tonunda iki gri noktanın ölçümünde farklı değerler elde edilmesi, yüzeyde görülmemesine rağmen elektron mikroskoplarında “demet genişlemesi” etkisi nedeni ile yalnızca gölgeden değil, izlenen noktanın altındaki “demet genişlemesi”ndeki diğer elementlerin de ölçümlenmesinin sonucudur (Goldstein, 2003).

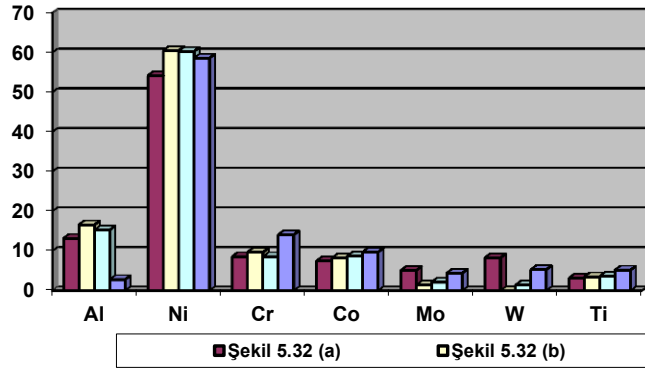
#### 5.3.2.4 İç bölge (Düzgün Bant Üstü) “İlk Yüzey” analizlerinin değerlendirilmesi (Görüntü 14-15-16)

İç bölgede, düzgün kümelenme bandı ile ilk yüzey arasında kalan bölgede yapılan SEM çalışmaları Şekil 5.32’de verilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Çizelge 5.1 Sütun 14-15-16’da ve Şekil 5.33’de grafik halinde sunulmuştur. Buna göre;

- Ni element ağırlık oranı % 54,2-60,5’ ve Al element ağırlık oranı % 13,2-16,6’ ile Ni ve Al elementi yönünden yoğundur.
- Kaplama işleminden ilk etkilenen bölgedir. Ni ve Al elementlerinin yoğunluğu sonucu diğer elementlerde belirgin bir azalma görülmektedir. Dikkat çeken azalma ise Cr elementindedir.



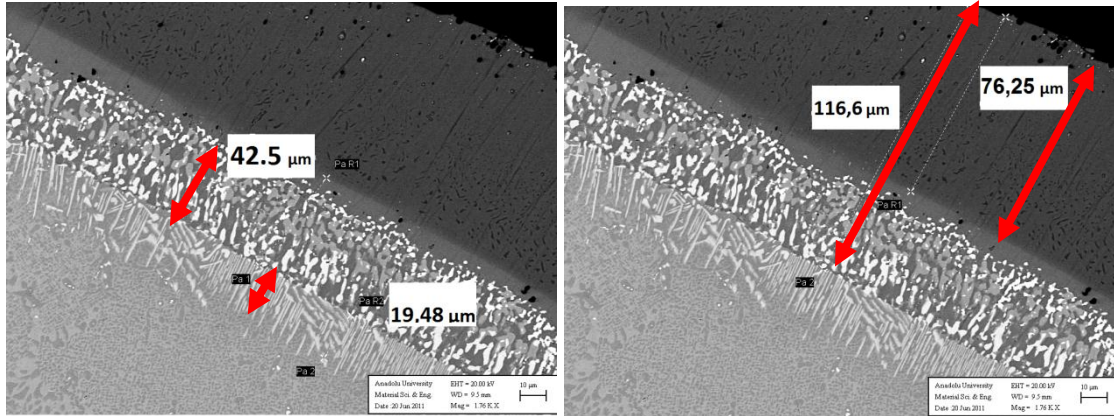
Şekil 5.32 İç bölge ilk yüzey düzgün bant üstü görüntüleri (Görüntü 14-15-16)



Şekil 5.33 İç bölge düzgün bant üstü- ilk yüzey element ağırlık oranları grafiği

### 5.3.2.5 Yeniden yapılan kaplama sonrası kalınlık ölçümü

Yeni kaplanmış kanatçık kesiti (Şekil 5.34) üzerinde yapılan ölçümlerde ise paket sementasyon alüminit yayılımı kaplama kalınlığının  $116,6\mu\text{m}$ ' olduğu, dış bölgedeki kaplama kalınlığının  $76,25\mu\text{m}$ ' olduğu tespit edilmiştir.

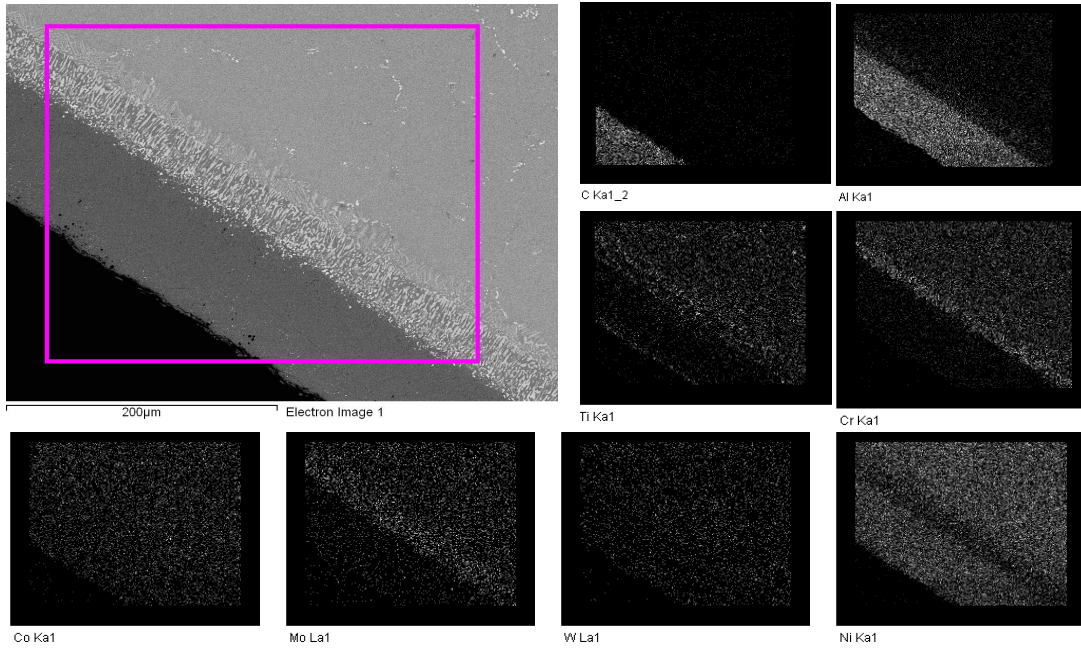


Şekil 5.34 Yayınım kaplama kalınlık ölçümleri

### 5.3.2.6 J79 kanatçığı yeniden yapılan kaplama sonrası “Haritalama” analizlerinin incelemesi

Yeniden kaplama yapılmış J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçık üzerinde  $320 \times 260 \mu\text{m}$ ,  $140 \times 105 \mu\text{m}$  ve  $67 \times 44 \mu\text{m}$ 'lik üç ayrı haritalama alanı belirlenmiştir.

Şekil 5.35'deki  $320 \times 260 \mu\text{m}$ 'lik analiz alanındaki haritalama analizinde, yoğunluk değerlendirmesi uygun görülen elementler C, Al, Ti, Cr, Co, Ni, Mo, ve W olarak planlanmıştır. Görüntü alanında kaplama alanının tümü görülebilmektedir. Ana malzeme, görüntünün sağ üst tarafında açık gri bölgedir. Görüntünün sol alt tarafında yer alan koyu üçgen ise hava boşluğudur. Koyu gri düzgün şerit görünümündeki bölge yaklaşık  $80 \mu\text{m}$ ' olup, paket yayılım kaplama dış bölgeyi oluşturmuştur.

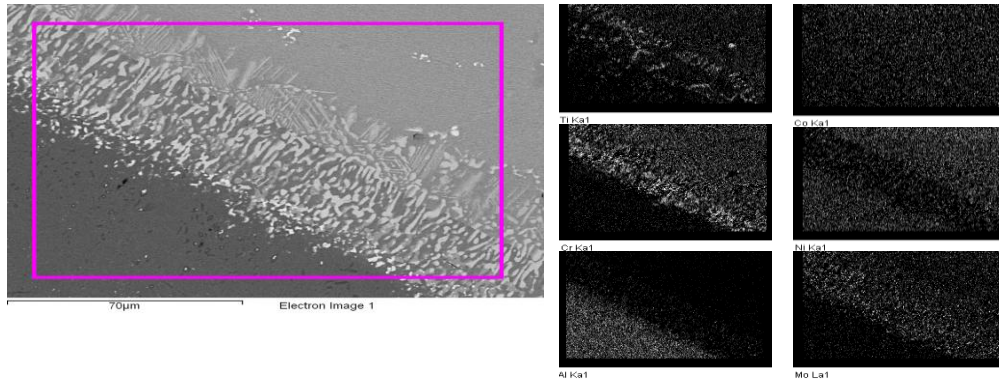


Şekil 5.35 J79 yayınımlı kaplama sonrası (320x260µm’lik görüntü alanı) haritalama analizi

Şekil 5.35’de “ilk yüzey” düz bir hat olarak görülmektedir. İlk yüzey ile ana malzeme arasında noktalı ve çizgili benekli şerit yaklaşık 55’µm olup içe yayınımlı ile ilgili iç bölgeyi göstermektedir. Kullanılmış kaplamanın kalınlığı 36–47µm’ iken, yeniden kaplanmış J79 türbin sabit kanatçığındaki kaplama kalınlığı 120–136µm’ arasındadır. Yapılan kaplama ile;

- Kaplama kalınlığının arttığı,
- Malzeme yapısında süreklilik sağlandığı,
- Mikroyapının homojen olarak yeniden yapılandırıldığı belirlenmiştir.

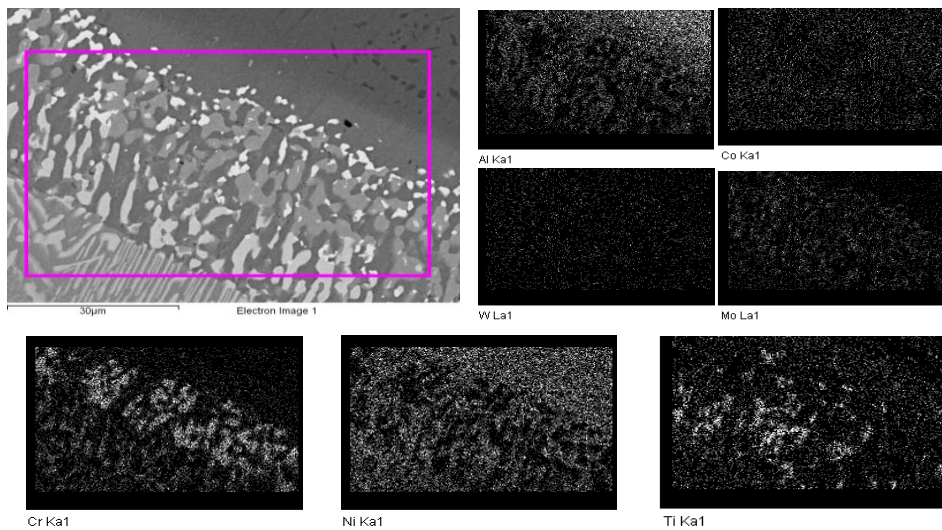
Şekil 5.36’da yeniden kaplanmış J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığının 140x105µm’lik analiz alanı ile elde edilen haritalama analiz sonuçları verilmiştir. Görüntü alanının sol altında koyu gri üçgen bölge, dışa yayınımlı olduğu paket yayınımlı kaplama dış bölgesidir. Görüntü alanının sağ üst kesiminde homojen açık gri görünümü ise ana malzemeyi temsil etmektedir.



Şekil 5.36 J79 yeniden yapılan yayınım kaplama sonrası ( $140 \times 105 \mu\text{m}$ 'lik görüntü alanı) kanatçık haritalama analizi

Koyu gri alan ile beyazlı noktacık ve çubuk görünümlü kısım arasında ilk yüzey yer almıştır. Noktacıkların ve çubukların oluşturduğu bölge, içe doğru yayınının gerçekleştiği paket yayınım kaplama iç bölgesini oluşturmaktadır. Haritalama analizinde önemsenen elementler olarak da Ti, Cr, Co, Ni, Al ve Mo elementleri belirlenmiştir.

Şekil 5.37'de J79 ikinci kademe sabit kanatçığında, analiz alanı  $67 \times 44 \mu\text{m}$ ' olarak daha dar bir alan seçilmiştir. Bu alan değerlendirilirken, iç yayınım alanı ile ilgili iç bölgenin ilk yüzeye komşu alanı ve dış yayınım ile ilgili dış bölge kısmen ele alınmıştır. Haritalama analizinde ele alınan elementler de Al, Ti, Cr, Co, Ni, Mo, W elementleridir.

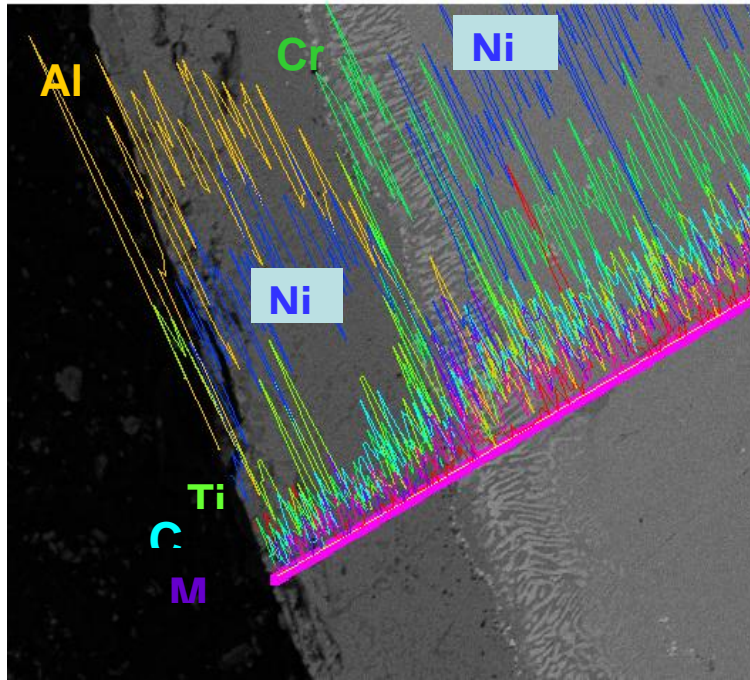


Şekil 5.37 J79 yeniden yapılan kaplama sonrası ( $67 \times 44 \mu\text{m}$ 'lik görüntü alanı) haritalama analizi



### 5.3.2.7 Yeniden yapılan kaplama sonrası J79 ikinci kademe sabit kanatçık üzerinde “Haritalama Analizi” ile “Çizgi Analizi” nin incelenmesi

J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçık dış yüzeyin yeniden yapılan kaplama sonrası numune kesitinden alınan görüntü incelendiğinde (Şekil 5.38); dış bölge kaplama kalınlığının 55  $\mu\text{m}$ , iç bölge kaplama kalınlığının 30  $\mu\text{m}$  olduğu ölçülmüştür.

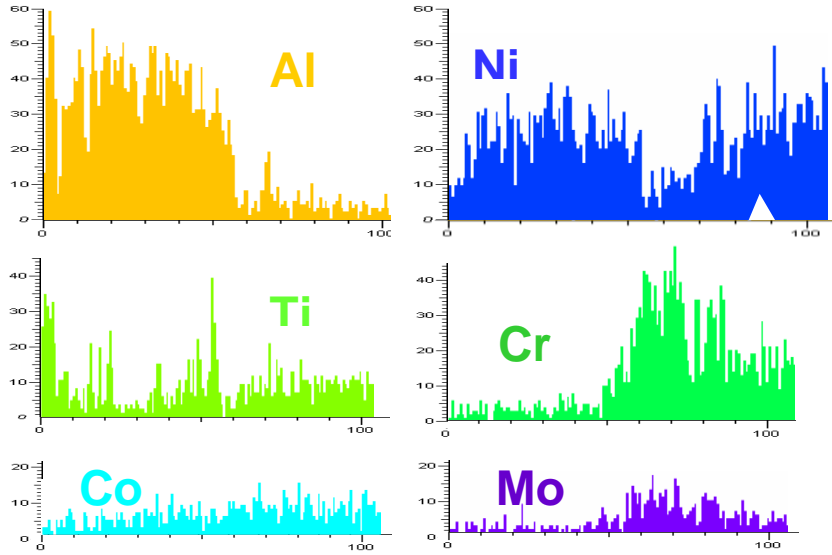


Şekil 5.38 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığın yeniden yapılan kaplama sonrası elde edilen çizgi analizi sonucu grafiği

Belirlenen, kaplama yüzeyine dik doğrultuda uygulanan çizgi analizi sonucunda (Şekil 5.39) beklendiği şekilde;

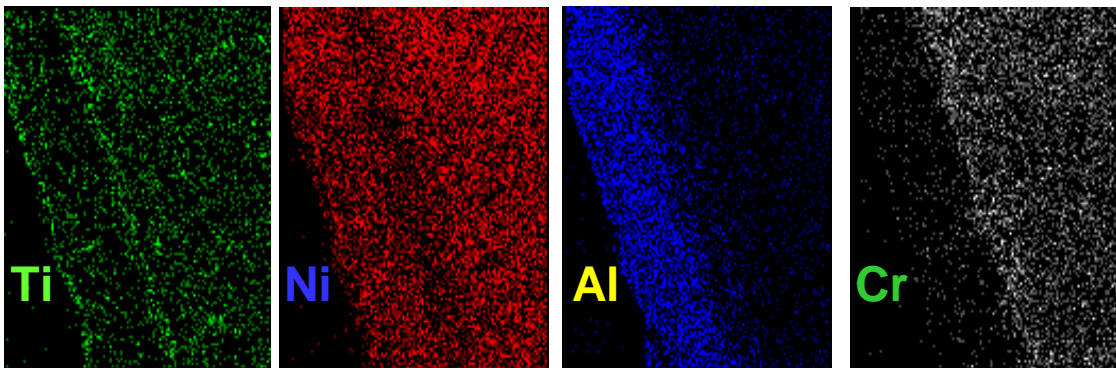
- Alüminyum elementinin dış yüzeyde yüksek, nikel elementinin iç bölgede düşük, nikel elementinin iç bölgedeki boşluğunun krom ve molibden elementleri ile doldurulduğu çizgi analizi sonuçlarında görülmektedir.
- Kobalt elementi iç ve dış bölgede yakın miktarlardadır.

- Kaplama sonrası dış bölgenin uç kenarında titanyum ve alüminyum elementlerinde ince bir hat boyunca yükselme, aynı hatta nikel elementinde ise azalma gözlenmiştir.



Şekil 5.39 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığının yeniden yapılan kaplama sonrası elde edilen çizgi analizi sonucu grafiği

Bölgenin haritalama analizinde (Şekil 5.40), kesitten elde edilen element dağılımının, çizgi analizine uyumlu gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 5.40 J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığının yeniden yapılan kaplama sonrası elde edilen haritalama analizi sonucu grafikleri



### 5.3.3 J79 motoru “Türbin İkinci Kademe Sabit Kanatçıkları”nın, yeniden paket sementasyon alüminit yayılım kaplama öncesi ve sonrası analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

J79 motoru türbin 2. kademe sabit kanatçığının “Paket Sementasyon Alüminit Yayılım Kaplama” öncesinde (Bkz. Çizelge 5.1) ve yeniden yapılan kaplama sonrasında (Bkz. Çizelge 5.2) element ağırlık oranları karşılaştırıldığında;

- Ana malzeme element ağırlık oranlarında;
  - Nikel ve alüminyum elementinde değişim görülmediği,
  - Krom, titanyum, molibden ve volfram elementlerinde küçük artış olduğu,
  - Kobalt elementinin ağırlık oranında ise az miktarda düşme olduğu belirlenmiştir.
- X-yayılım destek bölgesinde element ağırlık oranlarında;
  - Nikel elementi miktarının % 59,7’den % 48’e düştüğü,
  - Alüminyum elementi miktarının % 2,8’den % 4,8’e yükseldiği,
  - Krom elementi miktarının % 14’den % 18,6’ya yükseldiği,
  - Kobalt elementi miktarının % 9,7’den % 12’ye yükseldiği,
  - Titanyum elementi miktarının % 4,7’den % 4,3’e düştüğü,
  - Molibden elementi miktarının %5,3’den %5,2’ değerine az bir miktarda düştüğü,
  - Titan elementi miktarının ise %4,1’den %5,6’ya yükseldiği görülmüştür.

### 5.3.4 J79 motoru türbin sabit kanatçığının kullanılmış kaplamada ve yeniden yapılan kaplama sonrası “çizgi analizi sonuçlarının” değerlendirilmesi

J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçığının kaplama öncesi (Bkz. Şekil 5.17) ve yeniden yapılan kaplama sonrası (Bkz. Şekil 5.38) çizgi analizi sonuçlarına göre;

- Kaplama öncesi analizlerde (Bkz. Şekil 5.17, Şekil 5.18);

- Ana malzeme bölgesinde, nikel, kobalt, krom, titanyum ve alüminyum elementlerinin kararlı element ağırlık oranlarına sahip oldukları,
- İç yayınım bölgesinde krom elementinin nikel elementinden yüksek olduğu, yer yer alüminyum ve titanyum elementlerinde yükselme ve düşmeler gösterdiği, nikel elementi dışındaki elementlerdeki yükselmeler sonucu nikel elementi miktarının düştüğü,
- Dış yayınım bölgesinde ise, krom, kobalt ve titanyum elementlerinin ana malzemede bulunan elementlerde ağırlık oranlarının düşük ancak dengeli oranda bulunduğu, nikel ve alüminyum elementlerinin element ağırlık oranlarının birbirine eşdeğer şekilde artıp azaldığı ve faz diyagramındaki tek tip nikel-alüminyum alaşımı fazlarından birinin mevcut olduğu belirlenmiştir.
- Kaplama sonrası görüntüde (Bkz. Şekil 5.38 ve Şekil 5.39);
  - Ana malzeme bölgesinde element ağırlık oranlarının dengeli ve nikel elementinin en yüksek ağırlık oranına sahip olduğu ve onu takip eden krom elementinin olduğu, alüminyum, titanyum, kobalt ve molibden elementlerinin yakın değerlerde ve kararlılık gösterdikleri,
  - X-bölgesinde element ağırlık oranlarının; krom elementinin nikel elementi ile ters orantılı olarak ani bir yükseliş gösterdiği, diğer elementlerde ise kısmi yükselme olduğu,
  - İç yayınım bölgesinde iç yayınımın kanıtı olarak krom elementinde ani yükselme, kobalt ve alüminyum elementlerinin ağırlık oranlarında kısmi yükselme ve titanyum elementinde noktasal sıçramalı yapılanma görüldüğü,
  - Dış yayınım bölgesinde alüminyumun elementinin element ağırlık oranında nikel elementine oranla bir yükselme görüldüğü, titanyum elementinin en uç nokta dışında ana malzemede element ağırlık oranının altında kaldığı, kromun ve molibden elementlerinin var olduğu fakat yüksek ağırlık oranlarına sahip olmadıkları gözlemlenmiştir.

Kullanılmış kaplamada (Bkz. Şekil 5.17) ve yeniden uygulanan kaplama sonrasındaki (Bkz. Şekil 5.38) haritalama analizi, Şekil 5.19 ve Şekil 5.40 ile beraber irdelendiğinde alınan değerlerin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kullanılmış kaplamada yayınının yer aldığı iç yayınım bölgesinde nikelin element dağılımının minimum olduğu durumlarda, krom ve titanyum elementlerinin miktarlarında aşırı bir artış izlenmiştir.

Kullanılmış kaplamaya ait çizgi analizi sonucunda (Şekil 5.17) Ti ve Al elementlerinin sıçrama yaptığı bir bölüm yer almıştır. Aynı şekilde, kaplama sonrası çizgi analizinde de (Şekil 5.38) dış yayınım uç noktasında alüminyum elementinin yanı sıra yoğun titanyum elementi dağılımı görülmüştür. Bu birikintinin alüminyum ve titanyum elementlerinin  $Ti_3Al$  bileşiği olabileceği, titanyum-alüminyum faz diyagramından belirlenmiştir.

#### **5.4 J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçıklarının karakterizasyon sonuçları**

Deneilerin yapıldığı tesiste daha önce hiç kaplanmamış J85 türbin hareketli kanatçık üzerinde yapılan kaplama deneyleri ve testlerinde öncelikle ana malzeme sınıfının saptanması/doğrulanması amacıyla; üretimi esnasında hiç kaplanmayan ve bu nedenle de ana malzeme ile ilgili en yakın bilgiyi verebilecek olan, kanatçığı türbin rotoruna bağlayan ve kurtağzı olarak adlandırılan bölümden SEM ile incelenmesi ve element ağırlık oranlarının referans değerler olarak kabulü kararlaştırılmıştır.

##### **5.4.1 Hareketli kanatçık “Kurtağzı Bölümü”nün incelenmesi**

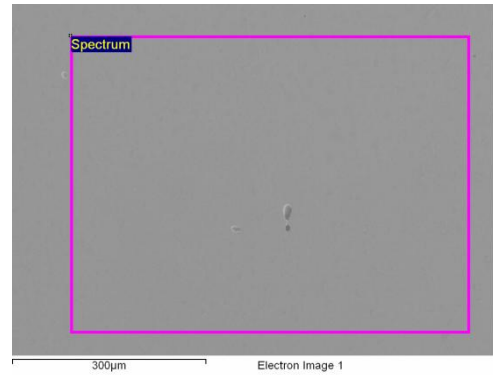
J85 motorunda ikinci kademe hareketli kanatçığı türbin rotoruna bağlayan kurtağzı kesiminin görünümü Şekil 5.41’da verilmiştir.



Şekil 5.41 J85 motorunda kanatçığı türbin rotoruna bağlayan kurtağzı kesimi görüntüsü

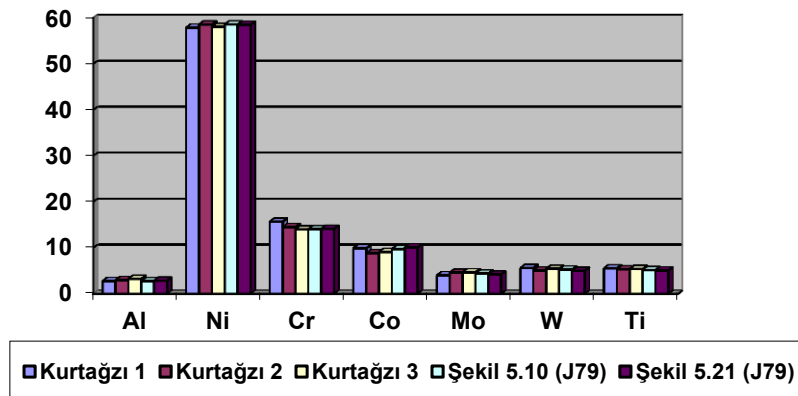
3 ayrı noktaya taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile EDX analizi uygulanmıştır. Elde edilen değerler Şekil 5.42’de verilmiştir. Görüntülerde mikro yapıda süreksizlik tespit edilmemiştir.

Element	Ağırlık %		
	1	2	3
Al	2,79	2,99	3,26
Ti	5,56	5,35	5,40
Cr	13,69	14,54	14,02
Co	9,92	8,84	9,11
Ni	57,92	58,60	58,07
Mo	4,03	4,61	4,69
W	5,62	5,06	5,45



Şekil 5.42 Kurtağzı bölgesi görüntüsü ve element ağırlık oranları

J85 kurtağzı alanından EDX analizi sonuçları ile J79 motorlarındaki Rene 80 döküm esaslı süperalaşım EDX analizi sonuçları (Şekil 5.10, Şekil 5.21 ve Şekil 5.42) tek bir grafik üzerinde görülmektedir (Şekil 5.43).



Şekil 5.43 J85 hareketli ve J79 hareketsiz kanatçık element ağırlık oranları grafiği

Şekil 5.43 ve element analizlerinin verildiği Çizelge 5.3 değerlendirildiğinde, J79 gaz türbini ikinci kademe sabit kanatçığı ile J85 gaz türbini türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının ana malzemelerinin aynı olduğu (nikel bazlı döküm esaslı Rene 80) belirlenmiştir.

Çizelge 5.3 RENE serisi süperalaşım ile Kurtağzı bölgesi element ağırlık oranlarının karşılaştırması

	Ni	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti
<b>RENE 80</b>	<b>60,0</b>	<b>14,0</b>	<b>9,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>
<b>RENE 77</b>	58,0	14,6	15,0	4,2	-	3,3	-
<i>J85 KURTAĞZI -1</i>	<i>57,9</i>	<i>13,7</i>	<i>9,9</i>	<i>4,0</i>	<i>5,6</i>	<i>2,8</i>	<i>5,6</i>
<i>J85 KURTAĞZI -2</i>	<i>58,6</i>	<i>14,5</i>	<i>8,8</i>	<i>4,6</i>	<i>5,1</i>	<i>3,0</i>	<i>5,3</i>
<i>J85 KURTAĞZI -3</i>	<i>58,1</i>	<i>14,0</i>	<i>9,1</i>	<i>4,7</i>	<i>5,5</i>	<i>3,3</i>	<i>5,4</i>

J85 motorunda ikinci kademe hareketli kanatçıkta kaplama öncesi ve sonrası, kaplama bölgesindeki element hareketlerinin incelenmesi amaçlı deneyler; kurtağzına yakın kısmında, uca nispetle kalınca ve aerodinamik profil görünümüne sahip kök (airfoil root) bölgesinin ve hareketli kanatçığın ince olan ve kurtağzı ile zıt istikamette bulunan kanatçık uç (airfoil tip) kesiminin incelenmesi, görüntü ve EDX analizlerinin uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

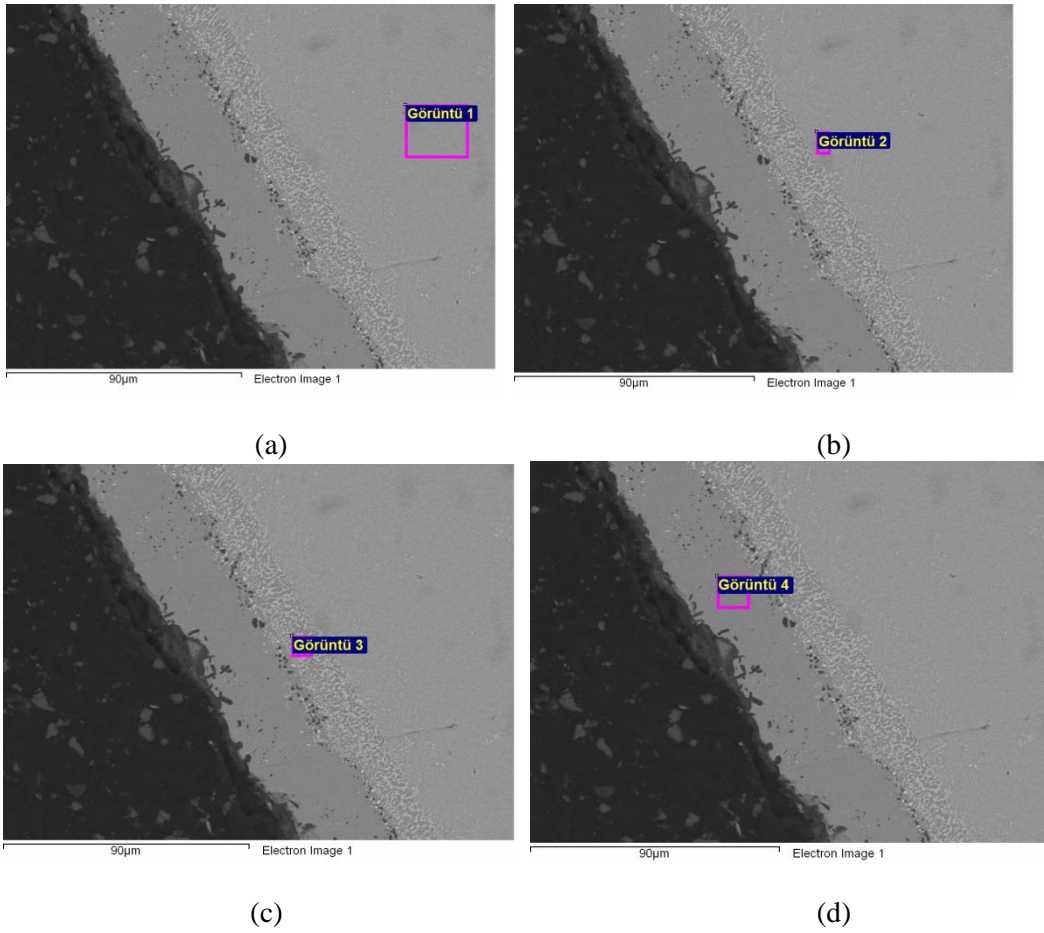
#### 5.4.2 J85 motoru ikinci kademe hareketli kanatçık kullanılan kaplama karakterizasyon sonuçları

##### 5.4.2.1 “Kök Bölümü”nün kaplama öncesi incelenmesi

J85 motoru ikinci kademe hareketli kanatçıkta kaplama öncesi kullanılan kaplamanın durumunun değerlendirilmesi amacı ile kanatçığın kök bölümünde (Şekil 5.44) dört ayrı bölgeden yapılan incelemeler Şekil 5.45’de, elde edilen analizler Çizelge 5.4’de ve Şekil 5.46’da verilmiştir.



Şekil 5.44 J85 motorunda ikinci kademe hareketli kanatçığın “Kök Bölümü” görüntüsü

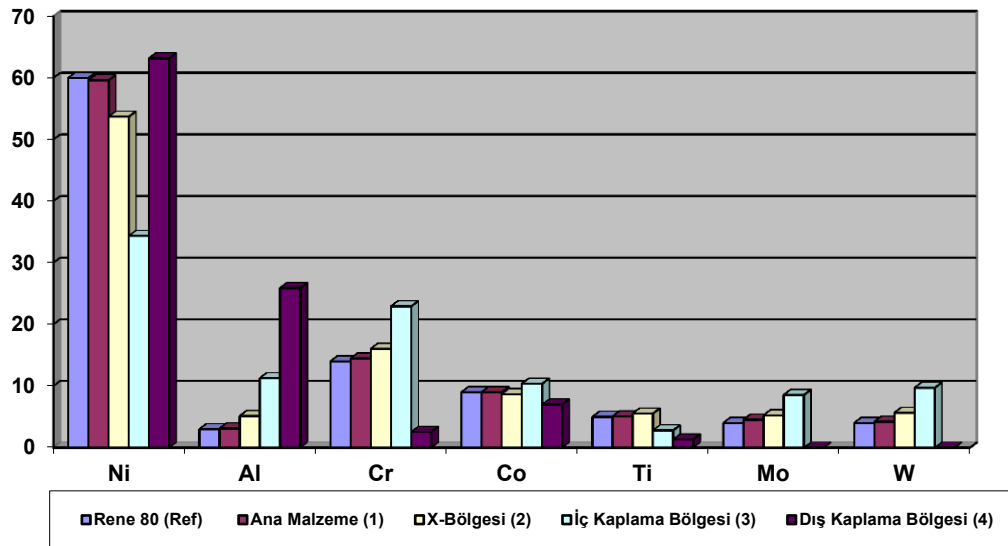


Şekil 5.45 J85 motoru ikinci kademe hareketli kanatçığın “Kök Bölümü”nde kullanılmış kaplamada görüntülenen;

- (a) Ana Malzeme, (b) X-Bölgesi, (c) İç Kaplama Bölgesi, (d) Dış Kaplama Bölgesi görüntüleri

Çizelge 5.4 “Kök Bölümü” kullanılmış kaplama ölçülmüş EDX analizi sonuçları

Element	RENE 80 (Ref)	Görüntü			
		1	2	3	4
Ni	Kalan	59,62	53,72	34,37	63,19
Al	3	3,11	5,13	11,28	25,9
Cr	14	14,47	16,04	22,93	2,56
Co	9	9	8,68	10,37	7,01
Ti	4,7	5,07	5,53	2,8	1,33
Mo	4	4,53	5,25	8,55	-
W	4	4,2	5,65	9,71	-



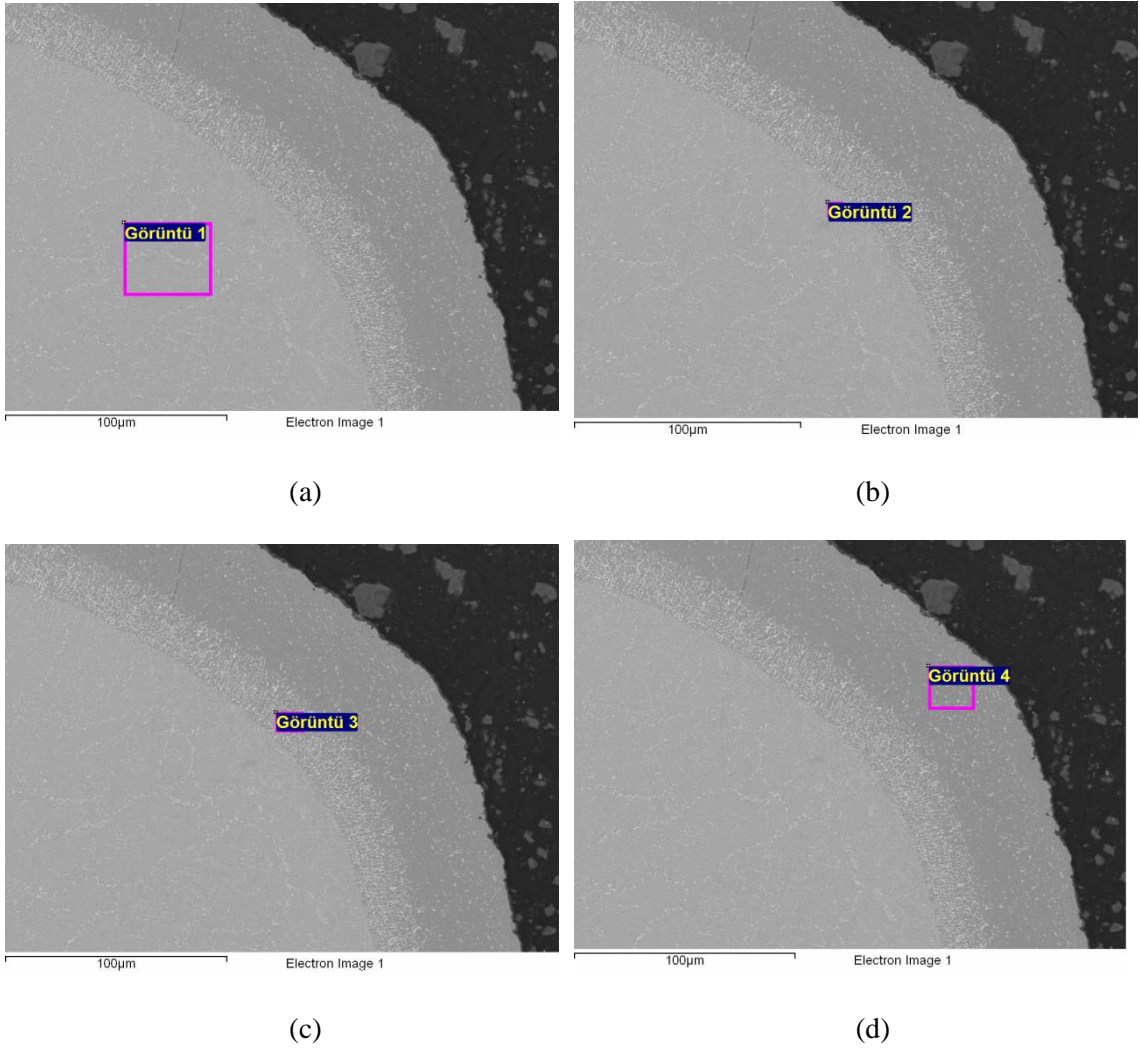
Şekil 5.46 “Kök Bölümü” kullanılmış kaplama ölçülmüş element ağırlık oranları grafiği

#### 5.4.2.2 J85 kullanılmış kaplamada “Uç Bölümü”nün incelenmesi

J85 motoru ikinci kademe hareketli kanatçıkta kullanılmış kaplamanın durumunun değerlendirilmesi amacı ile kanatçık uç bölümünde (Şekil 5.47) dört ayrı bölgeden alınan görüntüler Şekil 5.48’de, elde edilen analizler Çizelge 5.5’de ve Şekil 5.49’da verilmiştir



Şekil 5.47 J85 motorunda ikinci kademe hareketli kanatçık “Uç Bölümü” görüntüsü

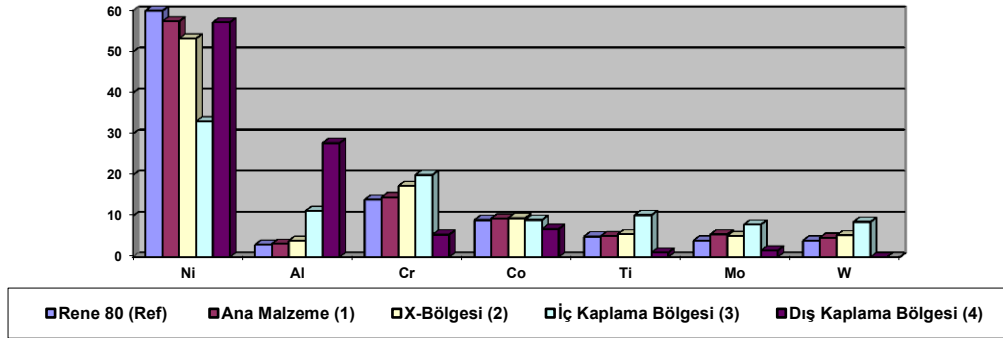


Şekil 5.48 J85 motoru kanatçık “Uç Bölümü”nde kullanılmış kaplamada görüntülenen; (a) Ana Malzeme, (b) X-Bölgesi, (c) İç Kaplama Bölgesi, (d) Dış Kaplama Bölgelerinin EDX analizleri



Çizelge 5.5 “Uç Bölümü” kullanılmış kaplamada ölçülmüş element ağırlık yüzde oranları

Element	RENE 80 (Ref)	Görüntü			
		1	2	3	4
Ni	Kalan	57,46	53,25	33,06	57,2
Al	3	3,22	3,97	11,24	27,77
Cr	14	14,58	17,33	20,01	5,47
Co	9	9,39	9,46	9,02	6,86
Ti	4,7	5,11	5,55	10,2	1,11
Mo	4	5,53	5,13	7,91	1,59
W	4	4,7	5,31	8,56	-



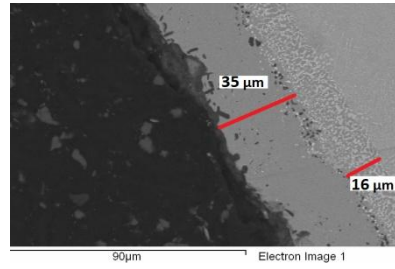
Şekil 5.49 “Uç Bölümü” kullanılmış kaplamada ölçülmüş element ağırlık yüzde oranları grafiği

J85 motoru kanatçığının kullanılmış kaplamasında kanatçık “Kök Bölümü” (Çizelge 5.4) ile kanatçık “Uç Bölümü” (Çizelge 5.5) element ağırlık yüzdeleri oranları karşılaştırıldığında;

- Alüminyum, krom, titanyum, kobalt elementleri miktarlarının yakın değerlerde olduğu,
  - Nikel, molibden ve volfram elementlerinin miktarlarında az miktarda farklılıklar olduğu,
- gözlenmiştir.

### 5.4.2.3 J85 motoru kanatçığı kullanılmış kaplama kalınlık ölçümleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan detaylı incelemede, kaplamanın etkisini değerlendirmek için kaplama öncesi kullanılmış kaplamaya ait test numuneleri üzerindeki kaplama kalınlıkları incelenmiş ve görüntüleri Şekil 5.50’de verilmiştir.

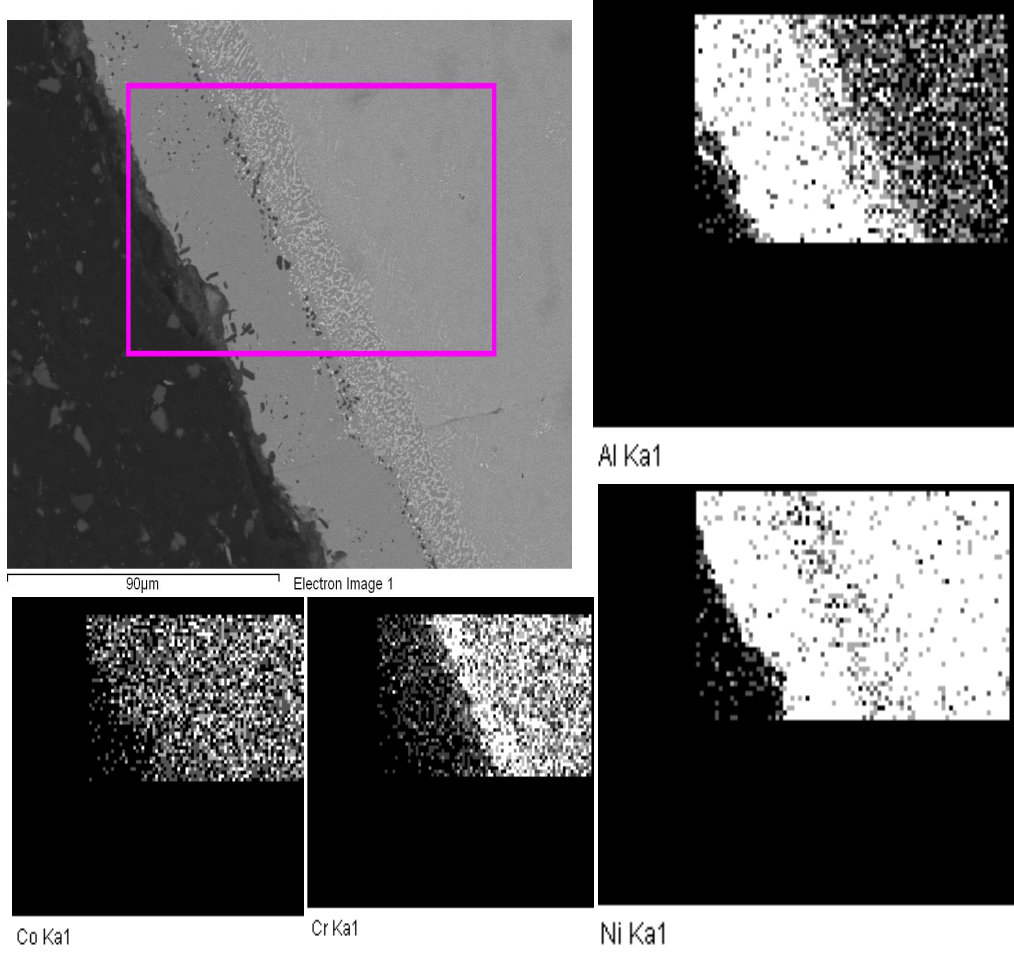


Şekil 5.50 J85 kanatçığık kök bölgesi kullanılmış kaplama kalınlık ölçümleri

J85 kaplama öncesi kanatçığık kesiti numunesi üzerinde (Şekil 5.50) yapılan ölçümlerde yaygın kaplama kalınlığının 51  $\mu\text{m}$  olduğu, dış bölgedeki kaplama kalınlığının ise 35 $\mu\text{m}$  olduğu belirlenmiştir.

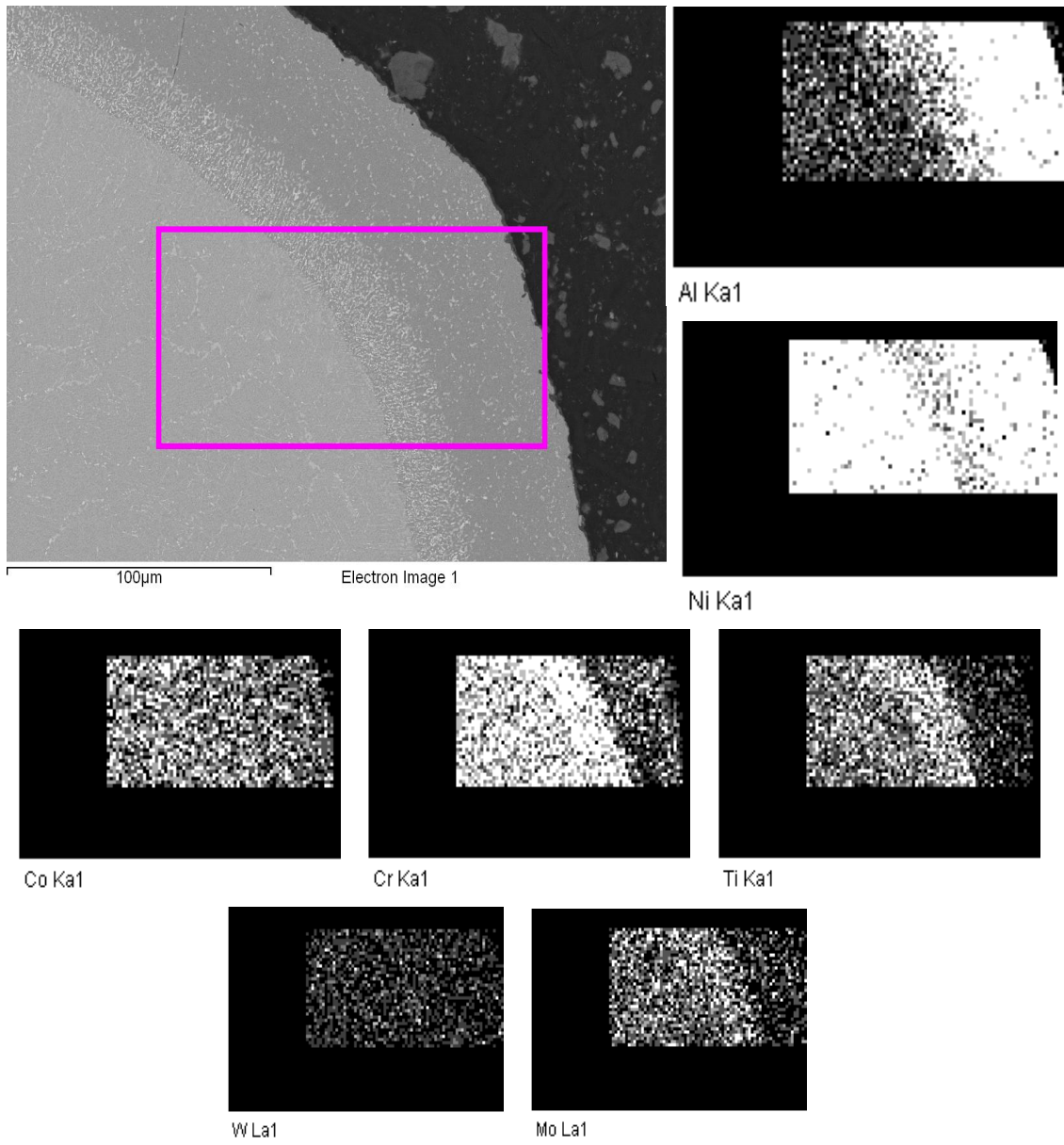
### 5.4.2.4 “J85 Türbin İkinci Kademe Hareketli Kanatçığık” kullanılmış kaplamada haritalama analizi sonuçları

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan görüntüleme çalışmasında Şekil 5.51’da kanatçığık kök bölgesinde ana malzeme ve kullanılmış kaplama bölgelerini kapsayan haritalama analizi sonuçları verilmiştir. Burada; analizi yapılan bölgede, ana malzeme bölgesi ile kaplamanın iç kaplama bölgesi - ilk yüzey - dış kaplama bölgesindeki elementlerin haritaları (açık renk bölgeler daha yoğun) ve yayılımları oldukça belirgin olarak görölmektedir.



Şekil 5.51 J85 kaplama öncesi kanatçık “Kök Bölgesi” haritalama analizi

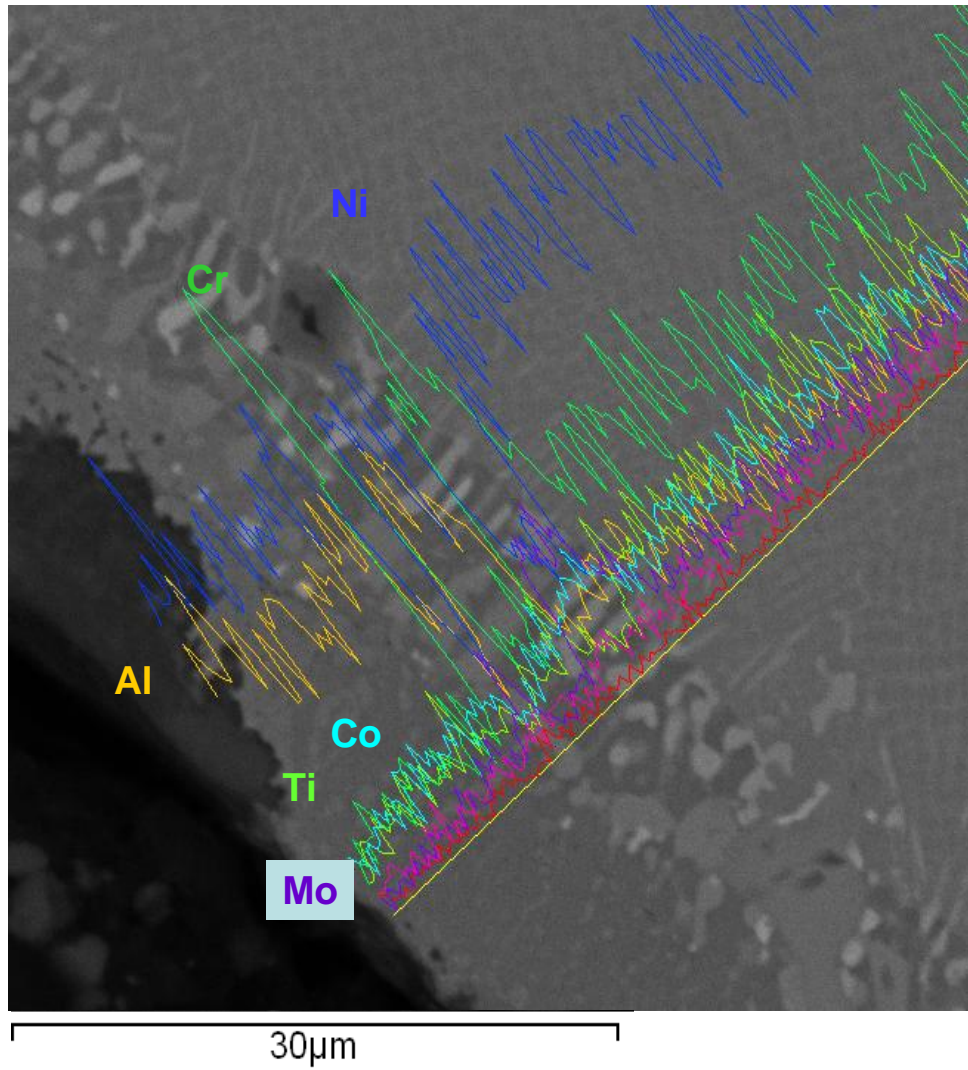
J85 hareketli kanatçık uç bölgesindeki ana malzeme ve kaplama öncesi numunesine uygulanan haritalama analizi Şekil 5.52’de verilmiştir. Burada da; analiz yapılan bölgede, ana malzeme bölgesi ile kaplamanın iç kaplama - ilk yüzey - dış kaplama bölgelerindeki haritalama sonuçları ve yayılımları oldukça belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 5.52 J85 kaplama öncesi kanatçık “Uç Bölgesi” haritalama analizi

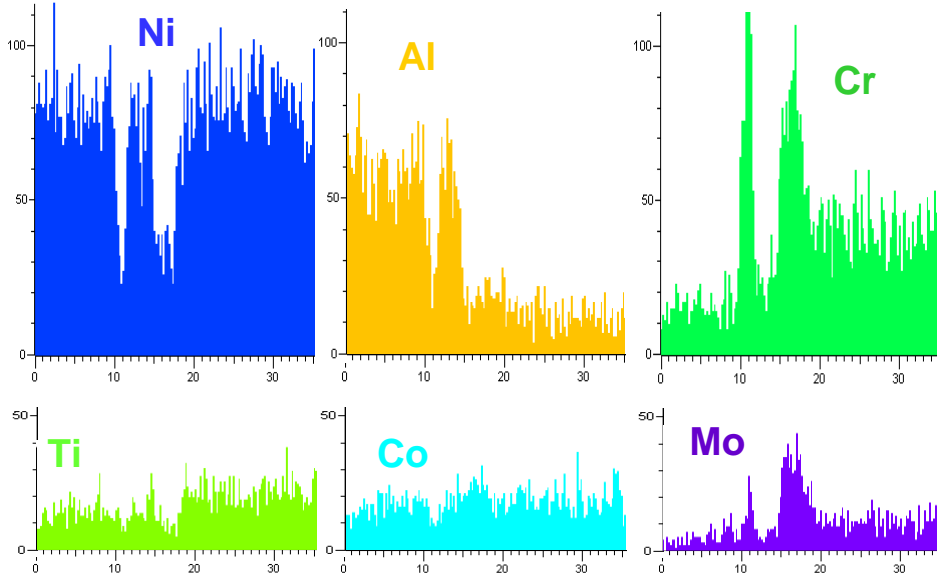
#### 5.4.2.5 J85 kanatçığı üzerinde kaplama öncesi “Renkli haritalama analizi” ve çizgi analizi sonuçlarının incelenmesi

J85 türbin ikinci kademe hareketli kanatçık kaplama öncesi numunesi üzerinde yapılan analizde (Şekil 5.53); dış kaplama kalınlığına 10  $\mu\text{m}$ 'ye kadar düştüğü, iç kaplama kalınlığına ise 10  $\mu\text{m}$  civarında olduğu ölçülmüştür.



Şekil 5.53 J85 türbin ikinci kademe hareketli kanatçığın kaplama öncesi “Çizgi Analizi” sonuçları

Belirlenen kesitte element miktarları (Şekil 5.54);



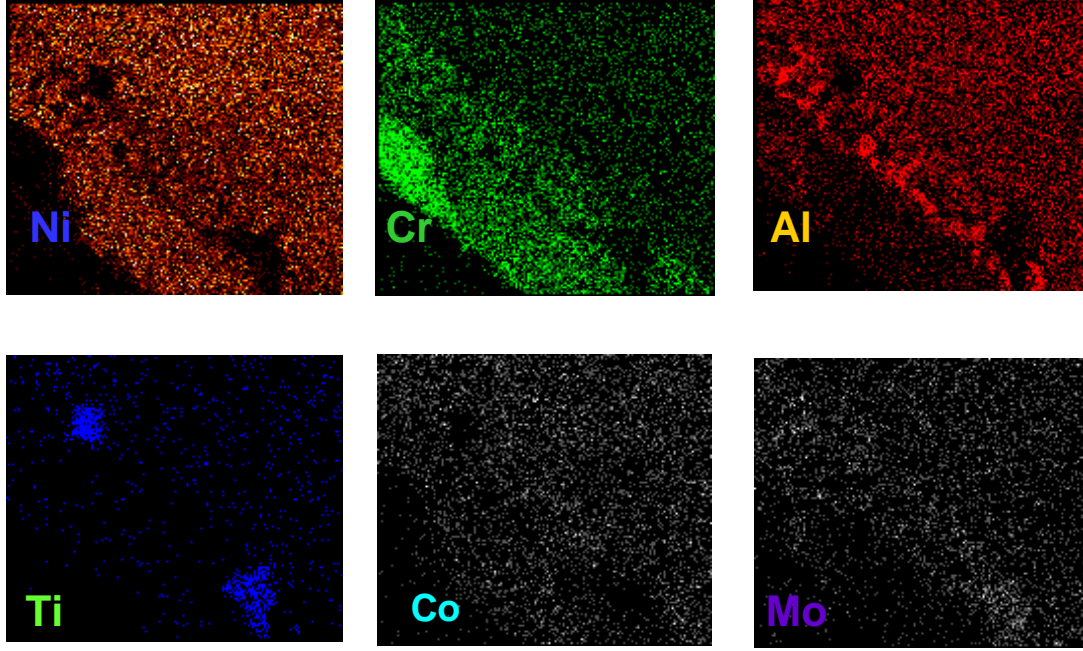
Şekil 5.54 J85 kanatçığının kaplama öncesi kesitte görüntülenen her bir elementin dağılım grafikleri

- Alüminyum elementi, dış bölgede de yüksek, dış bölge-iç bölge arasındaki ilk yüzeyde düşük, iç bölgede normal değerlerde, ana malzemede ise alaşım değerindedir.
- Nikel elementi dış kaplama bölgesinde ana malzeme bölgesine oranla daha düşük değerlerdedir. Ancak ilk yüzey iç bölge ile ana malzeme geçiş bölgesinde düşüktür.
- Nikel elementinin düşük olduğu bu bölgelerde krom ve molibden elementleri en yüksek değerindedir.
- Titanyum elementi miktarında nispi bir düşüklük gözlemlenmiştir.

Çizgi analizi uygulanan kesitin bulunduğu bölgenin haritalama analizinde ise (Şekil 5.55); dış kaplama bölgesinde boşluk görünümündeki kısımda nikel ve kobalt elementlerinin olmadığı, ancak o bölgede çok yoğun alüminyum elementi ve kısmen krom elementinin mevcudiyeti tespit edilmiştir. Aynı şekilde bu bölgenin (Şekil 5.53) sağ alt ve sol üst köşelerinde görülen farklı renk tonlamasının nikel, alüminyum, kobalt



ve krom elementlerinin eksikliğini ve bu noktalarda aşırı titanyum elementinin varlığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.55 J85 Türbin ikinci kademe hareketli kaplama öncesi numunesinin haritalama analizi

Kullanım sonrası aşınmış ve muhtemelen maruz kaldığı yüksek ısı korozyonu ve oksidasyon sonucu element yapısında bozulmalar meydana gelen hareketli kanatçıkta elde edilen bu analiz değerlendirmeye alınmamıştır. Şekil 5.53’de verilen kesitteki çizgi analizinde yukarıda bahsedilen heterojen olan bölgeden alınması durumunda yorumu etkileyecek çok farklı değerler alınacağı değerlendirilmiştir.

#### 5.4.3 J85 motoru kanatçıklarının yeniden yapılan kaplama sonrası karakterizasyon sonuçları

Deneylerin yapıldığı tesiste daha önce hiç kaplanmamış “J85 Türbin İkinci Kademe Hareketli Kanatçığına” “J79 Türbin İkinci Kademe Sabit Kanatçığına” uygulanan işlemler yapılarak yeniden kaplama yapılmıştır. Numunedeki parçalar üzerinde, kanatçığın kurt ağzına yakın kısmında, uca nispetle kalınca ve aerodinamik

profil görünümüne sahip kök (airfoil root) bölgesinde iki ayrı bölgede (Enlemesine ve uzunlamasına kesitte) (Şekil 5.56) görüntüleme ve kimyasal analizler yapılmıştır.



Şekil 5.56 Kanatçık “Kök Bölgesi” görüntüsü (Solda uzunlamasına, sağda enlemesine kesit)

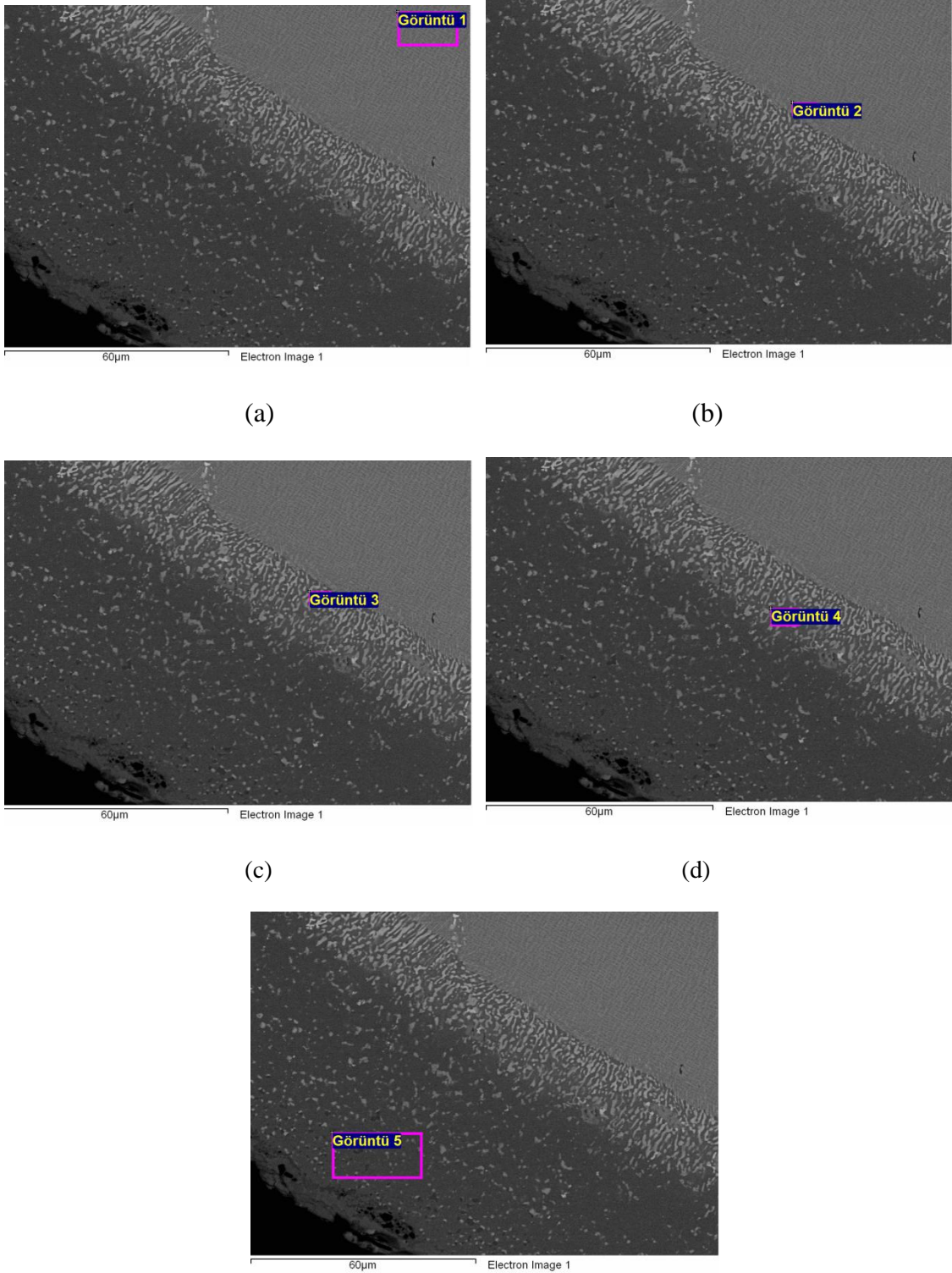
#### 5.4.3.1 “Kök Bölümü”nün yeniden yapılan kaplama sonrası incelenmesi

İlk analizler uzunlama kesitte gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.57). Ana Malzeme, X-Bölgesi, İç Kaplama, İlk Yüzey ve Dış Kaplama bölgelerinden alınan analiz sonuçları Çizelge 5.6’da ve grafiği Şekil 5.58’de verilmiştir.

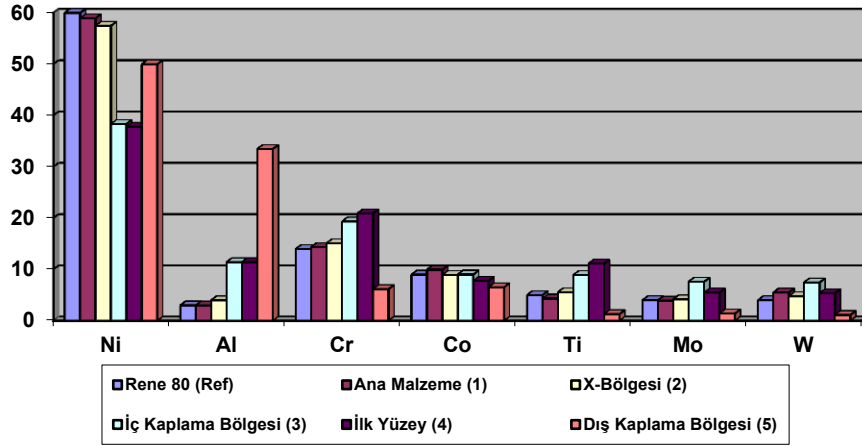
Çizelge 5.6 “Kök Bölümü” uzunlamasına kesit yeniden kaplama sonrası ölçülmüş element ağırlık yüzde oranları

Element	RENE 80 (Ref)	Görüntü				
		1	2	3	4	5
Ni	Kalan	58,94	57,49	38,35	37,82	50,00
Al	3	2,98	3,99	9,32	11,42	33,5
Cr	14	14,38	15,12	19,35	20,94	6,17
Co	9	9,95	8,92	9,01	7,79	6,53
Ti	4,7	4,33	5,55	8,89	11,14	1,29
Mo	4	3,92	4,17	7,61	5,51	1,41
W	4	5,5	4,76	7,47	5,38	1,13





Şekil 5.57 J85 motoru yeniden yapılan kaplama sonrası kanatçık “Kök Bölgesi” uzunlaşmasına kesit EDX analizi



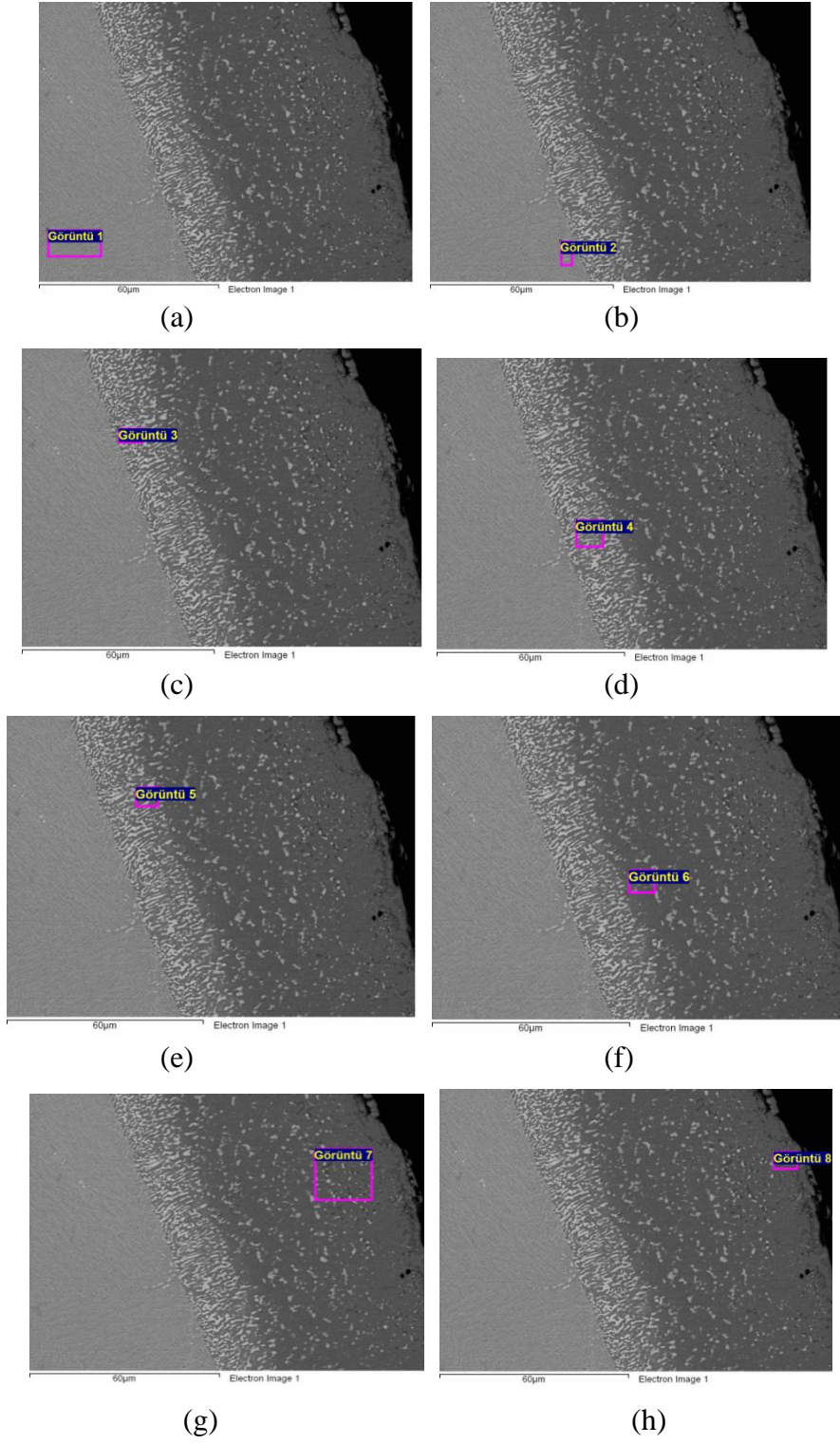
Şekil 5.58 “Kök Bölümü” uzunlamasına kesit kaplama sonrası ölçülmüş element ağırlık yüzde oranları grafiği

#### 5.4.3.2 J85 motoru kaplama sonrası kanatçık “Uç Bölümü”nün incelenmesi

İkinci analizler enlemesine kesitte gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.59). Ölçümlerde elde edilen değerler Çizelge 5.7 ve Şekil 5.60’da verilmiştir.

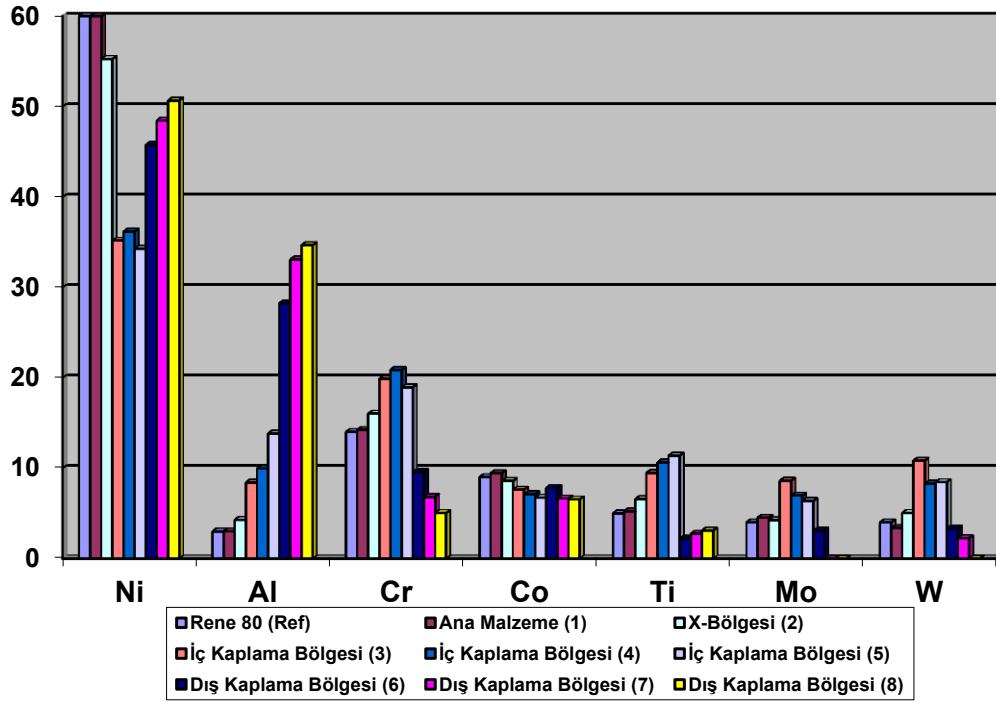
Çizelge 5.7 J85 motoru yeniden yapılan kaplama sonrası kanatçık “Uç Bölümü” enlemesine kesit ölçülmüş element ağırlık yüzde oranları

Element	RENE 80 (Ref)	Görüntü							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ni	Kalan	60,2	55,27	35,18	36,16	34,29	45,75	48,46	50,66
Al	3	3,01	4,28	8,41	9,95	13,83	28,22	33,08	34,66
Cr	14	14,22	16,03	19,89	20,88	18,94	9,58	6,82	5,04
Co	9	9,44	8,58	7,62	7,12	6,74	7,81	6,64	6,54
Ti	4,7	5,23	6,57	9,47	10,64	11,37	2,21	2,73	3,1
Mo	4	4,52	4,23	8,61	6,97	6,38	3,09	--	--
W	4	3,37	5,04	10,82	8,28	8,45	3,33	2,26	--



Şekil 5.59 “Uç Bölümü” enlemesine kesit yeniden kaplama sonrası analiz yapılan bölgeler;

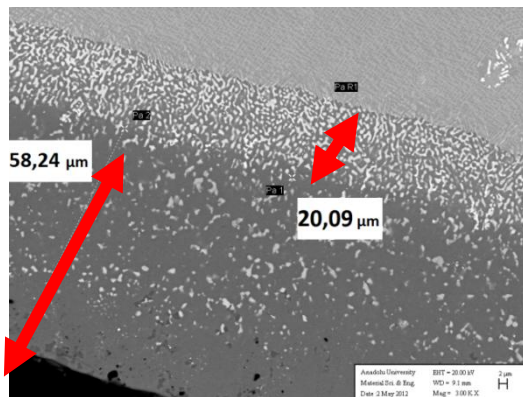
- (a) Ana Malzeme Bölgesi, (b) X-Bölgesi (c,d,e) İç Kaplama Bölgesi,  
 (f, g, h) Dış Kaplama Bölgesi



Şekil 5.60 “Uç Bölümü” enlemesine kesit yeniden kaplama sonrası ölçülmüş element ağırlık yüzde oranları grafiği

### 5.4.3.3 J85 motoru kanatçığına kaplama sonrası kalınlık ölçümleri

J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının yeniden yapılan yayınımlı kaplama sonrası görüntüsü Şekil 5.61’de verilmiştir.



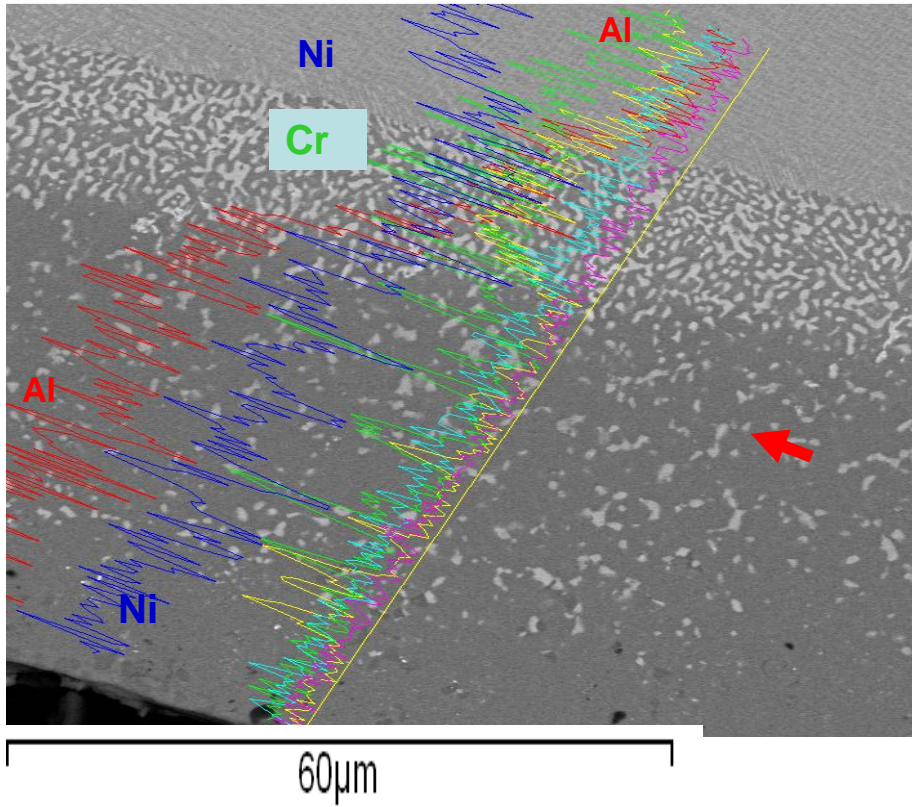
Şekil 5.61 J85 kaplama sonrası kalınlık ölçümleri



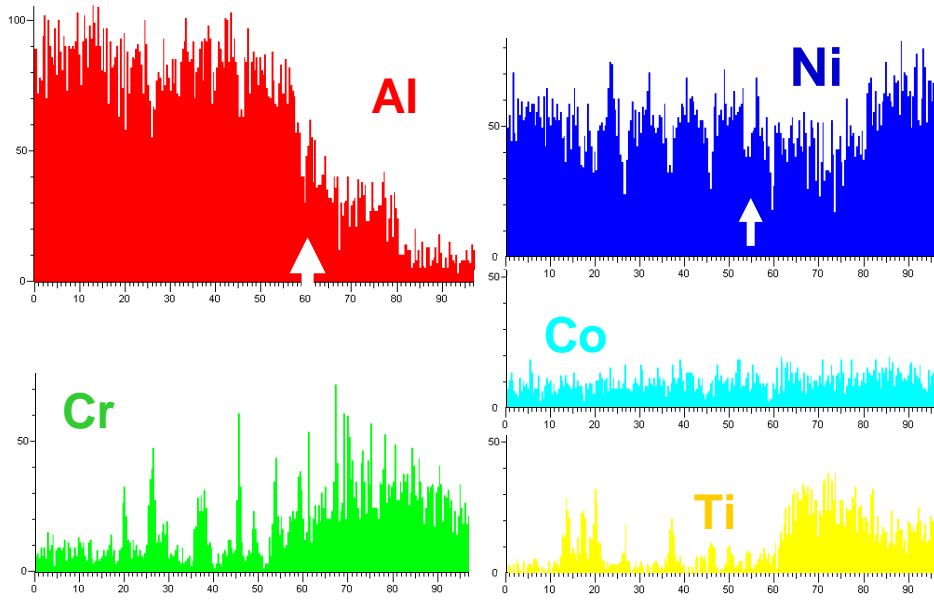
Yeni kaplanmış kanatçık kesiti (Şekil 5.61) üzerinde yapılan ölçümlerde kaplama kalınlığının 78,33  $\mu\text{m}$  olduğu, dış bölgedeki kaplama kalınlığının 58,24  $\mu\text{m}$  olduğu tespit edilmiştir.

#### 5.4.3.4 Yeniden kaplama sonrası J85 türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının “Renkli haritalama analizi” ve çizgi analizi sonuçları

J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçıkta kaplama sonrası yapılan çizgi analizi Şekil 5.62’de verilmiştir.



Şekil 5.62 J85 kanatçığının kaplama sonrası numunesinin çizgi analizi

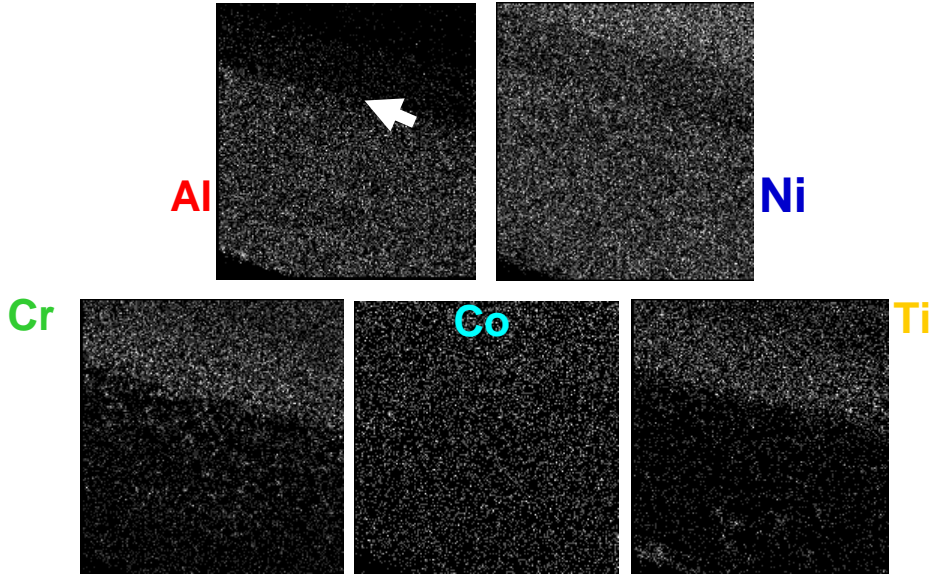


Şekil 5.63 J85 kanatçığında kaplama sonrası kesitte görüntülenen her bir elementin dağılım grafikleri

Belirlenen kesitte element miktarları (Şekil 5.63);

- Alüminyum elementi, yeni kaplama dış bölgesinde beklenen şekilde yoğundur. İç bölgede nispi bir düşme görülmekte olup ana malzemede ise alaşım ağırlık oranı düzeyindedir.
- Nikel elementi ana malzemeye oranla kaplama bölgesinde düşme gözlemlenmiştir. İç kaplama bölgesindeki düşme dış kaplama bölgesine nazaran daha fazladır.
- Krom ve titanyum element miktarı ana malzemede kaplama bölgelerine göre daha yüksektir.

Analizi yapılan bölgenin haritalama analizinde (Şekil 5.64) ise, grafiklerde elde edilen sonuçları destekleyen dağılımlar tespit edilmiştir.



Şekil 5.64 J85 kanatçığında kaplama sonrası görüntülenen her bir elementin haritalama analizleri

#### 5.4.4 J85 motoru kanatçıklarının yayınım kaplama öncesi ve sonrası ölçüm sonuçları

J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçığının “Yayınım Kaplama” öncesi “Kanatçık Kök Bölümü” (Bkz. Çizelge 5.4, Şekil 5.45) ve kaplama sonrası “Kök Bölümü Uzunlamasına Kesit” (Bkz. Çizelge 5.6, Şekil 5.57) element ağırlık oranları karşılaştırıldığında;

- Ana malzeme element ağırlık yüzdelerinde;
  - Nikel, alüminyum ve krom elementlerinde değişim görülmediği,
  - Molibden ve titanyum elementlerinde çok az miktarda,
  - Kobalt elementi miktarında düşme,
  - Volfram elementi miktarında ise artma,
 olduğu görülmüştür.

- İç yayılım bölgesi ile ana malzeme arasındaki “X-Yayılım Destek Bölgesi”nde element ağırlık oranları;
  - Nikel elementinin % 53,72’ den % 57,47’ a yükseldiği,
  - Alüminyum elementinin % 5,13’den % 3,99’a düştüğü,
  - Krom elementinin % 16,04’den % 15,12’ye düştüğü,
  - Kobalt elementinin %8,68’den %8,92’ye yükseldiği,
  - Titanyum elementinin %5,53’den % 6,56’ya yükseldiği,
  - Molibden elementinin %5,25’den %3,10’a düştüğü,
  - Volfram elementinin ise %5,65’den % 1,74’e düştüğü görülmüştür.



## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Mevcut kaplama tesisi motor üreticisi firma tarafından kurulmuş, süreç, yetenek ve uygulama sınırları yine aynı firma tarafından belirlenmiştir. Buna göre;

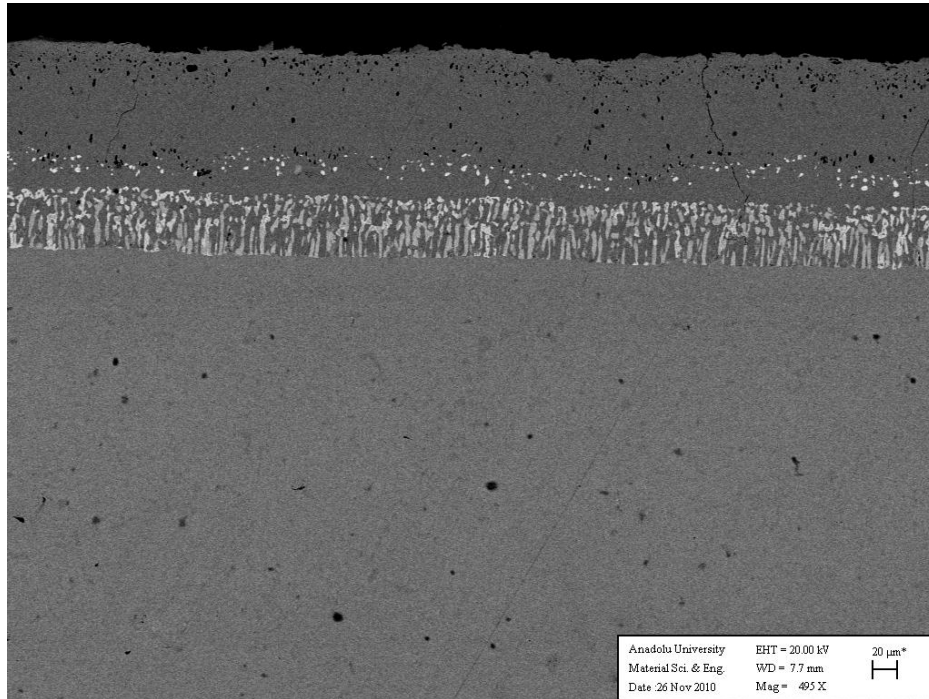
- Kaplamada kullanılacak reçete, fırınlama adımları, kontrol usulleri önceden belirlidir,
- Kaplama yapılmasına karar verilen kanatçıklar, karışımları sabit olan paket içeriği malzemeler kullanılarak ve standart fırınlama işlemleri uygulanarak kaplanmaktadır,
- Test numunelerine optik mikroskop ile 10 kat büyütürük; kaplama kalınlığı ölçümü, yüzey kalitesi kontrolü ve oksitlenme testi yapılmakta, test sonuçları dikkate alınarak uygun olanlar servise verilmektedir,
- Yukarıdaki parametreler kullanılarak bugüne kadar sadece tek tip malzeme ve kanatçığın kaplaması yapılmıştır.

Sadece J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçığı onarımında kullanılan bu yöntemin irdelenerek ve kaplamalardaki element hareketlerinin incelenerek, farklı parçaların da kaplanabilirliği araştırılmış, bu amaçla deney ve testler yapılmıştır.

Yapılan literatür çalışmasında benzer kaplama yöntemlerinin farklı süperalaşımarda da uygulandığı belirlenmiştir. Ancak önceden kaplanmış olan bir parçanın yeniden kaplanabileceği ve onarılabileceği bilgisi literatürde tespit edilmemiştir..

Deneysel çalışmada önce, bir grup J79 motor türbin ikinci kademe sabit kanatçık ve test numuneleri paket sementasyon alüminit yayılım kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Kaplama öncesi ve sonrası test numunesinin taramalı elektron mikroskobu ile incelenmesine ve literatürdekilerle karşılaştırılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla

Anadolu Üniversitesi'nde taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapı analizi ve EDX dedektörü ile kimyasal analiz yapılmıştır (Şekil 6-1). Deneysel çalışmada, Rene 80 nikel esaslı süperalaşımdan imal edilen kanatçıklara uygulanan paket sementasyon alüminit yayılım kaplama sürecinin ve elde edilen kaplamanın (Bkz. Şekil 5.7); Goward ve Boone'nun UDIMET 700 (Bkz. Şekil 3.5) ve Lang'ın IN100 (Bkz. Şekil 5.5) nikel esaslı süperalaşımları üzerinde yaptıkları çalışmalarında belirtilen alüminit yayılım kaplamalarındaki mikroyapıyı sergilediği, içe doğru yayılım ve dışa doğru yayılımın olduğu görülmüştür. Elde edilen görüntünün literatürdeki diğer görüntüler ile benzer / aynı çıkması, ilk yüzey-ana malzeme-iç/dış-yayılım destek bölgelerinin elde edilmesi bundan sonraki çalışmalara öncü olmuştur.



Şekil 6.1 Yeniden kaplama yapılan J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığı kaplama görüntüsü

Test parçacığının farklı bölgelerinden ve farklı alanlarda EDX analizleri uygulanarak elementsel analiz yapılmıştır. Elde edilen değerlerin, RENE 80 ana malzeme referans değerleri ile karşılaştırma ve doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Görüntüdeki iç yayılım bölgesindeki farklı renk tonlu yapıların ayrı ayrı analizleri yapılarak element yayılım hareketleri belirlenmeye çalışılmış, analizler ile element ağırlık oranları arasındaki ilişkiler ortaya konmuştur.

Elde edilen bu sonuçlardan sonra, normal uygulamada yeniden kaplama işlemi yapılmayan, ancak uzun yıllar hizmette kalması planlanan J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçıklarının bu yöntemle kaplanabilirlik incelemesinin yapılmasına karar verilmiştir. Yeniden kaplama öncesi numune kanatçıkların taramalı elektron mikroskop görüntüleri alındığında, parçalar üzerinde benzer bir yayılım kaplamasının olduğu tespit edilmiştir. Yapılan EDX analiz (element ağırlık) değerlendirmesinde J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçıkları ana malzemesinin, kullanıcıya üretici tarafından verilen dokümanlarda yer alan süperalaşım olmadığı, J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçığı ana malzemesi olan RENE 80 olduğu ve üzerinde “paket yayılım alüminit kaplama” eşdeğeri bir kaplamanın varlığı tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 5.2).

Nokta analizlerinin doğrulanması ve yapıların homojen olup olmadığının belirlenmesi için seçilmiş alanlardan analiz yapılması kararlaştırılmıştır. Bu amaçla, onarım için gelen ve zamanla aşınmış olabilecek J79 motoru türbin ikinci kademe sabit kanatçığına ve J85 motoru türbin ikinci kademe hareketli kanatçığına ait test numunelerinde kaplama öncesi mevcut halinin ve sonrasının görüntüleri alınmış, kaplama kalınlık ölçümleri yapılmış, EDX analizleri değerlendirilmiştir.

Deney ve test çalışmasının bir sonraki aşamasında her iki motor kanatçıklarına ait test numuneleri üzerinde belirli analiz alanlarındaki element ağırlık oranları elde edilmiş, böylece her bir kaplama alanındaki element hareketleri tespite çalışılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında, nokta ve alan element analizlerine ilave olarak kaplama yüzeyine dik belirlenen bir hat üzerinde çizgi analizleri uygulanarak element yoğunluklarına da bakılmıştır. Her iki motora ait kaplama öncesi ve kaplama sonrası test numunelerinin dağılımları yapılmış, elde edilen element değişim diyagramlarının ve element ağırlık oranlarının görüntüleri değerlendirilmiş, yayınımdaki element hareketleri izlenmiştir.

J79 ve J85 motorlarının türbin kanatçıklarının yeniden “Paket Sementasyon Alüminit Yayınım Kaplama” öncesi ve sonrası yapılan bölgesel ve noktasal analiz ve element ağırlık oranı sonuçlarına göre;

- J79 türbin ikinci kademe sabit kanatçıkta kaplama öncesi mevcut dış kaplama bölgesinde kısmi bir incelmeye olmakla birlikte dış kaplamanın düzgün bir dağılım gösterdiği,
- J85 türbin ikinci kademe hareketli kanatçık kök bölgesindeki kaplamanın kaygı yaratacak düzeyde incelendiği ve yapısal bozulmalar (titanyum ve alüminyum elementlerinin miktarlarındaki artmalar) olduğu,
- Kaplama öncesi ve sonrası incelenen taramalı elektron mikroskobu element dağılım analizlerinde ana malzeme içerisinde bulunan tüm elementlerin, ana malzeme alaşımının kompozisyonuna karşılık gelen miktarlarda kaplama boyunca bulunduğu, ancak, kaplamadaki alüminyum elementinin seyrelmesine bağlı olarak bu elementlerin miktarlarının ana malzemedeki kompozisyona kıyasla daha düşük değere sahip olduğu,
- Kaplama sonrasında dış kaplama bölgesinde 50–60 µm’lik kaplamaların elde edildiği, kaplama bölgesindeki elementlerin homojen şekilde dağıldığı belirlenmiştir.

Deneylerde elde edilen sonuçlara göre;

- Ana metalin içindeki kübik morfolojiye sahip  $\gamma'$  ( $\text{AlNi}_3$ ),  $\beta$  ( $\text{NiAl}$ ) fazları yardımı ile yüksek sıcaklık dayanımı elde edilirken, alüminyum ve krom gibi elementlerce zengin kaplama kısmında oksidasyon ve korozyon dayanımı sağlanmaktadır.
- Krom ve alüminyum elementleri yüksek sıcaklıktaki gaz akışı altında oksitlenerek koruyucu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alümina) ve  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ( $\text{CrO}$ ) tabakalarını oluşturmaktadır. Bunların mevcudiyeti, iç kısımlara oksijen geçişini güçleştirmekte ve bu da süperalaşımında istenen özellikleri sağlanmasında yardımcı olmaktadır.

- Kaplamanın içerisindeki yüksek alüminyum ve krom elementlerinin miktarı, parçayı korozif ortamdan korurken metal alaşım iç kısmında sünekliği ve mukavemeti parçaya kazandırmaktadır. Böylelikle hem korozyon direnci yüksek hem de ihtiyaç duyulan mukavemete sahip parçalar elde edilebilmektedir. Bütün bu olay, paket sementasyon alüminit yayılım kaplama üzerinde kademeli bir geçiş ile ortaya çıkmakta ve bu hizmeti görece ara katman iç yayılım bölgesinde oluşmaktadır.
- Kaplama ana metal kadar sünek olmadığından daha kolaylıkla çatlayabilmekte ve oluşan bu çatlaklar da ana metal içerisine doğru ilerleyerek parçaların kırılmasına yol açabilmektedir (Goward, 1970). Bu sebep ile kaplama kalınlığı belirli ölçüler içerisinde tutulmakta ve parçaların periyodik bakımında düzenli olarak çatlak kontrol işlemi uygulanmaktadır.

“Paket Sementasyon Alüminit Yayılım Kaplama” kabiliyeti ile;

- Belirlenen sürece uymak kaydıyla uygulaması basit ve kontrolün kolay olduğunu,
- Çalışma ortamında oluşan güçlü koşullar nedeniyle ortaya çıkan olumsuzluğun önlenmesi amacıyla kanatçıkların yeniden kaplanmasının imkan dahilinde olduğunu, yeniden kaplama yöntemiyle kanatçıkların uçuş güvenilirliğini artırabileceğini ve kanatçıkların ömür boyu maliyetinin düşürüldüğünü,
- Yayılım kaplamasının yeniden uygulanarak kaplanan ana malzemedeki yayılım olan Ti, W, Mo, Co elementleri ağırlık oranlarının izlenmesini, bilhassa krom elementinin kanatçıkta korozyona karşı direnci artırarak sağladığı üstünlük yanı sıra malzeme sürekliliğini olumsuz yönde etkileyebileceği esas alınarak krom ağırlık oranının %7 -10 altına düşmesinin engellenmesinin gerekli olduğunu,
- Yeniden kaplama işlemi uygulanmayan düğüm jet motor sabit ve hareketli kanatçıklarının da benzer alüminit yayılım kaplama metodu ile kaplanabilirliğinin incelenmesinde yarar olduğu görülmektedir.

Alüminit yayının kaplama çalışmalarında öneri olarak;

- a. Alüminit Yayınım Kaplamanın termal ve mekanik özelliklerinin iyi bir şekilde karakterize edilmesi ve yeni potansiyel kullanım alanlarının belirlenmesi
- b. Alüminit Yayınım Kaplamanın oluşumunda kullanılan süreç parametrelerinin irdelenerek optimize edilmesi ile daha nitelikli kaplamaların elde edilebilirliği
- c. Alüminit Yayınım Kaplamaya alternatif termal bariyer kaplamaların jet motor kanatçığı üzerinde uygulanması ve karakteristiklerinin belirlenmesi
- d. Platin alüminit yayınım kaplamalarının paket alüminit yayınım kaplamaya göre avantajlarının araştırılması
- e. Alüminit Yayınım Kaplama uygulanmamış sıcak kısım sabit parçalarının belirlenerek CODEP kaplama uygulanabilirliği ve üstünlüklerinin araştırılması
- f. Jet motorları sıcak kısım sabit parçalarının belirlenerek Paket Alüminit Yayınım ve Termal bariyer kaplanabilirliğinin araştırılması

konuları lisans üstü ve doktora çalışmalarında teklif konularıdır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

Aldred P. 1975, SAE Paper 751049, National Aerospace Engineering and Manufacturing Meeting, Los Angeles, CA.

Antony K.C. and Goward G.W. , 1988, Superalloys, D.N. Duhal et al., Ed., The Metallurgical Society of AIME, , s. 745-754.

ASM (American Society for Metals), 1982, Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 5, Surface Cleaning, Finishing and Coating, Metals Park, Ohio, s. 715.

ASM (American Society for Metals), 1990, Metals Handbook, Tenth edition, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, Metals Park, Ohio, s. 1415.

ASM Handbook Volume 3 1992 s. 149.

ASM (American Society for Metals) International, 2007, High Temperature Corrosion and Materials Application Chapter 9, s. 249.

Barber M.J. , McMurray N.D., and Pacala T., 1983, Final Report, Air Force Contract F33615-78-C-5102.

Bauer R. and Grunling H. 1982, *Thin Solid Films*, Vol 1, s 3-2.

Bianco R. and Rapp R.A. , 1993, *Metallurgical and Ceramic Coatings*, K.H. Stern, Ed., Chapman and Hall, Chapter 9.

Boone, Dr. Donald H., 1980, Overlay Coatings for Gas Turbine Airfoils, AGARD (Advisory Group for Aerospace Research and Development): Materials Coating Techniques, London, s. 8.1-8.13.

Bose Sudhangshu, 2007, High Temperature Coatings, s.78

Bradley, E. F., 1988, Superalloys: Technical Guide, ASM International, s.280.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Brill –Edwards H.W. , 1970, U.S. Patent No. 3,694,255.

Burgel R., 1986, *Mater. Sci. Tech.*, Vol 2, p 302-308.

Cervenka, M., Rolls-Royce, [www.thomas-sourmail.net/coatings/turbine.html](http://www.thomas-sourmail.net/coatings/turbine.html) .

Clark E.V., 1973, U.S. Patent 3,779,719.

Diltemiz S. F., 2010, “Plazma Sprey Termal Bariyer Kaplamaların Termal ve Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu”.

Donachie M.J. Jr. – Donachie S. J., 2002, “Heat Treating” Superalloys: A Technical Guide, 2nd edition ASM , s.135-147.

Drewitt R, 1951, *Anti-Corros. Methods Mater.*, Vol 16, s. 543-548.

Duret C., Pichoir R., 1983, *Coatings for High Temperature Applications*, E. Lang, Ed., Applied Science Publishers, , s.33-78.

Eliaz, 2002, *Materials Science and Engineering, Hot Corrosion in Gas Turbine Components* .

Eskner M., 2004, *Mechanical Behaviour of Gas Turbine Coatings*, PhD Thesis, Royal Institute of Technology, ISBN-91-7283-7861.

Fishman M. , 1988 , U.S. Patent 4,774,149.

Fitzer E., 1954, *Arch. Eisenhüttenwes.*, Vol 25, s. 455.

Furrer, D., Fach H., 1999, “Ni-Based Superalloys for Tubine Discs.” JOM.

Gadd J.D. , Najedlik F.J. , and Graham L.D., 1968, *Electrochem. Tech.*, Vol 6, s. 307-315.

Gauje G. and Morbioli R, 1983, *High Temperature Protective Coatings*, S.S. Singhal, Ed., The Metallurgical Society of AIME, s. 13-26.



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gibson T. , 1957, U.S. Patent No: 2,809,127
- Godlewski K. and Godlewska E. , 1986, *Oxid. Met.*, Vol 26, s. 125-128.
- Goldstein Joseph , Newbury D E , Joy D C , Lyman C E, Echlin P, Lifshin E, Sawyer L, and Michael J R, 2003 , *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis* (3 ed). Springer, s. 66.
- Goward G.W., 1970, Current Research on the Surface Protection of Superalloys for Gas Turbine Engines, *J. Met.*, Vol 22, , s. 31-39.
- Goward, G. W. , and Shankar S., 1989, U.S. Patent 4,837,389.
- Goward, G. W. , Boone D. H., 1971, *Oxid. Met.* Vol 3, s. 475-495.
- Goward, G. W. , and Cannon L. W., 1988, *Trans. ASME*, Vol 110, s. 150-154.
- Goward G.W. . and Seigle L.L. , 1994, ASM (American Society for Metals), *Metals Handbook*, Volume 5, Surface Engineering, Metals Park, Ohio,s. 611-620
- Gupta B. K., Sarkhel A.K., and Seigle L.L., 1979, *Thin Solid Films* , Vol 39, s. 313-320
- Gupta B. K. and Seigle L.L. , 1980, *Thin Solid Films* , Vol 73, s. 365-371
- Harry J.F.V. , 1986, *Mater. Sci. Tech.*, Vol 2, , s. 295-301.
- Hillary R.E. , 1996, NRC Report, National Academy Press , Hoar, T.P., Croam, E.A.G., 1951, *Iron Steel Institute* , Vol . 169 , s. 101.
- Hoar T.P. and Croam E.A.G., 1951, *J.Iron Steel Inst.*,Vol.169. ,s.101
- Holmes J.W. and Mc Clintock F.A., 1990 , *Met. Trans. A*, Vol 21A, , s. 1209-1222.
- Howe G.H. , 1925, U.S. Patent No. 1,655,269.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Janssen, M.M.P. and Rieck, G.D., 1967, Reaction Diffusion and Kirkendall-Effect in the Nickel-Aluminum System, *Trans, Met.Sci.AIME*, Vol 239, s.1372–1385.
- Johnson W. , Komarek K. , and Miller E., 1968 , *Trans. Met. Soc. AIME*, Vol 242, s. 1685-1690.
- Joseph A.D., 1963, U.S. Patent No. 3,102,044.
- Kreige O.H. and Boone D.H., 1973, *Material Eval.* Vol. 32, z. 38-44
- Kung S.C. and Rapp R.A., 1989, *J. Electrochem. Soc.*, Vol 135, s. 89-109.
- Lang, E., 1983, *Coatings for High Temperature Applications*, Elsevier Science Publishing Co., Inc., Newyork, s. 442.
- Lehnardt G. and Meinhardt H. W, 1972, *Electrodeposition and Surface Treatment*, Vol 1, s. 189-193.
- Levine S., and Caves R.M, 1974, Thermodynamics and Kinetics of Pack Aluminide Coating Formation on IN-100, *J. Electrochem. Soc.*, Vol 121, s.1051-1064.
- Marijnissen G.H., 1983, *High Temperature Protective Coatings*, S.S. Singhal, Ed.,
- Meetham G.W., Van de Voorde H.M, 2000, *Materials for High Temperature Engineering Application*, s.691-707.
- Nichols E.S. , Burger J.A. , and Hanink D.K., 1965, *Mech. Eng.*, s. 52-56.
- Parzuchowski R.S., 1979, U.S. Patent 4,132,816.
- Rairden J.R. , 1975, III, U.S. Patent 3,874,901.
- Rapp R.A. , Wang D. , and Weisert T. 1983, in *High Temperature Coatings*, Khobaib M. and Krutenat R. , Ed., The Metallurgical Society of AIME, p.131-141.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Reed, R.C. , 2006, The Superalloys Fundamentals and Applications, Cambridge University Pres. , s.19.
- Restall J. E. and Wood M.I. , 1986 , Mater. Sci. Tech. , Vol 2 , s. 225-231.
- Rolls Royce Ltd, 1969 , French Patent 1,511,698.
- R.S. Parzuchowski , 1979, U.S. Patent 4,132,816.
- Rudolph, E. Malush., 1987, “An Investigation of the Hot Corrosion Protectivity Behaviour of Platinum Modified Aluminide Coatings on Nickel Based Superalloys”, Master Thesis, Naval Postgraduate Scholl. Montary, CA.
- Samuel R.I. and Lockington M.A., 1952, Metal Treatment and Drop Forging, Vol 18, 1951, s 334-359, 407-414, 440-444, 495-506, and 543-548; Vol 19, s. 27-32, and 81-85.
- Seelig R.P. and Stuber R.P. , 1978 , *High Temp.-High Press.*, Vol 10, s. 207-213.
- Shankar S. And Seigle L.L., 1978, *Met. Trans. A*, Vol 9A, s. 1468-1476.
- Schilling W.F., 1984, NATO Advanced Workshop on Coatings for Heat Engines, I. Kvernes, Ed., Aquafreda di Maratea, Italy.
- Schneider R. , Bauer R. , and Grunling H., 1978, *Thin Solid Films*, Vol 54, s. 359-367.
- Smialek J.L and Lowell C.E., 1974, NASA TM X-68274.
- Smith J.S. and Bone D.H., 1990, ASME Paper 90-GT-319, s.6.
- Tein, John K., Caulfield T., 1989, Superalloys, Supercomposites, and Superceramics, Boston Acedemic Press, s. 775.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Vandenbulke L. , Leprince G. , and Nciri B. , 1989, *Mater. Sci. Eng.*, Vol A21, s 379-386.
- Walker J.L. and Rose J.R., 1975, U.S.Patent 3,873,347
- Walsh P.N., 1973, Chemical Vapor Deposition, 4th International Conference, The Electrochemical Society, s. 147-168
- Wells C.H. et.al., 1992 proceedings of Steam and Combustion Turbine Blade Workshops, Electric Power Research Institute
- Williams, J. C., 1994, “The Development of Advanced Gas Turbines”, s.1831–1846
- Yu, Z. Hass, D.D., Wadley, H.N.G., 2004, NiAl Bond Coat Made by a Directed Vapor Deposition Approach, Elsevier, Materials Science&Engineering,

## ÖZGEÇMİŞ

17 Kasım 1937’de Bulgaristan’da doğan Fazıl AYDINMAKİNA, 1957 yılında Hava Harp Okulu’nu, 1958’de İstihkam Okulu’nu bitirdi. Michigan Üniversitesi’nde Makine Mühendisliği’nden lisans diplomasını 1962 ve lisansüstü diplomasını 1964 yılında aldı.

1965-1978 tarihlerinde Eskişehir Hava İkmal Bakım Merkezi’nde Jet Motoru Revizyon Tesisi’nin gerçekleştirilmesi projesi ve konu tesiste J65, J33, J57, J79, J85, Tyne 22 ve J69 Jet Motorları Revizyonunda Proje Yöneticiliği yaptı. 1978-1980 tarihlerinde Washington Silahlı Kuvvetler Kıdemli Ataşeliği’nde Hava Lojistik Ataşesi görevinde bulundu.

Eskişehir Hava İkmal Bakım Merkezi’nde 1980-1982 tarihlerinde Üretim Kontrol Müdürlüğü, 1982-1990 tarihlerinde Fabrika Müdürlüğü, 1990-1993 tarihlerinde de 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı, 1993-1996 yıllarında Kayseri 2. Hava İkmal Bakım Merkezi’nde Komutanlık yaptı.

1996-1998 Türk Hava Kurumu’nun İngiltere’den üretim lisansını aldığı NAC-6 Zirai İlaçlama ve Yangın Söndürme uçağının prototip üretimi, montajını ve uçuş sertifika işlemlerinin tasarım ve uygulamasını yaptı. İngiliz Sivil Havacılık Teşkilatı’ndan “Uçuşa Uygunluk Sertifikası”nı aldı. İlk uçuşu 29 Ekim 1997’de gerçekleştirdi.

Savunma Sanayi şirketlerinden Savronik ve Havelsan’ın 1996-2000 yıllarında Yönetim Kurulu üyeliğini, Balıkesir’deki İşbir Elektrik A.Ş.’nin 1999-2001 tarihleri arasında Genel Müdürlüğü’nü yaptı.

4691 sayılı Teknoloji Geliştirme Bölgeleri yasa kapsamındaki ODTÜ Teknokent A.Ş.’nin 2002-2007 yıllarında Yönetim Kurulu üyeliğinde bulundu. 2006 yılından beri

Eskişehir Teknoloji Geliştirme Bölgesi yönetici şirketi ATAP A.Ş.'de Genel Müdürlük görevini yürütmektedir.

Evli ve iki çocuk babası olan Fazıl Aydınmakina iki toruna sahiptir. Hobisi girişimcilere teknolojik destek vermek ve torunlarıdır.

## EK AÇIKLAMA – A

Çizelge A-1. Süperalaşımın kimyasal bileşimleri ağırlık oranları (Reed, 2006).

<b>Kobalt Bazlı Dövme Süperalaşımın Kompozisyonu</b>														
Alloy	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Fe	Mn	Si	C	Zr	Diger
Air Resist 213	-	19,0	66,0	-	4,7	6,5	-	3,5	-	-	-	0,18	0,15	0,1 Y
Elgiloy	15,0	20,0	40,0	7,0	-	-	-	-	Bal	2,0	-	0,1	-	0,04 Be
Haynes 188	22,0	22,0	39,2	-	14,0	-	-	-	3,0	-	-	0,10	-	-
L-605	10,0	20,0	52,9	-	15,0	-	-	-	-	-	-	0,05	-	-
MAR-M 918	20,0	20,0	52,5	-	-	7,5	-	-	-	-	-	0,05	0,10	-
MP35N	35,0	20,0	35,0	10,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MP159	25,5	19,0	35,7	7,0	-	-	0,6	0,2	9,0	-	-	-	-	3,0 Ti
Stellite 6B	3,0	30,0	Bal	1,5	4,5	-	-	-	3,0	2,0	2,0	1,10	-	-
Haynes 150	-	28,0	50,5	-	-	-	-	-	Bal	-	0,75	-	-	0,02 P - 0,002 S
S-816	20,0	20,0	Bal	4,0	4,0	-	4,0	-	3,0	1,2	-	0,40	-	-
V-36	20,0	25,0	Bal	4,0	-	-	2,3	-	2,4	1,0	-	0,32	-	-

<b>Demir Bazlı Dövme Süperalaşımın Kompozisyonu</b>														
Alloy	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	B	Diger
A-286	26,0	15,0	--	1,3	--	--	0,2	2,0	54,0	1,3	0,5	0,05	0,015	--
Discaloy	26,0	13,5	--	2,7	--	--	0,1	1,7	54,0	0,9	0,8	0,04	0,005	--
Alloy 901	42,5	12,5	--	5,7	--	--	0,2	2,8	36,0	0,1	0,1	0,05	0,015	--
Haynes 556	20,0	22,0	20,0	3,0	2,5	0,1	0,3	--	29,0	1,5	0,4	0,10	--	N - 0,02 La - 0,9 Ta
Incoloy 800	32,5	21,0	--	--	--	--	0,4	0,4	46,0	0,8	0,5	0,05	--	--
Incoloy 801	32,0	20,5	--	--	--	--	--	1,1	44,5	0,8	0,5	0,05	--	--
Incoloy 802	32,5	21,5	--	--	--	--	--	--	46,0	0,8	0,4	0,40	--	--
Incoloy 807	40,0	20,5	8,0	0,1	5,0	--	0,2	0,3	25,0	0,5	0,4	0,05	--	--
Incoloy 825	38-46	5-23,5	--	1,5-3,5	--	--	0,2	1,6-1,2	22,0	1,0	0,5	0,05	--	1,5-3 Cu - 0,03 S
Incoloy 903	38,0	--	15,0	--	--	3,0	0,7	1,4	41,0	--	--	--	--	--
Incoloy 907	38,0	--	13,0	--	--	4,7	0,03	1,5	42,0	--	0,15	--	--	--
Incoloy 909	38,0	--	13,0	--	--	4,7	--	1,5	42,0	--	0,4	0,01	0,001	--
N-155	20,0	21,0	20,0	3,0	2,5	1,0	--	--	30,0	1,5	0,5	0,15	--	0,15N
V-57	27,0	14,8	-	1,3	--	--	0,3	3,0	52,0	0,3	0,7	0,08	0,010	--
19-9 DL	9,0	19,0	0,4	--	1,3	--	--	0,3	Bal	1,0	0,5	0,30	--	--
16-25-6	25,5	16,25	--	6,0	--	--	--	--	Bal	2,0	1,0	0,10	--	--
Pyromet CTX-1	37,7	0,1	16,0	0,1	--	3,0	1,0	1,7	39,0	--	--	0,03	--	--
Pyromet CTX-3	38,3	0,2	13,6	--	--	4,9	0,1	1,6	Bal	--	0,15	0,05	0,007	--
17-14 CuMo	14,0	16,0	--	2,5	--	0,4	--	0,3	62,4	0,75	0,50	0,12	--	3,0 Cu
20-Cb3	34,0	20,0	--	2,5	--	1,0	--	--	42,4	--	--	0,07	--	3,5 Cu

Çizelge A-1. Süperalaşımın kimyasal bileşimleri ağırlık oranları (Reed, 2006). (Devam)

<b>Nikel Bazlı Dövme Süperalaşımın Kompozisyonu</b>															
<b>Alloy</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>Mo</b>	<b>W</b>	<b>Nb</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>Zr</b>	<b>Diger</b>
Astroloy	55,0	15,0	17,0	5,3	-	-	4,0	3,5	-	-	-	0,06	0,030	-	-
Cabot 214	75,0	16,0	-	-	-	-	4,5	-	2,5	-	-	-	-	-	0,01 Y
D-979	45,0	15,0	-	4,0	-	-	1,0	3,0	27,0	0,3	0,2	0,05	0,010	-	-
Hastelloy C-22	51,6	21,5	2,5	13,5	4,0	-	-	-	5,5	1,0	0,1	0,01	-	-	0,3 V
Hastelloy C-276	-	15,5	2,5	16,0	3,7	-	-	-	5,5	1,0	0,1	0,01	-	-	0,3 V
Hastelloy G-30	42,7	29,5	2,0	5,5	2,5	0,8	-	-	15,0	1,0	0,1	0,03	-	-	2,0 Cu
Hastelloy S	67,0	15,5	-	14,5	-	-	0,3	-	1,0	0,5	0,4	-	0,009	-	0,05 La
Hastelloy X	47,0	22,0	1,5	9,0	0,6	-	-	-	18,5	0,5	0,5	0,10	-	-	-
Haynes 230	57,0	22,0	-	2,0	14,0	-	0,3	-	-	0,5	0,4	0,10	-	-	0,02 La
Inconel 587(a)	Bal	28,5	20,0	-	-	0,7	1,2	2,3	-	-	-	0,05	0,003	0,050	-
Inconel 597(a)	Bal	24,5	20,0	1,5	-	1,0	1,5	3,0	-	-	-	0,05	0,012	0,050	0,02 Mg
Inconel 600	76,0	15,5	-	-	-	-	-	-	8,0	0,5	0,2	0,08	-	-	-
Inconel 601	60,5	23,0	-	-	-	-	1,4	-	14,1	0,5	0,2	0,05	-	-	-
Inconel 617	54,0	22,0	12,5	9,0	-	-	1,0	0,3	-	-	-	0,07	-	-	-
Inconel 625	61,0	21,5	-	9,0	-	3,6	0,2	0,2	2,5	0,2	0,2	0,05	-	-	-
Inconel 706	41,5	16,0	-	-	-	2,9	0,2	1,8	40,0	0,2	0,2	0,03	-	-	-
Inconel 718	52,5	19,0	-	3,0	-	5,1	0,5	0,9	18,5	0,2	0,2	0,04	-	-	-
Inconel X750	73,0	15,5	-	-	-	1,0	0,7	2,5	7,0	0,5	0,2	0,04	-	-	-
M252	55,0	20,0	10,0	10,0	-	-	1,0	2,6	-	0,5	0,5	0,15	0,005	-	-
Nimonic 75	76,0	19,5	-	-	-	-	-	0,4	3,0	0,3	0,3	0,10	-	-	-
Nimonic 80A	76,0	19,5	-	-	-	-	1,4	2,4	-	0,3	0,3	0,06	0,003	0,060	-
Nimonic 90	59,0	19,5	16,5	-	-	-	1,5	2,5	-	0,3	0,3	0,07	0,003	0,060	-
Nimonic 105	53,0	15,0	20,0	5,0	-	-	4,7	1,2	-	0,3	0,3	0,13	0,005	0,100	-
Nimonic 115	60,0	14,3	13,2	-	-	-	4,9	3,7	-	-	-	0,15	0,160	0,040	-
Nimonic 263	51,0	20,0	20,0	5,9	-	-	0,5	2,1	-	0,4	0,3	0,06	0,001	0,020	-
Nimonic 942(a)	Bal	12,5	-	6,0	-	-	0,6	3,7	37,0	0,2	0,3	0,03	0,010	-	-
Nimonic PE.11(a)	Bal	18,0	-	5,2	-	-	0,8	2,3	35,0	0,2	0,3	0,05	0,030	0,200	-
Nimonic PE.16	43,0	16,5	1,0	1,1	-	-	1,2	1,2	33,0	0,1	0,1	0,05	0,020	-	-
Nimonic PK.33	56,0	18,5	14,0	7,0	-	-	2,0	2,0	0,3	0,1	0,1	0,05	0,030	-	-
Pyromet 860	43,0	12,6	4,0	6,0	-	-	1,25	3,0	30,0	0,05	0,05	0,05	0,010	-	-
Rene 41	55,0	19,0	11,0	1,0	-	-	1,5	3,1	-	-	-	0,09	0,005	-	-
Rene 95	61,0	14,0	8,0	3,5	3,5	3,5	3,5	2,5	-	-	-	0,15	0,010	0,050	-
Udimet 400	Bal	17,5	14,0	4,0	-	0,5	1,5	2,5	-	-	-	0,06	0,008	0,060	-
Udimet 500	54,0	18,0	18,5	4,0	-	-	2,9	2,9	-	-	-	0,08	0,006	0,050	-
Udimet 520	57,0	19,0	12,0	6,0	1,0	-	2,0	3,0	-	-	-	0,50	0,005	-	-
Udimet 630	Bal	18,0	-	3,0	3,0	6,5	0,5	1,0	18,0	-	-	0,03	-	-	-
Udimet 700	55,0	15,0	17,0	5,0	-	-	4,0	3,5	-	-	-	0,06	0,030	-	-
Udimet 710	55,0	18,0	15,0	3,0	1,5	-	2,5	5,0	-	-	-	0,07	0,020	-	-
Udimet 720	55,0	17,9	14,7	3,0	1,3	-	2,5	5,0	-	-	-	0,03	0,033	0,030	-
Unitemp AF2-1DA	60,0	12,0	10,0	2,7	6,5	-	4,0	2,8	-	-	-	0,04	0,015	0,100	1,5 Ta
Waspaloy	58,0	19,5	13,5	4,3	-	-	1,3	3,0	-	-	-	0,08	0,006	-	-



Çizelge A-1. Süperalaşımların kimyasal bileşimleri ağırlık oranları (Reed, 2006). (Devam)

Bazı Döküm Süperalaşımların Ağırlıkça İçeriği															
Süperalaşım	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Nb	Rc	Ru	Hf	C	B	Zr	Ni
AM1	7,0	8,00	2,00	5,00	5,00	1,80	8,00	1,00	-	-	-	-	-	-	Bal.
AM3	8,00	5,50	2,25	5,00	6,00	2,00	3,50	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
CM186LC	6,00	9,30	0,50	8,40	5,70	0,70	3,40	-	3,00	-	1,40	0,07	0,015	0,005	Bal.
CM247LC	8,00	9,30	0,50	9,50	5,60	0,70	3,20	-	-	-	1,40	0,07	0,015	0,010	Bal.
CMSX-2	8,00	5,00	0,60	8,00	5,60	1,00	6,00	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
CMSX-3	8,00	4,80	0,60	8,00	5,60	1,00	6,30	-	-	-	0,10	-	-	-	Bal.
CMSX-4	6,50	9,60	0,60	6,40	5,60	1,00	6,50	-	3,00	-	0,10	-	-	-	Bal.
CMSX-6	10,00	5,00	3,00	-	4,80	4,70	6,00	-	-	-	0,10	-	-	-	Bal.
CMSX-10	2,00	3,00	0,40	5,00	5,70	0,20	8,00	-	6,00	-	0,03	-	-	-	Bal.
EPM-102	2,00	16,50	2,00	6,00	5,55	-	8,25	-	5,95	3,00	0,15	0,03	-	-	Bal.
GTD-111	14,00	9,50	1,50	3,80	3,00	5,00	3,15	0,07	-	-	-	0,10	0,014	0,007	Bal.
GTD-222	22,50	19,10	-	2,00	1,20	2,30	0,94	0,80	-	-	-	0,08	0,004	0,020	Bal.
IN100	10,00	15,00	3,00	-	5,50	4,70	-	-	-	-	-	0,18	0,014	0,060	Bal.
IN-713LC	12,00	-	4,50	-	5,90	0,60	-	2,00	-	-	-	0,05	0,010	0,100	Bal.
IN-738LC	16,00	8,50	1,75	2,60	3,40	3,40	1,75	0,90	-	-	-	0,11	0,010	0,040	Bal.
IN-792	12,40	9,20	1,90	3,90	3,50	3,90	4,20	-	-	-	-	0,07	0,016	0,018	Bal.
IN-939	22,40	19,00	-	2,00	1,90	3,70	-	1,00	-	-	-	0,15	0,009	0,100	Bal.
Mar-M002	8,00	10,00	-	10,00	5,50	1,50	2,60	-	-	-	1,50	0,15	0,015	0,030	Bal.
Mar-M246	9,00	10,00	2,50	10,00	5,50	1,50	1,50	-	-	-	1,50	0,15	0,015	0,050	Bal.
Mar-M247	8,00	10,00	0,60	10,00	5,50	1,00	3,00	-	-	-	1,50	0,15	0,015	0,030	Bal.
Mar-M200Hf	8,00	9,00	-	12,00	5,00	1,90	-	1,00	-	-	2,00	0,15	0,015	0,030	Bal.
Mar-M421	15,00	10,80	1,80	3,30	4,50	1,60	-	2,30	-	-	-	0,18	0,019	0,040	Bal.
MC2	8,00	5,00	2,00	8,00	5,00	1,50	6,00	-	-	-	0,10	-	-	-	Bal.
MC-NG	4,00	-	1,00	5,00	6,00	0,50	5,00	-	4,00	4,00	0,10	-	-	-	Bal.
MX4	2,00	16,50	2,00	6,00	5,55	-	8,25	-	5,95	3,00	0,15	0,03	-	-	Bal.
Nasair100	9,00	-	1,00	10,50	5,75	1,20	3,30	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
PWA1422	9,00	10,00	-	12,00	5,00	2,00	-	1,00	-	-	1,50	0,14	0,015	0,100	Bal.
PWA1426	6,50	10,00	1,70	6,50	6,00	-	4,00	-	3,00	-	1,50	0,10	0,015	0,100	Bal.
PWA1480	10,00	5,00	-	4,00	5,00	1,50	12,00	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
PWA1483	12,20	9,20	1,90	3,80	3,60	4,20	5,00	-	-	-	-	0,07	-	-	Bal.
PWA1484	5,00	10,00	2,00	6,00	5,60	-	9,00	-	3,00	-	0,10	-	-	-	Bal.
PWA1487	5,00	10,00	1,90	5,90	5,60	-	8,40	-	3,00	-	0,25	-	-	-	Bal.
PWA1497	2,00	16,50	2,00	6,00	5,55	-	8,25	-	5,95	3,00	0,15	0,03	-	-	Bal.
Rene 80	14,00	9,00	4,00	4,00	3,00	4,70	-	-	-	-	0,80	0,16	0,015	0,010	Bal.
Rene 125	9,00	10,00	2,00	7,00	1,40	2,50	3,80	-	-	-	0,05	0,11	0,017	0,050	Bal.
Rene 142	6,80	12,00	1,50	4,90	6,15	-	6,35	-	2,80	-	1,50	0,12	0,015	0,020	Bal.
Rene 220	18,00	12,00	3,00	-	0,50	1,00	3,00	5,00	-	-	-	0,02	0,010	-	Bal.
Rene N4	9,00	8,00	2,00	6,00	3,70	4,20	4,00	0,50	-	-	-	-	-	-	Bal.
Rene N5	7,00	8,00	2,00	5,00	6,20	-	7,00	-	3,00	-	0,20	-	-	-	Bal.
Rene N6	4,20	12,50	1,40	6,00	5,75	-	7,20	-	5,40	-	0,15	0,05	0,004	-	Bal.
RR2000	10,00	15,00	3,00	-	5,50	4,00	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
SRR99	8,00	5,00	-	10,00	5,50	2,20	12,00	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
TMS-75	3,00	12,00	2,00	6,00	6,00	-	6,00	-	5,00	-	0,10	-	-	-	Bal.
TMS-138	2,90	5,90	2,90	5,90	5,90	-	5,60	-	4,90	2,00	0,10	-	-	-	Bal.
TMS-162	2,90	5,80	3,90	5,80	5,80	-	5,60	-	4,90	6,00	0,09	-	-	-	Bal.

## **EK AÇIKLAMALAR – B**

### **Paket Sementasyon Alüminit Yayımlı Kaplama Süreci**

#### **B.1 Keşif Kontrol**

Bütün yüzeylerin kaplama öncesi uygunluğunun belirlenmesi için soğutulmuş kanatçıklar görsel olarak kontrol edilir ve akış ölçümü uygulanır. Oksitlenmiş yüzeyler ve hassas dökümün maça artıkları ve kabuk kalıntıları gibi yabancı malzemelerin bulunması kaplama oluşumunu etkiler ve ürünün kullanım ömrünü kısıtlar.

#### **B.2 Yüzey Hazırlama**

Yüzeysel oksitlerin giderilmesi için yapılan yüzey hazırlama da genellikle orta boyutlu alümina taneleri kullanılarak kumlama yapılır. Silisyum karbür ile yapılan kumlama istenmez. Çünkü, herhangi bir yapışmış silisyum karbür zerreciği süperalaşımında düşük ergime sıcaklıklı ötektik oluşturur. Ultrasonik yüzey temizleme ile istenen hassas yüzey elde edilir. Talaşlı imalattan sonra buharla temizleme ile yağ kalıntılarının giderilmesi gerekebilir.

#### **B.3 Maskeleme**

Bazı durumlarda kanatçık dipleri gibi kritik mekanik temas yüzeylerinde kaplama olması istenmez. Bu tip bölgelerin maskelenmesi gerekir. Bu işlem mekanik veya kimyasal reaktif maskelerle uygulanabilir. Mekanik maskeleme, >870°C gibi yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen kaplama işleminin güçlü etkisi nedeni ile tam koruma sağlamayabilir. Çeşitli element ve alaşım tozlarını içeren kimyasal reaktif maskeler yüksek işlem sıcaklıklarında daha etkilidir. Pahalı maskeleme ihtiyaçlarının önlemesi amacıyla kaplamaların final talaşlı imalat öncesi yapılması önerilmektedir.

#### B.4 Paket Karışımı (Aktivatör) Hazırlanması

Paket karışımlarının (aktivatör) hazırlanması için etkili karıştırma depolama ve dozajlama amacı ile tasarlanmış büyük ölçekli toz işlem ekipmanlarına ihtiyaç duyulur. Örnek karışım (aktivatör) kompozisyonları Çizelge B.1'de gösterilmiştir.

Çizelge B.1 Farklı nikel ve kobalt süperalaşımlarda paket karışım / kaynak ve işlem parametreleri (Vol. 5, ASM Handbook 1994, s.616)

Kaplama Tipi	Kaynak Bileşeni	İşlem Parametreleri
Paket alüminyumlamada, nikel alaşımlarına $Ni_2Al_3$ 'ün içeri doğru yayılımı <sup>(a)</sup>	5-20% Al (Al-10Si), 0,5-3% NH <sub>4</sub> Cl, kalanı Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozu	650 ile 680°C'ta 1-4 saat hava, argon ve H <sub>2</sub> de, 1095°C de, argonda 4-6 saat ısıl işlem.
Paket alüminyumlamada, nikel alaşımlarına NiAl'ün içeri doğru yayılımı <sup>(b)</sup>	44% Al, 56% CrNH <sub>4</sub> Cl, kalanı Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozu	5 ila 10 saat 1040°C vakum altında (Argon ve H <sub>2</sub> )
Paket alüminyumlamada, nikel alaşımlarına NiAl'ün dışı doğru yayılımı <sup>(c)</sup>	2-3% Al, 20% Cr, 0,25% NH <sub>4</sub> HF <sub>2</sub> , kalanı Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozu	Argon altında 1040°C de 25 saat
Kobalt alaşımların Paket Alüminyumlanması <sup>(d)</sup>	8% Al, 22% Cr, 1% NH <sub>4</sub> F, kalanı Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozu	Argon altında 980-1150°C de 4-20 saat
Gaz fazı alüminyumlamada, nikel alaşımlarına $Ni_2Al_3$ 'ün dışarı doğru yayılımı <sup>(e)</sup>	10% Co <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> , 2,5% NaCl, 2,5% AlCl <sub>3</sub> , kalanı Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozu	Argon altında 1095°C de 3 saat
Gaz fazı alüminyumlamada, nikel alaşımlarına $Ni_2Al_3$ 'ün dışarı doğru yayılımı <sup>(f)</sup>	30% Al - 70% Cr alaşım granülleri, NH <sub>4</sub> F	Argon altında 1150°C de 4 saat
Nikel alaşımlarda paket veya gaz fazı kromlama <sup>(g)</sup>	15% Cr, 4% Ni, 1% Al, 10,25% NH <sub>4</sub> Br veya NH <sub>4</sub> Cl, kalanı Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozu	Argon altında 1040°C de 3 saat
(a) U.S. Patent 3,544,348.	(b) U.S. Patent 3,625,750.	(c) U.S. Patent 3,716,398.
(d) U.S. Patent 3,257,230.	(e) U.S. Patent 4,132,816.	(f) G.Gauje, R.Morbioli
(g) U.S. Patent 3,801,353.		

Sağlık ve güvenlik sebebiyle kapalı işlem sistemlerine günümüzde ihtiyaç duyulmaktadır. Olası metal tozlarının patlamalı yanması engellenmelidir. Genel olarak çeşitli kimya mühendisliği teknolojileri uygulanır.

### **B.5 Kutuların ve Kapların Yüklenmesi**

Kaplama kutularına kontrollü dizilimlerle toz karışımlarının içine gömülü parçaların yüklenmesi, işçiliği yoğun bir işlemdir.

### **B.6 Fırın Sıcaklık evrimleri ve Isıl İşlemler**

Asal gaz ortamında uygun sıcaklık ve ısıl dağılımı sağlayan fırınlar kaplama tesislerinin en pahalı ekipmanlarıdır. Çoğu işlemlerde kaplamalarda kullanılan kutular Inconel 600 veya 601 gibi yüksek sıcaklığa dayanımlı alaşımlarından hava geçirmeyecek yalıtım elemanları kullanılarak üretilir. Gazla veya elektrikle ateşlenen kuyu tipi fırınlarda kullanılan kaplar 1.2 m çapında ve 2.4 m yüksekliğindedir. Kaplama işlemi sırasında asal gaz olarak kullanılan argon veya hidrojenin kaplara püskürtülmesi ile hava ve nemden uzak asal ortam sağlanır. Bir kaplama işlemi, kapların ve içeriğinin belirli bir sıcaklığa getirilmesi, bu sıcaklığın birkaç saat korunması ve asal gaz ortamını koruyarak ortam sıcaklığının soğutulmasını içerir.

İe yayınımla yapılan alüminyumlamada, kaplama sıcaklıkları 650°C olabildiği gibi nikel speralaşımlarının dışa yayınım yoluyla alüminyumlamada 1150°C'a kadar çıkabilir. Süreç zamanları ortalama olarak 4 ile 24 saat arasındadır. Çizelge B.1'de bazı zaman-sıcaklık çevrim örnekleri görülebilir. Sıcaklığın sabit olduğu periyotlarda kabın içindeki sıcaklık dağılımının genellikle  $\pm 14^\circ\text{C}$  olması istenir. Süreç sırasında çıkan gazlar asal gaz akışı ile atılır ve çevresel olarak alüminyum klorür gibi zararlı kimyasallar içerir. Bu gazlar atmosfere atılmadan önce çeşitli filtrelemelerle tutulmalı ve uygun evre mevzuatlarına göre atılmalıdır.

Kapların ve kutuların boşaltılması, parçaların tozlardan ve maskeleme elemanlarından ayrılması, parçaların detaylı olarak su ile temizlenmesi işçiliği yoğun bir süreçtir. Sabit ve hareketli kanatçıklarda, kaplamaların uygun olarak yayımını sağlamak için ilave ısıtma işlemi ihtiyaç duyulabilir ve/veya bu yolla kaynak alışı sırasında optimum mekanik özellikler sağlanmasına yardımcı olunur. Parça geometrilerinden dolayı fazla miktarda oluşan tepe-vadi ilişkisi sonucu, kaplamaların her bölgede homojen olarak dağılmasını beklemek mümkün değildir. Bu sebeple, kaplama kalınlığı ve mikroyapısı olarak parça bütünlüğünde homojenliği yakalamak amacıyla kaplama sonrası ısıtma işlemleri uygulanır. Bu işlemler asal veya vakum ortama ihtiyaç duyduğu gibi değişken olmayan ısıtma işlem sıcaklık kontrollerine ihtiyaç duyarlar.

### **B.7 Aktivatörlerin Geri Kazanımı**

Toz karışımların, kullanım sonrası azalacağı aşıkardır. Bu karışımlara yapılan kimyasal ölçüm sonrası, eksilen kaplama elementlerinin, alışımların ve aktivatörlerin eklenmesi toz karışımlarının geri kazanılması için genel uygulamadır. Benzer kaplama uygulamaları yapıldığında istatistiksel kayıtlar esas alınabilir. Kullanılmış karışımların atılması çevresel mevzuatlar açısından sakıncalı olduğundan, atılabilecek hale getirmek için yüksek maliyetli özel işlemlere ihtiyaç duyulur.

### **B.8 Kalite Kontrol**

Kalite kontrol işlemlerinde, uygulamanın her onarım yapılacak kanatçık grubunu (aynı anda işlem yapılan tüm miktar) temsil eden gerçek bir parça, tahribatlı kontrol ile incelenir. Bu işlem esnasında, gerçek parçadan, kaplama yapılan alanları temsil edecek tam kesit numune parça alınarak “test numunesi” oluşturulur. Test numunesi, kaplama sonrası yapılacak tüm kalite kontrol işlemlerinde, gerçek parçayı ve uygulanan süreci temsil edecektir. Değerlendirmede, kullanıcının belirlediği kaplama kalınlığının (birçok uygulamada 25-100 µm veya 1-4 mil (1 mil=25,4 µm) ve mikroyapının uygunluğu araştırılır. Element kompozisyonlarının, x-ray floresans (XRF) veya taramalı elektron mikroskoplarda EDX analizi ile kantitatif analizi yapılır. Yapı içerisinde alüminyum,

krom, platin, vb. içeriği değerlendirilir. Bir saat süre ile 621°C’da alüminyumlanmış nikel elementinin ısıtma renklendirme veya temaslı ısıtma algılayıcı ölçüm yöntemi ile kaplama yüzeyindeki verilerde uyumsuzluk araştırılır. Isıtma renklendirme yönteminde, kaplanmış olanlar altın renginde, kaplanmamış olanlar ise lacivert renklerde görünür. Kaplama kalınlığı ölçümünde tahribatsız ölçüm usulleri belirlenmiştir (Kriege and Bone,1973). Fakat, bu usuller yeni kaplama yüzeyleri için yaygın olarak kullanılmamaktadır. Servis ömrü olan kullanılmış statüsündeki parçalarda, kaplama kalınlığının ölçümü ve alüminyum elementi içeriği malzeme kullanım ömrünün belirlenmesinde önem taşımaktadır (Wells, 1992).

Zaman-sıcaklık çevrimi yöntemiyle yapılan kontrollerde kaplaması “hasarlı” statüsünde belirlenen parçalara yeni kaplama uygulanır. Gerekli durumlarda kaplamalar asit eriyiklerinde sökülürler. Alüminit yayınımlı kaplamalarda nitrik asit veya hidroklorik asit, fosforik asit ve tuz içeren karışım (all in one) kullanılır. Ancak bu işlem çok dikkatli ve gerektiğinde uygulanmalıdır. Çünkü, alüminit yayınımlı dış kaplamada, alaşımın sahip olduğu nikel bileşiklerin de bu asit banyosu esnasında yok olması gündeme gelir ki, kaplamanın sökülmesi sonrasında kritik parça ölçümlerinde fark edilir düzeyde ölçüm farklılıklarının ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu problemin çözümü istatistiksel süreç kontrol uygulamaları ile desteklenir. Tamir sürecinde, (Bkz. Şekil 3.9) belirtilen standart üretim teknolojisindeki tüm kaplama döngüsü aynen tekrarlanır.

## **B.9 Güvenlik Önlemleri**

- Paket yayınımlı işleminde kullanılan amonyum florür deri, gözler ve solunum sistemi için zehirlidir ve buharı ciddi zehirlenmelere neden olabilir. Aseton ve yapıştırıcı ayrıca yanıcıdır. Bu maddeleri kullanırken deri, göz ve solunum sistemi korunması ve iyi havalandırılan yerde kullanılması gereklidir.

- Parçalar kaplama öncesinde sadece lifsiz pamuklu eldivenlerle ele alınmalıdır ve kirlenmemelerine özen gösterilmelidir. Aksi takdirde kaliteli bir kaplama elde edilemeyebilir.

- Kaplama istenmeyen bölgelerin maskelenmesi için kullanılan maskeleyicilerden M7 maskeleyicisinin sadece M1 üzerine uygulanmasına, hiçbir zaman malzemenin kendisine temas etmemesine dikkat edilmelidir. Aksi takdirde parça hasar görebilir.

- M1 ve M7 maskeleyiciler kurudukları zaman kırılgandır ve kolaylıkla dökülebilirler. Parçaları ele alırken ve kutulara yerleştirirken maskelerin dökülmemesine özen gösterilmelidir.

- Bütün karıştırılmış tozlar, paket yayını yapılan saha içinde kapalı kutularda tutulur. Alüminyum oksit tozları ve CODEP-B tozu orijinal kutularında nemden ve kirlenmeden uzak, kapalı şekilde korunur. Tozlar “ilk gelen ilk kullanılır” prensibine göre tüketilir. Yaklaşık 1 kg. amonyum florür bir fırın içerisinde her zaman 50°C sıcaklıkta hazır bekletilir veya kullanmadan önce en az 24 saat boyunca kurutulur.

- Karıştırılan toz, amonyum florür ilave edilerek aktifleştirilmesinden itibaren 24 saat içerisinde kullanılır.

- Deneme kaplamaları sonucunda belirlenen toz karışımı oranlarına ve fırınlama sürelerine uyulur.

- Kaplama numuneleri kutuların merkezine diğer parçalarla temas etmeyecek şekilde yerleştirilir.

- Fırında kullanılan hidrojen gazı havayla karıştığında patlayıcı özelliğe sahip bir gaz olduğundan, kaçak kontrolleri iyi yapılmalı ve acil durum usullerine uyulmalıdır.

- Fırının boşaltılması sırasında ısı yalıtımlı eldivenlerin kullanılması gereklidir. Aksi takdirde yaralanmalar meydana gelebilir.

- Kutuların boşaltılması sırasında tozlara karşı göz ve solunum koruması kullanılması gerekir.

## B.10 Sürecin Uygulama Adımları

- Paket yayınımların kaplama yapılacak olan parçaların kaplanması istenmeyen kısımları maskelenir.

- Maskelenecek bölgelere önce yapıştırıcı ve seyreltici ile karıştırılarak macun kıvamına getirilen M1 maskeleyicisi uygun kalınlık sağlanıncaya kadar birkaç kat uygulanır. M1 kuruduktan sonra sadece onun üzerine M7 maskeleyici uygulanır ve kurutulur.

- Alüminyum oksit ve CODEP-B tozları gerekli oranlarda karıştırılarak ikiz hazneli karıştırıcı içerisinde bir süre karıştırılır. Daha sonra bu karışıma gerekli oranda amonyum florür ilave edilerek en az 30 dakika süreyle tekrar karıştırılır.

- Kaplama kutuları, 2. kademe kanatçıkların kaplanması durumunda 4 cm. yüksekliğe kadar karışım tozu ile doldurulur ve kanatçıklar bu tozun üzerine konkav yüzeyleri yukarı gelecek şekilde yatay konumda yerleştirilerek tozun içine hafifçe gömülür (Bkz. Şekil 4.9).

- Üzerine tozun kalan kısmı boşaltılır ve tozun tamamen yerleşerek boşlukları da kaplaması için kaplama kutularının kenarlarına hafifçe vurulur.

- Doldurulan kaplama kutularının kapakları kapatılır ve fırın kutu ızgarasına (retord) uygun şekilde yerleştirilir (Şekil B.1). Isı algılayıcılar, kutuların içinde paket yayınımların karma tozunun içine gömülür ve fırınlama çevrimi uygulanır.

- Fırınlama çevriminde;

- -62°C yada daha düşük çığlenme noktasına sahip, 6 m<sup>3</sup>/saat basınçlı MIL-A-18455 argon ile en az 10 dakika temizleme yapılması,

- 750 – 775°C'a ısıtarak BB-H-886 Hidrojen (-62°C veya daha düşük çığlenme noktası) ile oksijenden arındırılması





Şekil B.1 Kaplama Kutuları ve Atmosfer Kontrollü Fırın Izgarası Üzerine Yerleştirilmesi

- Fırını 1035–1065°C'a kadar ısıtma ve bu sıcaklıkta yaklaşık 4 saat tutulması,
  - Hidrojen akışının durdurulması ve 4,5 - 6 m<sup>3</sup>/saat basınçlı MIL-A-18455 argon (-62°F veya daha düşük çığlenme noktası) kullanarak oksijenden arındırılması,
  - Kutuların 1035–1065°C'de en az 50 dakika süreyle oksijenden arındırılması,
  - 4,5 - 6 m<sup>3</sup>/saat basınçlı MIL-A-18455 argon ile sıcaklık 150-250°C'a düşene kadar oksijenden arındırmaya devam edilmesi,
  - Izgaranın çıkarılarak kutuların boşaltılması.
  - Boşaltılan kutulardan çıkarılan kaplanmış parçaların üzerindeki toz artıkların fırça ve basınçlı hava kullanılarak temizlenmesi,
- aşamalarını içerir.

### **B.11 Sürecin Uygunluğunun Kontrolü**

Kaplama işlemi sonrası malzemeler atölyede muhafaza edilir. Paket yayılımı kaplama esnasında hazırlanan numune iki parçaya ayrılır. Kaplama uygunluğunun, kalınlığının tespiti ve oksitlenme direncinin belirlenmesi amacıyla ilgili metalürji laboratuvarlarına gönderilen numuneler üzerinde değerlendirmeler yapılır. Ölçüm kontrolünde laboratuvarda x500 büyütme yapacak laboratuvar ekipmanına gerek duyulmaktadır. Kaplama kalınlığının tüm parçalarda yaklaşık 25–110 mikron (0,0010–

0,0045 inç) arasında olması istenir. Bu limiti aşan numuneler belirlendiğinde, numunelerin alındığı fırında kaplanan parçaların tümü ret edilir.

Laboratuarda yapılan değerlendirmede yetkili havacılık ve benzeri otoriteler tarafından onaylanan malzemelere özgü standartlar kullanılır. Bu standartların özü, paket yayının kaplamasının güvenilirliği ile ilgilidir. Rene 80-döküm süperalaşımından üretilmiş türbin sabit kanatçığı ile ilgili standartta; “Birbirine 25mm (1 inç)’den daha yakın olmamak şartıyla, derinliği ilave paket sementasyon alüminit yayının kaplama tabakası kalınlığının %50’sini aşan, maksimum iki “oksit cebi” (derinliğin genişlikten az olması) veya “batma”ya (derinliğin genişlikten fazla olması) izin verilir. Referans dökümünde “İki oksit cebi, içe doğru yayının tabakasına değmemek kaydıyla servise verilmesine engel teşkil etmez. Dışa doğru yayının (ilave) tabakasının %50’sini aşmayan bütün oksit cepleri ve batmalar kabul edilir.” hükmü yer almaktadır.

Kaplama kalınlığının uygunluğunun dışında, kaplamanın yeterli oksitlenme derecesine sahip olup olmadığının kontrol edilmesi amacıyla, numunelere 1120°C sıcaklıkta hava sirkülasyonlu fırında oksitlenme testi yapılır. Test sonucunda metalürji laboratuvarına gönderilen numunelerde oluşmuş olan oksit ceplerinin yayının tabakasına ulaşmamış olması istenir.

Metalürji laboratuvarları, “test numune”leri üzerinde uyguladıkları çalışmalarını raporlamak ve test numunelerini arşivlemekten sorumludur.

Servise verilen paket yayının kaplamada belirlenecek uyumsuzluklarda bu test kuponları bilimsel değerlendirme ve denetsel amaçlı kullanılabilirler. Bu aşamada Elektron Mikroskobu verilerine gerek duyulabilmektedir.

## **B.12 Süreç Bitiminden Sonra Yapılması Gerekenler**

Kaplama yapılan kanatçıklarda parçalara basınçlı atölye havası tutarak artık tozlardan arındırma ve kaplanmış olabilecek cıvata deliklerinin yeniden raybalanması dışında yapılması gereken özel bir işlem yoktur. Ayrıca kaplama sonrası kaplamanın sünekleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle genelde tamir görmüş parçalara uygun ısıtma işlemi uygulanır.

## **EK AÇIKLAMALAR – C**

### **Kaplama Yüzeylerinin X Işınları Difraktometre Çalışmaları**

#### **C.1 J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçığı kaplama öncesi yüzeyinin XRD laboratuvarında X- ışınları difraktometresi sonuçları**

J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçıklarının kaplama öncesi yüzeyinden alınan XRD grafiği Şekil C-1 A ve Şekil C-1 B de verilmiştir.

Şekil C-1 A ve C-1 B de J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçığının önceden kaplanmış yüzeyinden alınan grafiklerde (I-2 $\theta$ ) 2, 3, 5, 6, 7 ve 9 nolu pikler  $\beta$  fazına (NiAl) aittir. En yüksek şiddeti gösteren 3 nolu pik alüminyum nikel fazına aittir ( 110 düzlemi ). Tüm kaplama yüzeyinin  $\beta$  fazı NiAl den oluştuğu açıkça görülmektedir.

#### **C.2 J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçığının yeniden kaplanmış yüzeyinin X- ışınları difraktometresi sonuçları**

J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçıklarının yeniden kaplanmış dış yüzeyinden alınan XRD grafiği Şekil C-2 A ve Şekil C-2 B de verilmiştir.

Şekil C-2 A ve C-2 B de J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçığının yeniden kaplanmış dış yüzeyinden alınan grafiklerinde (I-2 $\theta$ ) 2, 6, 8 ve 11 nolu pikler NiAl  $\beta$  fazına ait olup 6 nolu pik (110 düzleminde) en yüksek şiddete sahiptir. Ayrıca 3, 5, 10 ve 12 nolu pikler NiO' e aittir. Bunların kaplama yüzeyinin XRD öncesi yeterince temizlenmemesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

### **C.3 Kullanılmış kaplamalı J85 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçığı kaplama öncesi yüzeyinin X- ışınları difraktometresi sonuçları**

J85 motoru ikinci kademe hareketli türbin kanatçıklarının kaplama öncesi dış yüzeyinden alınan XRD grafiği Şekil C-3 A ve Şekil C-3 B de verilmiştir.

Şekil C-3 A ve C-3 B de J85 motoru ikinci kademe hareketli türbin kanatçığının kaplama öncesi dış yüzeyinden alınan grafiklerinde (I-2 $\theta$ ) 2, 4, 5 ve 8 nolu pikler NiAl  $\beta$  fazına ait olup 3 nolu pik (110 düzleminde) en yüksek şiddeti göstermektedir.

### **C.4 J85 motoru ikinci kademe hareketli türbin kanatçığı yeniden kaplanmış yüzeyinin XRD laboratuvarında X- ışınları difraktometresi sonuçları**

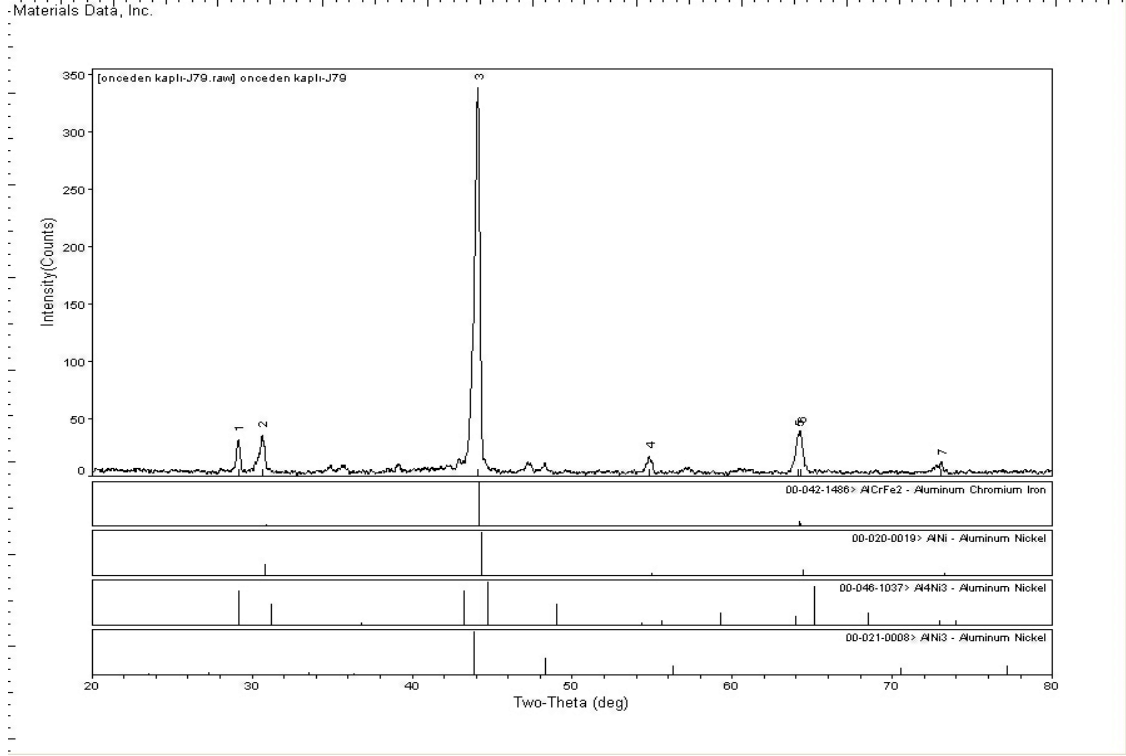
J85 motoru ikinci kademe hareketli türbin kanatçıklarının yeniden kaplanmış dış yüzeyinden alınan XRD grafiği Şekil C-4 A ve Şekil C-4B de verilmiştir.

Şekil C-4 A ve C-4 B de J85 motoru ikinci kademe hareketli türbin kanatçığının yeniden kaplanmış dış yüzeyinden alınan grafiklerinde (I-2 $\theta$ ) 1, 8 ve 11 nolu pikler NiAl  $\beta$  fazına ait olup 8 nolu pik (110 düzleminde) en yüksek şiddet değerine sahiptir. 3, 4, 7 ve 12 nolu pikler Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub>' e aittir ayrıca 2 ve 6 nolu pikler Bunsenite – NiO' e rastlanmıştır. Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub> ve Bunsenite – NiO in yeniden kaplanan yüzeyindeki XRD öncesi yeterince temizlenmemesinden kaynaklandığı ihtimal dahilindedir.

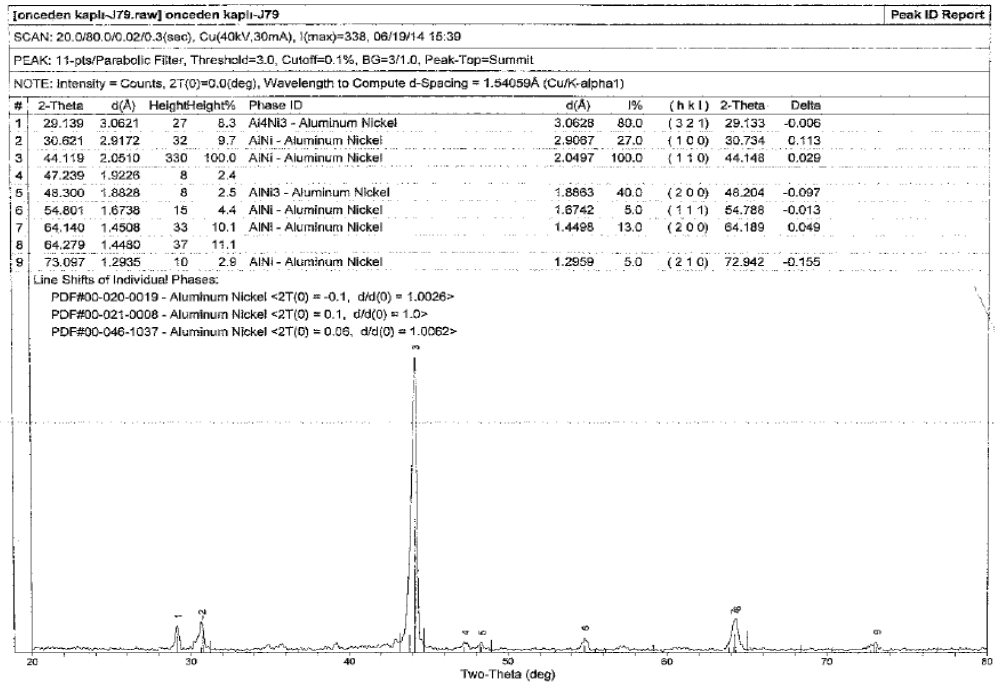
### **C.5. Hareketli ve sabit türbin kanatçıklarının kaplama öncesi ve sonrası yüzeylerinden alınan XRD grafik çözümlerinin karşılaştırılması**

Tüm veriler incelendiğinde Şekil C-5 te özetlenen grafik çözümleri üzerinde AlNi  $\beta$  fazının (110 düzlemi) her bir yapıda hakim olduğu ve bu özelliğin de süperalaşımarda gaz türbin ve jet motorlarında sorun olan oksidasyon ve yüksek sıcaklık korozyonunu engellendiği belirlenmiştir.

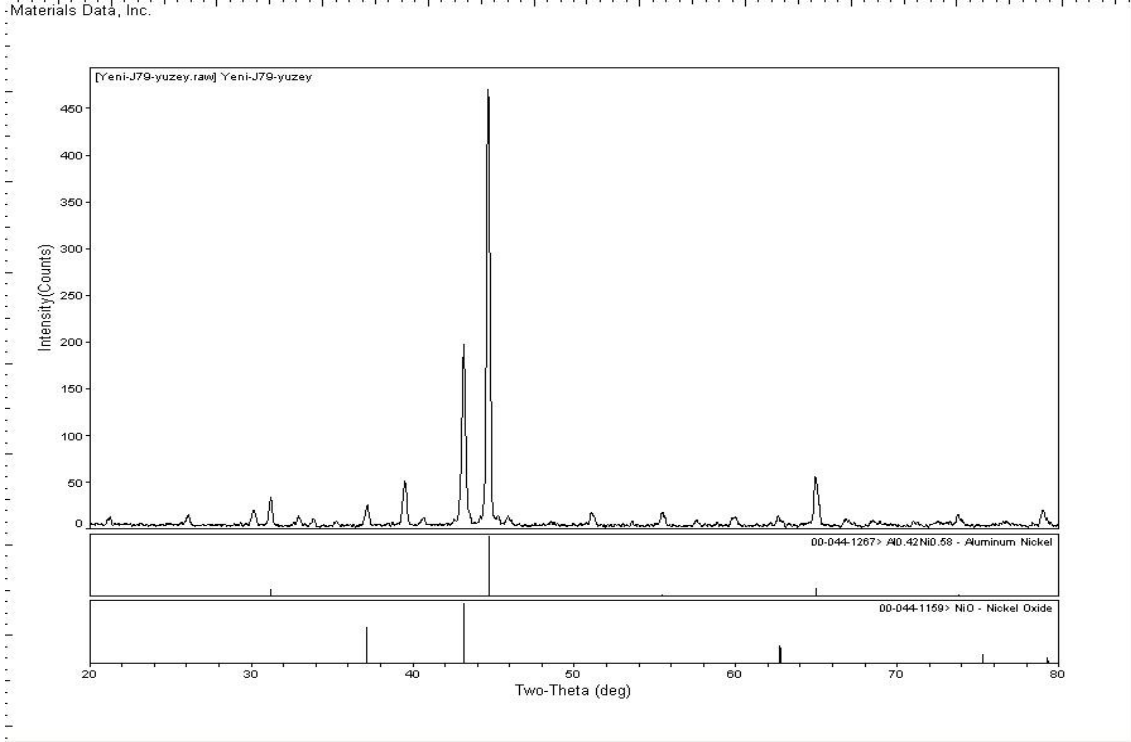
Kaplama sonrası türbin kanatçıklarında cüzi miktarlarda NiO ve Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub> bulunduğu dikkat çekmiştir. Bunun kaplanmış yüzeylerin XRD öncesi yeterince temizlenmemesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu fazlara kaplama öncesi türbin kanatçıklarında rastlanmamıştır.



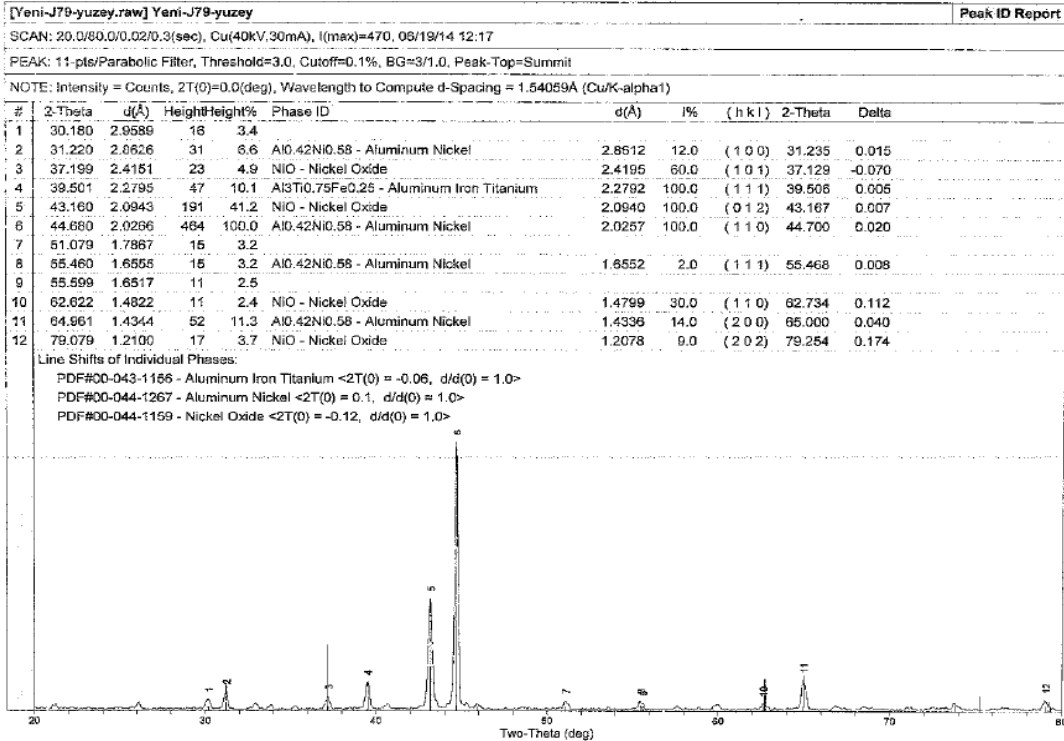
Şekil C-1 A: J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçıklarında kaplama öncesi yüzeylerinin XRD grafiği



Şekil C-1 B: J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçıklarında kaplama öncesi yüzeylerinin XRD grafiği çözümleri

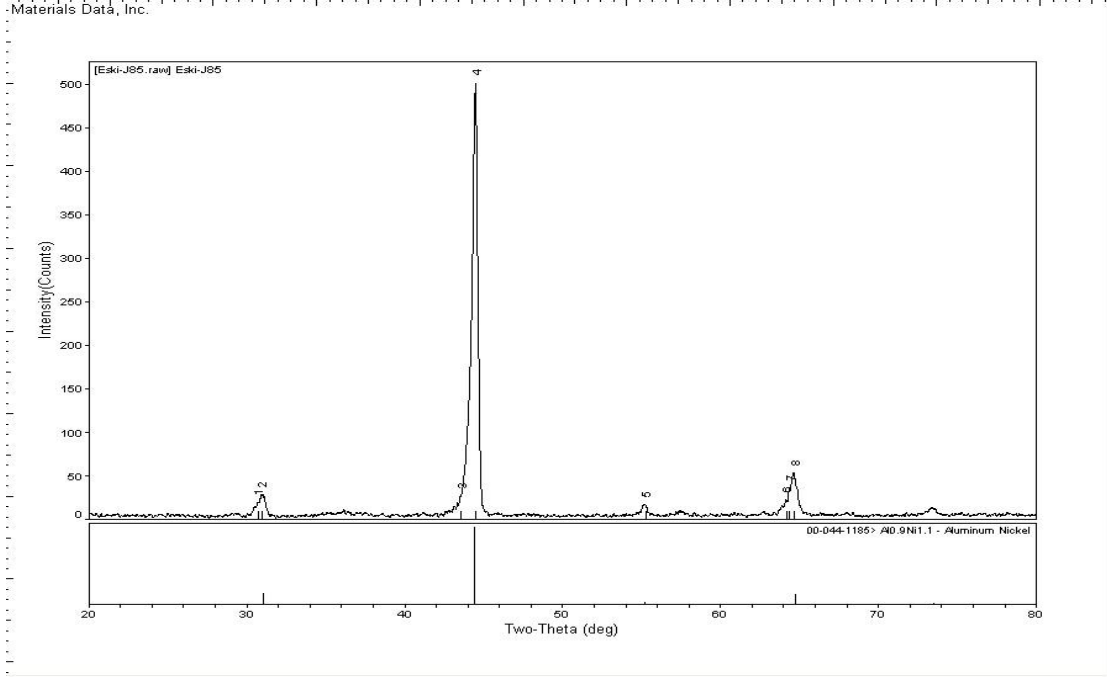


**Şekil C-2 A :** J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçıklarında yeniden kaplanmış dış

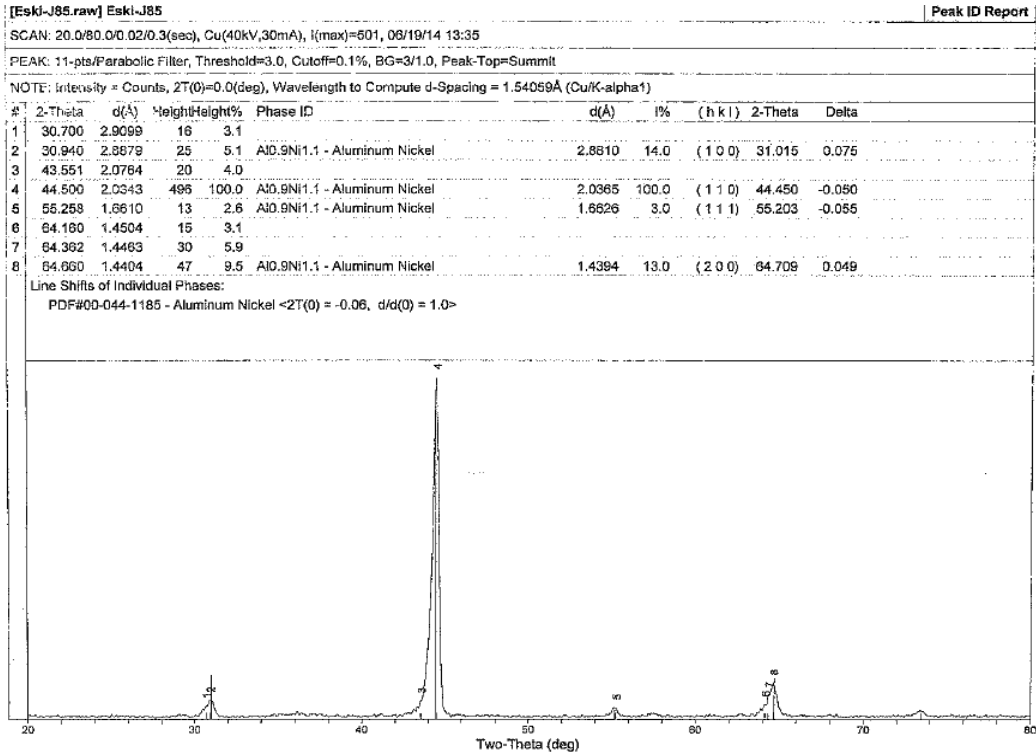


Materials Data, Inc.

**Şekil C-2 B :** J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçıklarında yeniden kaplanmış dış yüzeylerinin XRD grafiği çözümleri



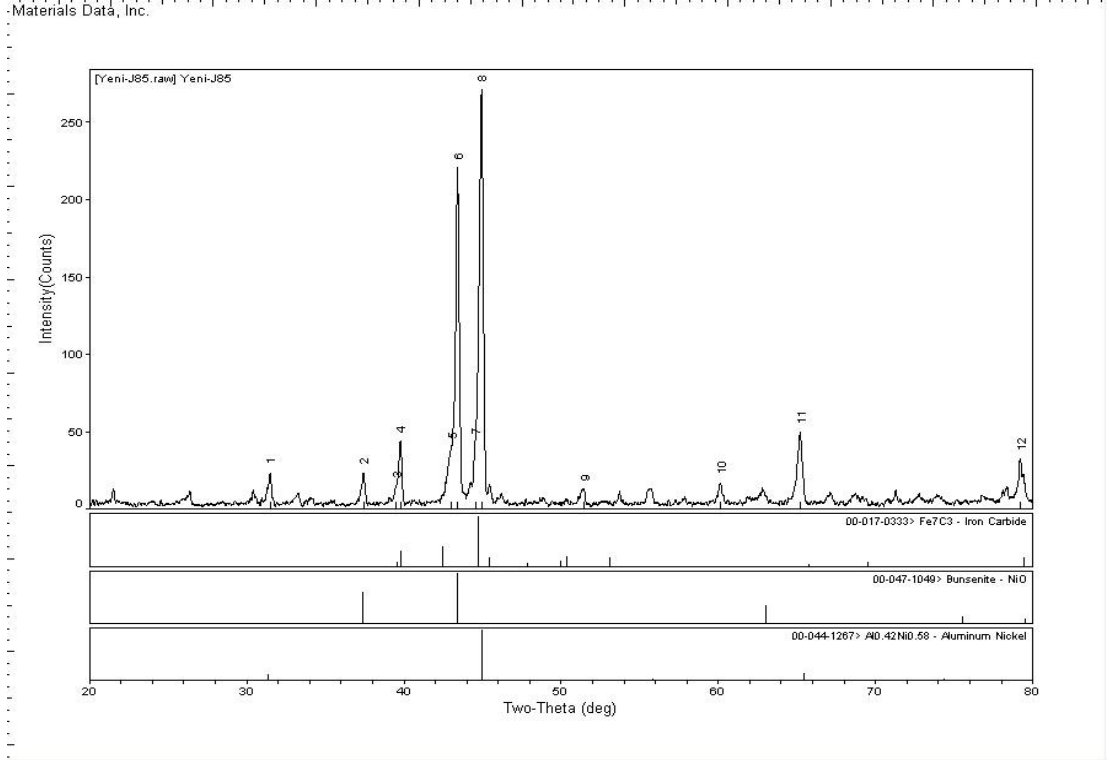
Şekil C-3 A : J85 motoru ikinci kademe hareketli türbin kanatçıklarında kaplama öncesi dış yüzeylerinin XRD grafiği



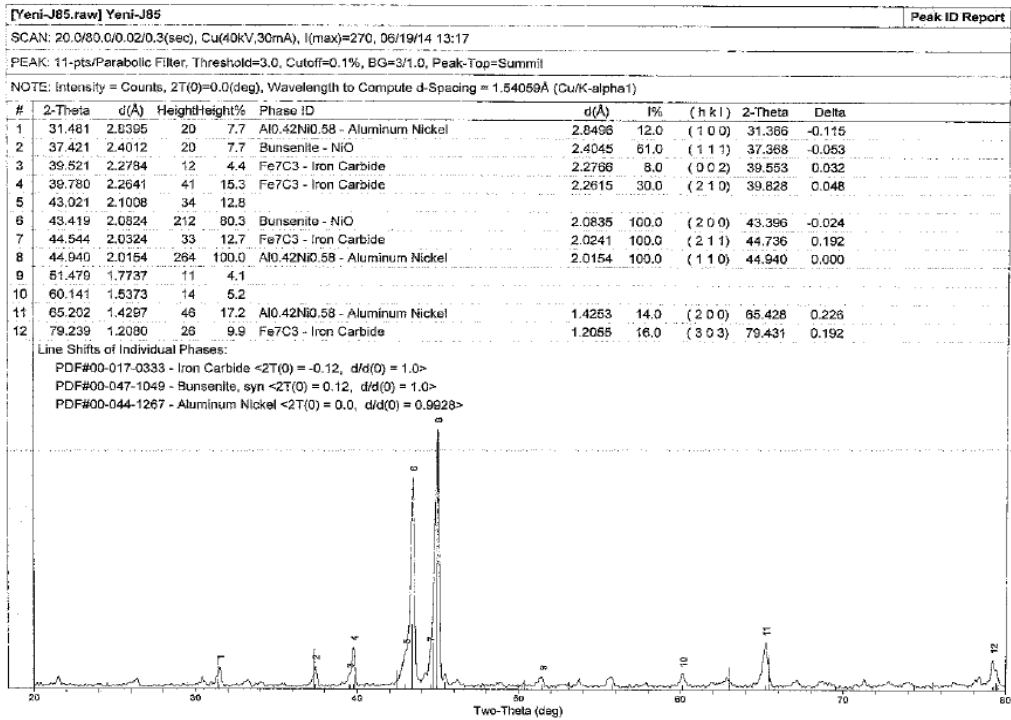
Materials Data, Inc.

Şekil C-3 B : J85 motoru ikinci kademe hareketli türbin kanatçıklarında kaplama öncesi dış yüzeylerinin XRD grafiği çözümleri



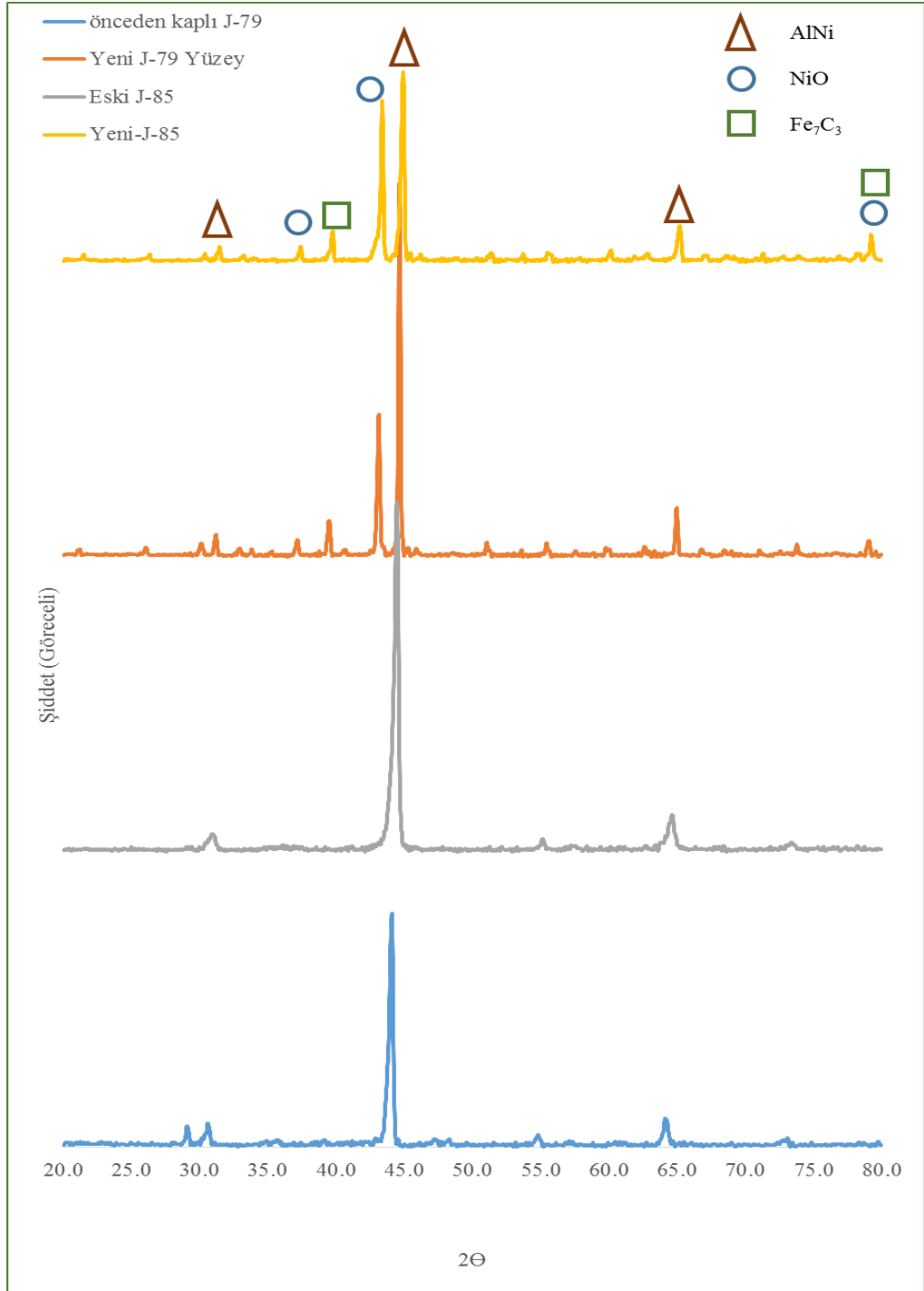


Şekil C-4 A: J85 motoru ikinci kademe hareketli türbin kanatçıklarında yeniden kaplanmış dış yüzeylerinin XRD grafiği



Materials Data, Inc.

Şekil C-4 B : J85 motoru ikinci kademe hareketli türbin kanatçıklarında yeniden kaplanmış dış yüzeylerinin XRD grafiği çözümleri



Şekil C-5 : Yayımla kaplama öncesi ve sonrası yüzeylerden alınan XRD grafik çözümlerinin karşılaştırılması

## EK AÇIKLAMALAR – D

### YAYINIM KAPLAMALARINDA ELEMENTLERİN KAPLAMA VE ANA MALZEMEDEKİ DAĞILIMINI GÖSTEREN ÇİZGİ ANALİZİ

#### D.1 J79 motoru ikinci kademe sabit kanatçıklarında yeni kaplama öncesi mevcut kaplama bölgesinde ve ana malzemede element dağılımının çizgi analizi

J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçıklarının kaplama öncesi kaplama yüzeyine dik bir çizgi boyunca element dağılımı çizgi analizi ile incelenmiştir. Tezde karakterizasyon sonuçları ile ilgili bölümde (5.3.1.7) ve Şekil 5.17 de yer almıştır. Şekil 5.18 de aynı kesit üzerinde ve çizgi boyunca her bir elementin ayrı ayrı element dağılımları çizgi analizi ile aktarılmıştır. Bu açıklamalarda şekillerin ayrı ayrı alınarak incelenmesinde güçlük ile karşılaşmıştır.

Uzun süre serviste kalmış J79 motoru ikinci kademe sabit türbin kanatçığının tek bir şekil üzerinde incelenmesi amacıyla çalışma yapılmış olup Şekil D.1 de derlenmiştir.

- J79 sabit kanatçık kaplama öncesi numunesinin çizgi analizi incelendiği (Şekil D-1) numunenin yaklaşık 42  $\mu$ 'luk dış yüzeyinde Ni ve Al elementlerinin yoğun bir şekilde mevcudiyeti tespit edilmiştir. Ni ve Al elementlerin birlikte var olması Ni-Al  $\beta$  fazının bulunduğu düşündürmüştür. Bu durum XRD analizi ile teyit edilmiştir.

- Numune kesitinde 42 – 46  $\mu$ m aralığında Ti ve Al elementlerinin yoğunlaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda Ti ile Al arasında intermetalik bir faz oluştuğu düşünülmektedir. Şekil D-1 'de Ti ile Al elementlerinin en çok olduğu bölgede diğer elementler (Ni, Cr ve Co) varlığından bahsedilememektedir.

- 44 – 59  $\mu$ m aralığında ise Cr elementinin varlığında Ni elementinin mevcut olmadığı görülmektedir. Yine bu bölgede Al ve Ni elementlerinin çizgi analizleri benzer

dağılım göstermiştir. Bu durumda Ni ve Al elementleri arasında bir faz oluşmuş ol muhtemeldir.

- 68 $\mu\text{m}$ ' dan sonra ise ana malzeme bölgesidir ve temel olarak Ni, Cr, Co, Ti ve Al elementleri yeknesak dağılım göstermektedir.

## **D.2 J79 motoru ikinci kademe sabit kanatçıklarında kaplama sonrası kaplama bölgesinde ve ana malzemede element dağılımının çizgi analizi**

J79 motoru sabit kanatçığında yeni kaplama sonrası kaplama yüzeyinde dik bir doğrultuda yapılan element çizgi analizi Şekil D-2' de görülmektedir.

Kaplama sonrası çizgi analizi verileri incelendiğinde;

- 48 – 88  $\mu\text{m}$  aralığında iç yayınım bölgesi oluşmuştur ve bu bölgede Cr ve Mo elementleri arasında benzer elementel dağılım olduğu görülmektedir. Bu durumun ana malzemedeki, yeniden kaplama ile oluşturulmakta olan dış yayınım bölgesinin gerek duyduğu Ni yayınımının sonucudur.

- Dış yayınım bölgesinde Cr, Mo, Co elementlerinin yoğunluğu azalırken, Ti elementinin en uç noktada arttığı ve eşdeğer zamanda Al elementinin de artışı, Ti ve Al elementleri arasında bölgesel bir intermetalik yapı oluşumunu göstermektedir.

## **D.3 J85 motoru ikinci kademe hareketli kanatçıklarında yeni kaplama öncesi mevcut kaplama bölgesinde ve ana malzemede element dağılımının çizgi analizi**

J85 motoru kaplama öncesi numunesinin çizgi analizi sonuçları Şekil D- 3'te sunulmuştur.

- Türbin hareketli kanatçıkları çok güç şartlarda ve uzun süre serviste kalması sonucunda yayınım kaplama kalınlığının 10  $\mu\text{m}$ ' a düştüğü görülmüştür. Seçilen kesit doğrultusunda dış yayınım bölgesinde Ni, Al elementleri yoğunlukta olduğu ve Ek

Açıklamalar C de yer alan kaplama yüzeylerinin x ışınları difraktometre çalışmalarında belirlenen NiAl  $\beta$  fazı olduğu kanıtlanmıştır.

- Ana malzemenin yer aldığı seçilen kesit doğrultusundaki element dağılımları incelendiğinde üniform bir yapının mevcut olduğu görülmüştür.

- Kaplama bölgesindeki 10 -20  $\mu\text{m}$ ' lik iç yayılım bölgesinde ise Cr, Mo elementlerinde belirgin bir şekilde Co elementinde ise kısmi bir artış olduğu görülmüştür. Konu artışın görüldüğü bölgelerde Ni elementinin dağılımının azaldığı tespit edilmiştir. İç yayılım bölgesinde Ni ve Al elementlerinin eş uyumlu dağılım göstermesi, her iki element arasında intermetalik bir faz oluşumunu düşündürmüştür.

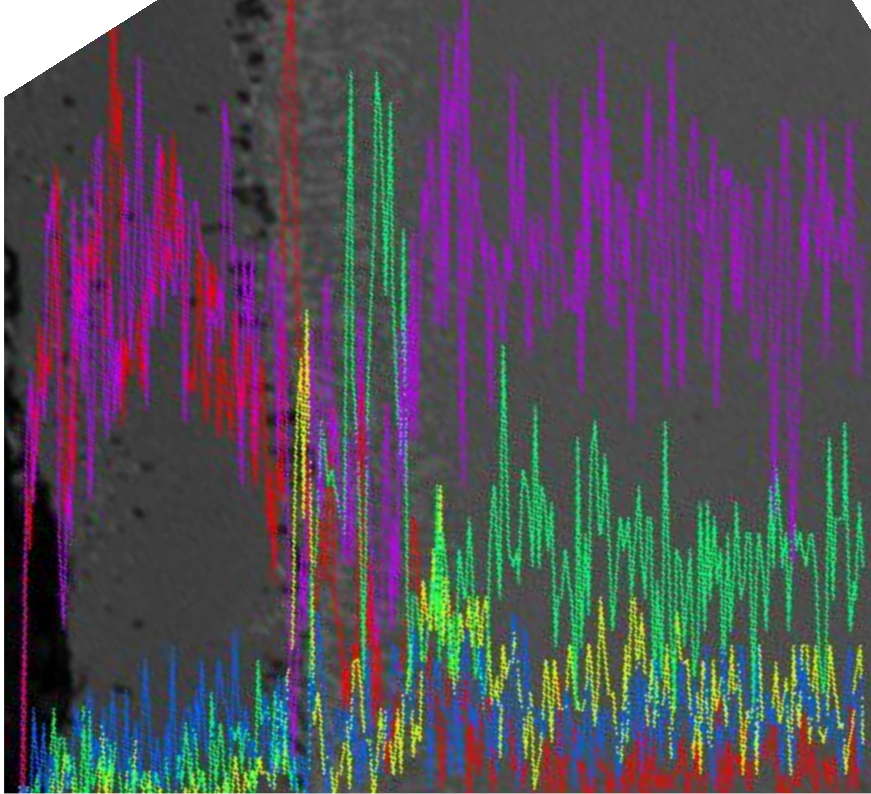
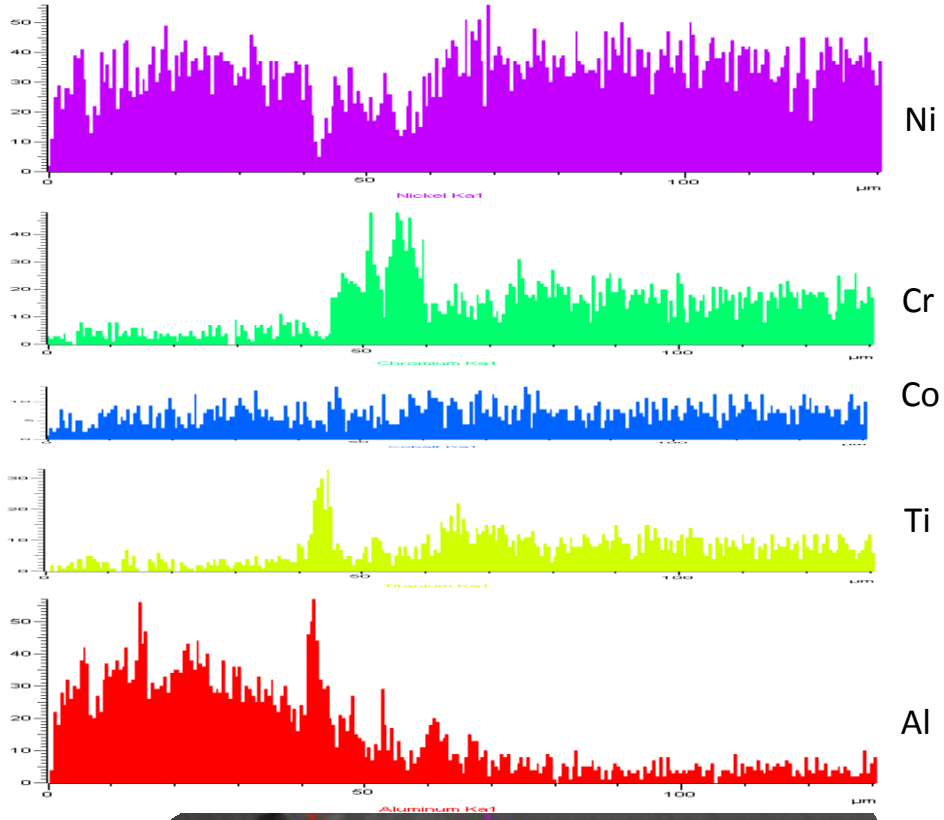
#### **D.4 J85 motoru ikinci kademe hareketli kanatçıklarında kaplama sonrası kaplama bölgesinde ve ana malzemede element dağılımının çizgi analizi**

J85 motoru kaplama sonrası test numunesinin çizgi analizi sonuçları Şekil D-4'te sunulmuştur.

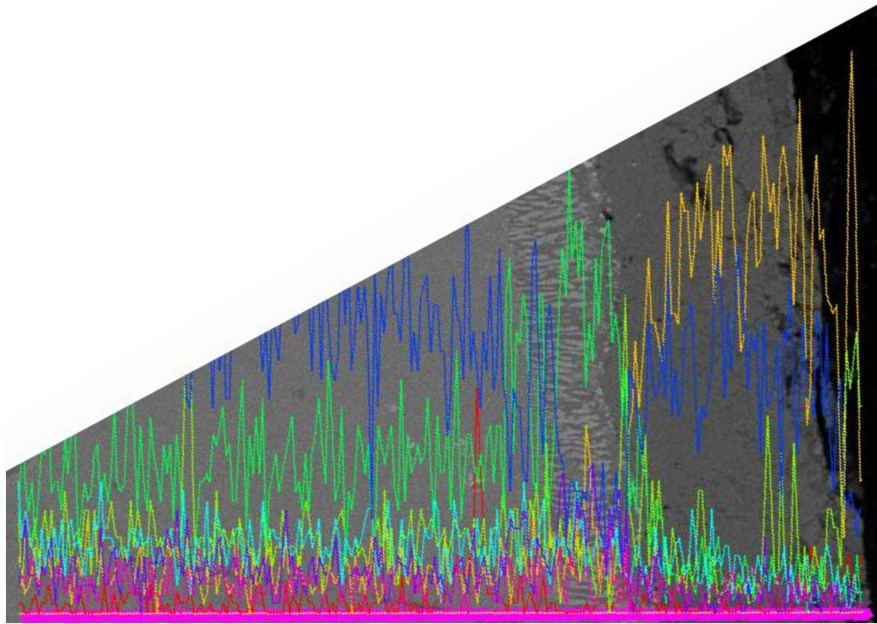
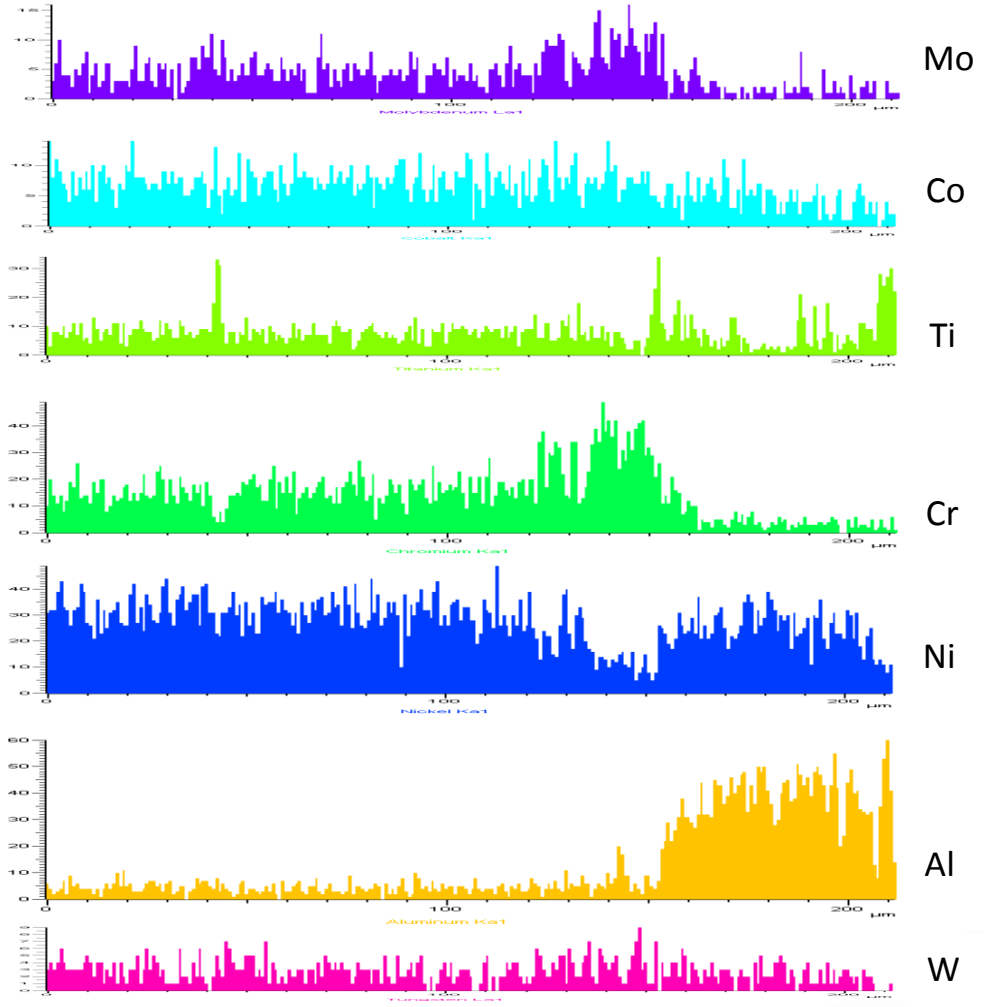
- Kaplama bölgesinde ölçülen kaplama kalınlığı 80  $\mu\text{m}$ ' dir.

- Dış yayılım bölgesinin tespitinde Ti elementi için 12  $\mu$ , Cr elementi için 20  $\mu$ 'luk bir dış kaplamanın düzenli bir şekilde oluştuğu görülmüştür. 20 – 80  $\mu\text{m}$  aralığındaki alanda element dağılımındaki sapmaların özellikle Cr ve Ni elementlerinin dağılımı ile şekillenmiştir. Bu durum J85 motor kanatçığının yeniden kaplama sürecinde iç yayılımının baskın olmasının sonucudur.

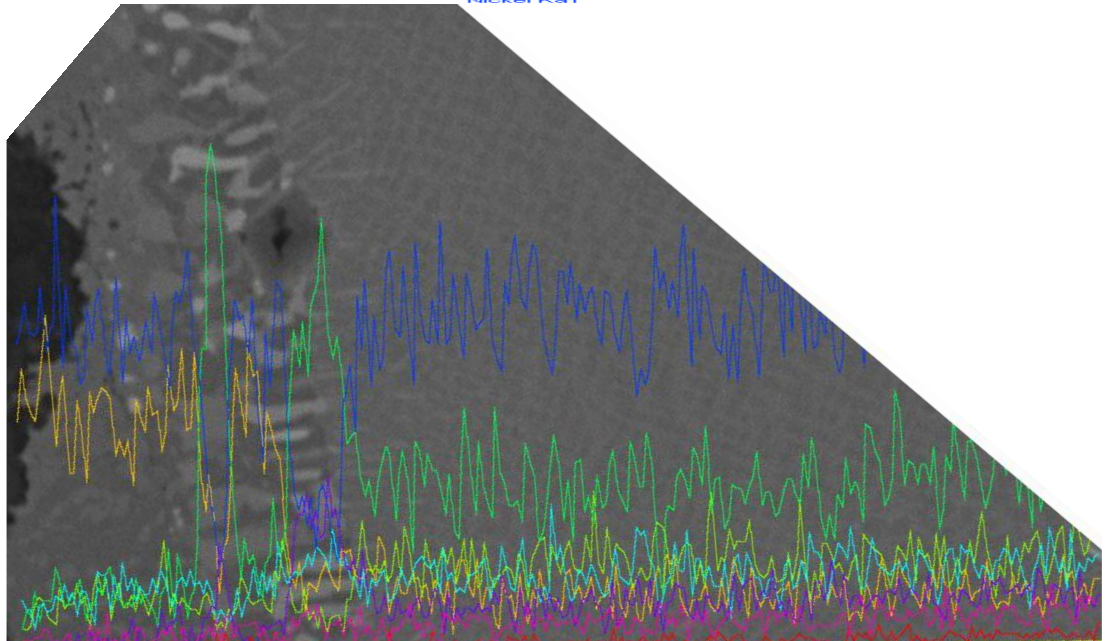
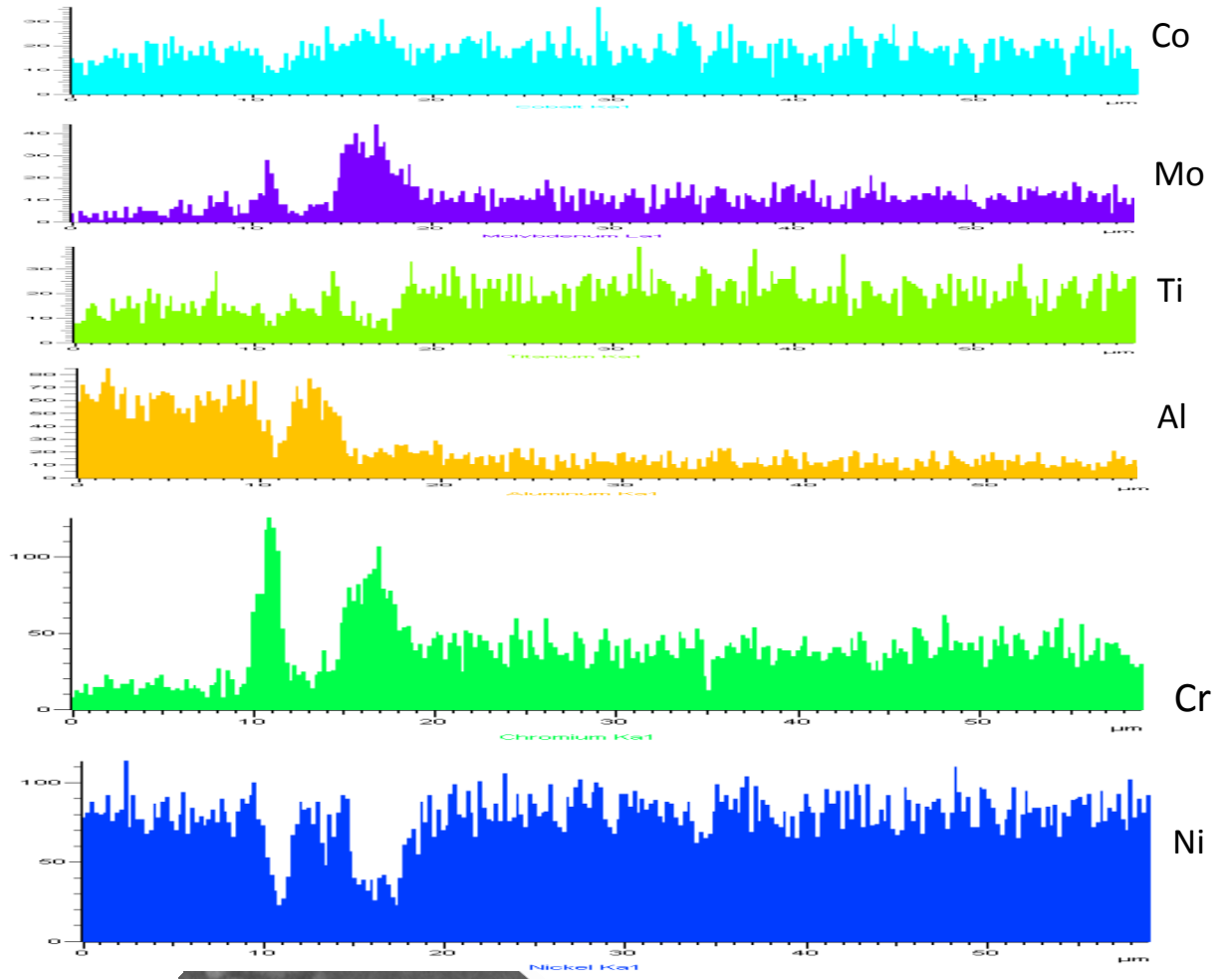
- Kaplama bölgesinde dış kaplamanın 20  $\mu\text{m}$  civarında olması, iç kaplamanın ise 58  $\mu\text{m}$  olması durumu ile bundan önceki çalışmalar karşılaştırıldığında Şekil D-4'deki element dağılımı çizgi analizi verileri kaygı yaratmıştır. Kaygının ana sebebi, J79 ve J85 motoru kanatçıklarında ana malzeme aynı olup neticenin farklı çıkmasıdır. Bu hususun çözümlenmesi için J85 motoru ikinci kademe hareketli kanatçıklarında kaplama sürecinin esasları yeniden saptanarak işlemlerin yenilenerek süreç koşullarının iyileştirilmesi gerekmektedir.



Şekil D-1: J 79 sabit kanatçık kaplama öncesi numunesinin çizgi analizi

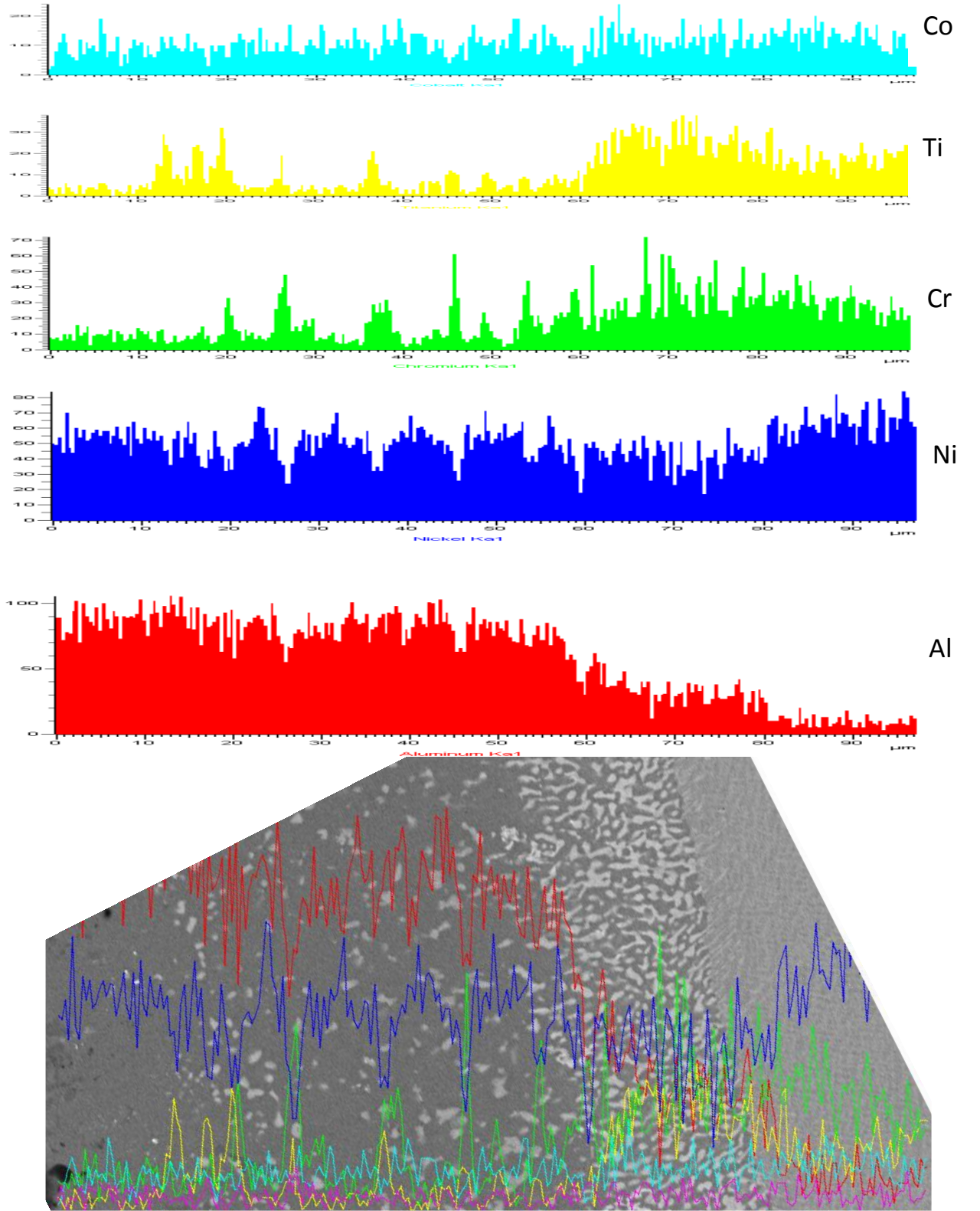


Şekil D-2: J 79 sabit kanatçık kaplama sonrası numunesinin çizgi analizi



Şekil D-3: J 85 sabit kanatçık kaplama öncesi numunesinin çizgi analizi





Şekil D-4: J 85 hareketli kanatçık kaplama sonrası numunesinin çizgi analizi

