

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASTELLOY C-276 ALAŞIMI ÜZERİNDE Ni-Al ESASLI
İNTERMETALİK KAPLAMA ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet ALAOĞLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

ŞUBAT 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASTELLOY C-276 ALAŞIMI ÜZERİNDE Ni-Al ESASLI
İNTERMETALİK KAPLAMA ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet ALAOĞLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tuba YENER

ŞUBAT 2024

Muhammet ALAOĞLU tarafından hazırlanan “Hastelloy C-276 Alaşımı Üzerinde Ni-Al Esaslı İntermetalik Kaplama Üretimi Ve Karakterizasyonu” adlı tez çalışması 29.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Doç. Dr. Tuba YENER (Danışman)
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi Harun GÜL
	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ALTINSOY
	Sakarya Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Hastelloy C-276 Alaşımı Üzerinde Ni-Al Esaslı İntermetalik Kaplama Üretimi ve Karakterizasyonu” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

29/02/2024

(imza)

Muhammet ALAOĞLU





Eşime ve aileme



TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince ilgi ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, yol gösterici yardımlarından ötürü, deneylerin planlaması, yönteminin uygulanması ve uygun alanların sağlanmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Tuba YENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Katkılarını ve desteklerini eksiksiz gösteren Doç. Dr. Hakan ATAPEK'e, Dr. Öğr. Üyesi Gülşah Aktaş Çelik'e saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında eğitimime devam etmeme yardım eden MES Makina Elek. Kim. San. A.Ş. yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda emekleri olan Uzman Fuat KAYIŞ'a ve Erkut TAŞ'a teşekkür ederim.

Beni yetiştiren, bugünlere gelmemi sağlayan maddi ve manevi hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve bu çalışma süresince beni destekleyen aileme ve sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Muhammet ALAOĞLU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. HASTELLOY C-276 ÖZELLİKLERİ VE TARİHSEL GELİŞİMİ	3
2.1. Süperalaşımlar	3
2.2. Ni Esaslı Süperalaşımlar	4
2.3. Hastelloy C-276	5
2.4. Hastelloy C-276 Malzemenin Diğer İsim ve Uygun Olduğu Normlar	8
2.5. Hastelloy C-276 Alaşımları Kullanım Alanları	9
2.6. Hastelloy C-276 Üstün Özellikleri	10
2.7. Metal Alüminitler Ve Özellikleri	11
2.8. Metal Alüminitler	13
2.9. Demir Alüminitler	14
2.10. Titanyum Alüminitler	17
2.11. Nikel Alüminitler	21
3. YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ	29
3.1. Anodik Oksidasyon	30
3.2. Termal Oksidasyon	31
3.3. Nitrasyon	31
3.4. Fiziksel Buhar Biriktirme İle Kaplama	32
3.5. Kimyasal Buhar Biriktirme İle Kaplama	33
3.6. Kutu Sementasyon Yöntemi	35
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	39
4.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Araç ve Gereçler	39
4.3. Deney Akışı	41
4.4. Karakterizasyon Çalışmaları ve Analizler	44
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	49
5.1. Nikel Alüminit Tabaka Oluşumu	50
5.2. Alüminyumlanmış Numunelerin SEM, EDS Analizi Sonuçları	53
5.3. Alüminyumlanmış Numunelerin Tabaka Kalınlıkları	74
5.4. XRD İncelemeleri	75
5.5. Sertlik Ölçümleri	78
5.6. Alüminyumlama Kinetiği	83

5.7. Oksidasyon Sonuçları ve TG analizi	89
6. GENEL SONUÇLAR	91
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ.....	99



KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
EDS	: Enerji Dispersiv Spektrum
g/cm³	: Gram/Santimetre Küp
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HSP	: Hekzagonal Sıkı Paket
HV	: Hardness Vickers
Kg	: Kilogram
MPa	: Mega Pascal
N	: Azot
Ni	: Nikel
PTF	: Proterm Fırın
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Alüminyum
TGA	: Termgravimetrik Analiz
V	: Volt
W	: Wolfram
XRD	: X Işınları Difraksiyonu



SİMGELER

∂C	: Konsantrasyon Gradyanı
∂X	: Mesafe Değişimi
μm	: Mikrometre
$\text{\AA}$	: Angstrom
Al_2O_3	: Alümina
AlCl_3	: Alüminyum Klorür
CO	: Karbonmonoksit
D	: Difüzyon Katsayısı
D_0	: Doğal Difüzyon Katsayısı
H_2SO_4	: Sülfürik Asit
J	: Difüzyon Akısı
$\text{J/kg}\cdot\text{K}$	: Joule/Kilogram.Kelvin
k	: Difüzyon Sabiti
MgCl_2	: Magnezyum Klörür
mm	: Milimetre
NH_3	: Amonyak
Q	: Aktivasyon Enerjisi
R	: Rydgerb Sabiti
T	: Sıcaklık
NiAl	: Nikel Alüminit
Ni_3Al	: Nikel Alüminit
$\text{W/m}\cdot\text{K}$	: Watt/Metre.Kelvin
$\sigma\text{-Ni}_2\text{Al}$	: Alfa-NikeldiAlüminit
J	: Difüzyon Akısı
NH_4Cl	: Amonyum Klorür



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Hastelloy C-276 spektral analiz sonuçları.....	8
Tablo 2.2. Hastelloy C-276'nın özellikleri(thermo phsical). [13]	8
Tablo 2.3. Hastelloy C-276 alaşımının oda sıcaklığında mekanik özellikleri. [13]....	8
Tablo 2.4. Hastelloy C-276 Fiziksel özellikler. [13]	9
Tablo 2.5. NiAl ve Ni ₃ Al bileşiklerinin bazı fiziksel özellikleri. [26]	23
Tablo 5.1. Hastelloy C-276 levhasının kimyasal bileşimi.....	53
Tablo 5.2. 600°C, 650°C ve 700°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat tutma sürelerinde kutuyöntemiyle Al kaplanmış numunelerin sem kesit görüntüleri.	54
Tablo 5.3. 600°C, 650°C, 700°C tutma sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat işlem süresi sonucunda oluşan tabaka kalınlıkları.	74
Tablo 5.4. 600,650 ve 700°C sıcaklıklardaki difüzyon katsayı değerleri.	87



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Hastelloy C-276 ürün görselleri.	9
Şekil 2.2. Periyodik Tablo [11].	13
Şekil 2.3. Nikel ve demir alüminitlerin kristal yapıları (a) L12 , (b)B2, (c) DO3.	14
Şekil 2.4. Fe-Al ikili denge diyagramı. [26]	15
Şekil 2.5. FeAl'un kristal yapısı.	16
Şekil 2.6. Fe ₃ Al'un kristal (D03) (γ) ve (α) demir alt kafesi, (β) Al alt kafesi.[26]	17
Şekil 2.7. Ti-Al faz diyagramı. [26].	19
Şekil 2.8. Titanyum alüminitlerin kristal yapıları. [26]	19
Şekil 2.9. CsCl NiAl ve Cu ₃ Au-Ni ₃ Al kafes yapılarının kristal yapıyı oluşturan her bir tür atomlarla beraber gösterimi. [26]	22
Şekil 2.10. Ni-Al ikili faz diyagramı. [26].	22
Şekil 2.11. NiAl (B2) kristal yapısı. [55].	24
Şekil 2.12. Ni-Al denge diyagramı. [34,35].	25
Şekil 3.1. Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinin gösterimi.	33
Şekil 3.2. Kimyasal buhar biriktirme yöntemlerinin gösterimi.	33
Şekil 4.1 : Radwag AS 220.R2 hassas terazi.	40
Şekil 4.2. PTF fırını. (PTF Serisi - Protherm Furnace b.t.)	40
Şekil 4.3.PTF fırını. (PTF Serisi - Protherm Furnace b.t.)	41
Şekil 4.4. Hastelloy C-276 alaşımı kutu alüminyumlamasını gösteren akım şeması.	41
Şekil 4.5: Hastelloy C-276 alaşımı kutu alüminyumlamasını gösteren akım şeması.	42
Şekil 4.6. 1x1x1 cm ölçülerinde yüzey hazırlığı yapılmış numuneler (a)-(b).	42
Şekil 4.7. Kutu karışımı ve numunenin kutu içerisindeki yerleşimi.	43
Şekil 4.8. Kutu alüminyumlama işleminin şematik gösterimi.	44
Şekil 4.9 : Oxford Instruments, Foundry Master Modeli Spektral Analiz Cihazı.	45
Şekil 4.10. Joel Jsm-5600 marka taramalı elektron mikroskobu. [73]	45
Şekil 4.11. Rigaku marka D/MAX 2000 model X-ışınları cihazı.	46
Şekil 4.12. Leica Vhmt Mot sertlik cihazı ölçümü.	46
Şekil 5.1. Çoklu fazlı bir nikel alüminit kaplamasındaki tabakaların gösterimi ve EDS analizi	52
Şekil 5.2. 600°C 2 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.	55
Şekil 5.3. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 600° C'de 2 saatlik SEM-EDS analizi.	55
Şekil 5.4. 600°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının çizgi analizi.	56
Şekil 5.5. 600°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.	57
Şekil 5.6. 600°C'de 4 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.	57
Şekil 5.7. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 600° C'de 4 saatlik SEM-EDS analizi.	58
Şekil 5.8. 600°C 4 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.	58
Şekil 5.9. 600°C'de 6 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.	59
Şekil 5.10. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 600° C'de 6 saatlik SEM analizi.	60
Şekil 5.11. 600°C 6 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.	61

Şekil 5.12. 650°C’de 2 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.	62
Şekil 5.13. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 650° C’de 2 saatlik SEM-EDS analizi.	62
Şekil 5.14. 650°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.	63
Şekil 5.15. 650°C’de 4 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.	64
Şekil 5.16. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 650° C’de 4 saatlik SEM-EDS analizi.	64
Şekil 5.17. 650°C 4 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.	65
Şekil 5.18. 650°C’de 6 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.	65
Şekil 5.19. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 650° C’de 6 saatlik SEM-EDS analizi.	66
Şekil 5.20. 650°C 6 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.	67
Şekil 5.21. 700°C’de 2 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.	67
Şekil 5.22. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 700°C’de 2 saatlik SEM-EDS analizi.	68
Şekil 5.23. 700°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının çizgi analizi.	69
Şekil 5.24. 700°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.	70
Şekil 5.25. 700°C’de 4 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.	70
Şekil 5.26. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 700°C’de 4 saatlik SEM-EDS analizi.	71
Şekil 5.27. 700°C 4 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.	72
Şekil 5.28. 700°C’de 6 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.	72
Şekil 5.29. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 700°C’de 6 saatlik SEM-EDS analizi.	73
Şekil 5.30. 700°C 6 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.	74
Şekil 5.31. 600°C, 650°C, 700°C tutma sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat işlem süresi sonucunda oluşan tabaka kalınlıkları.	75
Şekil 5.32. 600 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası numunelerin XRD analizi.	76
Şekil 5.33. 650°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası numunelerin XRD analizi.	77
Şekil 5.34. 700°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası numunelerin XRD analizi.	77
Şekil 5.35. Kaplama ve matrisin sertlik cihazı ekran görüntüsü.	81
Şekil 5.36. 600°C’ de farklı sürelerde alüminyumlanan alaşımın yüzeyden itibaren mesafeyle sertlik değişimi.	82
Şekil 5.37. 650°C’ de farklı sürelerde alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının yüzeyden itibaren mesafeyle sertlik değişimi.	82
Şekil 5.38. 700°C’ de farklı sürelerde alüminyumlanan alaşımın yüzeyden itibaren mesafeyle sertlik değişimi.	83
Şekil 5.39. Hastelloy C-276 alaşımının (x-t) diyagramı.	85
Şekil 5.40. Hastelloy C-276 alaşımının (x2-t) diyagramı.	87
Şekil 5.41. Hastelloy C-276 alaşımının lnD - 1/T grafiği.	88
Şekil 5.42. 600°C (2-4-6 saat) alüminit kaplanan alaşımın TG analiz grafiği.	90

HASTELLOY C-276 ALAŞIMI ÜZERİNDE Ni-Al ESASLI İNTERMETALİK KAPLAMA ÜRETİMİ VE KARATERİZASYONU

ÖZET

Hastelloy C-276, nikel temelli bir süper alaşım olup ana alaşım elementleri Cr, Mo, Fe ve W içermektedir. Bu tür alaşımlar, özellikle havacılık, uzay ve nükleer reaktör gibi yüksek sıcaklık mukavemeti gerektiren alanlarda bilimsel ve endüstriyel açıdan önem taşımaktadır. Son yıllarda, bu tür alaşımların yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla, alüminyumca zengin bir kaplama oluşturularak yüksek sıcaklıklarda kararlı alümina (Al_2O_3) elde etme yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Hastelloy alaşımının yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla, düşük sıcaklık kutu alüminyumlama prosesi kullanılarak alüminit kaplanmıştır. $600^{\circ}C$, $650^{\circ}C$ ve $700^{\circ}C$ sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat sürelerinde gerçekleştirilen alüminyumlama işlemi, en kısa işlem süresinde bile intermetalik kaplama birikimini sağlamıştır. Ni-Al esaslı kaplama tabakası, artan sıcaklığa bağlı olarak $11\ \mu m$ 'den $42\ \mu m$ 'ye yükselmiştir. Elde edilen kaplama sayesinde sertlik değerleri, başlangıçta 250 HV seviyesindeyken 850 HV'ye ulaşmıştır. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra, kaplama tabakalarının kalınlıkları dikkate alınarak alüminyumlama işleminin oluşum kinetiği üzerine hesaplamalar yapılmıştır. Bu analizde, özellikle sıcaklık ve süre parametreleri önemli rol oynamaktadır. Yapılan analizler sonucunda, kaplama tabakasının kinetik enerjisinin 50,911 kJ/mol olduğu belirlenmiştir. Bu değer, alüminyumlama işleminin termaldinamiklerini ve reaksiyon hızını anlamada kritik bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, termogravimetrik (TG) termal analiz yöntemleri kullanılarak, kaplamanın oksidasyon direnci ve termaldayanıklılık özellikleri belirlenmiştir. Bu analizler, kaplamanın oksidasyon sırasında ağırlık değişimlerini inceleyerek malzemenin termalstabilitesi ve oksidasyon direnci hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Kaplamanın büyüme kinetiği, alüminit tabakasının derinliği ile zaman ve işlem sıcaklığı arasındaki ilişki üzerine yapılan analizler, kaplamanın performansının optimize edilmesi ve endüstriyel uygulamalarda daha etkin kullanılması açısından önem taşımaktadır.



PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF Ni-Al BASED INTERMETALLIC COATING ON HASTELLOY C-276 ALLOY

SUMMARY

In the field of high temperature applications such as aviation, space exploration and nuclear reactors, Hastelloy C-276 emerges as a very important nickel-based superalloy. Characterized by the composition of basic elements such as Cr, Mo, Fe and W, this alloy is of great importance in both scientific and industrial contexts. Recently, the quest to improve the surface properties of such alloys has led to the widespread adoption of a technique that involves the formation of an aluminum-rich coating. The purpose of this coating is to obtain stable Alumina (Al_2O_3) at high temperatures. This work focuses on enhancing the surface properties of Hastelloy alloy through the application of a low-temperature package aluminization process, resulting in the formation of an aluminide coating. The aluminization process performed at varying temperatures (600°C, 650°C, and 700°C) and durations (2, 4, and 6 hours) causes significant deposition of intermetallic coatings even within a short process time. Noteworthy is the gradual increase in the thickness of the Ni-Al-based coating layer, from 11 μm to 42 μm , with the increase of temperature. The resulting coating not only increases the hardness values from an initial 250 HV to an impressive 850 HV, but also offers a compelling kinetic energy value of 50,911 kJ/mol. This kinetic energy value is considered an important measurement that provides critical information about the thermodynamics and reaction rate of the aluminization process. Calculations made after coating, taking into account the coating layer thicknesses, contribute to a comprehensive understanding of the formation kinetics of the aluminization process. Temperature and time emerge as important parameters in this analytical process. Additionally, the oxidation resistance and thermal stability properties of the coating are realized through the application of thermogravimetric (TG) thermal analysis methods. These analyses, which examine weight changes during oxidation, provide valuable information about the material's ability to withstand thermal stresses and resist oxidation. Further investigation of the relationship between the depth of the aluminide layer and the growth kinetics with respect to time and process temperature reveals vital insights for optimizing coating performance. Such insights are promising and lead to many studies for more efficient use of these coatings in various industrial applications. Aluminizing is a heat treatment process performed by raising the temperature of a material and holding it at that temperature for a certain period. The aluminizing process can improve mechanical properties such as hardness, strength, and durability by altering the internal structure of a material.

Hastelloy C-276 is a nickel-based single-phase superalloy, with chromium, molybdenum, iron, and tungsten as its main alloying elements. This alloy is designed to avoid precipitation hardening and relies on solid solution strengthening. Besides differences in chemical composition, the thermal expansion coefficients of the main metals also differ. These differences can lead to metallurgical problems in the heat-affected zone (HAZ) such as solidification cracking, formation of secondary phases,

and the presence of an unmixed zone. Despite these challenges, joining different metals can provide economic advantages in areas requiring local performance and can enhance flexibility and performance in design.

Hastelloy alloys, a typical Ni-based alloy family, are of great scientific and industrial importance due to their widespread use in aerospace, nuclear, and chemical industries. Particularly, Hastelloy C-276, a Ni-Cr-Mo-based superalloy, is widely used in extreme oxidizing environments such as exhaust gas sulfur removal systems and hot contaminated environments. These alloys are preferred due to their high oxidation resistance and excellent mechanical properties, holding a significant position in the industry.

In maritime and marine applications, the C-276 alloy offers an effective solution against oxidation factors like seawater. It is used to provide durability in ship parts, equipment exposed to seawater, and in salty environments. The C-276 alloy is an important material offering a wide range of applications with excellent oxidation resistance and durability in various industries.

Hastelloy C-276 is utilized across various sectors such as the chemical processing industry, nuclear energy, maritime, paper, and cellulose industries, particularly due to its resistance to oxidation. The continuous development and usage of the alloy have adapted to the evolving industrial needs.

Nickel-based alloys garner significant interest in fields like automotive, aerospace, biomedical, chemical, and maritime industries. Nickel-based Hastelloy alloys possess distinctive features such as high strength, toughness, high melting point, excellent strength-to-weight ratio, and oxidation resistance. Among these, the high oxidation resistance of Hastelloy implies its suitability for chemical and waste treatment processing industries. Nickel-Chromium-Molybdenum-based forged Hastelloy C-276 is a challenging material to process due to its high strength and hot hardness at high temperatures.

Hastelloy C-276 is a nickel alloy material produced and developed by Haynes International. This material is also referred to as Alloy C-276. Hastelloy C-276 was developed approximately fifty years ago to withstand various acids and harsh environments, and its usage has become increasingly widespread today. This material, indicated by UNS N10276 according to the UNS standard, is denoted by the material number 2.4819. It is also manufactured by Special Metals Corporation, and the materials produced by this company are referred to as Inconel Alloy C-276.

Nickel-based superalloys constitute 50% of the weight of alloys used in aircraft engines, particularly in turbine engines, turbine and propeller blades, combustion chamber linings, and connecting regions, due to their high resistance to high temperatures. Precipitation-hardened alloys have higher strength compared to alloys hardened by solid solution. Therefore, alloys hardened with γ' precipitates are preferred for high-temperature applications. Alloys hardened by solid solution are preferred more for their weldability and ease of production, depending on service conditions.

Hastelloy C-276 provides superior oxidation resistance in corrosive environments. It exhibits exceptional resistance to highly corrosive solutions such as ferric chloride and copper, particularly. It is resistant to localized deformations such as pitting and stress oxidation cracking. This alloy demonstrates rare resistance to wet chlorine gas, hypochlorite, and chlorine dioxide. Additionally, it possesses high weldability due to

its low carbon content. With these characteristics, Hastelloy C-276 stands as one of the rare alloys that exhibit excellent performance under demanding conditions

Hastelloy C-276 is a nickel-molybdenum-chromium superalloy renowned for its exceptional versatility and performance in corrosive environments. Developed by Haynes International, this alloy, also known as Alloy C-276, has become a cornerstone material across various industries due to its remarkable resistance to a wide range of corrosive chemicals and high-temperature environments.

One of the key features of Hastelloy C-276 is its outstanding oxidation resistance, making it ideal for applications where exposure to aggressive oxidizing agents is commonplace. It exhibits exceptional resistance to corrosive solutions such as ferric chloride and copper, along with rare resilience against wet chlorine gas, hypochlorite, and chlorine dioxide.

Moreover, Hastelloy C-276 offers superior resistance to localized deformations like pitting and stress oxidation cracking, ensuring long-term reliability even in challenging operating conditions. Its low carbon content further enhances its weldability, making it suitable for a wide range of fabrication processes.

The versatility of Hastelloy C-276 extends to its usage across diverse industries, including chemical processing, aerospace, maritime, and more. In aerospace applications, it finds extensive use in turbine engines, turbine blades, combustion chamber linings, and other critical components due to its high resistance to elevated temperatures.

In summary, Hastelloy C-276 stands as a testament to innovation in materials science, providing unmatched performance and reliability in corrosive environments where conventional materials falter. Its widespread adoption across industries underscores its status as a premier choice for demanding applications requiring exceptional corrosion resistance and high-temperature capabilities.

Nickel aluminizing, or nickel aluminide coating, is a surface treatment process used to enhance the corrosion and oxidation resistance of nickel-based alloys by applying an aluminum-rich layer to the surface. This process involves diffusing aluminum into the surface of the nickel alloy substrate through a series of heat treatment steps.



1. GİRİŞ

Hastelloy, muazzam mukavemeti ve yüksek ısı verimliliği ile tanınan bir süper alaşım türüdür ve bu özellikleri sayesinde havacılık, nükleer reaktör bileşenleri ve kimya endüstrisi gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu malzeme, işlenmesi oldukça zor olduğu için sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmak için uygun soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Hastelloy C-276, oksidasyona dayanıklı bir nikel-molibden-krom alaşımıdır ve genellikle ağır kimyasal ortamlarda kullanılır. Alüminyumlama, genellikle bu tür alaşımların özelliklerini iyileştirmek, sertliği artırmak veya belirli termalişlemler sonrasında oluşan deformasyonları düzeltmek amacıyla uygulanabilir. Uygulama sebeplerinden biri de alüminyumun düşük maliyeti sebebiyle tercih edilmesidir. Alüminyumlama, bir malzemenin sıcaklığını artırarak ve belirli bir süre boyunca bu sıcaklıkta tutarak gerçekleştirilen bir ısıtma işlemi sürecidir. Alüminyumlama işlemi, bir malzemenin iç yapısını değiştirerek özellikle sertlik, mukavemet ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerini iyileştirebilir. Bu işlem genellikle aşağıdaki nedenlerle uygulanabilir:

- Sertliği Artırmak: Alüminyumlama, alaşımların sertliğini artırabilir, bu da mekanik dayanıklılıklarını artırabilir.
- Yorulma Direnci: Alüminyumlama, malzemenin yorulma direncini artırabilir, bu da malzemenin tekrarlayan yük uygulamalarına karşı dayanıklılığını artırabilir.
- Mikroyapı Düzeltme: Isıl işlemler sırasında veya sonrasında oluşan mikro yapısal deformasyonları düzeltmek ve malzemenin homojenliğini sağlamak için kullanılabilir.
- Kimyasal Direnç: Alüminyumlama, malzemenin kimyasal direncini artırabilir, özellikle oksidasyona karşı daha dayanıklı hale getirebilir.

Hastelloy C-276, nikel bazlı tek fazlı bir süper alaşımdır ve ana alaşım elementleri Cr, Mo, Fe ve W'dir. Bu alaşım, çökeltme sertleşmesi meydana gelmeyecek şekilde tasarlanmış ve katı çözelti güçlendirmesine dayanmaktadır. Kimyasal bileşimdeki farklılıkların yanı sıra, ana metallerin termalgenleşme katsayıları da birbirinden

farklıdır. Bu farklılıklar, ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) katılaşma çatlağı, ikincil fazların oluşumu ve karışmamış bölgenin varlığı gibi metalurjik problemlere neden olabilir. Tüm bu zorluklara rağmen, farklı metallerin birleştirilmesi, lokal performans gerektiren bölgelerde ekonomik açıdan avantaj sağlayabilir ve tasarımda esneklik ve performansı artırabilir [2]. Hastelloy alaşımları, tipik bir Ni bazlı alaşım ailesi olup, havacılık, nükleer ve kimya endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan bu alaşımların araştırılması hem bilimsel hem de endüstriyel açıdan büyük önem taşımaktadır. Özellikle Hastelloy C-276, Ni-Cr-Mo bazlı bir süper alaşım olup, baca gazı kükürt giderme sistemleri ve sıcak kirlenmiş ortamlar gibi aşırı oksidasyonlu ortamlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, yüksek oksidasyon direnci ve mükemmel mekanik özellikleri sayesinde tercih edilmektedirler ve endüstride önemli bir yer tutmaktadırlar [3]. Denizcilik ve denizcilik uygulamalarında ise, C-276 alaşımı deniz suyu gibi oksidasyon etkenleriyle mücadelede etkili bir çözüm sunar. Gemilerin ve deniz araçlarının parçalarında, deniz suyuna maruz kalacak ekipmanlarda ve tuzlu ortamlarda dayanıklılık sağlamak için kullanılır. C-276 alaşımı, çeşitli endüstrilerde mükemmel oksidasyon direnci ve dayanıklılığı ile geniş bir uygulama yelpazesi sunan önemli bir malzemedir [4]. Nikel bazlı süper alaşımlar, yüksek oksidasyon direnci ve yüksek mukavemet nedeniyle kimyasal, petrokimya, havacılık ve nükleer santral vb. çeşitli endüstrilerin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır [5]. Özellikle kimyasal işleme endüstrilerinde, C-276 alaşımının dayanıklılığı ve oksidasyon direnci, asitler, tuzlar ve agresif kimyasal ortamlar gibi zorlu şartlarda kullanımını mümkün kılar. Bu özellikleri sayesinde, kimyasal tesislerde boru hatları, reaktörler, tanklar ve diğer ekipmanlar için tercih edilen bir malzemedir ve pahalı bir malzeme olan Hastelloy C276, alaşım maliyetlerini azaltmak için orta riskli koşullarda nispeten düşük fiyatlı paslanmaz çelik malzemeler ile yer değiştirebilir [6].

2. HASTELLOY C-276 ÖZELLİKLERİ VE TARİHSEL GELİŞİMİ

2.1. Süperalaşımlar

Süperalaşımların tarihçesi, yüksek performanslı metal alaşımlarının gelişimiyle bağlantılıdır ve özellikle yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında kullanılmak üzere yapılan özel alaşımların evrimini içerir.

İlk Süperalaşımların Gelişimi: Süperalaşımların öncülleri, 20. yüzyılın başlarından itibaren ortaya çıkmıştır. Bu dönemde, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında kullanılmak üzere, özellikle tungsten ve molibden gibi refrakter metallerin nikel ile birleştirilmesiyle ilk alaşımlar geliştirilmiştir. II. Dünya Savaşı sırasında, uçak motorları ve diğer askeri uygulamalar için daha dayanıklı ve yüksek performanslı malzemelerin ihtiyacı arttı. Bu dönemde, nikel esaslı alaşımların ve özellikle "Waspalloy" gibi bazı alaşımların geliştirilmesi başladı [7,8].

1940'lar ve 1950'ler: II. Dünya Savaşı'nın ardından süperalaşımların araştırılması ve geliştirilmesi hız kazandı. Bu dönemde, nikel esaslı alaşımların dayanıklılığı ve yüksek sıcaklık performansı üzerine daha fazla çalışma yapıldı. Özellikle nikel-krom ve nikel-kobalt esaslı alaşımlar bu dönemde dikkat çekti. **1960'lar ve Sonrası:** Süperalaşımların endüstriyel kullanımı genişledi. Özellikle havacılık ve enerji sektörlerinde, jet motorları, türbinler, nükleer reaktörler ve endüstriyel fırınlar gibi yüksek sıcaklık ve basınç gerektiren uygulamalarda kullanılmaya başlandı [9].

Malzeme Bilimi ve Metalurji Araştırmaları: 20. yüzyılın sonlarına doğru ve 21. yüzyılın başlarında, malzeme bilimi ve metalurji alanındaki ilerlemeler süperalaşımların gelişimini hızlandırdı. Nanoteknoloji, malzeme karakterizasyon teknikleri ve bilgisayar destekli modelleme gibi alanlardaki ilerlemeler, daha dayanıklı ve performanslı süperalaşımların geliştirilmesine olanak sağladı ve yüksek sıcaklıklarda kullanılan alaşımların, atmosferdeki aşındırıcı etkilere karşı dirençli

olması ve gereken mukavemeti sağlaması, aynı zamanda metalurjik veya yapısal değişimlere karşı kararlı olması kritiktir. Özellikle oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık oksidasyonu açısından, krom en önemli alaşım elementlerinden biridir. Bu nedenle, oksidasyon direnci gerektiren çelikler, paslanmaz çelikler, Ni-Cr alaşımları ve

süperalaşımlar gibi malzemeler genellikle yüksek krom içeriğine sahiptir. Aynı şekilde, yüksek sıcaklık uygulamalarında da yüksek krom içeriği tercih edilir (Betteridge ve diğ., 1974).

Çok yüksek sıcaklıklarda çalışma koşullarında, seramiklerin yanı sıra V-A grubu (vanadyum, niyobyum, tantalum) ve VI-A grubu (krom, molibden, tungsten) metallerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, refrakter metallerin oksidasyon direnci düşüktür, bu yüzden daha çok oksidasyona maruz kalmayan bölgelerde tercih edilirler. Seramiklerin ise yapısal uygulamalarda sınırlı tokluğa sahip olmaları nedeniyle kullanımı kısıtlıdır. Bu sebeplerden dolayı, mevcut teknolojiye sınırlamalar nedeniyle süperalaşımların kullanımı kaçınılmazdır (Loria, 1992).

Süperalaşımlar genellikle VIII-A grubu elementlerden geliştirilen alaşımlardır ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini koruyabilme yeteneğine sahiptirler. Ayrıca, ısı oksidasyonu ve erozyon dirençleri yüksektir. Süperalaşımlar, özellikle uçak türbin motorları ve süper turbo yükleyiciler gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır (Bradley, 1979). Bu alaşımlar genellikle demir, nikel, kobalt ve kromun farklı kombinasyonlarını içerirken, düşük oranda tungsten, molibden, tantalum, niyobyum, titanyum ve alüminyum da kullanılabilir. Süperalaşımların öne çıkan özellikleri arasında farklı türlerde demir, krom ve nikel içeren alaşımlar, kompleks demir-nikel-krom-kobalt kompozisyonları, karbürlerle güçlendirilmiş kobalt esaslı alaşımlar, nikel esaslı katı çözelti olarak mukavetlendirilmiş alaşımlar ve çökelme-dağılma sertleştirilmiş nikel esaslı alaşımlar bulunmaktadır (Bradley, 1979).

2.2. Ni Esaslı Süperalaşımlar

Mukavemet ve tokluğun birleşimi, 700°C ve üzerindeki sıcaklıklarda mekanik özellikleri ile yüksek performans gerektiren uygulamalar için nikel esaslı süper alaşımları ana malzeme haline getirir [10]. Ni esaslı süper alaşımların, yüksek sıcaklıkta sürünme, yorulma ve çevresel bozunmaya karşı direnci, bu tür sıcaklık koşullarındaki kullanımlarını yaygın hale getirmiştir [11]. Nikel esaslı süper

alaşımların yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmasının nedenleri şu şekilde sıralanabilir: İlk olarak, nikel, yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısına sahiptir, bu da atomlar arasındaki bağın artan kohezif enerjiyle birlikte tokluk ve süneklik sağlar. Ayrıca, nikel YMK formunda oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar

kararlılık gösterir; bu koşullarda faz dönüşümü gerçekleşmemesi, yapıda yüksek sıcaklık bileşeni olarak kullanılmasını sağlar. Ni gibi YMK yapılı metallerde difüzyon hızı düşüktür, bu durum yüksek sıcaklıklarda mikroyapısal kararlılığı sağlamaktadır [11,12]. Nikel esaslı süper alaşımlar üç kategoride ele alınabilir: katı eriyik sertleştirici elementlerle güçlendirilmiş olanlar, çökelti ile sertleştirilmişler ve oksit-dağılım ile mukavemetlendirilmişler (ODS). Katı eriyik alaşımlar, hiç veya çok az miktarda alüminyum (Al), titanyum (Ti) ve niyobyum (Nb) içerir. Çökelti ile sertleştirilen alaşımlar, alüminyum ve titanyum dışında önemli miktarda niyobyum içerirler. ODS alaşımlarında, küçük bir miktar ince oksit partikülleri bulunur ve toz metalürji yöntemiyle üretilirler. Yaşlandırma ile sertleştirilen (çökelme sertleşmesi) nikel esaslı alaşımlar, alüminyum ve titanyum ilavesi ile oluşan γ' çökeltisi ve karbür çökelti ile güçlendirilirler. Optimum yüksek sıcaklık özelliklerinin elde edilebilmesi için γ' çökelti fazı birincil derecede önemlidir. Alüminyum ve titanyum miktarı ile alüminyum/titanyum (Al/Ti) oranı, ısıtılma sürecinde kritik öneme sahiptir. Bu orandaki artış, yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirebilir. Ayrıca, γ' fazının hacimsel oranı, boyutu ve dağılımı kontrol edilmesi gereken önemli parametrelerdir [11].

Nikel esaslı süper alaşımlar, uçak motorlarında kullanılan alaşımların ağırlığının %50'sini oluşturur; özellikle yüksek ısıya karşı yüksek dirençleri nedeniyle uçak türbinleri, türbin ve pervane kanatları, yanma odası astarları ve bağlantı bölgelerinde kullanılırlar. Çökelti ile sertleştirilen alaşımlar, katı eriyik ile sertleştirilen alaşımlara kıyasla daha yüksek dayanıma sahiptirler. Bu nedenle, yüksek sıcaklık uygulamalarında γ' çökeltisi ile sertleştirilen alaşımlar tercih edilmektedir. Katı eriyik ile sertleştirilen alaşımlar ise daha çok servis koşullarına bağlı olarak, kaynak edilebilirlik ve üretim kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedirler [10,12].

2.3. Hastelloy C-276

Hastelloy C-276, özellikle yüksek oksidasyon direnci sağlamak üzere tasarlanan bir nikel-molibden-krom alaşımıdır. Bu alaşımın tarihi ve gelişimi, endüstriyel ihtiyaçlara ve oksidasyon direnci gereksinimlerine yanıt olarak evrimleşmiştir.

Hastelloy C-276'in tarihi şu şekildedir:

- Geliştirme Dönemi: Hastelloy C-276, Haynes International tarafından 1960'ların sonlarına doğru geliştirilmiştir. Bu dönemde, özellikle kimyasal işleme endüstrisi gibi agresif çevrelerde kullanılabilecek yüksek oksidasyon direncine sahip

bir malzeme ihtiyacı vardı. Hastelloy C-276, bu ihtiyaçları karşılamak üzere tasarlanmıştır.

- 1960'lar ve 1970'ler: Hastelloy C-276, özellikle petrokimya, kimyasal üretim, kağıt ve selüloz endüstrilerinde kullanılmaya başlandı. Bu dönemde, alaşımın oksidasyon direnci ve mekanik özellikleri endüstri tarafından benimsendi ve talep gördü.
- Ticarileştirme: Hastelloy C-276, geliştirildikten sonra Haynes International tarafından ticarileştirilmiş ve pazarlanmıştır. Bu alaşımın geniş bir endüstriyel kullanım alanı bulunmaktadır ve günümüzde hala çeşitli kritik uygulamalarda tercih edilen bir malzeme olarak kullanılmaktadır.

Hastelloy C-276, özellikle oksidasyona dayanıklı özellikleri nedeniyle kimyasal işleme endüstrisi, nükleer enerji, denizcilik, kağıt ve selüloz endüstrisi gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. alaşımın sürekli geliştirilmesi ve kullanımı, endüstriyel ihtiyaçların evrimine uyum sağlamıştır [13].

Nikel bazlı süper alaşımlar (NBS), aşırı sıcaklıklarda mekanik niteliklerin mükemmel kombinasyonu nedeniyle havacılık, nükleer ve denizcilik gibi yüksek değerli endüstrilere yönelik bileşenlerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır [14].

Nikel bazlı alaşımlar otomotiv, havacılık, biyomedikal, kimya ve denizcilik endüstrileri gibi alanlarda oldukça ilgi görmektedir. Nikel esaslı hastelloy , yüksek mukavemet , tokluk, yüksek erime sıcaklığı, mükemmel ağırlık-ağırlık mukavemeti ve oksidasyon direnci gibi bazı ayırt edici özelliklere sahiptir . Bunlar arasında, hastelloy'un yüksek oksidasyon direnci özelliği, onun kimyasal ve atık arıtma işleme endüstrileri için uygun bir aday olduğunu ima etmesine yol açmıştır. Nikel-Krom-Molibden bazlı dövme Hastelloy C-276, yüksek mukavemeti ve yüksek sıcaklıktaki sıcak sertliği nedeniyle işlenmesi zor bir malzemedir [15].

Hastelloy serisi, Nikel esaslı alaşım gruplarındaki oksidasyona dayanıklı süper alaşımlardır. Hastelloy C-276 en yaygın kullanılan alaşımdır. Aynı zamanda ticari olarak da mevcuttur. Hastelloy C-276, diğer Nikel bazlı süper alaşımlar gibi birçok üstün özellik sergiler ve nikel esaslı alaşımlar, ikincil faz oluşmaksızın krom (Cr), molibden (Mo), demir (Fe) ve tungsten (W) katı eriyik elementlerini içermektedir [10].

Hastelloy C-276 Haynes International firması tarafından üretilmiş ve geliştirilmiş bir nikel alaşım malzemedir.

Bu malzeme aynı zamanda Alloy C-276 olarakta adlandırılmaktadır. Hastelloy C-276 yaklaşık elli sene önce çeşitli asitlere ve birçok zorlu ortama dayanabilmesi için geliştirilmiş bir malzemedir ve günümüzde bu malzemenin kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır. UNS standartına göre UNS N10276 olarak gösterilen bu malzemenin malzeme numarası 2.4819 olarak gösterilmektedir. Bu malzeme aynı zamanda Special Metals firması tarafından da üretilmektedir ve bu firmanın ürettiği malzemelere Inconel Alloy C-276 denmektedir [13].

Alloy C-276 malzeme çok zor ve agresif koşullu ortamlarda mükemmel derecede iyi oksidasyon direncine sahip olmak için üretilmiş ve geliştirilmiş bir malzemedir. Bu yüksek nikel ve molibdenli malzeme, oldukça farklı birçok korrozif ortamda uzun süre dayanıklılığını koruyabilmektedir [16]. Özellikle malzeme içerisinde yer alan yüzde 15 civarındaki molibden elementi malzemenin çukurcuk oksidasyonuna karşı dayanımını arttırmaktadır.

Bu nikel alaşım malzeme çok düşük oranda karbon içermektedir. Bu malzemenin içerdiği karbon oranı yüzde 0,01'den azdır ve bu içerdiği az karbon malzemenin daha kolay kaynak yapılabilmesine olanak sağlar. Düşük karbonla beraber kaynak işlemi sırasında karbürleme en aza inmiş olur ve bu sayede kaynak yapılan bölgelerde oksidasyon direncinde ve mekanik yapıda bir gerileme olmaz [13]. Hastelloy C-276 malzemenin içerisinde ciddi bir oranda W (Tungsten) elementi bulunmaktadır. Hastelloy C-276 veya diğer yaygın kullanılan adıyla Inconel Alloy C-276 birçok kimyasal tepkimenin olduğu alanda kullanılmaktadır.

Ayrıca çeşitli özel filtrelerde, kâğıt üretiminde kâğıt hamuruyla temas eden parçalarda, kâğıt üretiminde, endüstriyel atıkların depolanmasında, doğal gaz ile temas eden bazı parçalarda, özel fan parçalarında, sıcaklık değiştiricilerinde, kimyasal birçok reaksiyonun gerçekleştiği özel kaplarda ve tanklarda, sıvı buharlaştırıcı sistemlerde ve bu sistemlerin boru aksamalarında sıkça kullanılan bir nikel alaşım malzemedir [17].

Tablo 2.1. Hastelloy C-276 spektral analiz sonuçları.

Element	İçerik (%)
Ni	57
Cr	15.5
Fe	5
W	3.53
Co	2.50
Mn	1
V	0.35
Si	0.080
P	0.025
C	0.010
S	0.010

Tablo 2.2. Hastelloy C-276'nın özellikleri(thermo phsical). [13]

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/ cm ³)	8.89
Elastik Modül (GPa)	205
Zehir oranı	0.31
Çekme mukavemeti (MPa)	785
Verim gücü (MPa)	365
Sertlik (Hv)	255
Özgül ısı (J/Kg°C)	427
Isı iletkenliği (W/mK)	10.
Erime aralığı (°C)	1323–1371

2.4. Hastelloy C-276 Malzemenin Diğer İsim ve Uygun Olduğu Normlar

İsimler: Hastelloy C-276, Alloy C-276, Alloy c-276, inconel Alloy c-276, UNS N10276, 2.4819, NiMo16Cr15W

Normlar: ASTM B366, ASTM B564, ASTM B574, ASTM B575, ASTM B619, ASTM B622, ASTM B626

Tablo 2.3. Hastelloy C-276 alaşımının oda sıcaklığında mekanik özellikleri. [13]

Alaşım durumu	Çekme mukavemeti N/mm ²	Akma dayanımı N/mm ²	Uzama %5
C /C-276	690	283	40

Tablo 2.4. Hastelloy C-276 Fiziksel özellikler. [13]

Yoğunluk	8,9 g/cm ³
Erime noktası	1325-1370 °C

Şekil 2.1’de Hastelloy C-276’ya ait kullanım alanlarına uygun görseller verilmiştir. İşleme ürünler, vana sistem, billet vb. ürünler.



Şekil 2.1. Hastelloy C-276 ürün görselleri.

2.5. Hastelloy C-276 Alaşımları Kullanım Alanları

Hastelloy C-276, genellikle oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık performansı gerektiren çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir nikel-molibden-krom alaşımıdır [59]. Hastelloy C-276'ün belirli kullanım alanları:

- Kimyasal İşleme Ekipmanları: Hastelloy C-276, kimyasal işleme ekipmanlarında yaygın olarak kullanılır. Kimyasal reaktörler, karıştırıcılar, borular ve diğer ekipmanlar, çeşitli kimyasal ortamlara dayanıklılığı nedeniyle bu alaşımı tercih eder
- Endüstriyel Atık Tesisleri: Atık su arıtma tesislerinde, özellikle agresif kimyasalların bulunduğu ortamlarda kullanılır. Kirlilik kontrol sistemleri ve atık gaz arıtma sistemleri için ideal bir malzemedir.

- Petrol ve Gaz Endüstrisi: Hastelloy C-276, petrol rafinerilerinde ve gaz işleme tesislerinde çeşitli uygulamalarda kullanılır. Bu alanlarda çeşitli korozif maddelerle temas etmesi gereken ekipmanlar için uygundur.
- Kağıt Hamuru ve Kağıt Üretimi: Kağıt hamuru ve kağıt üretim endüstrisinde kullanılan ekipmanlar arasında bulunur. Özellikle aşındırıcı kimyasallara dayanıklı olması nedeniyle tercih edilir.
- İlaç ve Gıda Endüstrisi: Hastelloy C-276, ilaç ve gıda endüstrilerinde kullanılan ekipmanlarda kullanılır. Bu endüstrilerde temizlik ve kimyasal direnç gereklidir.
- Özel Hava Filtreleri: Yüksek sıcaklık ve oksidasyonlu ortamlarda çalışan özel hava filtreleri için uygun bir malzemedir.
- Denizcilik ve Deniz Uygulamaları: Deniz suyu, tuzlu su ve deniz atmosferine maruz kalan parçalarda kullanılır. Denizcilik uygulamalarında genellikle dayanıklılık ve oksidasyon direnci nedeniyle tercih edilir.
- Enerji Üretimi: Nükleer enerji tesislerinde ve diğer enerji üretim uygulamalarında, özellikle yüksek sıcaklık ve korozif ortamlarda kullanılır.

Hastelloy C-276, geniş bir endüstriyel yelpazede çeşitli uygulamalarda kullanılan bir malzeme olup, özellikle aşındırıcı ve korozyonlu ortamlarda güvenilir performans sergiler [18].

2.6. Hastelloy C-276 Üstün Özellikleri

Hastelloy C-276, aşındırıcı ortamlarda üstün oksidasyon direnci sağlar. Özellikle demir klorür ve bakır gibi yoğun paslandırıcı çözeltilere karşı olağanüstü dayanıklılık gösterir. Karıncalanma ve gerilim oksidasyonu çatlaması gibi yerel deformasyonlara karşı dirençlidir. Bu alaşım, ıslak klorin gazı, hipoklorit ve klorin dioksite karşı nadir bulunan bir dayanıklılık sergiler. Ayrıca, düşük karbon içeriği sayesinde yüksek kaynaklanabilirlik özellikleri taşır. Bu özellikleriyle Hastelloy C-276, zorlu koşullar altında mükemmel performans sergileyen ender alaşımlardan biridir [13].

Kaynaklanabilir değildir ve α alaşımlarına göre sürünme direnci daha düşüktür. İsmine β olmasına rağmen, β fazı oda sıcaklığında yarı kararlıdır ve bu nedenle soğuk çalışma koşulları için uygun alaşımlardır, aksi halde yüksek bir sıcaklık ortamında α fazına dönüşüm gözlemlenebilir [19].

2.7. Metal Alüminitler ve Özellikleri

"Metal Alüminitler" terimi, metalik özelliklere sahip ve alüminyum içeren özel alaşımları ifade etmek için kullanılabilir. Alüminyum, diğer metallerle birleştirilerek çeşitli alaşımlar oluşturabilir. Ancak, bu alaşımların spesifik bileşenleri ve özellikleri, hangi metallerin kullanıldığına ve alaşımın özel uygulamalara yönelik olarak geliştirilip geliştirilmediğine bağlı olarak değişir [20,21].

Alüminyum, yüksek oksidasyon direncine sahip bir malzemedir ve uçak, roket ve uzay araçları endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğada, yüzeyinde alüminyum oksit bulunur. Oksidasyona karşı koruma amacıyla genellikle Al alaşımları tercih edilir. Oksidasyona dayanıklı malzemelerde, ısı transferinin uygun olmaması taneler arası oksidasyon tipini tetikleyebilir ve yüzeyde zaman zaman kırmızı, bazen kahverengi veya siyah noktalar oluşturabilir [13].

Farklı uygulama yöntemleriyle alüminyum kaplama yapılabilir; bunlar arasında radyasyonla kaplama (paket sementasyon), sıcak daldırma, püskürtme, elektrik ark püskürtme, akımsız metal kaplama, difüzyon kaplama, vakum kaplama, katodik dağılım ve iyon kaplama yer almaktadır [22].

Kutu alüminyumlama işlemi, birçok araştırmacı tarafından çeşitli malzemelere farklı işleme koşullarında uygulanmış ve elde edilen kaplama tabakasının özellikle oksidasyon ve oksidasyon direnci üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Alüminyumun metalik elementlerle oluşturduğu intermetalik alaşımların özellikleri genellikle bu alaşımların kullanım amacına göre değişir. Bu alaşımlar, hafiflik, dayanıklılık, oksidasyon direnci veya özel ısısal özellikler gibi belirli özelliklere

odaklanabilir. İntermetalik bileşikler veya alaşımlar, iki metalin düzenli katı hali birleşimini ifade eden genel bir terimdir. Bu malzemeler genellikle sert, kırılğan, yüksek sıcaklık direncine sahip ve yüksek sıcaklıklarda güçlü mekanik özelliklere sahip olma eğilimindedir. Schulze'nin tanımına göre, kristal yapıları diğer bileşenlerden ayıran bu malzemeler, isteğe bağlı olarak bir veya daha fazla metalik olmayan elementle birlikte iki veya daha fazla metalik element içeren katı fazları temsil eder. Atomik bağlanmada, metaller arası bileşikler metal-kovalent bağ içerirken, katı çözelti alaşımlarındaki bağ metaliktir ve sitokimyasal veya sitokimyasal dışı intermetalik bileşikler olarak sınıflandırılabilir [23].

İntermetalik alaşımlar, metal elementlerin özel oranlarda birleşmesiyle oluşan ve geleneksel metal alaşımlarından farklı özellikler sergileyen malzemelerdir. Bu alaşımların önemli özellikleri arasında karmaşık ve özgün kristal yapıları bulunur, bu yapılar malzemelerin mekanik ve termal özelliklerini belirler. Yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direnci ile dikkat çeken intermetalik alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilir. Ayrıca, yüksek sertlik ve mukavemetleri sayesinde mekanik dayanıklılıkları ve aşınma dirençleri oldukça yüksektir. Bazı intermetalik alaşımlar, oksidasyona karşı üstün direnç gösterir, bu da onları agresif kimyasal ortamlarda kullanıma uygun kılar. Ek olarak, bu alaşımlar özel fiziksel özellikler gösterebilir, örneğin elektriksel veya manyetik özelliklere sahip olabilirler, bu da onları belirli uygulamalar için ideal hale getirir. Belirli bir intermetalik alaşımların özellikleri, bileşimi, kristal yapısı ve uygulama alanlarına bağlı olarak değişir [23].

Geçiş sonrası metaller ve metaloidler ile oluşturulan intermetalik bileşiklerin geniş uygulama alanlarını ve çeşitli özelliklerini anlatmaktadır. Metallerin homojen ve heterojen katı çözeltileri ile arayer bileşikler (karbürler, nitürler gibi) genellikle bu tanım dışında tutulur. İntermetalik bileşikler, günümüzde tam anlaşılmadan bile kullanışlı malzemeler olarak ön plana çıkıyor. Bu bileşikler, bileşenlerin eritilmesi, sinterlenmesi veya oksitlerden indirgenmesi gibi yöntemlerle elde edilir ve yapısal, elektronik, katalitik malzemeler gibi geniş uygulama alanlarına sahiptir [24].

Genel olarak, intermetalik bileşiklerin fiziksel özellikleri üzerinde durulmuş, kimyasal özelliklerine daha az vurgu yapılmıştır. Ancak kimyasal açıdan, intermetalik bileşiklerin bileşenlerinin Şekil 3.1.'de Periyodik Tablo'da Zintl çizgisine göre konumlarına bağlı olarak tanımlanabileceği belirtilmiştir. Bu bölge, Zintl çizgisinin yakınında veya solundaki elementleri içerir.

Atom Numarası → 1
Elementin Adı → Hidrojen
Atom Kütesi → 1,008

ZINT ÇİZGİSİ

Elementin Simgesi → H

Maddenin Durumu: KAT, SIVI, GAZ, BİLİNİYOR

Legende: Alkali Metaller, Lantanoidler, Geçiş Metalleri, Toprak Alkali Metaller, Aktinoidler, Ara Geçiş Metalleri, Yarı Metaller, Ametaller, Halogener, Soygazlar

Şekil 2.2. Periyodik Tablo [11].

Katı halde bulunan ve valans kurallarına uymayan bileşikler, Zintl çizgisinin sağ tarafındaki elementlerden oluşmaktadır. Bu nedenle, bu özelliklere sahip tüm bileşikler kapsamak amacıyla, Şekil 3.1’de sarı veya yeşil çizgi ile belirtilen elementleri de dahil etmek gerekmektedir. Periyodik tabloda Zintl çizgisi, metalleri ve ametalleri ayıran hayali bir çizgidir. Bu çizgi, sağ tarafta genellikle metallerin, sol tarafta ise genellikle ametallerin bulunduğu bir sınırla belirlenmektedir.

2.8. Metal Alüminitler

İntermetalikler içinde yer alan alüminyum içerikli malzemeler, yani alüminitler, potansiyel ağırlık tasarrufu sağlamalarının yanı sıra, oksitleyici ortamda veya havada ısıtıldığında yüzeylerinde koruyucu bir alümina tabakası oluşturur. Bu tür bileşikler, yüksek ergime noktaları, iyi oksidasyon direnci ve yüksek mukavemete sahip olmalarının yanı sıra nispeten düşük yoğunluklu malzemelerdir [23].

Alüminyum esaslı intermetalik bileşikler arasında en yaygın kullanılanlar şunlardır:

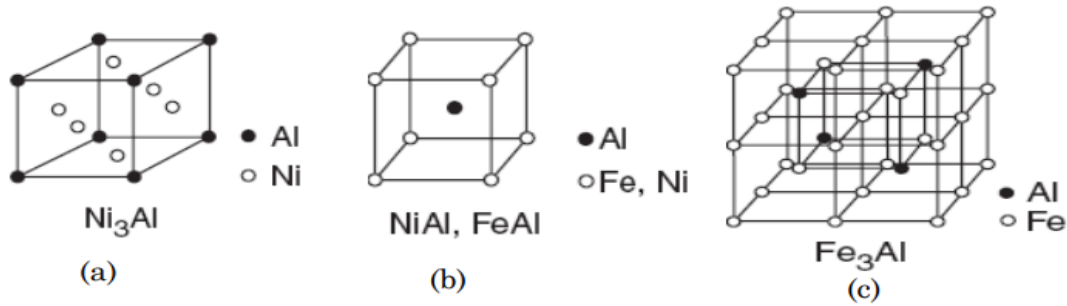
- Demir Alüminitler
- Nikel Alüminitler
- Titanyum Alüminitler

Yüksek çalışma sıcaklıkları için, Ni_3Al , $NiAl$, Ni_2Al_3 , Ni_3Al_2 , Fe_3Al , $FeAl$, Ti_3Al ve $TiAl$ gibi alüminyum esaslı intermetalik bileşikler, daha yoğun yapısal malzemelere

bir alternatif olarak sunulmuştur. Bu tip alaşımlar içinde, demir alüminitler düşük malzeme maliyetleriyle dikkat çekmektedir [66].

Son yıllarda, Ti, Fe ve Ni alüminitler üzerinde yapılan araştırmalarda, alaşımlama ve üretim işlemlerini kontrol altında tutarak kristal yapılarını, mikroyapısal oluşumlarını, tane yapılarını ve kompozisyonlarını geliştirme çabaları, özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun hale getirmeye yöneliktir. Yeterli alüminyum içeren bileşiklerde, oksitleyici ortamda yüzeyde kompakt ve koruyucu bir alümina (Al_2O_3) tabakası oluşmaktadır [26, 23].

Şekilde, alüminit yapıların atomların dağılımını gösteren bir gösterim bulunmaktadır. Alüminitlerin çoğu belirtilen kompozisyon aralığının üzerinde oluşmakta ve sitokiyometriden sapma arttıkça düzen oranı azalmaktadır. İlave edilen elementler, yapıda düzensizlik oluşturmada yerleştirilir. Örneğin, Ni_3Al 'da Al atomları alüminyum konumlarına, Ni atomları nikel konumlarına ve Fe atomu her iki konuma da yerleştirilebilmektedir [26].



Şekil 2.3. Nikel ve demir alüminitlerin kristal yapıları (a) L12 , (b)B2, (c) DO3. [26]

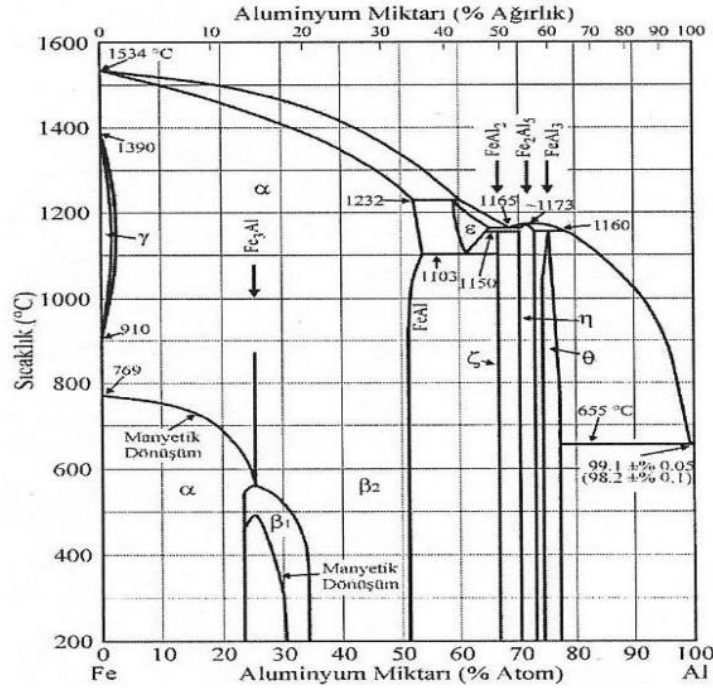
2.9. Demir Alüminitler

Demir alüminitler, demir ve alüminyumun belirli oranlarda birleştirildiği alaşımlardır ve özellikleri bileşimleri ve mikroyapılarına göre değişir. Bu alaşımların iki ana kristal yapısı vardır: B2 yapısı ($FeAl$), demir ve alüminyum atomlarının düzenli bir şekilde sıralandığı ve D03 yapısı (Fe_3Al), demirin farklı alt kafeslerinde bulunan atomları içeren bir intermetalik bileşiktir [23].

Demir alüminitlerin öne çıkan özellikleri şunlardır:

- Yüksek Sıcaklık Dayanımı: Yüksek ergime noktalarına ve iyi mekanik özelliklere sahip olmaları nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır.

- Yüksek Mukavemet: Yapısal uygulamalarda tercih edilir.
- Oksidasyon Direnci: Alüminyum, koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak oksidasyona karşı direnç sağlar.

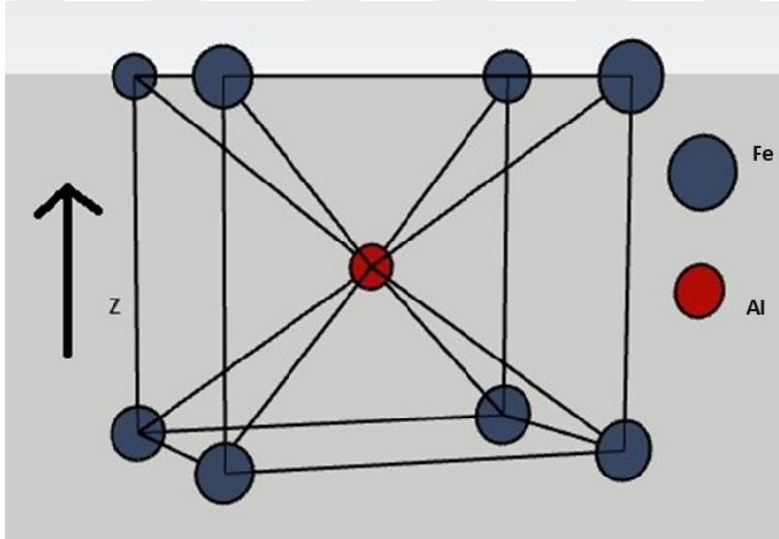


Şekil 2.4. Fe-Al ikili denge diyagramı. [26]

Demir alüminilerin (FeAl ve Fe₃Al gibi) avantajlarına karşın, bu alaşımların bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajları şu şekildedir:

- Zor Elde Edilmeleri: Demir alüminitlerin üretimi, diğer metal alaşımlarıyla karşılaştırıldığında daha karmaşık ve zor olabilir. Özel üretim teknikleri ve dikkat gerektiren işleme adımları bu alaşımları daha pahalı ve zor elde edilir kılar.
- Düşük Süneklik ve Kırılma Tokluğu: Oda sıcaklığında, bu alaşımlar düşük süneklik (esneklik) ve kırılma tokluğuna (darbe dayanımı) sahip olabilirler. Bu durum, yapısal uygulamalar sırasında malzemenin ani kırılma veya çatlamlarına yol açabilir.
- Sıcaklıkta Mukavemet Kaybı: Demir alüminitlerin mukavemeti, 500-600 °C civarındaki sıcaklıklarda düşebilir. Bu durum, yüksek sıcaklık uygulamalarında performans kaybına yol açabilir.
- Lokal Gevrekleşme Hassasiyeti: Rutubete ve oda sıcaklığındaki ortamlarda, demir alüminitler lokal gevreklik gösterebilirler. Bu, malzemenin kırılma dayanıklılığının azalmasına neden olabilir.

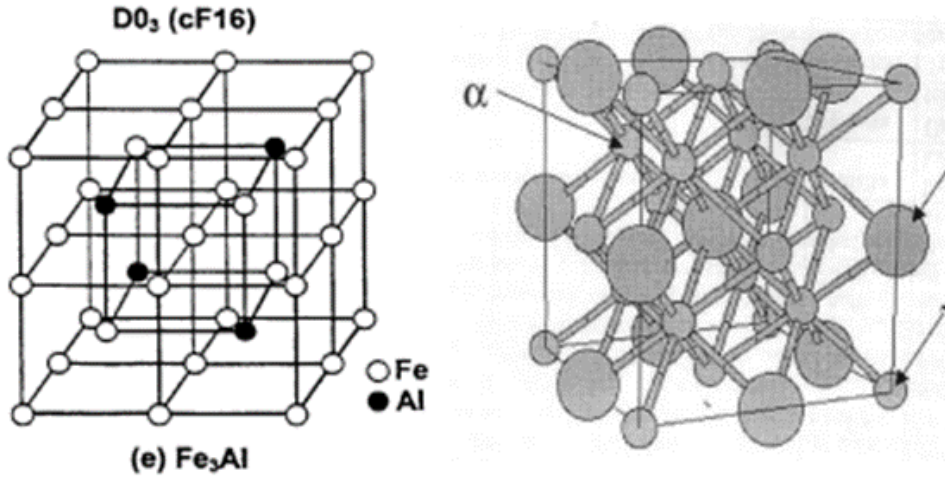
- **Hidrojenle Kimyasal Reaksiyon:** Atmosferik su buharı ve metaller arasında, hidrojenle kimyasal reaksiyon sonucu gevreklik meydana gelebilir. Bu, özellikle demir alüminitlerin döküm işlemleri sırasında dikkate alınması gereken bir husustur.
- **Sürünme Dayanımı:** Bu alaşımların sürünme dayanımı, kararlı ikinci faz partikülleri ve var olan ince disperse olmuş partiküllere bağlıdır ve bu durum, belirli uygulamalar için sınırlamalar oluşturabilir. Bu dezavantajlar, demir alüminitlerin endüstriyel ve mühendislik uygulamalarında kullanımını sınırlayan faktörler olarak görülebilir. Ancak, bu alaşımların avantajlarının yanı sıra, geliştirilen üretim teknikleri ve malzeme işleme yöntemleri sayesinde bu dezavantajlar azaltılabilir veya giderilebilir. Örneğin, Al seviyesinin kontrol altında tutulması, tane büyüklüğünün inceltilmesi, koruyucu yüzey kaplamasının oluşturulması gibi yaklaşımlar, malzemenin performansını iyileştirmek için kullanılabilir [23,26].



Şekil 2.5. FeAl'un kristal yapısı.

Fe_3Al , demir alüminitler içinde kararlı yapılarından biri olan D03 yapısına sahiptir. Bu yapı, geçiş metallerine ve bazı özel demir alt kafeslerine özgüdür. Fe_3Al alaşımında tamamen kübik alt kafeste (γ) yer alan Fe atomları ve β alt kafesindeki Al atomları, oktahedral düzlemde sekiz Fe atomu ile çevrilidirken, α alt kafesindeki Fe atomları dört Al ve dört Fe atomu ile tetrahedral düzlemde çevrilidir. Fe_3Al , katı halde soğurken zincirleme reaksiyonlarla oluşur ve 800°C 'nin üzerinde kararlı bir HMK düzensiz katı çözeltiye dönüşür. İlk oluşan FeAl fazı, B2 yapısını içerir ve $550\text{-}800^\circ\text{C}$ arasında sabit kalır, daha sonra D03 yapısına dönüşerek Fe_3Al 'ı oluşturur. Bu faz değişimi, ergime derecesinden daha düşük bir sıcaklıkta gerçekleşir, bu da NiAl gibi

diğer alüminitlerle kıyaslandığında atomlar arasında daha zayıf bağlar olduğunu gösterir. Fe₃Al'ın bu yapısal özellikleri ve faz değişimleri, alaşımın mühendislik uygulamalarında ve işlenmesinde önemli rol oynar [26].



Şekil 2.6. Fe₃Al'un kristal (D03) (γ) ve (α) demir alt kafesi, (β) Al alt kafesi.[26]

Fe₃Al ve HMK FeAl katı çözültisi arasındaki denge, demir veya alüminyum zengin bölgelere göre değişir. Demir zengin bölgelerde, Fe₃Al ve FeAl fazları arasında bir denge oluşurken, alüminyum zengin bölgelerde Fe₃Al'dan FeAl'a geçiş gözlemlenir. Bu denge, 550°C civarında bir kritik noktada, Cr, Mo, Mn, Ti ve Si gibi üçüncü elementlerin eklenmesiyle daha yüksek sıcaklıklara taşınabilir. Fe₃Al, düşük oluşum entalpisi nedeniyle kolayca ısı boşlukları oluşturur, bu entalpiyayınma entalpisinden bile daha düşüktür. Bu, Ni₃Al ve saf metallerle karşılaştırıldığında yüksek bir denge boşluk konsantrasyonuna yol açar ve difüzyon enerjisi alüminyum içeriğine bağlı olarak değişir [23].

Fe₃Al, geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak geliştirilen bileşiklerden biridir ve bu yöntem, yüksek sıcaklık senteziyle (SHS) kendi kendine meydana gelen ürün prensibine dayanmaktadır [26-27].

2.10. Titanyum Alüminitler

Titanyum alüminitler, titanyum ve alüminyumun belirli oranlarda alaşımlanmasıyla oluşan, ileri teknoloji uygulamalarında kullanılan özel malzemelerdir. Bu alaşımlar, hafiflik, yüksek sıcaklık dayanımı ve mükemmel mekanik özellikler gibi avantajlar

sunarlar. Genellikle, γ -TiAl (gamma titanyum alüminit) gibi intermetalik fazlardan oluşurlar [23].

- Temel Özellikleri:

- 1) Yüksek Sıcaklık Dayanımı: Titanyum alüminitler, yüksek sıcaklıklarda mükemmel mekanik dayanım ve oksidasyon direnci gösterir. Bu, onları motor parçaları gibi yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalar için uygun kılar.
- 2) Düşük Yoğunluk: Titanyum alüminitler, geleneksel nikel bazlı süper alaşımlara kıyasla daha hafiftir. Bu özellik, özellikle havacılık ve uzay endüstrilerinde tercih edilme sebebidir.
- 3) Oksidasyon Direnci: Alüminyum içeriği, bu alaşımlara iyi oksidasyon direnci sağlar.
- 4) Yüksek Sertlik ve Mukavemet: Yüksek sertlik ve mukavemet değerleri, aşınmaya ve yorulmaya karşı üstün direnç sunar.

- Uygulama Alanları:

- 5) Havacılık ve Uzay Endüstrisi: Titanyum alüminitler, uçak motorları ve uzay aracı bileşenlerinde kullanılır. Özellikle türbin kanatları ve diğer yüksek sıcaklık uygulamalarında avantajlıdır.
- 6) Otomotiv Endüstrisi: Yüksek performanslı motor parçaları ve egzoz sistemleri gibi alanlarda kullanılabilir.
- 7) Enerji Üretimi: Yüksek sıcaklık dayanımı, bu alaşımları gaz türbinleri gibi enerji üretim ekipmanları için uygun kılar.

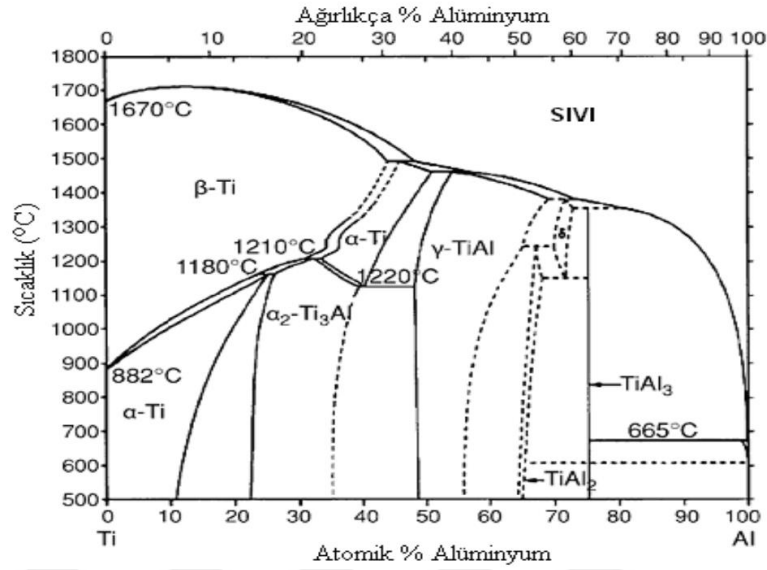
- Zorluklar ve Araştırmalar:

- 8) İşlenebilirlik: Titanyum alüminitler, işlenmesi zor malzemelerdir. Bu nedenle, üretim ve işleme tekniklerinin geliştirilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır.
- 9) Gevreklik: Oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda gevreklik, bu malzemelerin kullanımını sınırlayabilir.

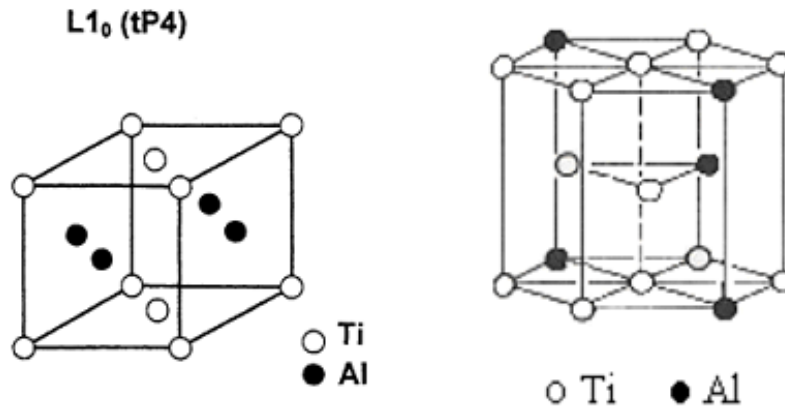
- 10) Maliyet: Üretim maliyetleri yüksektir, bu da ticari uygulamalarını sınırlar.

Titanyum alüminitler, özellikle havacılık ve uzay endüstrilerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek sıcaklık dayanımı, hafiflik ve oksidasyon direnci gibi özellikleri, bu alaşımları çeşitli yüksek performans uygulamaları için ideal kılar. Bununla birlikte, işlenebilirlik, gevreklik ve yüksek maliyet gibi zorluklar, bu malzemelerin daha geniş ölçekli kullanımını sınırlamaktadır. Devam eden

araştırmalar, bu sorunların üstesinden gelmeyi ve titanyum alüminitlerin daha geniş uygulamalarını hedeflemektedir [23,26].



Şekil 2.7. Ti-Al faz diyagramı. [26]



Şekil 2.8. Titanyum alüminitlerin kristal yapıları. [26]

Titanyum alüminitleri genellikle Ti-Al, Ti₃Al ve TiAl₃ şekillerinde karşımıza çıkar.

2.10.1. Ti₃Al

Ti₃Al, hekzagonAl bir kafes yapısına sahiptir ve P63/mmc uzay grubu düzeninde kristalleşir (Strukturbericht D019). Bu yapı, sıkı paket hekzagonAl A3 kafes yapısının üzerine düşen Ti atomlarının Al atomlarının yerini alması sonucunda oluşan bir üst düzenli örgüdür (superlattice). Atomik kompozisyonun %22 ila %35 Al arasında olduğu aralıkta kararlı bir durumda bulunur. Ayrıca, Al kompozisyonu yaklaşık %31

olduğunda, 1210 °C'ye kadar denge durumunu sürdürür. Kompozisyona bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda kübik β -Ti veya hekzagonAl α -Ti'ye dönüşebilir [28].

Ti₃Al yoğunluğu 4.2 g/cm³'tür ve Ti₃Al bazlı alaşımların yoğunluğu 4.1 ile 4.7 g/cm³ arasındadır. Ti₃Al bazlı alaşımlar, nispeten düşük yoğunlukları nedeniyle malzeme uygulamaları için geliştirilen ilk intermetalik alaşımlardan biridir. Ancak, bu alaşımların gevrek karaktere sahip olmaları, sünek-gevrek geçiş sıcaklığının 600°C olması ve yüzeylerinde koruyucu Al₂O₃ tabakasının oluşmaması, düşük oksidasyon direnci sergilemelerine yol açmaktadır. da değişebilir [26,28].

2.10.2. Ti-Al

TiAl, ergime noktasına kadar kararlı ve geniş bir bileşim aralığına sahip bir malzemedir. Al içeriği değişiklikleri yapısal düzensizliklere yol açabilir. L1₀ kristal yapısına sahip olan TiAl'ın c/a oranı 1.015, yoğunluğu ise 3.76 gr/cm³'tür, bu da onu diğer Ti bazlı alaşımlardan ve Ti₃Al bileşiğinden hafif kılar. Mekanik özellikleri ve oksidasyon direnci Nb, Ta, Zr, W gibi alaşım elementleriyle iyileştirilebilir. Al içeriğinin yüksekliği nedeniyle Ti₃Al'a göre daha iyi oksidasyon direnci sunar. Ayrıca, düşük yoğunluğu ve iyi oksidasyon direnci ile malzeme biliminde önemli bir araştırma konusudur. TiAl'in büyük ilgi görmesine neden olan özellikler, düşük yoğunluğu, yüksek oksidasyon direnci ve özellikle gaz türbin uygulamalarında kritik öneme sahip yanma özellikleriyle ilgilidir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda difüzyon hızının kontrol ettiği durumlarda sahip olduğu sürünme dayanımı ve mukavemeti, bu fazı tercih edilebilir kılar. Geniş bir sıcaklık aralığında yüksek rijitlik özelliğine de sahiptir. Ancak, TiAl'in yapısından kaynaklanan güçlü kimyasal bağlar, malzemenin gevrek bir karakter sergilemesine yol açar. Bu nedenle, tokluğun iyileştirilmesi gereken uygulamalarda mikroyapının inceltilmesi veya alaşımlandırma gibi yöntemlere başvurulmalıdır [26].

2.10.3. TiAl₃

TiAl₃, sıkı paket kübik L1₂ yapısındaki birim hücrelerin periyodik antifaz sınırları ile istiflenmesi sonucu elde edilen tetragonAl bir yapıya sahiptir (I4/mmm, D0₂₂). Bu yapı, uzun periyotlu düzende kübik yapı olarak da adlandırılır. Faz diyagramına göre %1 Al aralığı ile sınırlı katı çözünlülüğe sahiptir ve 1387°C'de düzensiz bir şekilde ergimektedir. Diğer Ti-Al bileşiklerine kıyasla daha düşük yoğunluğa (3.3 g/cm³) ve daha iyi oksidasyon direncine sahiptir. Ancak, mukavemeti diğer fazlardan daha düşük

olup aşırı gevrek bir karaktere sahiptir. Bu nedenle, $TiAl_3$, Ti ve Ti alaşımları yüzeyine yapılan koruyucu kaplamalara alternatif olarak düşünülmektedir [28].

2.11. Nikel Alüminitler

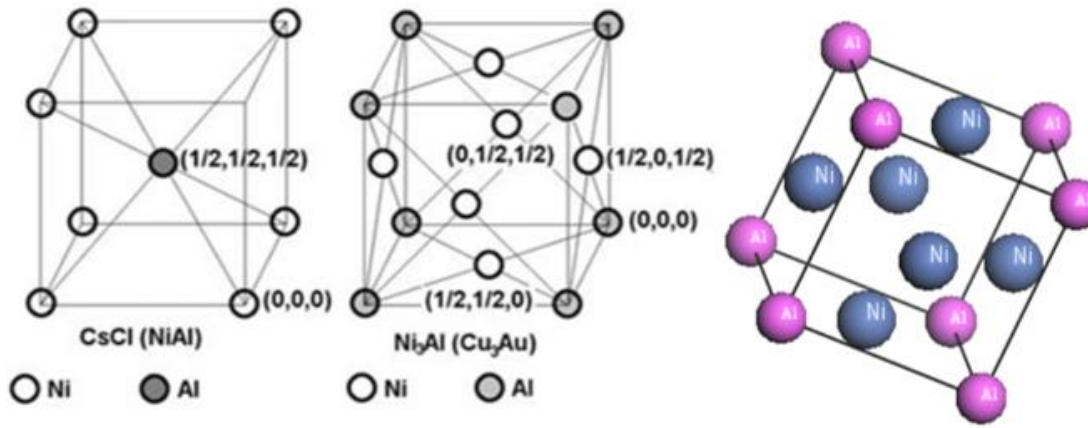
Al-Ni ikili faz diyagramında Al_3Ni , Al_3Ni_2 , Al_3Ni_5 , NiAl ve Ni_3Al intermetalik bileşikler bulunmaktadır [26]. Özellikle, nikelce zengin NiAl ve Ni_3Al , yüksek sıcaklık uygulamaları ve kaplama işlemleri için uygun malzemeler olarak kabul edilmektedir. Ni_3Al bileşiği, yüzey merkezli kübik (YMK) yapının türevidir ve L12 kristal yapısına sahiptir. Öte yandan, NiAl bileşiği hacim merkezli kübik (HMK)

yapının türevidir ve B2 yapısına sahiptir. Aşağıdaki tabloda, NiAl ve Ni_3Al bileşiklerinin bazı fiziksel özellikleri sunulmuştur [23,29].

NiAl fazı, %45-60 at.% Ni bileşim aralığında, 400°C'nin altında başlayarak ergime sıcaklığına kadar olan aralıkta oluşur. NiAl'un B2 yapısı, uzun mesafeli düzen içeren basit CsCl prototipi kristal yapısına sahiptir. B2 yapısı, Al atomlarının hacim merkez pozisyonunda ($1/2, 1/2, 1/2$) ve Ni atomlarının köşe pozisyonlarında (0, 0, 0) bulunduğu iki alt latişlerle ayrılmış iki atom hacmine sahip bir kafes şeklindedir. Kafes parametresi 0.2887 nm ve uzay grubu pm-3m(221) olarak listelenmiştir. Bu yapıya ait diğer bileşiklere örnek olarak CsBr, CsI, RbCl, AlCo, AgZn ve FeAl verilebilir [26,30].

NiAl'un yoğunluğu 5.35 gr/cm³ ile 6.60 gr/cm³ arasında değişmektedir. Sitokiyometrik bileşimdeki yoğunluğu 5.85 gr/cm³ olarak verilmektedir. Bu, paslanmaz çeliklerin, Fe-Cr-Ni alaşımlarının veya jet motorları gibi bazı hava araçlarında kullanılan Ni esaslı süper alaşımların yoğunluklarından oldukça düşüktür. Valans elektronların sitokiyometrik bileşimde atomlara olan yoğunluğu, yani e/a oranı, 3:2'dir ve bu, Hume-Rothery elektron bileşiği tanımına uymaktadır [30].

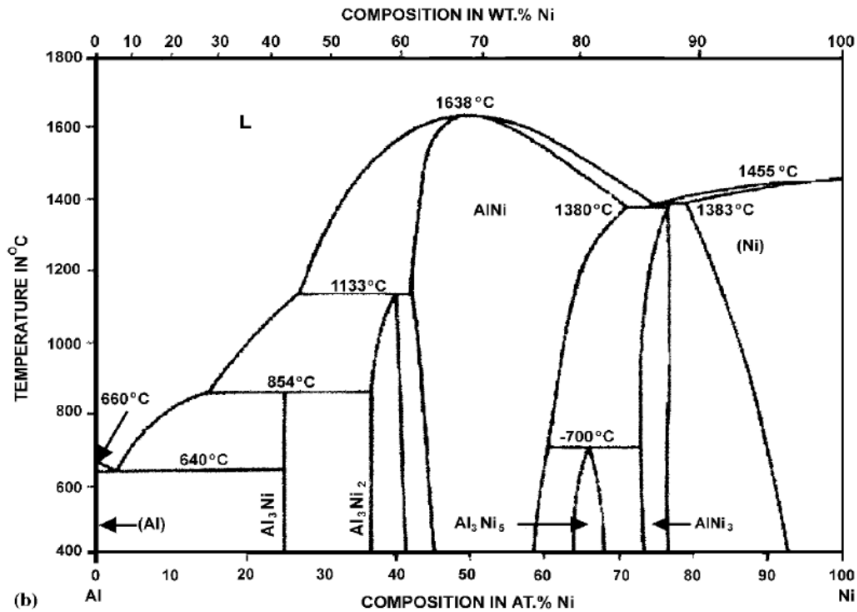
Ni oranının artmasıyla kristalografik değişimler, %23 at%Al-28 at%Al bileşim aralığında Ni_3Al oluşumu ile sonlanır. Ni_3Al , L12 tipi HMK kafes yapısına sahiptir. Bu yapıda, Ni atomları yüzey merkez pozisyonunda ve Al atomları kübik hücrenin köşe pozisyonlarında bulunur [29].



Şekil 2.9. CsCl NiAl ve Cu₃Au-Ni₃Al kafes yapılarının kristal yapıyı oluşturan her bir tür atomlarla beraber gösterimi. [26]

Ni oranının artışıyla birlikte, kristalografik değişimler 23 at%Al-28 at%Al bileşim aralığında Ni₃Al oluşumu ile sonlanır. Ni₃Al, L12 tipi HMK kafes yapısına sahiptir

Bu yapıda, Ni atomları yüzey merkez pozisyonunda konumlanırken, Al atomları kübik hücrenin köşe pozisyonlarını işgal eder. Bu durum, basit AuCu₃ prototipinde bulunan Uzun Mesafe Düzeni'ne (LRO - Long Range Order) benzeyen bir yapıdır. Uzay grubu pm-3m(221) olarak belirtilmiştir. NiAl'da olduğu gibi, bu yapıda da iki alt latise bulunur: Alfa (α) Alt latise, (0,0,0) pozisyonlarındaki Al, ve Beta (β) Alt latise, (0,1/2,1/2-1/2,0,1/2-1/2,1/2,0) pozisyonlarındaki Ni atomlarından oluşur [31].



Şekil 2.10. Ni-Al ikili faz diyagramı. [26]

Tablo 2.5. NiAl ve Ni₃Al bileşiklerinin bazı fiziksel özellikleri. [26]

Özellikler	Ni ₃ Al	NiAl
Elektriksel Direnç ($10^{-8} \Omega m$)	32.59	8-10
Isıl İletkenlik (W/m·K)	28.85	76
Isıl Genleşme Katsayısı ($10^{-6} /K-1$)	12.5	13.2
Latis Parametresi (nm)	0.357	0.2887
Young Modülü (GPa)	169	188
Spesifik Isı (J/g·K)	0.54	0.64
Ergime Sıcaklığı (°C)	1395	1682
Bağ Yapısı	Kovalent/metalik	Kovalent/metalik

2.11.1. Ni₃Al

Ni₃Al, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci ve mükemmel mukavemet özellikleri sergiler. Tek kristal formunda sünekken, çok kristalli formunda gevrek bir yapıdadır ve sıcaklık artışıyla mukavemeti düşmez.

Bu bileşik, belirli bir sıcaklıkta maksimum akma mukavemetine ulaşır, bu durum süper latis vida dislokasyonunun mobilitesi ve enerji anizotropisi ile sınırlanmaktadır. Alüminyum oksit tabakası taneler arası çatlak oluşumunu yavaşlatır ve bor ilavesi ile süneklik artarak, dövme işlemine uygun hale gelir. Cr, Fe, Mn gibi elementlerin katkısıyla süneklik artışı ve daha homojen atomik bağlanma sağlanır [32].

Ni₃Al'ün uygulama alanları oldukça geniştir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında, özellikle havacılık ve enerji sektörlerinde kullanılır [70].

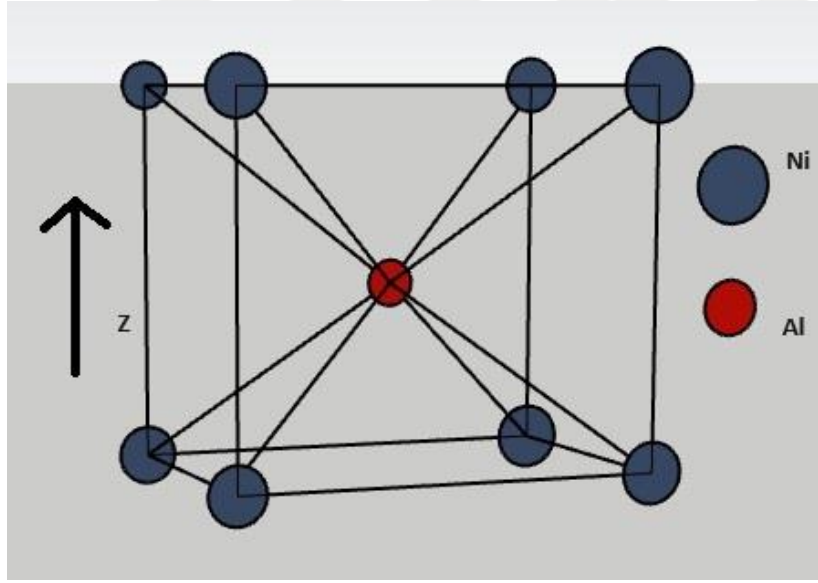
Oksidasyon direnci gerektiren egzoz sistemleri ve ısı değiştiricilerde tercih edilir. Aşınma direnci gerektiren mekanik parçalarda kullanılabilir. Hafif yapısal malzemelerde, özellikle havacılık endüstrisinde tercih edilir. Yüksek sıcaklıkta dayanıklı kaplamalar olarak kullanımı yaygındır.

Bu özellikler, Ni₃Al'ü yüksek sıcaklık uygulamalarında ve çeşitli endüstriyel alanlarda değerli bir malzeme yapmaktadır [30,32].

2.11.2. NiAl

Ni-Al sisteminde, %40'tan itibaren hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip B2 tipi tek faz kristal yapı oluşur. Bu NiAl, yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun olan avantajlı fiziksel özelliklere sahiptir: yüksek ergime noktası (1638°C), düşük yoğunluk

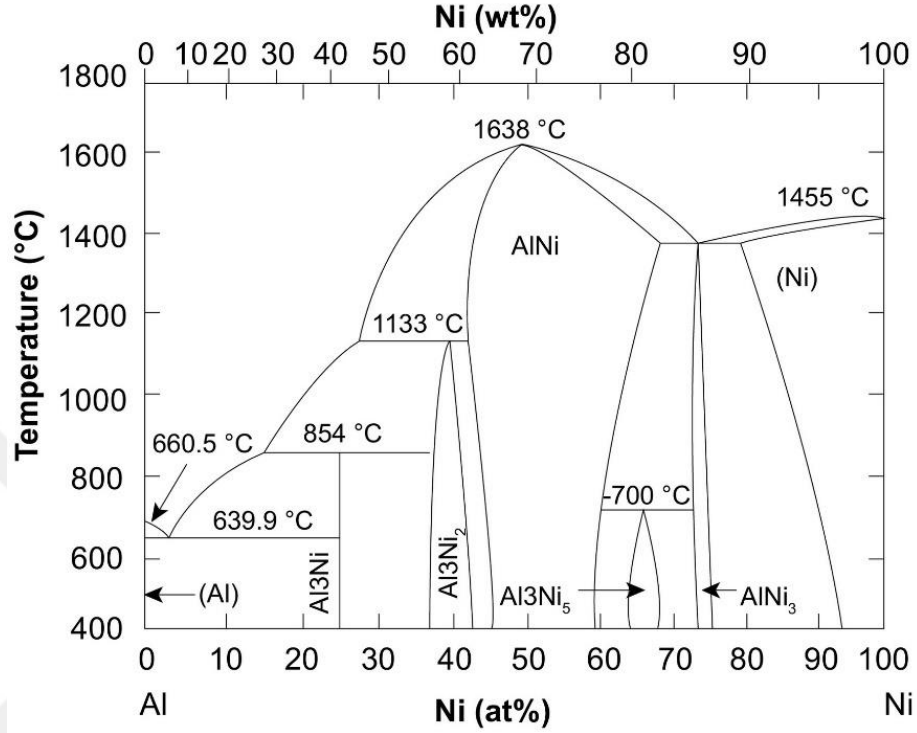
(5.86 gr/cm³) ve yüksek young modülü (294 GPa). Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci gösterir ve bu direnci artırmak için ytriyum, Hf ve Zr gibi elementler eklenir. NiAl'ın başlıca zorlukları, düşük süneklik ve yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet ve sürünme direncidir. 400°C üzerinde süneklik artar. NiAl, özellikle gaz türbin donanımlarında kullanılır ve Ni-esaslı süper alaşımlarla benzer sürünme direncine sahiptir. NiAl, %50 Al içeren bileşiklerin ergime sıcaklığı 1640 °C olan geniş bir intermetalik bileşik grubudur. Polikristal NiAl'ın yoğunluğu 5,9 g/cm³ ve elastiklik modülü yaklaşık 235 GPa'dır. Sürünme direnci, yüksek sıcaklıklarda düşer. Nikelce zengin NiAl bileşimlerinde martenzitik dönüşüm gözlemlenebilir. NiAl, Al₂O₃ ile mükemmel oksidasyon direnci sergiler ve Y, Zr, Hf gibi elementlerin eklenmesiyle direnci artırılabilir. Düşük yoğunluk, yüksek ergime derecesi ve iyi ısı iletimi özellikleriyle NiAl, yüksek sıcaklık uygulamalarında potansiyel bir malzemedir [32]. Gaz türbin motor pervaneleri ve termalbariyer kaplamalar gibi alanlarda kullanılır. NiAl, CsCl (B2) yapısında kristalleşir ve hacim merkezli kübik yapıya benzer, basit kübik bir yapıdadır [30].



Şekil 2.11. NiAl (B2) kristal yapısı. [55]

NiAl, yüksek oluşum ısısı sayesinde stabil bir yapıya sahiptir ve Al ile Ni elementlerinin birleşiminden oluşur. Alüminyum, yüzey merkezli kübik kristal yapısı, düşük yoğunluk ve ergime sıcaklığı ile genellikle saf haliyle elektriksel uygulamalarda kullanılırken, Nikel yüksek ergime sıcaklığı, yoğunluğu ve mükemmel aşınma, oksidasyon direnci ile bilinir. NiAl, kullanım sıcaklığında düşük süneklik ve yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet ve sürünme direnci gibi zorluklarla karşı karşıyadır.

Paket sementasyon prosesi ile oluşan Ni-Al intermetalik fazlar, Alüminyum veya nikel atomlarının tepkimesiyle oluşur ve Ni_3Al , NiAl , NiAl_2 , Ni_2Al_5 ve NiAl_3 gibi fazları içerir. Bu fazlar, Ni-Al Faz diyagramı ile belirlenebilir, özellikle Al bakımından zengin bölge NiAl_3 fazıyla ilişkilidir [33].



Şekil 2.12. Ni-Al denge diyagramı. [34,35]

2.11.3. Ni_2Al_3

Ni_2Al_3 intermetalik bileşiği, malzeme bilimi ve mühendislik alanında dikkate değer özelliklere sahiptir. Kristal yapısında nikel ve alüminyum atomları L12 düzeninde yer alır. alaşımın faz diyagramı, karışımın sıcaklık ve basınç altında kararlı olduğu fazları gösterir. Yüksek sıcaklıkta termalkararlılık gösteren Ni_2Al_3 , aynı zamanda yüksek mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklere sahiptir. Oksidasyona karşı direnci, çeşitli ortamlarda ve uzun süreli kullanım koşullarında değerlendirilir. Üretim yöntemleri ve endüstriyel uygulamaları, özellikle yarı iletken endüstrisi ve yüksek sıcaklık uygulamalarında önem taşır. Kristal yapısı ve özellikleri, malzeme bilimi ve metalurji alanında çeşitli yöntemlerle incelenmektedir [23].

K.V. Manukyan ve ark., Ni_2Al_3 gibi intermetalik alaşımların kafes yapıları üzerine yapılan teorik çalışmaları incelemiştir. Intermetallics veya Journal of Alloys and Compounds gibi dergilerde bu araştırmacıların yayınları mevcuttur. K. Hono ve ark., bu alanda önemli çalışmalar yapmış olan bir araştırmacı grubudur. "Nanotechnology"

veya "Materials Science and Engineering" gibi dergilerde bu araştırmacıların çalışmalarını mevcuttur. R. Yamada ve ark., katı hal fiziği ve alaşımların özellikleri üzerine çalışmalarıyla bilinen bir grup araştırmacıdır. Bu grup, Ni_2Al_3 gibi alaşımların kristal yapılarını ve özelliklerini anlamak için deneysel teknikler kullanabilir. Bu isimler ve gruplar, belirli bir alaşımın kafes yapısını anlamak için yapılan araştırmalarda öncü olmuşlardır [26].

2.11.4. Kullanım alanları ve üretim yöntemleri

Intermetalik alaşımlar, çeşitli endüstriyel uygulamalarda etkileyici özellikleriyle ön plana çıkarlar. Yüksek sıcaklık uygulamalarında, özellikle jet motorları, ısı eşanjörleri ve fırınlar gibi alanlarda, yüksek sıcaklık stabilitesi nedeniyle tercih edilirler. Yarı iletken endüstrisinde, elektronik cihazların yapımında özellikle özel sensörler ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Havacılık ve uzay endüstrisi gibi alanlarda yapısal malzemeler olarak da tercih edilirler; bu kullanım, hafiflik ve yüksek mukavemet özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda, örneğin aşırı koşullara maruz kalan mekanik parçaların üretiminde, sertlik ve mukavemetleri sayesinde etkili bir çözüm sunarlar. Ayrıca, kimyasal endüstride katalizör olarak kullanılabilecek potansiyelleri bulunur, özellikle bazı kimyasal reaksiyonların hızlandırılmasında etkili olabilirler. Bu geniş kullanım alanları, intermetalik alaşımların endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda vazgeçilmez bir bileşen haline gelmesine yol açmıştır [23,26].

NiAl intermetalik bileşiği, çeşitli alanlarda kullanım için uygun özelliklere sahiptir. Bu kullanım alanları şunları içerir:

- Yüksek Sıcaklık Uygulamaları: NiAl'ın yüksek ergime noktası ve oksidasyon direnci, gaz türbin motor pervaneleri gibi uygulamalarda avantaj sağlar.
- Gaz Türbin Motorları: Motor bileşenleri için potansiyel malzeme olarak yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direnci önemlidir.
- Termal Bariyer Kaplamaları: Yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzemelerin korunmasında kullanılır.
- Sabit Parçalar: Vanalar ve yanma contaları gibi sabit parçalar için oksidasyon direnci ve dayanıklılığı önemlidir.
- Süper alaşımlar: Nikel esaslı süper alaşımlarda ikincil bir faz olarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılır.

- Gaz Kaçağı Kontrolü: Yüksek sıcaklıklarda gaz kaçağını kontrol etmekte önemlidir.

NiAl bileşiğinin spesifik kullanım alanları ise şunlardır:

- Gaz türbin donanımları
- Termal bariyer kaplamalar
- Yarı iletkenler
- Otomotiv turbo şarjları
- Yüksek sıcaklık kalıpları
- Fırın sabitleyicileri
- Isıtma fırınlarında kullanılan merdaneler
- Hidro-türbinler
- Kesici takımlar
- Pistonlar
- Yanma contaları ve vanalarda
- Gıda, plastik, kimya veya ilaç endüstrisi için ikiz vida sürücülerinde

Bu örnekler, NiAl'ın geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu gösterir. Ancak, her uygulama için malzemenin özellikleri ve avantajları özel olarak değerlendirilmelidir [32]. Metaller arası bileşiklerin üretimi için çeşitli yöntemler denenmiştir, bunlar arasında ergitme ve döküm, toz metalurjisi, saf orjinal malzemeli reaktif sinterleme ve yanma sentezi öne çıkar [66]. Ergitme yöntemi, vakum ve argon indüksiyon ergitmesi gibi alt metotları içerirken, yüksek sıcaklıklarda empüritelerin bulaşma riski taşır. Toz metalurjisi, karmaşık şekiller için uygundur ama verimlilik düşük olabilir. Saf malzemeli reaktif sinterleme, yüksek yoğunluklu malzemeler üretir ancak genellikle ek işlemler gerektirir. Yanma sentezi, MoSi₂ ve WC gibi ileri seramik ve metaller arası bileşikler için kullanılır ve yüksek verimlilik sağlar. Bu yöntem, elementel tozların birleştirilmesiyle çalışır ve negatif ısı sonucu yayılan bir reaksiyon sürecidir. Ürünler genellikle porozite içerir ve bu, reaktif sıcak presleme veya izostatik presleme ile azaltılabilir. Kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi, reaktanların bir bobinle ısıtılarak ateşlenmesi veya termalpatlama ile gerçekleşir. Bu yöntemler, nikel aluminat üretiminde başarıyla kullanılmıştır ve reaktanların oranı, katkı maddesi miktarı, işlem atmosferi ve partikül boyutu gibi faktörler reaksiyonları etkileyebilir [69]. Ni-Al faz diyagramı, birçok araştırmacı tarafından geliştirme sürecinden geçmiş

ve defalarca değiştirilmiştir [36]. Batalu, Coşmeleață, and Aloman 2006 [37], Robertson ve Cayman [38] tarafından verilen Ni-Al faz diyagramı daha sonra Okamoto (Ishida 2004), Nash ve arkd. [39], Okamoto [40], ve Ma ve arkd. [41] tarafından diyagramda bazı düzeltmeler de önerilmiştir. Alaşımlandırılmamış Ni alüminitler sertlik değişimlerinde bileşime aşırı bağımlıdır, öyle ki, düşük sertlik değerleri stoykiyometrik Ni-Al bileşimlerde, stoykiyometri dışı bileşimlerdekinden daha az ölçülmüştür[42]. Westbeook, J. H. eş atomlu demir grubu alüminitlerin sertliğinin sıcaklığa bağlılığı çalışmasında Ni'e ağırlık % 40 ile ağırlık %55 arasında yapılan kademeli Al ilavesi ile sertlikteki düşüş 4,2GPa'dan yaklaşık 3 GPa'a kadar (stoykiyometrik bileşim) ve artan sertliğin de ağırlık %55 den itibaren 2,4GPa gibi düşük bir değerden, 6,4 GPa kadar yüksek bir değer çıktığı da, su verme sıcaklığından bağımsız olarak görülmüştür [43]. Stoykiyometrik bileşimdeki 2,4 GPa ile 3,2 GPa arasındaki sertlik değişimi üçlü hataya sebep olan bileşiklerin varlığına bağlanmaktadır. Ancak, yüksek sertlik değerleri az miktarda Al veya Ni'ce zengin stoykiyometriye yakın, örneğin Ni_5Al_2 ve Ni_4Al gibi bileşiklerde, tahmin edileceği gibi, Al'ca zengin NiAl intermetaliklerde ısıl yapısal hatAlardan ve Ni'ce zengin NiAl intermetaliklerde ise atomik boşluklarının önemli bir rol oynadıkları görülmektedir [44,45] Stoykiyometrik Ni_3Al intermetalik bileşiği için ergime noktası 1385°C ve yoğunluğu ise 7.50 gr/cm³ olarak verilmiştir[46]. NiAl için 1638°C ve 1639°C sıcaklıkları Singleton ve arkd [47], tarafından önerilen faz diyagramına göre ve deneysel olarak Matsuura ve arkd. [48] tarafından belirlenmiştir. 1640 °C ergime sıcaklığı da rapor edilmiştir [49].

3. YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Nikel bazlı süper alaşımlar, yüksek sürünme mukavemeti, oksidasyon ve oksidasyon direnci, ısıya karşı direnç ve mükemmel işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik gibi özelliklere sahiptir [26,34]. Hastelloy C-276, bu grupta yer alan, yüksek oksidasyon direncine sahip bir nikel-krom-molibden alaşımdır. Bu alaşımın yüzey özelliklerini geliştirmek için çeşitli yöntemler bulunur:

Yüzey Kaplamaları: PVD veya CVD gibi kaplama yöntemleri, oksidasyon direncini ve aşınma dayanıklılığını artırabilir.

Yüzey İşlemleri: alaşımın yüzeyinin mekanik veya kimyasal işlenmesi performansını artırabilir.

Termal İşlemler: Isıl işlemler, alaşımın özelliklerini değiştirebilir ve oksidasyon direncini artırabilir.

Yüzey Mühendisliği: Bu teknikler, malzeme yüzeyinin belirli bir amaca uygun olarak değiştirilmesi için kullanılabilir.

Bu işlemler, Hastelloy C-276'nın özellikle belirli kullanım alanları veya oksidasyon türleri için daha etkili olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, bu alaşımın yüzey kaplamaları oksidasyon direncini artırır, aşınma direncini ve hijyen standartlarını iyileştirir ve ömrünü uzatmaktadır. Özelleştirilebilir nitelikleriyle, belirli endüstriyel gereksinimlere uygun hale getirilebilir. Paket sementasyon işlemi, çok çeşitli alaşımlar üzerinde koruyucu ve sert metallerarası kaplamalar oluşturmak için kullanılabilir ve alüminit kaplama, difüzyon kaplamalar arasında oldukça yaygındır [34,50,51].

Termal spreyci kaplamalar alanında Wang ve ark. [52], Cinca ve ark. [53], Rosa ve ark. [54] çalışmışlardır. Kimyasal buhar biriktirme alanında [55], Paket alüminize etme alanında Yener ve ark. [50], ve sıcak daldırma kaplama Rosa ve ark. [54] ve Bozza ve ark. [56] çalışmalar yapmışlar ve tüm bu teknikler arasında kutu alüminizasyon

oldukça ucuz ve kolay uygulanabilir bir difüzyon kaplaması sebebiyle tercih edilmiştir. Bu çalışma, Hastelloy C-276 alaşımının yüksek sıcaklıklarda oksidasyon

ve aşınma direncini iyileştirmek amacıyla farklı sıcaklık ve zaman aralıklarında kutu alüminizasyon kaplamasının etkisini incelemeyi hedeflemektedir.

3.1. Anodik Oksidasyon

Anodik oksidasyon sürecinin genel prensipleri, belirli metal ve alaşımların yüzey özelliklerini iyileştirmek için uygulanabilir. Bu süreç, özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımları için yaygın olarak kullanılır, çünkü bu metaller yüksek oksijen affinitesine sahiptir ve oksit tabakası oluşturmada etkilidirler. Ancak, Hastelloy C-276 gibi nikel-krom-molibden alaşımları veya Ni-Al (Nikel-Alüminyum) alaşımları için anodik oksidasyonun uygulanabilirliği, bu malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişebilir [72]. Hastelloy C-276, oksidasyon direnci, oksitlenme direnci ve yüksek sıcaklık performansı gibi özellikler gösterir, ancak bu özellikler anodik oksidasyon işlemi için her zaman uygun olmayabilir. Bu tür özel alaşımlar için alternatif yüzey işleme teknikleri, alaşımın özgün özelliklerine ve uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak araştırılmalıdır. Diğer yandan, Ni-Al alaşımları yüksek sıcaklık performansı gösterir ve bu alaşımların anodik oksidasyonu, oksidasyon ve aşınma direncini artırmak için potansiyel bir yöntem olabilir [27]. Bu işlem, Ni-Al alaşımının yüzeyinde kontrollü bir oksit tabakası oluşturarak malzemenin dayanıklılığını ve ömrünü uzatabilir. Ancak, bu alaşımların anodik oksidasyonu üzerine spesifik bilgi ve literatür sınırlıdır ve daha fazla araştırma gerektirebilir. Özellikle Hastelloy C-276 ve Ni-Al alaşımları gibi özel malzemeler için bu işlemin uygulanabilirliği, malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerine ve spesifik uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Anodik oksidasyonda sıcaklık ve süre gibi parametreler önemlidir; oksit tabakasının büyümesi uygulanan voltaja bağlı olarak lineer olarak artar, çünkü iyon hareketi voltaja bağlıdır.

$$d = \alpha \times V \quad (3.1)$$

d = Tabaka kalınlığı

α = Sabit (1,5 – 3 nmV⁻¹), V = Voltaj

Voltajın tabaka büyümesiyle ilişkili olmasına rağmen, sürekli artan voltaj, tabakanın sürekli genişleyeceği anlamına gelmez. Belirli bir voltaj seviyesinin aşılması

durumunda tabaka büyümesi durabilir ve aşırı yüksek voltajlar anodizasyon sürecinde gaz veya kıvılcım oluşumuna neden olabilir. Bu durumda, gözenekli ve düzensiz bir

yapıya sahip olan plazma veya mikro-ark anodizasyonu gibi tekniklere başvurulabilir. Mikro-ark oksidasyonu, oksidasyon direnci yüksek ve biyouyumlu nikel alaşımlarının oluşturulmasında etkili olabilir. Oluşan oksit tabakasının genel karakteristiği diğer metotlara kıyasla daha az düzenli ve gözenekli olma eğilimindedir; bu tabaka genellikle amorf veya kısmen kristal yapıdadır ve genellikle anataz ve rutil fazlarını içerir [57].

3.2. Termal Oksidasyon

Termaloksidasyon süreçlerinin Hastelloy C-276, Ni-Al bileşiği ve nikel/alüminyum alaşımlarında etkileri, bu malzemelerin uygulama alanlarına ve özelliklerine göre farklılık gösterir:

- Hastelloy C-276: Bu alaşım, nikel, krom ve molibdenin oksijenle etkileşimi sonucu oluşan oksit tabakası ile yüksek sıcaklık ve aşındırıcı kimyasallara karşı mükemmel direnç sağlar. Kimya endüstrisi, petrokimya ve çevresel teknolojiler gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır [23,26].
- Ni-Al Bileşiği: Yüksek sıcaklıklarda nikel ve alüminyumun oksijenle reaksiyonu sonucu oluşan oksit tabakası, bu bileşiği özellikle motor parçaları ve yüksek sıcaklıkta kullanılan kaplamalar için uygun hale getirir.
- Alüminyum alaşımları: Alüminyumun oksijenle reaksiyonu sonucu oluşan Al_2O_3 (alüminyum oksit) tabakası, bu malzemeleri oksidasyona karşı korur. Havacılık, inşaat ve ulaşım sektörlerinde yaygın olarak tercih edilir.

Genel olarak, bu malzemelerin her biri yüksek sıcaklıkta kararlılık ve oksidasyon direnci sunar. Hastelloy C-276, özellikle agresif ortamlarda kullanılmak üzere tasarlanmışken, Ni-Al bileşiği ve alüminyum alaşımları daha geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Termal oksidasyon süreçleri, bu malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirerek çeşitli endüstriyel uygulamalar için ideal hale getirir [26].

3.3. Nitrasyon

Hastelloy C-276, yüksek oksidasyon direnci gerektiren alanlarda tercih edilen Hastelloy C-276, nikel-krom-molibden alaşımdır. Demir veya çelik gibi malzemeler için yaygın olan nitrasyon işlemi, Hastelloy C-276 için uygun değildir. Bu alaşım, daha

çok yüksek sıcaklıkta oksidasyona ve oksidasyona karşı dayanıklılığı artırmak için pasivasyon veya oksidasyon direncini artıran işlemlerle işlenir [12].

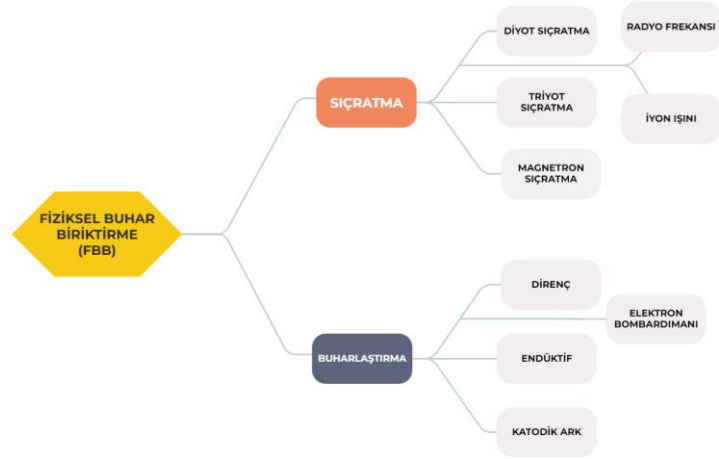
Ni-Al Bileşiği: Nikel ve alüminyumun birleşiminden oluşan Ni-Al bileşiği, nitrasyon işlemiyle yüzey sertliğini, aşınma ve oksidasyon direncini artırabilir. Bu işlem, yüksek sıcaklıklarda nitrojen atmosferinde gerçekleşir ve alaşımın yüzeyinde nitrit veya nitrid tabakası oluşturarak mekanik özellikleri iyileştirir.

Alüminyum ve Alaşımları: Alüminyum ve alaşımları için nitrasyon, metalin yüzey sertliğini ve oksidasyon direncini artıran bir işlemdir. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bu işlem, yüzeyde nitrid tabakası oluşturur ve endüstriyel uygulamalarda yüzey dayanıklılığını artırır.

İşlem Yöntemleri: Hem Hastelloy C-276 hem de Ni-Al ve alüminyum alaşımları için, kimyasal (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemleri, malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için alternatif yöntemler olarak değerlendirilebilir. Bu yöntemler, yüksek sıcaklık koşullarına ve malzemelerin özelliklerine bağlı olarak tercih edilir [58].

3.4. Fiziksel Buhar Biriktirme ile Kaplama

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), yüksek vakumda katı malzemelerin buharlaştırılması ve buharın bir yüzeye biriktirilmesiyle ince kaplamalar oluşturan bir tekniktir. PVD yöntemleri arasında Direnç Isıtma Buharlaştırma, Katot Işması Buharlaştırma, Magnetron Sputterleme ve İyon Plazma Buhar Biriktirme yer alır. Bu teknik, malzemelere yüksek kaliteli, aşınma ve oksidasyona dayanıklı kaplamalar sağlar. Metalik, seramik ve polimer malzemelerde kullanılır ve elektronik, otomotiv, tıbbi cihazlar ile dekoratif kaplamalar gibi çeşitli alanlarda uygulanır [59]. Şekil 3.1’de Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemleri kategorize edilmiştir ve gösterilmiştir.



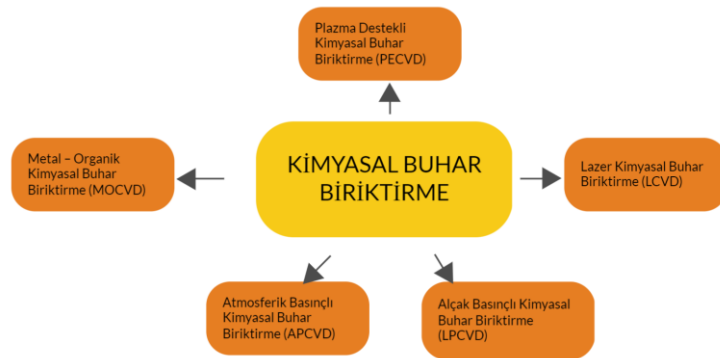
Şekil 3.1. Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinin gösterimi.

3.5. Kimyasal Buhar Biriktirme İle Kaplama

Kimyasal buhar biriktirme (CVD), diğer işlemlere kısmen benzer şekilde reaktan gazların, kimyasal reaksiyonlarının ürünlerinin kaplanacak malzeme üzerinde biriktirilmesi koşulunu içerir [60].

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD - Chemical Vapor Deposition), bir malzemenin yüzeyine kimyasal olarak reaksiyona giren gazların yerleştirilmesini içeren bir kaplama yöntemidir. CVD, ince film kaplamaların, yarı iletken cihazların, optik kaplamaların ve diğer birçok uygulamanın üretiminde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir [61].

Şekil 3.2’de kimyasal buhar biriktirme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kimyasal buhar biriktirme yöntemlerinin gösterimi.

- Temel İlkeler:

- 1) Gaz Fazı Reaksiyonu: CVD işlemi, genellikle gaz fazındaki reaksiyonlar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu reaksiyonlar, gaz fazındaki öncüllerin

malzeme yüzeyinde reaksiyona girmesi ve katı bir film oluşturması prensibine dayanır.

- 2) Sürekli İşlem: CVD, genellikle sürekli bir işlemdir. Malzeme yüzeyine sürekli olarak gazlar uygulanır ve reaksiyon devam ettikçe ince film büyür.
- 3) Yüksek Sıcaklık: CVD genellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir (genellikle 500 ila 1200°C arasında). Bu, gaz fazındaki reaksiyonların hızını artırır ve malzeme yüzeyine düzgün bir kaplama oluşturulmasına olanak tanır.

- Adımlar:

1. Hazırlık: Malzeme, temizlenir ve genellikle bir ön kaplama (primer) uygulanır.
2. Gaz Girişi: Gazlar, reaksiyon için gerekli olan kimyasal öncüller, reaktanlar ve taşıyıcı gazlar olarak malzemenin yüzeyine taşınır.
3. Reaksiyon: Yüksek sıcaklıkta, gaz fazındaki öncüller malzeme yüzeyinde reaksiyona girer ve katı bir film oluşturur.
4. Büyüme: Reaksiyon devam ettikçe, ince film malzeme yüzeyinde büyümeye devam eder.
5. Soğutma ve Katılaşma: Film oluşuktan sonra, malzeme soğutulur ve katılaşır.

- Uygulamalar:

1. Yarı İletken Üretimi: CVD, yarı iletken endüstrisinde silikon tabakaları oluşturmak için yaygın olarak kullanılır.
2. Optik Kaplamalar: CVD, optik kaplamaların üretiminde, özellikle cam yüzeylere antirefleks kaplamalar uygulanmasında kullanılır.
3. Koruyucu Kaplamalar: Malzemelerin oksidasyona karşı korunması veya aşınmaya karşı dayanıklılığının artırılması amacıyla kullanılır.
4. Termal Bariyer Kaplamalar: CVD, yüksek sıcaklıklara dayanıklı termalbariyer kaplamaların oluşturulmasında kullanılabilir.
5. Biyoaktif Kaplamalar: Biyomedikal uygulamalarda, implantların yüzeyine biyoaktif kaplamalar uygulanabilir.

Kimyasal buhar biriktirme, malzemelerin yüzey özelliklerini kontrol etmek ve özelleştirmek için güçlü bir araçtır, ancak yüksek sıcaklık ve hassas kontrol gereksinimleri gibi zorlukları vardır. Plazma destekli, Fotokimyasal, lazer destekli ve

elektron bombardımanı kimyasal buhar biriktirme yöntemleri olarak sınıflandırılabilir [62].

3.6. Kutu Sementasyon Yöntemi

Kutu sementasyon, çelik parçaların yüzeylerini sertleştirmek için karbon difüzyonu yoluyla yapılan bir termal işlemdir. İşlem aşamaları hazırlık, kutu doldurma, yüksek sıcaklıkta ısıtma, difüzyon işlemi ve soğutma şeklindedir. Bu yöntem, metal yüzeylerin sertliğini ve aşınma direncini artırarak parçaların ömrünü uzatır. Kutu sementasyon, özellikle makinelerde, dişli sistemlerinde ve otomotiv parçalarında kullanılır. Kaplama süreçleri ise, metal yüzeylerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Difüzyon ve kaplama işlemleri, metal yüzeylerine refrakter malzemeler ekleyerek çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Bu işlemler arasında elektron ışıını, plazma spreyi ve iyon kaplama gibi teknikler bulunur. Katmanlı kaplamalar, altlık üzerine biriktirilen özel alaşımlarla gerçekleştirilir ve termalbariyerler veya difüzyon bariyerleri oluşturabilir. Bu teknikler, malzemelerin ömrünü uzatır ve termalşok ile erozyona direnç sağlar [63]. Kaplamanın kendisinin rolü, esasen, yüzey oksitlerinin hızlı bir şekilde kendi kendine onarımının meydana getirebileceği şekilde, tabakayı oluşturan elementlerin kaynağını sağlamaktır. Daha da karmaşık ve sofistike olan en son kaplama gelişmeleri, termalbariyerler, difüzyon bariyerleri oluşturmak ve gerinim minimize etmeye yönelik çok katmanlı veya kademeli kaplamalardan oluşur. Bu koşullar, malzemelerin ömrünü uzatır ve çalışma sıcaklığı aralığını yükselterek, temel çevresel koşulları korurken termalşok ve erozyon direncini iyileştirir [43,64].

3.6.1. Kutu alüminyumlama

Taban metalin yüzeyini değiştirmek veya güçlendirmek amacıyla kullanılan bir termal işlem yöntemi olan kutu sementasyon, genellikle belirli bir sıcaklıkta kapalı bir ortamda belirli bir süre boyunca bir karışım içinde tutularak gerçekleşir. Alüminyum kaplaması elde etmek için yaygın olarak alüminyum tozu içeren bir karışım kullanılır. Bu işlem, metal parçanın yüzeyinde alüminyum bileşiklerinin oluşturulmasını hedefler ve demir/çelik/alaşım gibi malzemelerin yüzeyinde özellikle etkilidir. Parça, alüminyum tozu ve diğer kimyasallar içeren bir karışım içine yerleştirilir ve belirli bir sıcaklıkta belirli bir süre boyunca bu ortamda tutulur. Sonuç olarak, yüzeyde istenen alüminyum bileşikleri ve kaplama oluşur [65].

Bu yöntem, malzemenin oksidasyona karşı direncini artırarak yüzeyde koruyucu bir alüminyum tabaka oluşturur. Aynı zamanda mekanik özellikleri güçlendirir ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı veya oksidasyon direncini artırabilir. Ni-Al kutu sementasyonu genellikle bir nikel-alüminyum alaşımasının yüzeyde oluşturulması amacıyla kullanılır. Bu işlem, belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir süre boyunca alüminyum tozu veya alüminyum içeren bir karışım içinde nikel kaplı bir metal parçanın tutulmasıyla gerçekleşir. Sonuç olarak, yüzeyde istenen alüminyum ve nikel alaşımlarının olduğu bir kaplama elde edilir. Bu işlem, genellikle yüzeyin oksidasyona karşı direncini artırmak, mekanik özellikleri güçlendirmek veya yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı artırmak için kullanılır. Bu tür kaplamalar, havacılık, otomotiv ve metalurji endüstrilerinde çeşitli uygulamalar için tercih edilebilir [66].

Nikel alüminitlerde genellikle lamelli mikroyapılar gözlemlenir. Bu alaşımların tipik olarak lamel şeklinde bir yapıya sahip olması, özellikle Ni_3Al ve NiAl gibi intermetalik bileşiklerde sıklıkla görülür. Bu lamelli yapılar, alaşımların mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olabilir ve bazen bu yapı, malzemenin mekanik özelliklerini yönlendirir [44]. Kutu sementasyonu, bir CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme) işlemi olarak kabul edilebilir ve genellikle altlık malzemelerin metal yüzeylerine kaplama yapmak için kullanılan bir prosedürdür. Bu yöntemde, belirli bir sıcaklık ve süre koşullarında, bir pot içindeki altlık malzemeler, halojenür tuzları ve dolgu maddeleriyle etkileşime girer. Halojenür tuzları genellikle NaF , NaCl , NH_4Cl gibi maddeler içerir ve genellikle NH_4X , NaX , AlX_3 gibi bir formülle temsil edilir; burada X; F, Cl, Br, I gibi elementleri ifade eder. Sıcaklık etkisiyle aktivatör alüminyumla reaksiyona girer; bu reaksiyon sonucunda, uçucu alüminyum halojenürlerinin oluşumu tetiklenir (örneğin, $\text{H}_2(\text{g})$ veya $\text{Na}(\text{g})$). Bu reaksiyonlar, ICl , AlCl_2 , AlCl_3 ve Al_2Cl_6 gibi çeşitli metal halojenür buharlarını meydana getirir ve bu buharlar, kaplanacak metal altığın yüzeyine taşınır. Bu yöntem, metal yüzeylerde belirli bileşiklerin kaplanması yaygın olarak kullanılır ve kaplama işlemi genellikle atmosferik veya vakumlu ortamlarda gerçekleşebilir. Çok geniş boyut ve şekil aralığına uygulanabilirliği bu işlemi cazip kılmaktadır. Silikonca zengin tabakanın oluşumu esas hedef olsa da gerek altlık malzemenin türüne de bağlı olarak, matrisin işlem parametrelerinden daha az etkilenmesi adına, gerekse tabakanın gevrekliğinin azaltılması adına alüminyum gibi diğer kutu sementasyon ana etken elementlerinin alüminyum ile beraber biriktirilmesi durumlarında sıkça kullanılmaktadır [67]. Paket içerisinde yüksek aktivitesi bulunan alüminyumun, kaplama yüzeyinde daha düşük

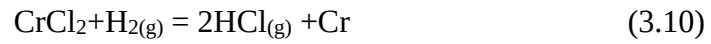
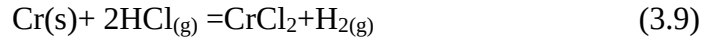
aktivitede olması halinde, dengede olan gaz fazındaki ana bileşenlerin kısmi basınçları, halojenürlerin serbest oluşum enerjileri ve aktivite olduğunda hesaplanabilir. Yüksek alüminyum aktivasyonu durumunda diğer metal halojenürlerin taşınımı görülmez. Pota içerisinde işleme tabi tutulacak nikel bazlı bir altlık için gerçekleşecek kutu sementasyon alüminzasyon işleminde tepkimelerin denklemleri şu şekildedir :



3.6.2. Kutu kromlama

Kutu sementasyon kromlaması, metal nesnelerin yüzeyine krom kaplama işlemidir. Bu işlemde genellikle çelik parçalar kullanılır ve özellikle otomotiv endüstrisi, ev aletleri, bisiklet parçaları gibi alanlarda tercih edilir. Türbin kanatlarının arkasındaki yüksek sıcaklıkta çalışan bölgelerde, metal parçaların oksidasyon, aşınma ve oksidasyona karşı dayanıklı olması kritiktir [68]. Bu nedenle, krom kaplamalar, çelik bileşenlerinin yüzey özelliklerini iyileştirmek için sıkça tercih edilir. Karbon çeliklerine Ni veya Co bazlı süperalaşımlara krom kaplamalar uygulanır. Karbür, kromlama sırasında yüzeyde krom zenginleşmesi için bir difüzyon bariyeri görevi görür. Bu nedenle, kromlama işlemi genellikle 1050°C'nin üzerinde gerçekleştirilir ve kaplama büyüme oranı altlık malzemesindeki karbon miktarına bağlıdır [69,70]. İşlem sıcaklığı, genellikle ortalama 1050°C civarındadır ve bu süreç kesinlikle kontrollü bir şekilde yönetilmelidir. Aksi takdirde, difüzyon arayüzünde oluşabilecek intermetalikler, koruyucu bir bariyer gibi davranarak kırılğan tabakaların oluşumuna neden olabilirler. Literatürde, 24 saatlik bir işlem süresinin sonunda elde edilen sonuçlar, yaklaşık olarak 125 mikronluk bir tabaka kalınlığı olduğunu göstermektedir. Kutu kromizasyon işlemi maliyet açısından etkin olup, özellikle şaft millerinde ve bağlantı elemanlarında hala kullanılan bir yöntemdir. Bu işlemin gelişimi, özellikle

nikel ve kobalt bazlı süper alaşımların sıcak oksidasyon direncinin artmasına önemli katkıda bulunmuştur. Kromit tabakasının büyümesi, altlık malzemenin Cr, C gibi elementlerinin konsantrasyonuna bağlıdır ve bu büyümeyi öncülleyen reaksiyonlar, kutu içerisindeki belirli halojenürlerin içeriğine göre değişebilir [68]. Gelişen reaksiyonlar şu şekildedir:



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında alüminyumlama yöntemi ile Hastelloy C-276 alaşımı yüzeyinde Ni esaslı intermetalik kaplama üretilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada altlıktan gelen Ni ve dış ortamdan gelen Al ile reaksiyona girmesi sonucu kaplama tabakasında NiAl intermetaliklerini oluşturmaktadır. Böylelikle yüzey sertliği 250 HV olan Hastelloy C-276 alaşımı sertliği artırılması ve oksidasyona dirençli kaplama üretilmesi hedeflenmiştir. Oluşan kaplama tabakalarının farklı sıcaklık ve sürelerde oluşan tabakların büyümesine yönelik kinetiğinin incelenip literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

4.1. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

- Altlık malzemesi olarak; 1x1x1 cm ebatında Hastelloy-C-276 alaşımı kullanılmıştır.
- Alüminyum kaynağı olarak alfa aesar marka kristalin %99,9'luk alüminyum tozu,
- Dolgu malzemesi olarak Seydişehir 7 µm'luk kaba alümina ve Alfa aesar marka 1 µm'luk ince alümina tozu,
- Aktivatör olarak % 99,5'luk Alfa aesar marka amonyum klorür tozu (NH₄Cl),
- Atmosfer ile temasın kesilmesi için grafit tozu kullanılmıştır.
- Malzeme ilk yüzeyini temizlemek için taşlama makinesi.
- Yüzey temizleme ve parlatma için SiC esaslı zımpara kağıdı ve parlatma çuhası

4.2. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Araç ve Gereçler

4.2.1. Hassas terazi

Deneyisel çalışmalarda kullanılan tozlar ve karışımları Radwag AS 220.R2 marka hassas terazi ile tartılmıştır. Hassas terazi şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Radwag AS 220.R2 hassas terazi.

4.2.2. Pota ve ısıtım işlem fırını

Kutu alüminyumlama işlemi, kaplama tozları ile reaksiyon vermemesi sebebi ile çelik kapaklı bir pota içerisinde gerçekleştirilmiştir. Pota silindirik geometriye sahip olup; 60x100mm boyutundadır.

Kutu alüminyumlama işlemi, farklı işlem sıcaklık ve sürelerinde Protherm marka $\pm 10^{\circ}\text{C}$ sıcaklık hassasiyetine sahip PTF tüp fırınında atmosfer altında gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık fırınının maksimum sıcaklık kapasitesi 1500°C olup devamlı 600-650 ve 700°C 'ye kadar çalışmaktadır. 7 kW güce sahiptir ve iki fazdan oluşmaktadır. Fırın şekil 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. PTF fırını. (PTF Serisi - Protherm Furnace b.t.)



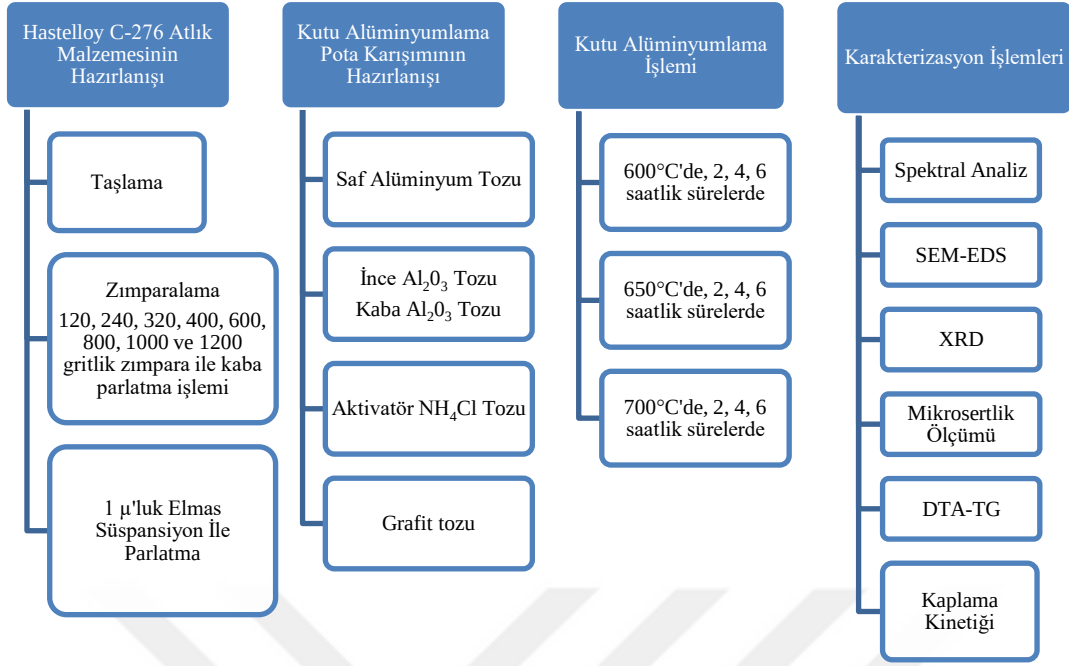
Şekil 4.3.PTF fırını. (PTF Serisi - Protherm Furnace b.t.)

4.3. Deney Akışı

Hastelloy C-276 alaşımının yüzeyinin alüminyumlanması işlemleri sırasıyla, numunenin giyotin makasta kesilmesi, numune yüzeyinin zımparalanması, parlatılması, kutu alüminyumlama potasının karışımının hazırlanması, atmosferik fırın içerisinde arzu edilen sıcaklıkta ve sürede işlemin gerçekleştirilmesi ve nihai olarak kaplama malzemesinin oda sıcaklığına soğutulması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Süreç akım şeması tablo 4.4 ve 4.5’de gösterilmiştir.



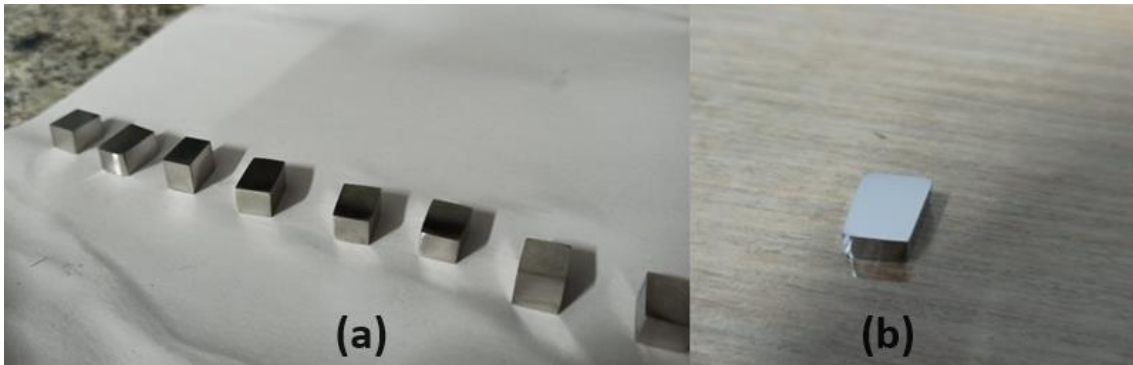
Şekil 4.4. Hastelloy C-276 alaşımı kutu alüminyumlamasını gösteren akım şeması.



Şekil 4.5: Hastelloy C-276 alaşımı kutu alüminyumlamasını gösteren akım şeması.

4.3.1. Numune hazırlama işlemleri

Altlık malzemesi Hastelloy C-276 alaşımı kutu alüminyumlama öncesi 1x1x1 cm ebatlarında, sulu testere ile uygun ölçüler halinde parçalar şeklinde kesilmiştir. Numunelerin yüzeyleri 120 gritlik zımparadan başlayarak sırası ile 240, 320, 400, 600 800, 1000 ve 1200 gritlik zımpara ile zımparalanmış ve ardından 1 mikronluk elmas süspansiyon ile parlatılarak alkol ile temizlenmiştir ve hava ile kurutulmuştur ki böylelikle tekrar çizilmenin önüne geçilmiştir. Numunelerin kesildikten ve yüzey temizleme işlemlerinden sonraki görselleri Şekil 4.6 'daki gibidir.

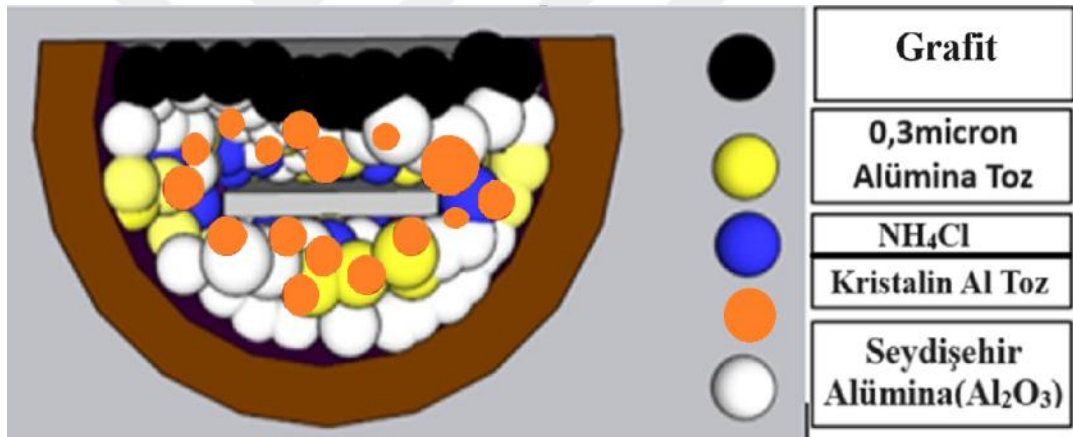


Şekil 4.6. 1x1x1 cm ölçülerinde yüzey hazırlığı yapılmış numuneler (a)-(b).

4.3.2. Toz karışımı ve kutu hazırlama işlemleri

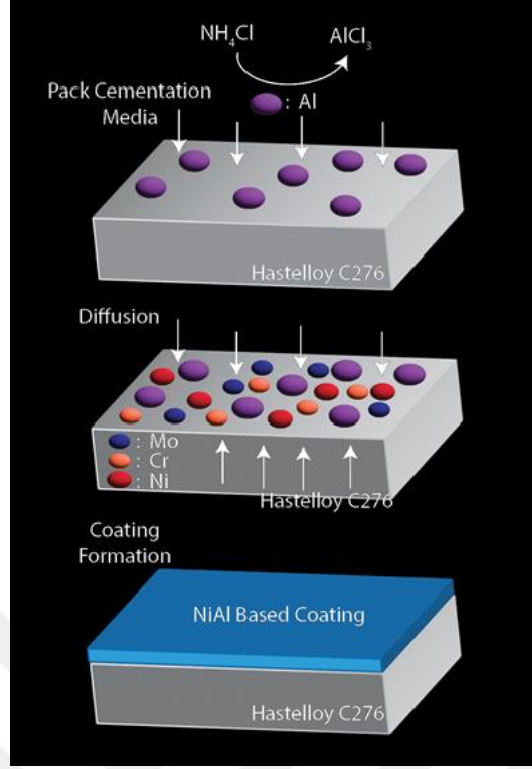
Kimyasal buhar biriktirme (CVD-KBB) benzeri bir proses olarak bilinen kutu sementasyon yöntemi ile kutu alüminyumlama işlemi, katı halde çelik bir pota içerisinde altlık malzemesinin kaplama toz karışımına gömülmesi ile atmosfer altında bir tüp fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. Toz karışımı, alüminyum kaynağı olarak kristalin alüminyum tozu, dolgu kaynağı olarak 1 µm tane boyutunda alümina tozu (Al_2O_3) ve aktivatör olarak amonyum klorür toz (NH_4Cl) karışımından oluşmuştur. Çelik potanın en altında ve en üstünde dolgu malzemesi olarak 7 µm'luk kaba seydişehir alümina tozu ve atmosferle temasın kesilmesi ve oksit oluşumunu engellemek istemiyle grafit tozu kullanılmıştır.

Tozlar Radwag AS 220.R2 marka hassas terazi ile darası alınmış bir şekilde tartılmış ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Şekil 4.7' de pota içerisine paketleme işleminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.7. Kutu karışımı ve numunenin kutu içerisindeki yerleşimi.

Homojen bir şekilde karıştırılan kaplama tozları, çelik bir pota içerisinde dolgu malzemesi olarak kullanılan kaba Al_2O_3 (alümina) tozları üzerine yerleştirilmiştir ve 1x1x1 cm ebatında hastelloy C-276 alaşım plakanın üzerinde uniform bir şekilde dağıtılarak paketleme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Kutu alüminyumlama işleminin şematik gösterimi.

4.4. Karakterizasyon Çalışmaları ve Analizler

Kutu alüminyumlama işleminden sonra kaplama tabakasının karakterizasyon işlemleri sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, altlık malzemesinin spektral analizi yapılarak kimyasal bileşimi tespit edilmiştir. Ardından metalografik olarak hazırlanmış numunelerin morfolojileri SEM ile incelenmiştir. EDS ile kaplama karakterizasyonları yapılan numunelerin analiz sonuçları XRD ile desteklenmiştir. Nihai olarak kaplamanın sertlik testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan kinetik çalışmalar sonucunda nikel alüminit tabakalarının büyüme aktivasyon enerjisi hesaplanmış ve optimum şartlarda elde edilen tabakanın termal analiz yöntemi ile oksidasyon sıcaklığı ve maksimum çalışma sıcaklığı belirlenmiştir.

4.4.1. Spektral analiz

Test numunelerinin kimyasal analizleri şekil 4.9’da gösterilen Oxford Instruments, Foundry Master modeliz analiz cihazında gerçekleştirilmiştir ve kaplama öncesinde sahip oldukları kimyasal bileşimleri çıkartılmıştır.



Şekil 4.9 : Oxford Instruments, Foundry Master Modeli Spektral Analiz Cihazı.

4.4.2. Taramalı elektron mikroskobu ve elementel analiz incelemesi

SEM incelemeleri için JOEL JSM-5600 marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. SEM ile her bir sıcaklık ve süreye ait nikel alüminit kaplama mikroyapı görüntüleri elde edilmiş, tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Yüzeyden itibaren matrise kadar nikel alüminit tabakasının belirlenen bölgelerinden enerji dağılımlı x ışınları spektrometrisi (EDS) ile nikel alüminit tabakasının noktasal ve çizgisel elementel analizleri ile map analizleri gerçekleştirilmiştir. İncelemelerin yapıldığı elektron mikroskobu şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Joel Jsm-5600 marka taramalı elektron mikroskobu. [73]

4.4.3. C-ışınları difraksiyon analizi (XRD)

Numunelerin yüzeyinde oluşan hakim fazlarının tespiti Rigaku marka x-ışınları difraktometrisinde $1,54056\text{\AA}$ dalga boyuna sahip $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu kullanılarak 2θ açısı 20° ile 90° arasında seçilerek gerçekleştirilmiştir. 4.11'de, deneysel çalışmalarda kullanılan Rigaku marka D/MAX 2000 X-ışını cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Rigaku marka D/MAX 2000 model X-ışınları cihazı.

X-ışınları difraksiyon analizi, tipik olarak bakır veya kobalt gibi belirli bir hedef elementten elde edilen $\text{K}\alpha$ karakteristik x-ışını demetinin, kristal düzlemindeki bir atoma çarparak aynı açıda yansıması temeline dayanır. Numunenin üç boyutlu kristal yapısında difraksiyona uğrayan bu ışın demeti, desenler halinde ortaya çıkar. Her bir alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin yüzeyinde oluşan alüminit kaplamanın sertlik ölçümleri, metalografik hazırlık sonrasında Leica Vmht Mot cihazıyla, yüzeyden merkeze doğru vickers tekniği kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.12'de gösterilen cihazla yapılmıştır. Bu ölçümler, yüzeyden başlayarak matrise doğru belirli mesafelerde nikel alüminit tabakası boyunca yapılmıştır ve oluşan kaplama ile ana matrisin sertlikleri karşılaştırılmıştır. Sertlik, sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 4.12. Leica Vmht Mot sertlik cihazı ölçümü.

4.4.4. Termogravimetrik analiz

Hastelloy C-276 üzerine alüminit bazlı intermetalik kaplama uygulanmış numuneler, Netzsch Sta 449F1 Termal analiz cihazıyla 1000°C'de muhtemel servis koşullarında oluşabilecek değişiklikleri belirlemek amacıyla oksidasyon direnci açısından test edildi ve kaplamanın termal kararlılığı incelendi. Kaplamalar, açık atmosferde gerçekleştirilen TG/DT testiyle 50°C ile 1000°C arasındaki sıcaklık artış hızı 2,48°C/1,5 dakika ve toplamda 4 saatlik test süresi içinde değerlendirilmiştir.





5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Hastelloy C-276, havacılık, kesici takımlar ve enerji endüstrilerinde, yüksek özgül mukavemet ve sertliğin önemli olduğu alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta aşınma ve oksidasyona karşı koruma için nikel alaşımları üzerinde iki geleneksel yaklaşım bulunmaktadır. Alaşımlama ve/veya koruyucu kaplamaların uygulanması. Yapılan araştırmalar, alaşım içindeki elementlerin örneğin; Al ve Ni gibi- nikel alaşımlarının yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncini artırabileceğini göstermiştir. Ancak, yüksek miktarda Ni veya Al katkısı, genellikle alaşımların mekanik özelliklerini yüksek sıcaklık dayanımı ve oda sıcaklığında süneklik gibi olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple, nikel alaşımlarının yüksek sıcaklıkta aşınma ve oksidasyon direncini artırmak için koruyucu kaplama yöntemlerinin kullanılması daha uygun olabilir. Bu bağlamda, genellikle difüzyon kaplama yöntemlerine başvurulmaktadır [71]. Yüzey nikel alüminit kaplandığında, gerçekleşen reaksiyonlar sonucu üst tabakada alüminyum oksit bir tabaka oluşur. Bu durum, yüksek oksidasyon şartlarında ana malzemenin oksitlenmesini engeller ve kaplama altında yüksek sıcaklık koşullarında koruma sağlar. Nikel alüminit gibi oluşan intermetalik kaplamalar, alttaki malzemeyi oksidasyona, yüksek sıcaklık oksidasyonuna ve oksidasyona karşı korurken, aynı zamanda yüksek aşınma direnci sunan bir tabaka oluşturmaktadır [72].

Deneyisel çalışmalarda Hastelloy C-276 alaşımı, üstün mekanik dayanım ve oksidasyon direnci sebebiyle tercih edilmiştir. Difüzyon kaplamaları katı hal difüzyonuna dayanmaktadır. Kaplanacak metalin buhar basıncı, ana metalin buhar basıncından yüksek olmalıdır. İşlem hava geçirmez, sızdırmaz bir potada gerçekleştirilmeli. Ana metal, kaplama malzemesi ile çevrili olmalıdır. Diğer kaplama türlerinde ise kimyasal buhar difüzyonu ile kaplama malzemesinin buharlaştırılması, difüze edilmesi ve ana madde ile kaplamanın tepkime oluşturulması üzerinedir [73]. Kaplama işlemi, 600-700°C sıcaklık aralığında atmosfer gazı altında gerçekleştirilmektedir. Bu işlemde, malzeme yüzeyiyle toz metal arasında temas sonucu metalin buharlaşmasıyla bir kaplama oluşmaktadır.

Difüzyon süreci, genellikle alkali metal halojenürler gibi elementlerin gaz fazındaki kimyasal bileşiklerle ana metal arasındaki reaksiyonlarla gerçekleşmektedir. Örneğin, kutu alüminyumlama işlemi, atmosfer gazı altında tüp fırında alümina potalar içinde uygulanır. Bu işlem, özellikle Hastelloy C-276 alaşımı ve ticari nikel alaşımı plakaların yüzeylerinde intermetalik nikel alüminit tabakalarının oluşturulmasını sağlar. Bu tabakaların oluşumu için farklı sıcaklık ve süre kombinasyonları kullanılabilir [73]. Bu çalışmalar, oluşturulan kaplama tabakalarının özelliklerini, kalınlıklarını, morfolojilerini, bileşimlerini, mekanik özelliklerini ve kimyasal bileşimin özelliklere etkisini incelemektedir. Bu analizler, malzeme yüzeylerindeki kaplama işlemlerinin optimize edilmesi ve malzeme performansının artırılması için değerli bilgiler sunmaktadır. Kutu alüminyumlama işleminin ardından oluşan tabakanın morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobunda enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (SEM-EDS) ile analizleri yapılmıştır. Tabakadaki hakim fazlar, X-ışınları difraksiyon analizi ile belirlenmiştir ve SEM-EDS analizi sonucunda elde edilen veriler ile mukayese edilmiştir. Oluşan nikel alüminit tabakalarının sertlik değerlerinin sıcaklık ve zamana bağlı olarak nasıl dağılım, değişim gösterdiği parametrelere göre mukayese edilmiştir. Alüminit tabaka kalınlıklarından hareketle kaplama tabakasının büyüme kinetikleri incelenmiş ve son olarak termal analiz yöntemi ile kaplamaların maksimum kullanım sıcaklıkları tespit edilmiştir. Şekil 3.10.'da gösterilen Ni-Al faz diyagramına dayanarak ikili sistem, iki katı çözelti ve beş kararlı intermetalik bileşik, yani Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $NiAl$, Ni_5Al_3 ve Ni_3Al sergiler; bunlardan ikisi bu çalışmada tespit edilmiştir.

5.1. Nikel Alüminit Tabaka Oluşumu

Alüminit tabakasının oluşumu genel olarak CVD prosesleri ile benzerlik göstermektedir.

Alüminit kaplama sonrasında Hastelloy C-276 alaşımının yüzeyinde nikel alüminit esaslı kaplama elde edilmiştir. Pota içerisinde bulunan toz karışımlarının tepkimesi sonucunda, altlık malzemesindeki nikel ile potadaki alüminyum bir araya gelerek; Hastelloy C-276 alaşımının yüzeyinde birden fazla faz içeren nikel-alüminyum intermetalik bileşikler oluşmaktadır [74]. İşlem sırasında meydana gelen reaksiyon denklemleri Eşitlik 6.1-6.4'de verilmiştir. Alüminit kaplama sonrasında, yüzeyi alaşımlanan hastelloy C-276 altlık malzemesinin yüzeyi, artık Ni-Al konsantrasyonu

işlem öncesindeki haline göre çok daha fazla olmaktadır. Daha doğru bir ifade ile hastelloy alaşım artık sadece bir katı çözelti değildir, ve yüzeyinde bazı intermetalik bileşikler oluşturmaktadırlar.

Alüminit tabakasının kalınlığının yüksek olması, intermetalik kaplama tabakasının gevrek davranışta bulunabilmesi sebebi ile kontrollü bir şekilde sınırlandırılmaktadır.

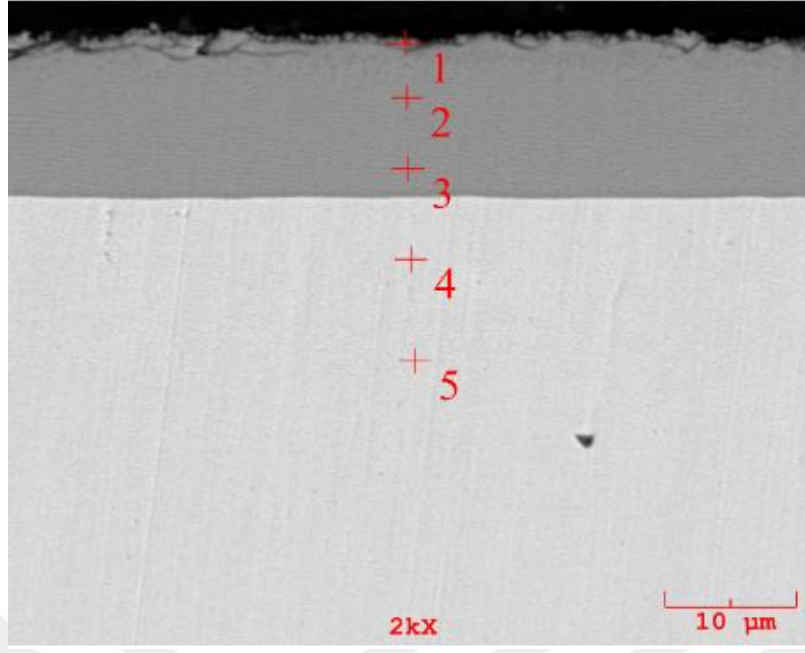
Pota içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar :

Alüminyum (Al) ve nikel (Ni) birleşerek nikel alüminit (NiAl_3) oluşturmaktadır:



Bu reaksiyonlar, kutu sementasyon potası içinde nikel alüminit oluşumunu temsil eder. Amonyum klorür, bu reaksiyonun aktivatörü olarak kullanılarak, reaksiyon koşullarını kontrol etmeye ve hızlandırmaya yardımcı olabilir. Ancak, bu süreçte detaylı parametreler, sıcaklık, basınç ve diğer faktörler, belirli bir uygulama veya endüstri gereksinimlerine göre optimize edilmemektedir.

Şekil 5.1’de de görüldüğü üzere, kimyasal tepkime sonucunda oluşan NiAl_3 fazlarının yüzeyde birikiminin ardından Ni_3Al_2 fazının zaman süresince dekompozisyonu ile alüminyum içeriği altlık malzemeye yaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Bu süreçte alüminyum malzemeye doğru difüze olurken; altlık malzemesinden de nikel yüzeye doğru difüze olacaktır ve buna rağmen alüminyum dominant alaşım elementi olarak kaplamada bulunmaktadır.



	Wt. %				
Elt.	1	2	3	4	5
Al	65,745	75,653	75,427	0,893	0,641
Ni	17,122	12,986	14,207	58,245	59,459
Mo	0,885	3,358	3,383	14,18	12,737
Cr	1,072	5,594	5,297	18,054	20,507
O	12,16	-	-	-	-
Fe	1,39	2,11	1,41	5,82	5,88
W	0,93	0,28	0,27	4,35	0,51
Mn	0,21	0,011	0	0,51	0,16

Şekil 5.1. Çoklu fazlı bir nikel alüminit kaplamasındaki tabakaların gösterimi ve EDS analizi

NiAl_3 bünyesindeki nikel atomunun mobilitesi çok azdır ve bu sebepten dolayı potadaki fazla miktardaki alüminyum kaynağı, NiAl_3 miktarını artıracakken, daha az alüminyum kaynağı bulunması durumunda, daha yüksek sıcaklıklarda NiAl_3 'den eş zamanlı olarak, alüminyumca daha fakir Ni_3Al Ni_2Al gibi fazları oluşacaktır.

Kutu alüminyumlama yöntemi ile üzerinde nikel alüminit tabaka oluşumu sağlanan altlık malzeme tek tip olup Hastelloy C-276 alaşımıdır.

Test numunelerinin kimyasal analizleri Oxford Instruments, Foundry master modeli analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan nikel plakasının alüminitleme öncesindeki kimyasal bileşimleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Hastelloy C-276 levhasının kimyasal bileşimi.

Element	% (Ağırlıkça)	Element	%(Ağırlıkça)	Element	% (Ağırlıkça)
Ni	57	Mo	15	Cr	15,5
Fe	5	Co	2,5	W	3.53
Mn	1	C	0,01	V	0,35
Si	0,08	P	0,025	S	0,01

5.2. Alüminyumlanmış Numunelerin SEM, EDS Analizi Sonuçları

Kutu sementasyon yöntemi ile farklı sıcaklık ve sürelerde yüzeylerinde nikel alüminit intermetalik kaplama tabakaları oluşturulan numunelerin farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri karşılaştırmalı olarak Tablo 5.2’de bir arada gösterilmiştir.

SEM mikrograflarında açık gri gözüken kısım altlık malzemesi Hastelloy C-276 alaşımını, üzerinde daha koyu ve farklı gri tonlarındaki tabakalar da nikel alüminit intermetalik tabakalarını göstermektedir.

Farklı tonlar SEM muayenesi sonuçlarına göre nihai olarak düzgün ve uniform farklı intermetalik tabakaların oluştuğunu görsel olarak göstermektedir.

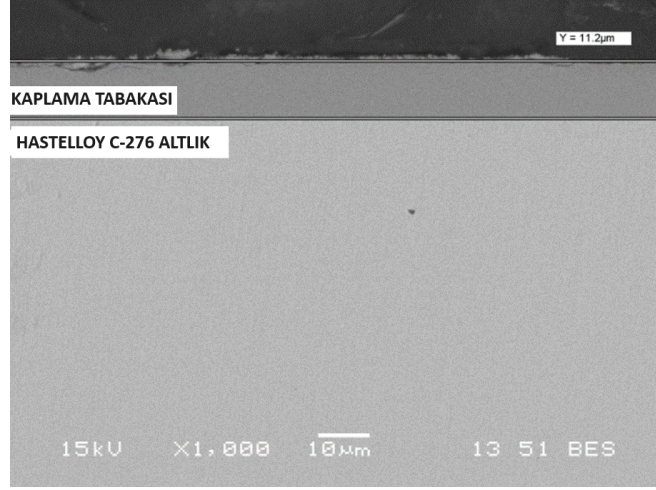
Kaplamaların birden fazla katmana sahip olup; her birinin farklı birer alüminit intermetalik fazına ait olduğu yapılan SEM-EDS nokta ve çizgi analizleri ile ortaya konulmuş ve XRD analizleri ile de fazlar desteklenmiştir.

SEM incelemelerinden kaplama matris arayüzeyinde çok iyi bir tutunma olduğu ve belirgin boşlukların olmadığı görülmektedir.

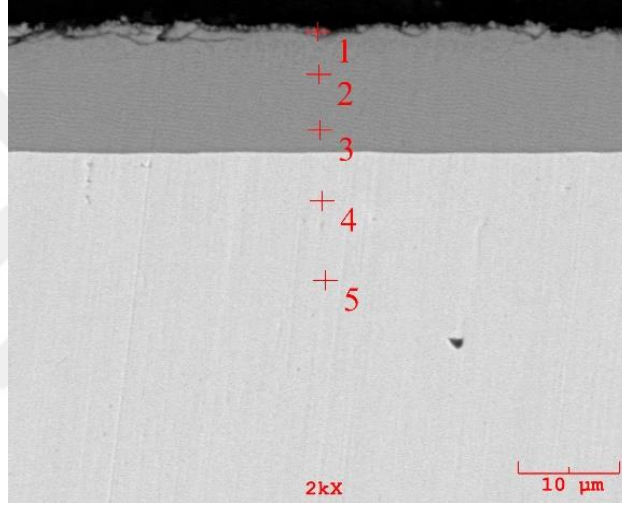
Tablo 5.2. 600°C, 650°C ve 700°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat tutma sürelerinde kutuyöntemiyle Al kaplanmış numunelerin sem kesit görüntüleri.

Sıcaklık	Süre, saat		
	2	4	6
600°C			
650°C			
700°C			

600°C’de 2 saat süresince alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin SEM kesit mikrografı Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi alüminit tabakası homojen ve uniform olup; yaklaşık olarak 11 µm kalınlığına sahiptir. Oluşan tabakaların morfolojileri SEM ile elementel dağılımları EDS analizi ile oluşan fazları ise XRD analizi ile tespit edilmiş olup birbirini destekler niteliktedir. SEM-EDS analizinden yüzeyde NiAl fazının oluştuğu ve içeriye doğru sırası ile Ni₂Al₃ ve NiAl₃ tabakalarının oluştuğu söylenebilmektedir. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 600° C’de 2 saatlik SEM-EDS analizi ise Şekil 5.3’de verilmiştir. Birikme oranları incelendiğinde kaplamadan altlığa doğru nikel ve diğer bileşenlerin oranı artarken kazandırılan alüminyum oranındaki düşüşler net şekilde görülmektedir. %ağırlıkça Al oranı %65 iken Ni oranı %17,12 seviyelerindedir. Kaplama kalınlığı ve tabaka temizliğinin sürekliliği görülmektedir. EDS analizine bakıldığında ağırlıkça% Al %65,745 değerlerindeyken altlığa doğru azalmıştır.



Şekil 5.2. 600°C 2 saat alüminyumlanan alaşımanın SEM görüntüsü.

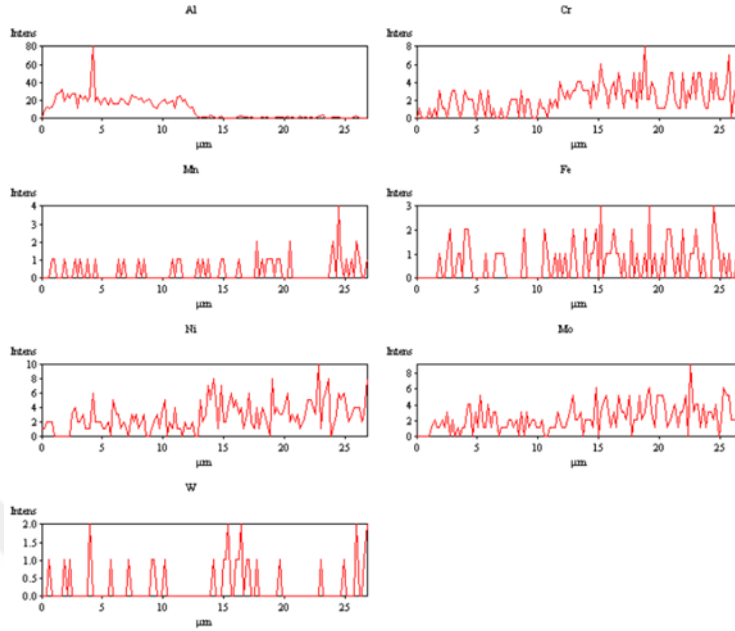


	Wt. %				
<u>Elt.</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
Al	65,745	75,653	75,427	0,893	0,641
Ni	17,122	12,986	14,207	58,245	59,459
Mo	0,885	3,358	3,383	14,18	12,737
Cr	1,072	5,594	5,297	18,054	20,507
O	12,16	-	-	-	-
Fe	1,39	2,11	1,41	5,82	5,88
W	0,93	0,28	0,27	4,35	0,51
Mn	0,21	0,011	0	0,51	0,16

Şekil 5.3. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 600° C'de 2 saatlik SEM-EDS analizi.

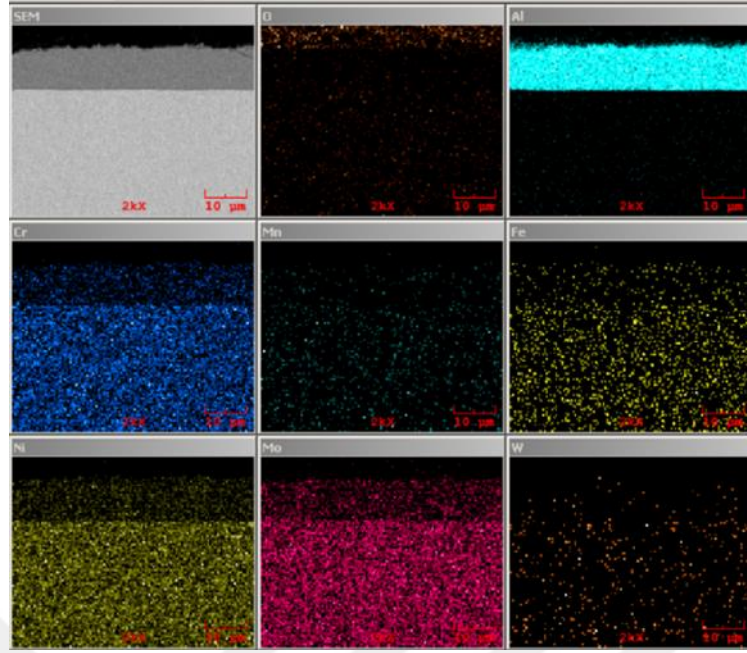
600°C'de 2 saat süresince alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin çizgi analizi sonuçları neticesinde elde edilen bilgiler ile Şekil 5.4'de verilmiştir. Altlık malzeme bileşenlerinin pikleri şekilde gösterildiği gibidir. 600° C'de 2 saat alüminyumlanan Hastelloy alaşımında Al'un 11 micron kadar birikme göstermiştir.

Hastelloy alaşımında Al'un 11 micron kadar birikme göstermiştir. Bunun yanı sıra Cr, Fe ve Mo'nun da yüzeye taşındığı tespit edilmiştir.



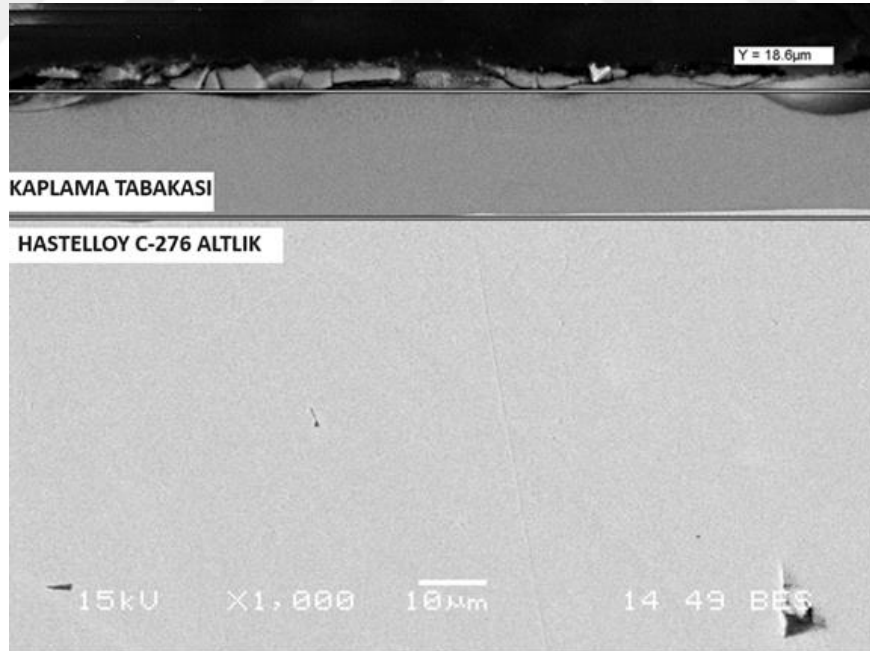
şekil 5.4. 600°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının çizgi analizi.

600°C'de 2 saat süreyle gerçekleştirilen alüminyumlamadan sonra oluşan alüminit tabakası, SEM-Map analizi ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. şekil 5.5, bu işlem sonucunda elde edilen alaşımın SEM-Map görüntüsünü sergilemekte, alüminit tabakasının yüzeyde belirgin bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. Bu analiz, yüzeydeki alüminit tabakasının homojenliğini ve alt katmanlara doğru herhangi bir difüzyon olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. SEM-Map analizi, SEM-EDS nokta analizlerini destekler niteliktedir. MAP analizinde Al turkuvaz, Ni sarı ve Cr mavi renkte gösterilmiştir. Ni'in yukarı taşınmış olduğu Al'un ise yüzeyde birikme gösterdiği MAP analizleri ile desteklenmektedir.



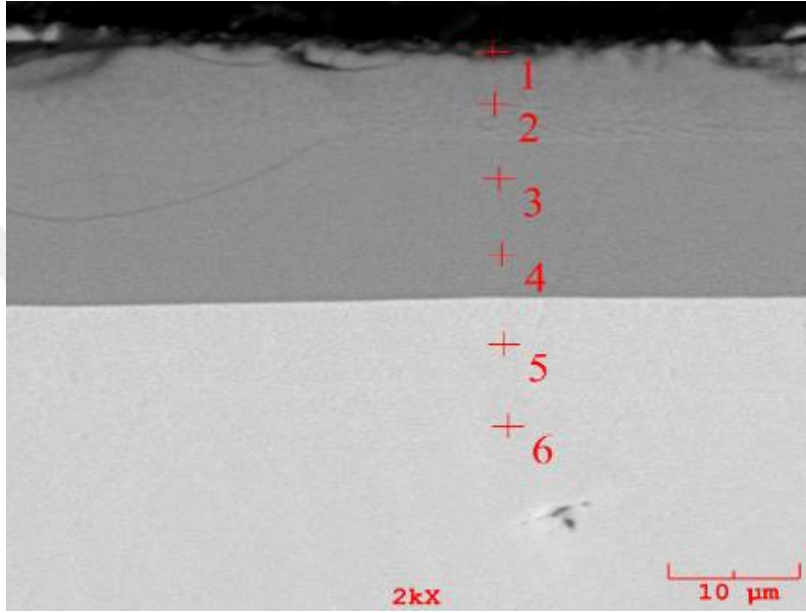
Şekil 5.5. 600°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.

600°C’de 4 saat süresince alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin SEM kesit mikrografı Şekil 5.6’de verilmiştir. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 600° C’de 4 saatlik SEM-EDS analizi ise Şekil 5.7’de verilmiştir.

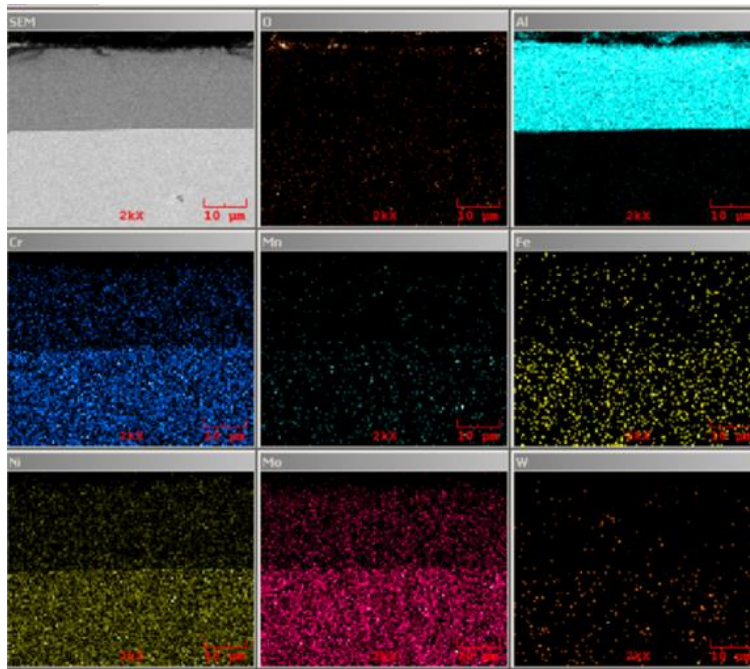


Şekil 5.6. 600°C’de 4 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.

	Wt. %					
Elt.	1	2	3	4	5	6
Al	51,21	56,342	55,628	53,75	0,153	0,635
Ni	24,84	24,720	24,253	22,963	55,160	52,568
Mo	3,503	7,621	7,649	9,122	18,373	18,393
Cr	2,431	5,606	6,391	7,708	15,338	15,023
O	9,325	-	-	-	-	-
Fe	2,538	1,573	2,157	1,804	4,663	4,669
W	5,853	7,900	2,666	2,593	6,313	8,710
Mn	0,253	0,247	0	0,162	0	0



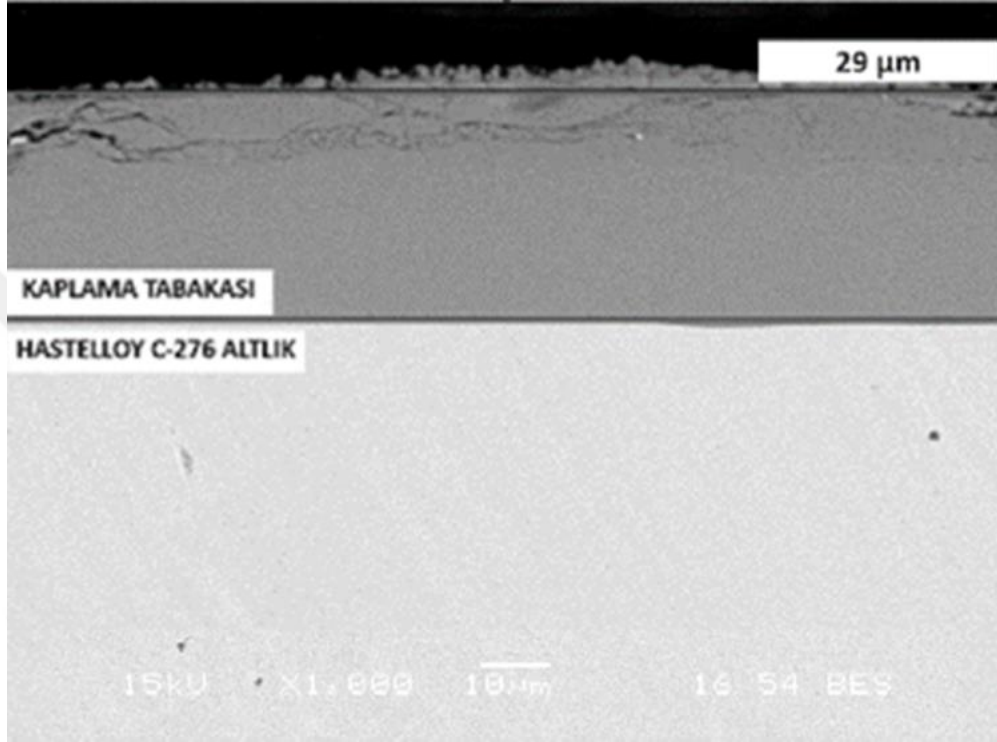
Şekil 5.7. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 600° C'de 4 saatlik SEM-EDS analizi.



Şekil 5.8. 600°C 4 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.

600°C’de 6 saat süresince alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin SEM kesit mikrografı Şekil 5.9’da verilmiştir.

Şekilden görüldüğü gibi alüminit tabakası homojen ve uniform olup; yaklaşık olarak 29 µm kalınlığına sahiptir. Oluşan tabakaların morfolojileri SEM ile elementel dağılımları EDS analizi ile oluşan fazları ise XRD analizi ile tespit edilmiş olup birbirini destekler niteliktedir.



Şekil 5.9. 600°C’de 6 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.

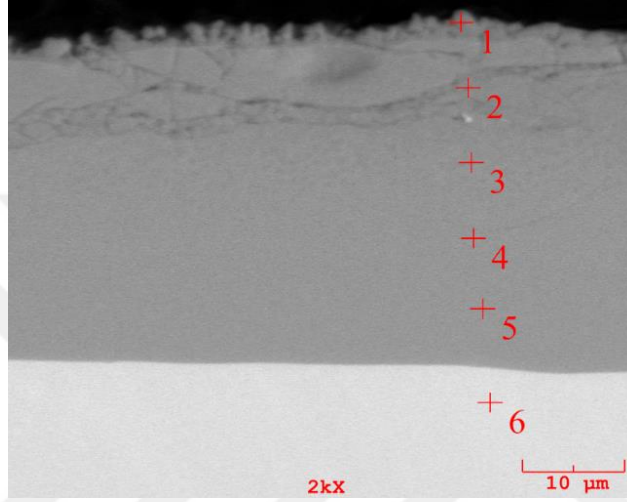
Al kaplı Hastelloy C-276’nın 600° C’de 6 saatlik SEM-EDS analizi ise Şekil 5.10’da verilmiştir. Birikme oranları incelendiğinde kaplamadan altlığa doğru nikel ve diğer bileşenlerin oranı artarken kazandırılan alüminyum oranındaki düşüşler net şekilde görülmektedir.

Kaplama üniform şekilde meydana gelmiştir.

Kaplama kalınlığı ve tabaka temizliğinin sürekliliği görülmektedir. Sıcaklık ve süreye bağlı olarak artış ve azalışlarda kaplama kalınlığında da artış azalış meydana gelmektedir.

EDS analizine bakıldığında ağırlıkça %Ni %30,2 seviyesindeyken 2 numaralı bölgede biriken Al sebebiyle en düşük değerinde olduğu görülmüştür.

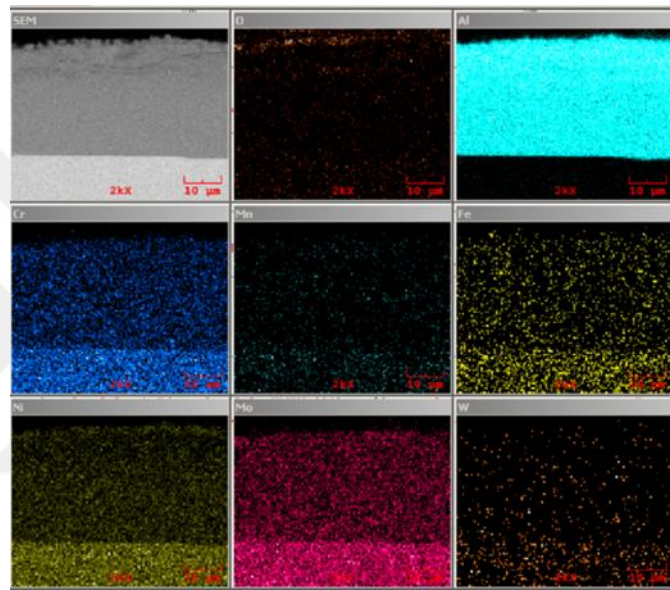
	Wt. %					
Elt.	1	2	3	4	5	6
Al	60,4	59,7	58,8	52,23	53,451	0,25
Ni	30,2	14,5	21,23	21,89	23,113	56,9
Mo	0,75	7,8	6,97	7,76	8,804	18,99
Cr	0,52	6,8	6,4	7,2	6,484	15,31
O	2,148	-	-	-	-	-
Fe	0,77	2,43	1,95	2,03	4,663	3,91
W	4,97	8,62	4,65	8,71	6,313	4,59
Mn	0,23	0	0	0,15	0	0



Şekil 5.10. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 600° C'de 6 saatlik SEM analizi.

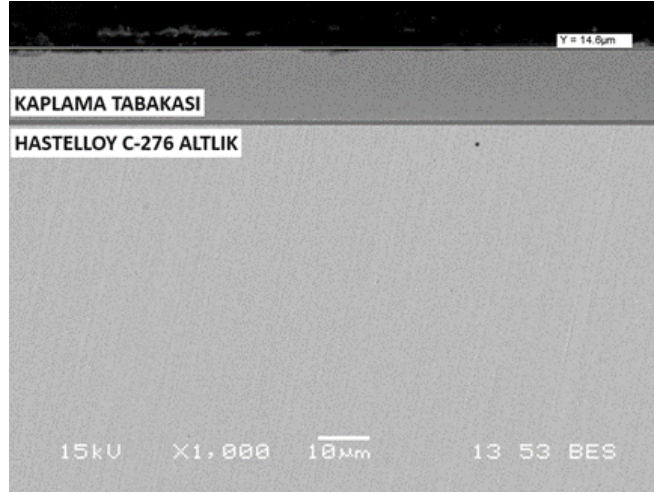
Eds analizinden alüminyum konsantrasyonu dış tabakada en yüksek olup; ana matrise yaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Bu bulgunun esas nedeni CVD benzeri prosestir. 340°C'de amonyum NH_4Cl 'nin NH_3 'e ve HCl 'ye ayrışmasından sonra HCl alüminyum kaynağı ile reaksiyon verir ve gaz AlCl_4 oluşturur. Altlık malzeme yüzeyine taşınan AlCl_4 , temas kurduğu hastelloy C-276 altlık ile reaksiyon verir ve atomik Ni oluşumu meydana gelir. Bu andan itibaren katı hal reaksiyonu ile yüzeyde NiAl_3 fazı oluşur. Sıcaklığın artışı ile NiAl_3 fazının yanında, AlNi ve Ni_2Al_3 fazları da meydana gelmektedir [51]. Kaplama sıcaklıkları ve süresi arttıkça bazı sıcaklıklarda Kaplamanın kendi içerisinde de yine interdifüzyon olayının gerçekleşmesi neticesinde çok katmanlı morfolojinin tekil bir yapıya dönüşümü de görülmüştür. İnterdifüzyon konusu difüzyon kaplamaları için önemli bir başlık olarak literatürde belirtilmektedir. Paul ve arkadaşlarının görüşüne göre interdifüzyon bölgesinde sadece bir faz tabakası büyüdüğünde, büyüme diğer fazlardan etkilenmemektedir. Öte yandan, çok fazlı bir interdifüzyonda bir fazın büyüme kinetiği, komşu fazların büyümesine bağlıdır. İdeal olarak, tüm fazlar, kendilerine özel malzeme sabitleri olduğundan, kendi difüzyon

parametrelerine göre büyümelidir. Bu, faz katmanlarının kalınlıklarının, difüzyon parametreleri aynı kalacak şekilde nihai ihtiva olunan bileşimlerine bağlı olarak ayarlandığı anlamına gelir [75]. Hastelloy C-276 alaşımı üzerinde gerçekleştirilen alüminyumlama işlemi, 600°C sıcaklıkta 6 saat süreyle uygulanmıştır. Bu işlemten sonra yüzeyde oluşan alüminit tabakası, SEM-MAP analizi ile derinlemesine incelenmiştir. Şekil 5.11, işlem sonrası alaşımın yüzeyinde açıkça görülen alüminit tabakasını detaylı bir şekilde göstermektedir. MAP analizinde Al turkuvaz, Ni sarı ve Cr mavi renkte gösterilmiştir. Ni ve Cr'nin yukarı taşınmış olduğu Al'un ise yüzeyde uniform bir birikme gösterdiği MAP analizleri ile desteklenmektedir.



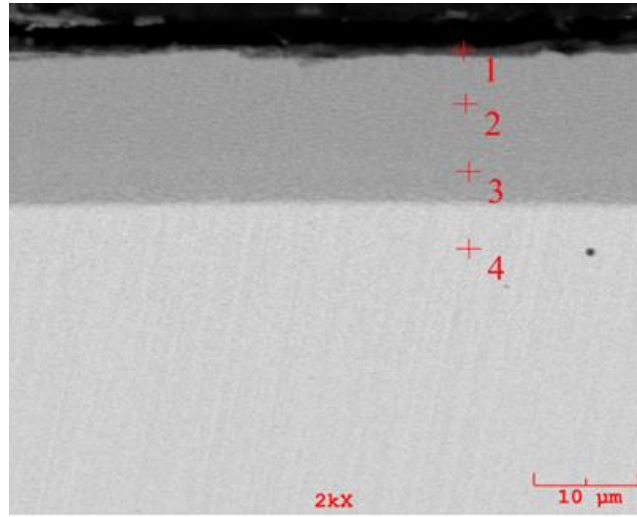
Şekil 5.11. 600°C 6 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.

650°C'de 2 saat süresince alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin SEM kesit mikrografı Şekil 5.12'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi alüminit tabakası homojen ve uniform olup; yaklaşık olarak 14 µm kalınlığına sahiptir. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 650° C'de 2 saatlik SEM-EDS analizi ise Şekil 5.13'te verilmiştir. Analiz sonuçları, tabaka kalınlığının 6 saat süre sonunda 2 ve 4 saate göre arttığını, 1 numaralı bölgeden 4 numaralı bölgeye gelindiğinde %Al oranının azaldığını %Ni oranının arttığını göstermektedir.



Şekil 5.12. 650°C’de 2 saat alüminyumlanan alaşımin SEM görüntüsü.

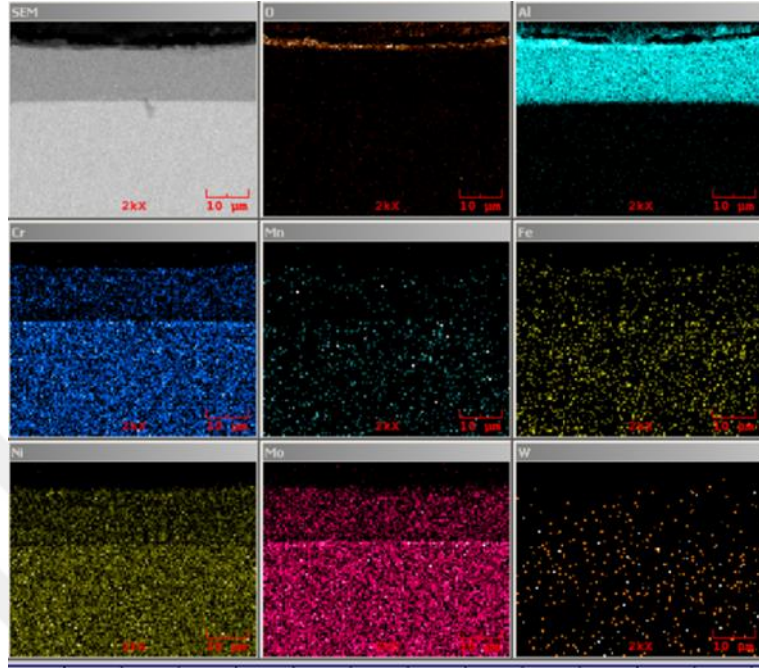
	Wt. %			
<u>Elt.</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
Al	52,94	44,4	42,03	0,24
Ni	6,73	30,2	35,1	54,6
Mo	3,8	11	11,02	19,8
Cr	6,73	9,81	7,7	15,9
O	18,84	-	-	-
Fe	2,56	2,31	2,59	5,36
W	0,56	2,26	1,73	3,86
Mn	0,15	0	0	0,256



Şekil 5.13. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 650° C’de 2 saatlik SEM-EDS analizi.

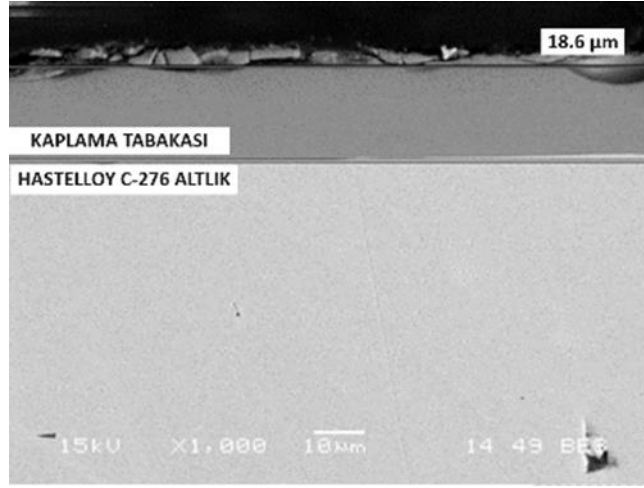
Hastelloy C-276 alaşımı üzerinde uygulanan alüminyumlama işlemi, 650°C sıcaklıkta 2 saat boyunca sürdürülmüştür. Bu uzun süreli ısısal işlem, yüzeydeki alüminit tabakasının gelişimine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. SEM-Map analizi ile yapılan derinlemesine inceleme, Şekil 5.14’de sunulduğu üzere, işlem sonrasında

alaşım yüzeyinde net bir şekilde gözlemlenen alüminit tabakasının ayrıntılarını ortaya koymaktadır. Ni ve Cr'nin yukarı taşınmış olup Al ise yüzeyde iyi bir birikim sağladığı MAP analizleri ile desteklenmektedir.



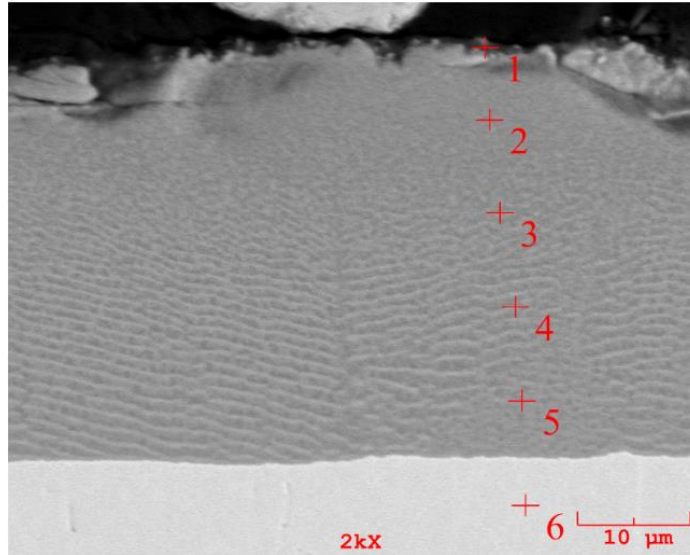
Şekil 5.14. 650°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.

650°C'de 4 saat süresince alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin SEM kesit mikrografı Şekil 5.15'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi alüminit tabakası homojen ve uniform olup; yaklaşık olarak 28 µm kalınlığına sahiptir. Oluşan tabakaların morfolojileri SEM ile elementel dağılımları EDS analizi ile oluşan fazları ise XRD analizi ile tespit edilmiş olup birbirini destekler niteliktedir. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 650° C'de 4 saatlik SEM-EDS analizi ise Şekil 5.16'da verilmiştir. Ni oranının altlığa doğru artması ve Al miktarının kaplama dışına doğru azalması yapılan çalışmanın tutarlılığı hakkında bilgi vermekte birlikte doğrusal olarak ilerlediğini göstermektedir.



Şekil 5.15. 650°C’de 4 saat saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.

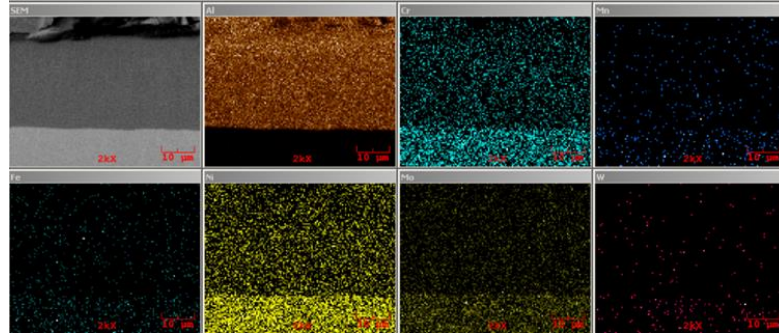
	Wt. %					
Elt.	1	2	3	4	5	6
Al	50,9	61,14	55,8	52,7	53,019	0,17
Ni	11,9	23,16	19,96	26,06	26,622	55,5
Mo	1,27	7,16	9,76	6,97	8,709	19,9
Cr	0,99	5,51	7,26	5,6	7,687	15,5
O	22,77	-	-	-	-	-
Fe	4,17	1,55	2,56	2,52	0,755	5,87
W	7,9	1,46	4,6	6,17	3,208	3,04
Mn	0,09	0	0	0	0	0



Şekil 5.16. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 650° C’de 4 saatlik SEM-EDS analizi.

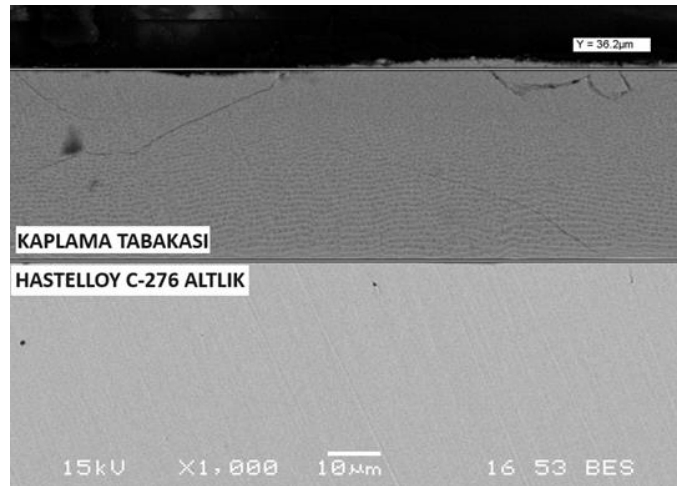
650°C’de 4 saat süreyle gerçekleştirilen alüminyumlamadan sonra oluşan alüminit tabakası, SEM-Map analizi ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 5.17, bu işlem sonucunda elde edilen alaşımın SEM-Map görüntüsünü sergilemekte, alüminit tabakasının yüzeyde belirgin bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. SEM analizine

bakıldığında kaplama tabakasının uniform yapıda oluşu ve EDS analizine bakıldığında ağırlıkça% Ni ve Al miktarlarının orantılı difüze oluşu görülmektedir. 1 numaralı bölgede %Al miktarı oranı fazla iken altlıktan gelen Ni oranı az, 7. bölgede altlığa inildikçe %Al azalırken Ni oranı artmıştır.



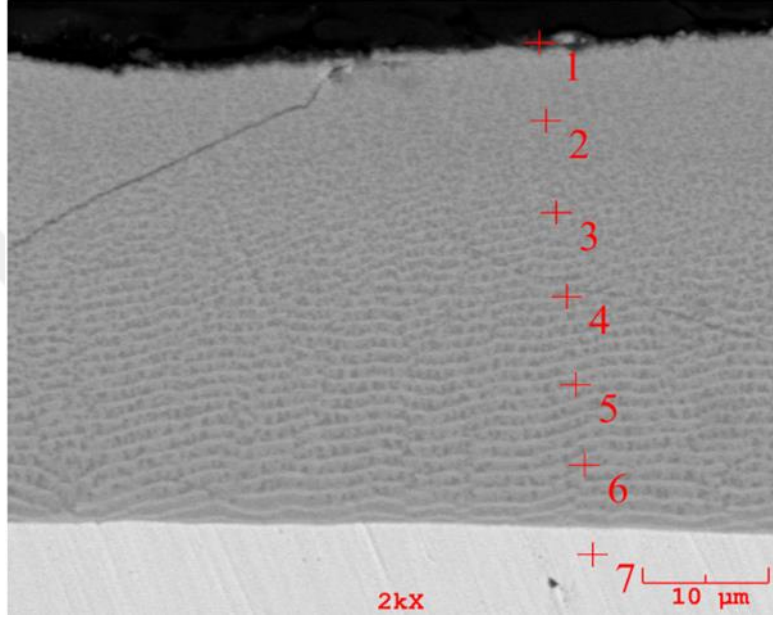
Şekil 5.17. 650°C 4 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.

650°C’de 6 saat süresince alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin SEM kesit mikrografı Şekil 5.18’de verilmiştir. Yaklaşık olarak 30 µm kalınlığına sahiptir. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 650° C’de 6 saatlik SEM-EDS analizi ise Şekil 5.19’da verilmiştir. Bu analiz, yüzeydeki alüminit tabakasının homojenliğini ve alt katmanlara doğru herhangi bir difüzyon olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. EDS analizine bakıldığında yüzeyde görülen %28,58 olan oksijen miktarının alt tabakalara inemediği görülmektedir.



Şekil 5.18. 650°C’de 6 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.

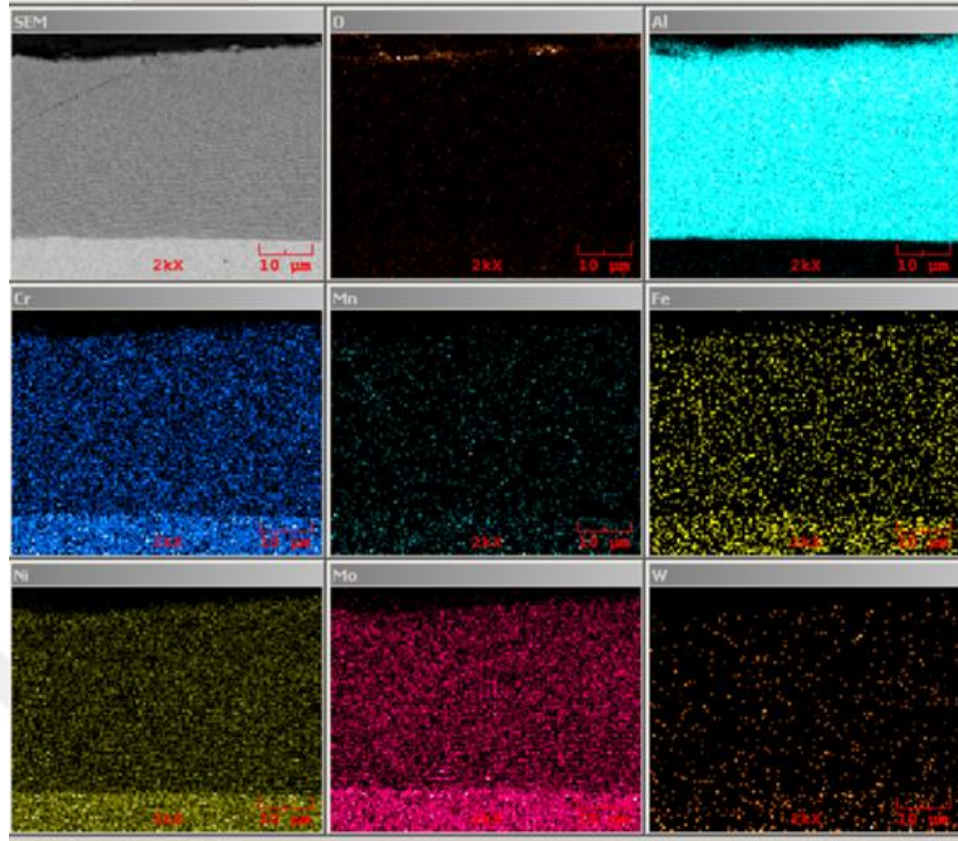
	Wt. %						
Elt.	1	2	3	4	5	6	7
Al	53,8	53,9	54,5	50,8	53,903	49,963	0,26
Ni	3,3	24,8	26,34	24,05	24,390	22,047	56,89
Mo	1,41	8,47	7,93	8,37	11,680	13,695	19,6
Cr	1,25	4,98	7,32	6,94	7,837	7,691	15,22
O	28,58	-	-	-	-	-	-
Fe	0,96	1,47	1,79	2,87	1,476	1,761	4,62
W	10,71	4,27	2,15	6,94	0,715	4,843	3,46
Mn	0,09	0,09	0	0	0	0	0



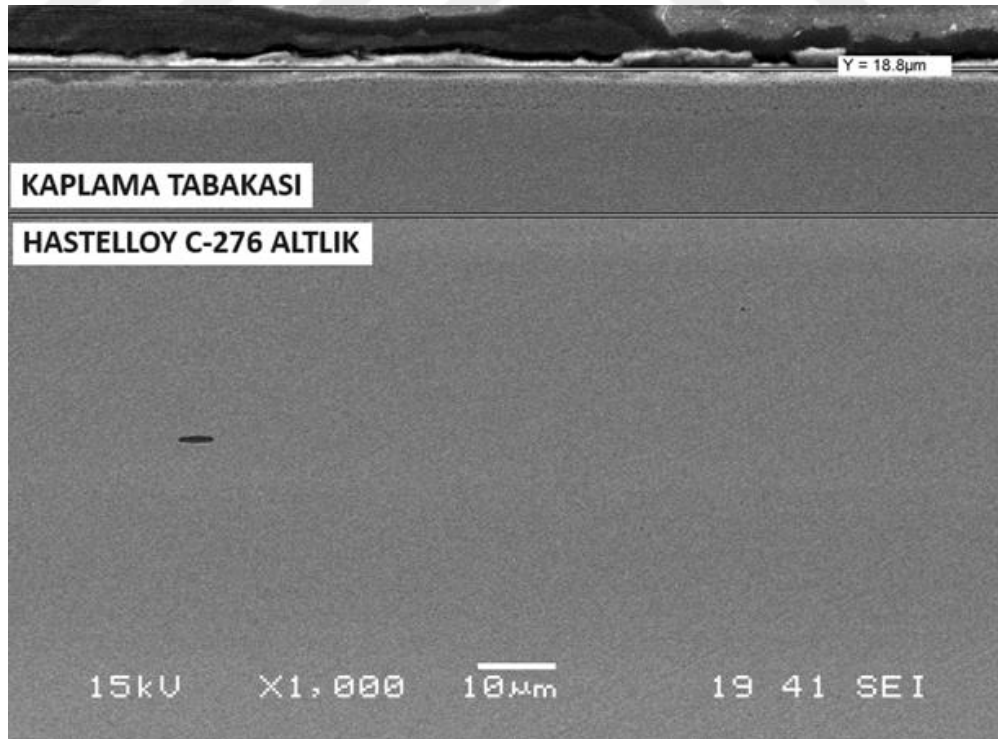
Şekil 5.19. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 650° C'de 6 saatlik SEM-EDS analizi.

650°C'de 6 saat süreyle gerçekleştirilen alüminyumlamadan sonra oluşan alüminit tabakası, SEM-Map analizi ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 5.20, bu işlem sonucunda elde edilen alaşımın SEM-Map görüntüsünü sergilemekte, alüminit tabakasının yüzeyde belirgin bir şekilde oluştuğunu göstermektedir.

Hastelloy C-276 alaşımında, 650°C'de 6 saat süreyle gerçekleştirilen alüminyumlamadan sonra oluşan alüminit tabakası, SEM-MAP analizi ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 5.20, bu işlem sonucunda elde edilen alaşımın SEM-MAP görüntüsünü sergilemekte, alüminit tabakasının yüzeyde belirgin bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. Al'un iyi bir birikme gösterdiği ve bunun yanı sıra kaplamaya Cr ve Mo taşındığı görülmektedir.

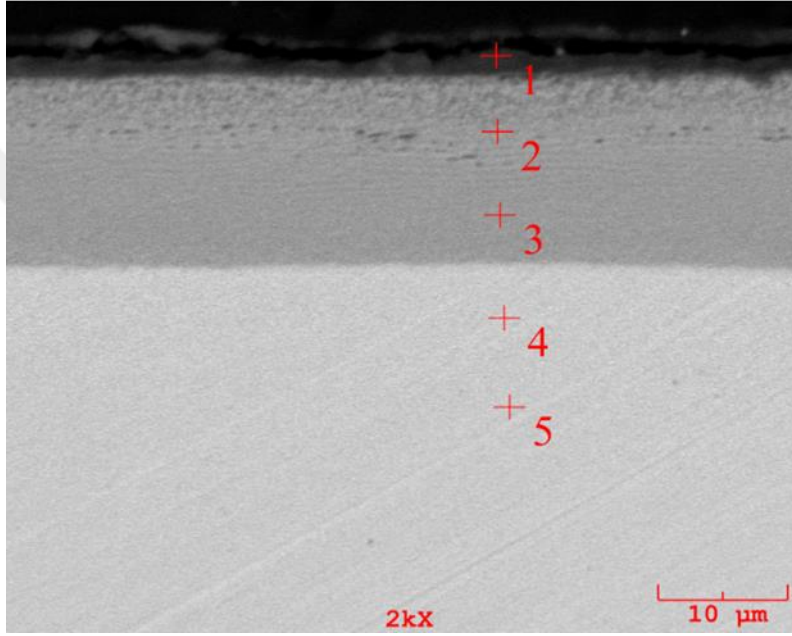


Şekil 5.20. 650°C 6 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.



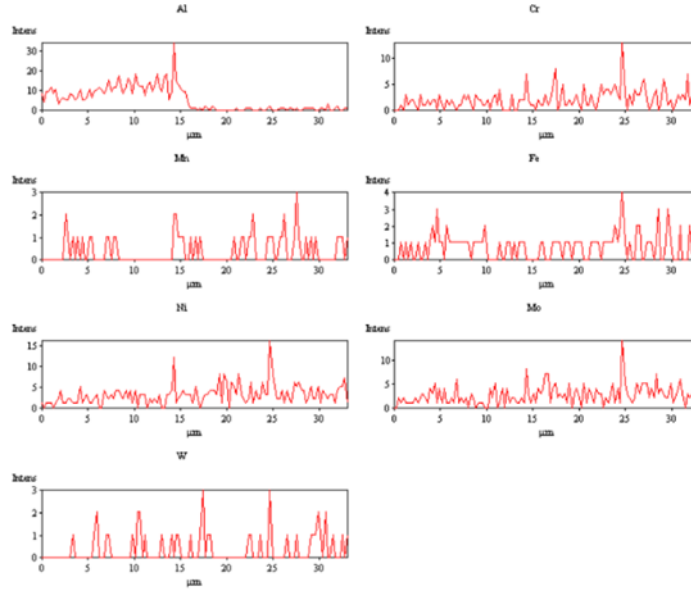
Şekil 5.21. 700°C’de 2 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.

<u>Elt.</u>	<u>Wt. %</u>				
	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
Al	35,05	32,7	40,9	0,44	0,09
Ni	13,74	36,9	32,62	57,17	55,3
Mo	4,99	12,6	10,5	17,8	19,3
Cr	5,34	9,6	7,6	16,14	15,9
O	27,44	-	-	-	-
Fe	3,17	3,93	2,024	4,75	5,53
W	5,97	4,15	6,33	3,68	3,72
Mn	0,21	0	0	0	0



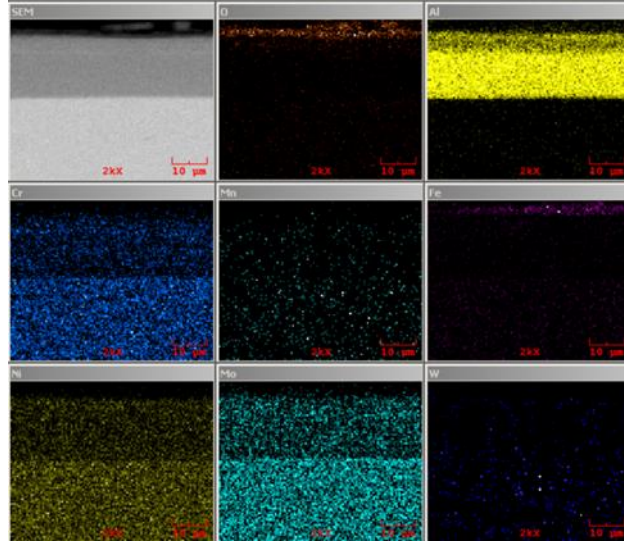
Şekil 5.22. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 700°C'de 2 saatlik SEM-EDS analizi.

700°C'de 2 saat süresince alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin çizgi analizi Eds sonuçları neticesinde elde edilen bilgiler ile Şekil 5.23'de verilmiştir. Altlık malzeme bileşenlerinin pikleri şekilde gösterildiği gibidir. 700°C'de 2 saat alüminyumlanan Hastelloy alaşımında Al'un 18 micron kadar birikme göstermiştir. Bunun yanı sıra Cr ve Mn'ında yüzeye taşındığı tespit edilmiştir.



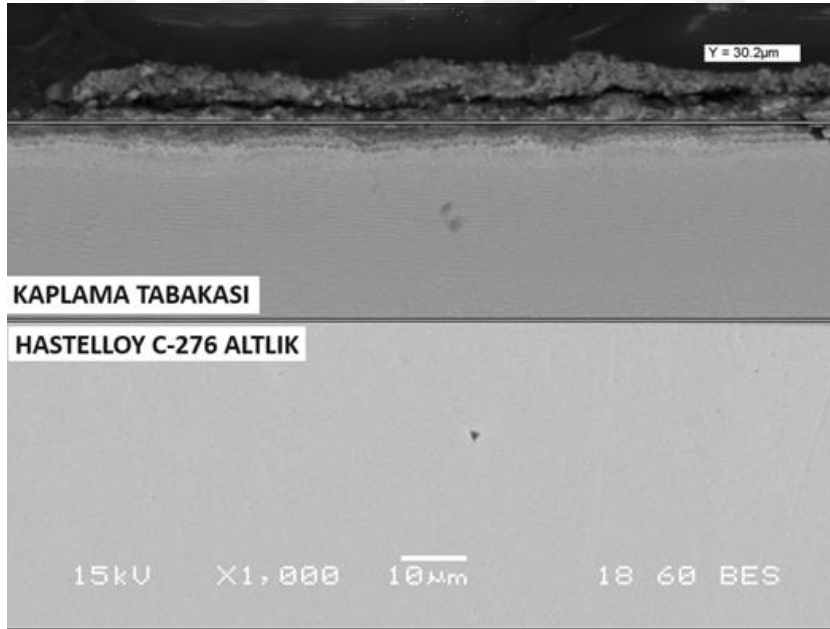
Şekil 5.23. 700°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının çizgi analizi.

700°C'de 2 saat süreyle uygulanan alüminyumlamadan sonra, SEM-MAP analizi ile detaylı bir şekilde incelenen alüminit tabakası, Şekil 5.24'de gösterildiği üzere, alaşım yüzeyinde belirgin bir şekilde oluşmuştur. Bu analiz, alüminit tabakasının yüzeyde homojen bir dağılım gösterdiğini ve alt katmanlara doğru herhangi bir difüzyon olmadığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca, kaplama tabakasının kalınlığı ve sürekliliği, uygulanan artan sıcaklık ve süre parametreleriyle doğrusal bir artış göstermektedir. Bu doğrusal ilişki, alüminyumlama işleminin etkinliğini ve alaşım yüzeyindeki kaplama tabakasının morfolojik özelliklerini anlamada kritik bir rol oynamaktadır. Yüksek sıcaklık ve uzun süreli maruz kalma, alüminit tabakasının yoğunluğunu ve yapısını önemli ölçüde etkilemekte, bu da malzemenin oksidasyon direnci ve mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. SEM-MAP analizi, SEM-EDS analizlerini destekler niteliktedir.



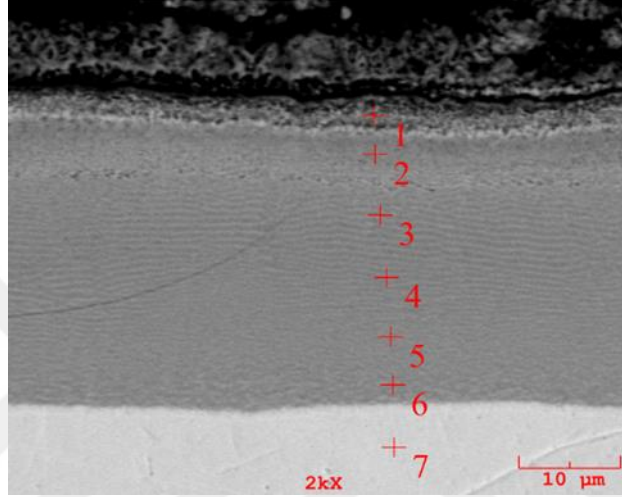
Şekil 5.24. 700°C 2 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.

700°C’de 4 saat süresince alüminyumlama işlemine tabi tutulan numunenin SEM kesit mikrografı Şekil 5.25’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi alüminit tabakası homojen ve uniform olup; yaklaşık olarak 31 µm kalınlığına sahiptir. Al kaplı Hastelloy C-276’nın 700° C’de 4 saatlik SEM-EDS analizi ise Şekil 5.26’de verilmiştir.



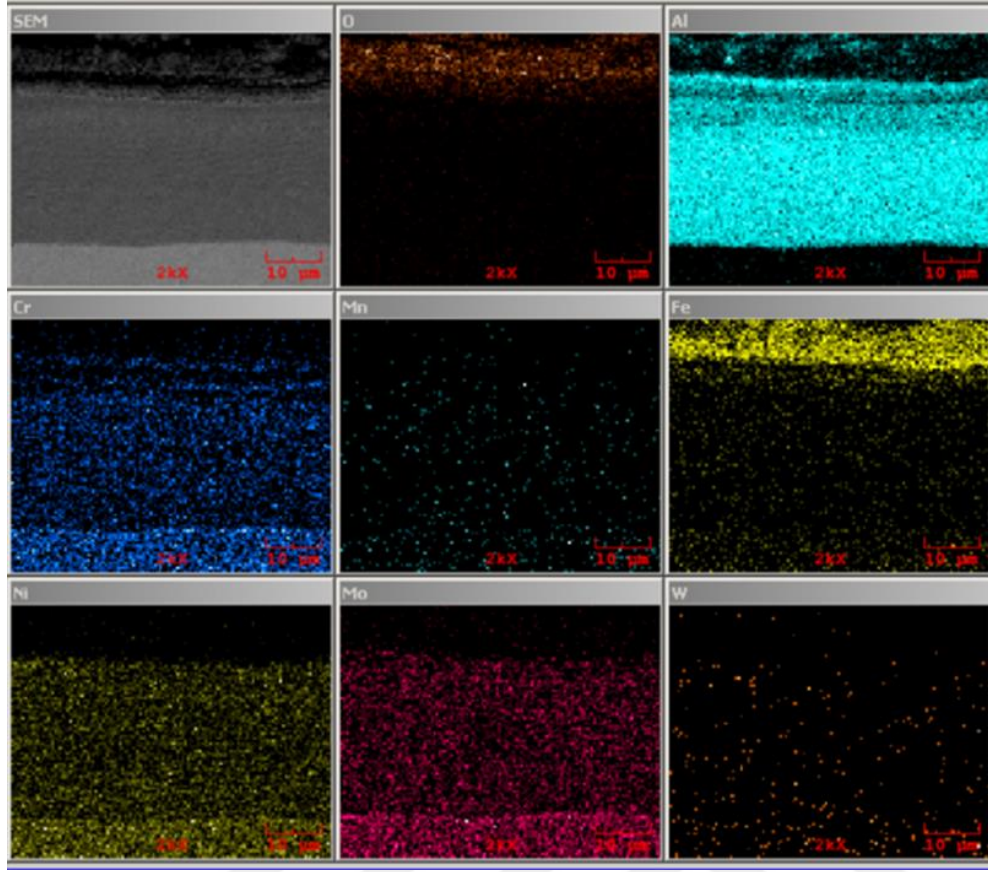
Şekil 5.25. 700°C’de 4 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.

Elt.	Wt. %						
	1	2	3	4	5	6	7
Al	25,7	34,2	45,6	46,28	44,689	42,294	0,4
Ni	28,01	34,2	25,8	33,2	32,297	31,433	57,01
Mo	7,3	12,2	11,9	7,82	8,328	11,082	17,32
Cr	2,41	7,9	9,94	8,32	9,660	8,123	14,42
O	12,32	-	-	-	-	-	-
Fe	15,54	3,72	3,71	2,683	2,966	2,027	5,72
W	2,79	7,94	3,11	1,68	0,457	6,040	4,86
Mn	0	0	0,009	0,029	0,226	0	0,3

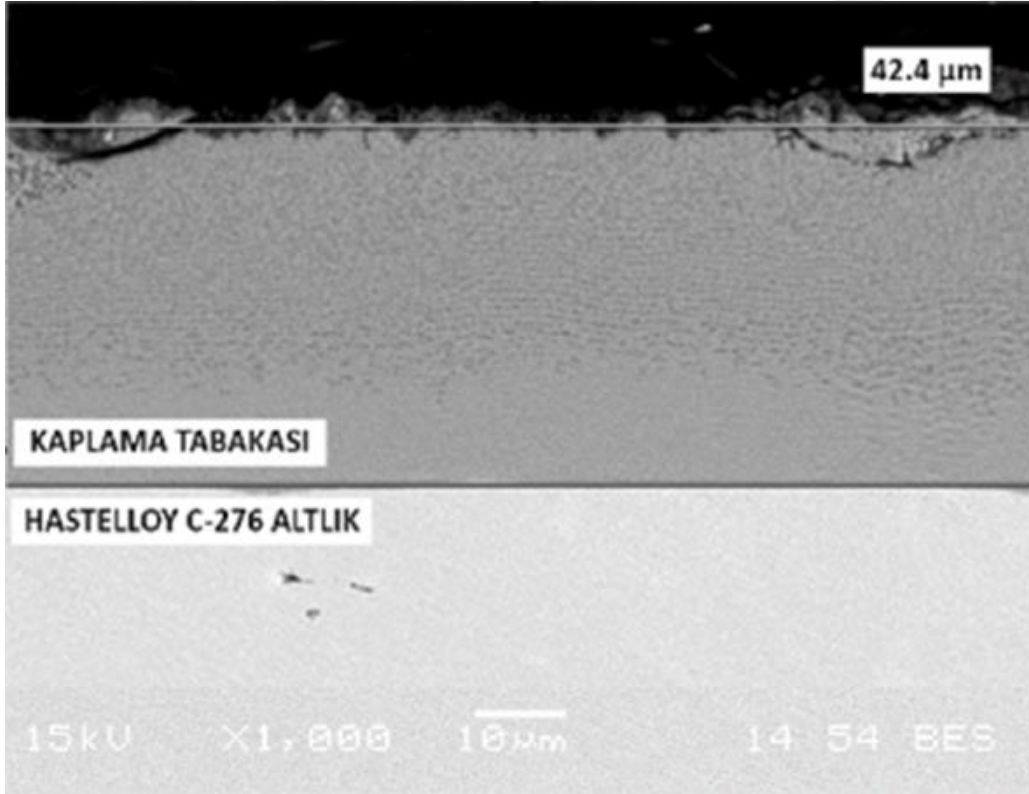


Şekil 5.26. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 700°C'de 4 saatlik SEM-EDS analizi.

700°C'de 4 saat süreyle uygulanan alüminyumlama sonrasında, SEM-Map analizi ile incelenen alüminit tabakası, Şekil 5.27'de gösterildiği gibi, alaşım yüzeyinde net bir şekilde görülmektedir. Bu analiz, alüminit tabakasının yüzeyde homojen bir dağılım sergilediğini ve alt katmanlara doğru difüzyon olmadığını belirgin bir şekilde ortaya koymaktadır. Kaplama tabakasının kalınlığı ve sürekliliği, artan sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak doğrusal bir artış göstermektedir. Bu sıcaklıkta uygulanan işlem, alüminit tabakasının yoğunluğunu ve kimyasal bileşimini önemli ölçüde etkilemektedir, bu da malzemenin oksidasyon direnci ve mekanik özelliklerini olumlu yönde etkelemektedir. Alüminit tabakasının bu özellikleri, yüksek sıcaklıkta gerçekleşen kimyasal reaksiyonların sonucu olarak, malzemenin genel performansını ve uzun süreli dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirebilir. SEM-MAP analizi, SEM-EDS nokta analizlerini desteklemektedir.

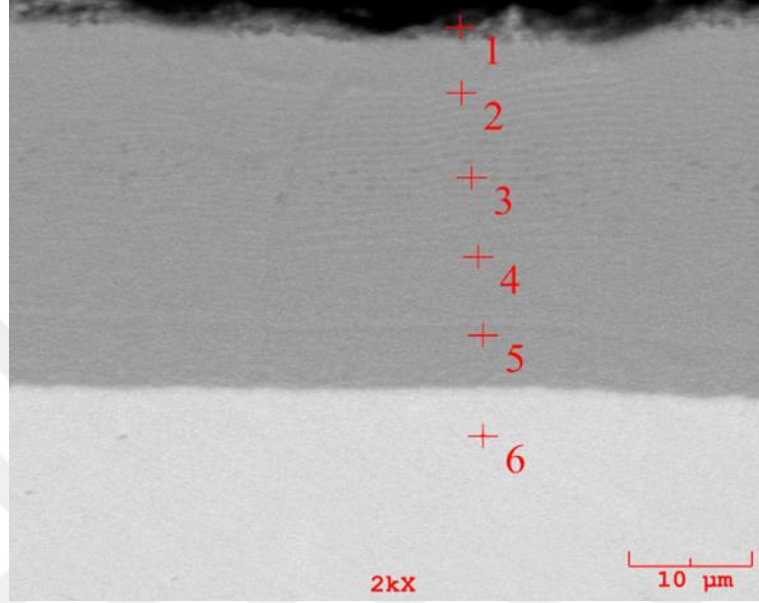


Şekil 5.27. 700°C 4 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.



Şekil 5.28. 700°C’de 6 saat alüminyumlanan alaşımın SEM görüntüsü.

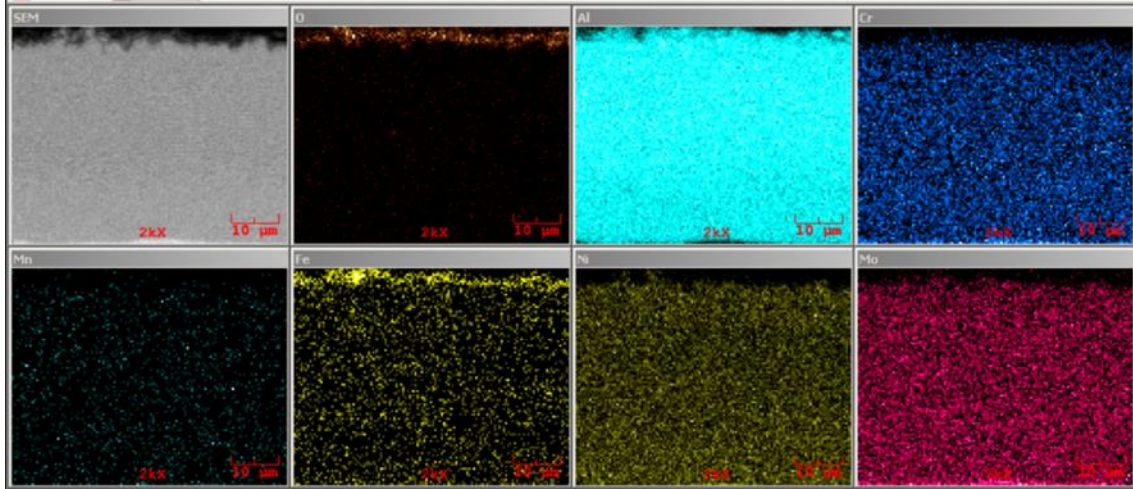
	Wt. %					
Elt.	1	2	3	4	5	6
Al	35,81	37,1	41,24	47,42	47,226	0,33
Ni	16,51	26,51	33,4	29,4	30,066	58,3
Mo	1,74	12,92	9,05	1,8	11,216	19,2
Cr	5,38	8,92	6,17	9,62	9,224	16,7
O	22,48	-	-	-	-	-
Fe	16,65	16,65	1,96	2,23	2,267	5,46
Mn	0	0,237	0	0,497	0	0



Şekil 5.29. Al kaplı Hastelloy C-276'nın 700°C'de 6 saatlik SEM-EDS analizi.

700°C'de 6 saat süreyle gerçekleştirilen alüminyumlama sonrası, SEM-MAP analizi ile incelenen alüminit tabakası, Şekil 5.30'da gösterildiği üzere, alaşım yüzeyinde açıkça görülebilir. Birikme yapan Al oranı net bir biçimde görülmektedir. Analiz, yüzeydeki alüminit tabakasının homojen bir dağılımını ve alt katmanlara difüzyonun olmadığını net bir şekilde ortaya koymaktadır ve Şekil 5.29'da verilen EDS analizi de bunu desteklemektedir. 1 numaralı bölgede %22,48 seviyelerinde olan O miktarı diğer bölgelere geçememiştir. Kaplama tabakasının kalınlığı ve sürekliliğindeki artış, artan sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak doğrusal bir eğilim göstermektedir. Daha yüksek sıcaklıkta ve uzun süreli maruz kalmanın, alüminit tabakasının yoğunluğunu ve kimyasal bileşimini önemli ölçüde değiştirdiği, bu da malzemenin oksidasyon direnci ve mekanik özelliklerine olumlu etkiler sağladığı görülmektedir. Yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamlarda kullanım için, bu alaşımın geliştirilmiş özellikleri, endüstriyel uygulamalarda önemli avantajlar sağlayabilir. SEM-MAP analizi, SEM-EDS nokta analizlerini destekler niteliktedir. 700°C'de 4 saat ve 6 saat işlem sürelerinde, uzayan işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak oksit oluşumu görülmektedir ve tabakanın bozulmaya başladığı görülmektedir. SEM-EDS analizleri ise bu durumu

desteklemektedir. Ni ve Cr'nin yukarı taşınırken Al ise yüzeyde homojen bir birikim gösterdiği MAP analizleri ile desteklenmektedir.



Şekil 5.30. 700°C 6 saat alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının MAP analizi.

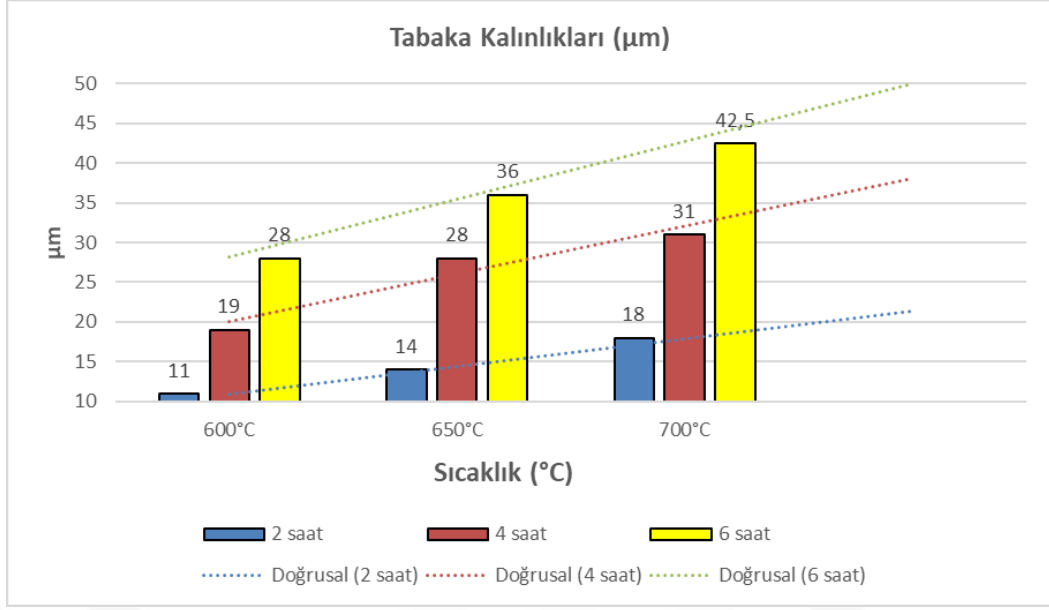
5.3. Alüminyumlanmış Numunelerin Tabaka Kalınlıkları

600°C, 650°C, 700°C işlem sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saatlik işlem süreleri sonucunda farklı tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. Kutu alüminyumlama işlemine ait proses parametrelerine göre tabaka kalınlıkları Tablo 5.3’de gösterilmiştir.

Tablo 5.3. 600°C, 650°C, 700°C tutma sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat işlem süresi sonucunda oluşan tabaka kalınlıkları.

Sıcaklık (°C)	Tabaka Kalınlıkları (µm)		
	2 Saat	4 Saat	6 Saat
600°C	11 µm	19 µm	28 µm
650°C	14 µm	28 µm	36 µm
700°C	18 µm	31 µm	41 µm

Şekil 5.31’de ki şekilde görüldüğü gibi kaplanan tabaka kalınlıkları doğrusal şekilde ilerlemektedir. Sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak sıcaklık ve süre arttıkça kaplanan tabaka kalınlığı da daha net şekilde artış göstermiştir.



Şekil 5.31. 600°C, 650°C, 700°C tutma sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat işlem süresi sonucunda oluşan tabaka kalınlıkları.

5.4. XRD İncelemeleri

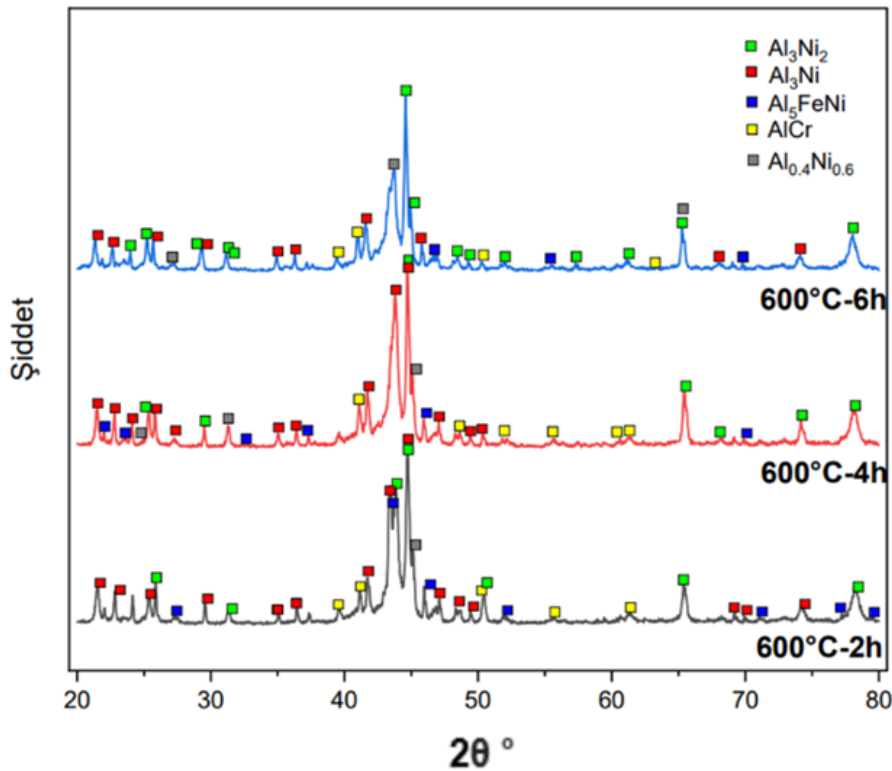
Şekil 6.35, 6.36 ve 6.37, 600°C, 650°C ve 700°C'de farklı zaman aralıklarına ait XRD grafiklerini sunmaktadır. Her bir süreçte, Hastelloy C-276 alaşımı yüzeyinde SEM-EDS analizlerinin ardından XRD ile de doğrulanan alüminit tabakaların oluşumu gözlemlenmiştir. İşlemin en düşük sıcaklığında ve süresinde Al_3Ni fazının varlığı belirlenirken, zamanla Ni'nin artan difüzyonu ile Al_3Ni_2 fazına geçiş olduğu anlaşılmıştır. Özellikle 6 saatlik işlem sonrası, Al_3Ni_2 fazının en belirgin şekilde olduğu tespit edilmiştir. Bu süre zarfında Al_3Ni fazı, büyük ölçüde Al_3Ni_2 fazına dönüşmüştür. Yener ve arkadaşlarının 2022 yılındaki çalışmalarında, 650 ve 700°C'de 5 saatlik işlem sonrasında Al_3Ni ve Al_3Ni_2 fazlarının olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyumlama işlemi sırasında, Al'ın Altıığa, Ni'nin ise yüzeye doğru difüze olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin yüzeyleri temizlenmeden yapılan XRD analizlerinde, bazı örneklerde potadan kaynaklanan Al_2O_3 fazları da saptanmıştır. Bunların yanında diğer çalışma saat aralıkları ve sıcaklıklarda da AlCr , $\text{Al}_{0.4}\text{Ni}_{0.6}$, Al_5FeNi gibi farklı fazlara da rastlanmıştır.

700°C'de gerçekleştirilen 2, 4 ve 6 saatlik kaplama işlemleri sonucu oluşan nikel alüminit tabakalarının fazları, XRD yöntemiyle incelenmiştir. Şekil 6.37'deki XRD piklerine bakıldığında, kaplamanın çok fazlı bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. 2

saatlik en kısa süreçte, Al_3Ni fazlarının baskın olduğu, ayrıca Ni_2Al_3 gibi nikel zengini fazların da piklerinin görüldüğü belirlenmiştir.

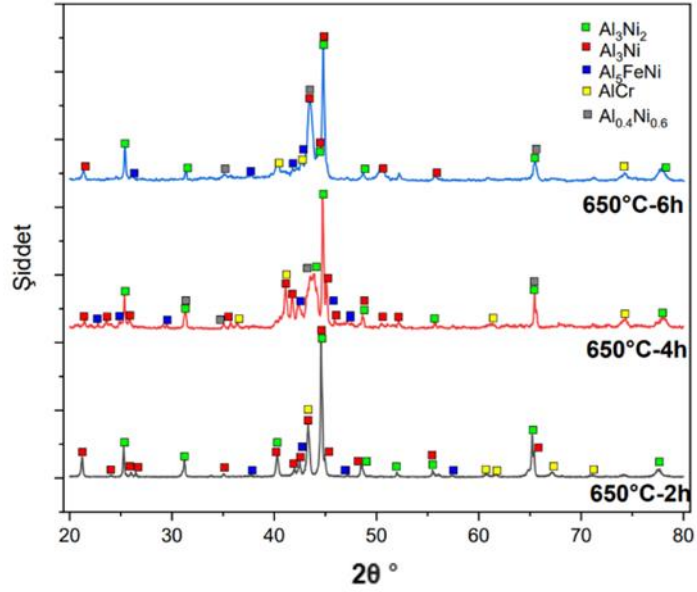
Ni_2Al_3 fazının oluşumunun, kaplama işlemi sırasında potada bulunan grafit tozu ve altlık malzeme arasındaki doğrudan temas ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. 600, 650 ve 700°C sıcaklıklarını temsil eden grafiklerde görüldüğü üzere, kaplama işlemi için en uygun sürenin 700°C'de 6 saat olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 5.32'de 600 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası numunelerin XRD fazları bulunmaktadır. Fazlara bakıldığında sıcaklığa bağlı süre artışlarında Al_3Ni_2 fazlarında artış meydana gelmektedir. Al_3Ni fazında Al miktarı azalarak yerini Ni ağırlıklı Al_3Ni_2 fazına bıraktığı görülmektedir.



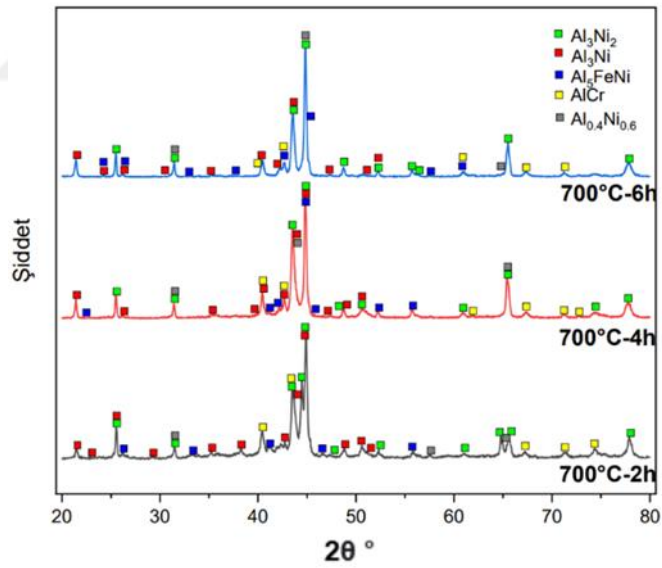
Şekil 5.32. 600 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası numunelerin XRD analizi.

Şekil 5.33'de 650 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası numunelerin XRD fazları bulunmaktadır.



Şekil 5.33. 650°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası numunelerin XRD analizi.

Şekil 5.34’de 700°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası numunelerin XRD fazları bulunmaktadır.



Şekil 5.34. 700°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası numunelerin XRD analizi.

650-700°C sıcaklıkta yapılan işlemde kaplama tabakasında Al_2O_3 yapısının özellikle 4 ve 6 saatlik işlemlerde varlığı dikkat çekmektedir. Al_2O_3 tabakasının varlığının sebebi numune yüzeylerinin XRD analizlerinden önce temizlenmemesinden kaynaklanmaktadır.

5.5. Sertlik Ölçümleri

Yapılan kutu sementasyon deneyleri sonuçlarına dayanarak elde edilen bulgular, farklı sıcaklık ve süre kombinasyonlarının alaşım sertliği üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamıştır.

Öncelikle, 600°C, 650°C ve 700°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen 2, 4 ve 6 saatlik kutu sementasyon işlemleri sonucunda alaşım sertliği genel olarak 250-300 HV aralığında kalmıştır. Bu değerler, belirli işlem parametrelerinin belirlenen sıcaklık aralığında benzer bir sertlik profilini koruduğunu göstermektedir.

Ancak, dikkat çeken bir bulgu olarak, 650-700°C sıcaklık ve 6 saat süre kombinasyonunda elde edilen sertlik değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle yüksek sıcaklık ve uzun süre uygulamalarının malzemenin mekanik özelliklerini artırabileceğini işaret etmektedir. Bu yüksek sertlik seviyeleri, kutu sementasyon işleminin intermetalik fazların oluşumu üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu düşündürmektedir. Mikroyapısal inceleme, bu artışın altında yatan nedenleri anlamak açısından önemli olacaktır.

Sonuç olarak, bu bulgular, belirli sıcaklık ve süre kombinasyonları kullanılarak kutu sementasyon işlemi yoluyla malzeme sertliğini özellikle optimize etme potansiyeline işaret etmektedir.

Ni içeriğiyle artan intermetalik fazın sertliği de artarak 850 HV değerlerine ulaştı. Çalışmamızda NiAl_3 üst katmanının sertliği 800 HV olarak ölçülmüştür. İki fazlı katmanın varlığı kaplamada kademeli bir sertlik artışı yaratmaktadır ve bu tür alaşımlar için bunun aşınma özelliklerine etkisi önemli olabilir. Ke ve ark. Sürtünme karıştırma işlemiyle yerinde üretilen Al-Ni intermetalik kompozitler çalışmasında, kompakt yığın numuneler üretmiş ve Ni_2Al_3 ve NiAl_3 için mikro sertlik değerlerini yüzeyden matrise yapılan sertlik deney çalışmalarında sırasıyla 1283 HV ve 841 HV olarak ölçmüştür [76]. Metalik intermetalik laminit kompozit çalışması ile ilgili bir diğer çalışma ise Yener ve ark. ve yaptıkları çalışmada NiAl_3 faz sertlik değeri yüzeyden matrise yapılan sertlik testlerinde 765 ± 60 HV civarında bulunmuştur [77].

2,4 ve 6 saatlik periyotlarda yapılan çalışmalar neticesinde her saatten benzer noktalardan alınan değerler doğrultusunda ortalama sertlik 780 HV olarak ölçülmüştür.

Alüminyumlama işlemi, metal yüzeylerin performansını artırmak amacıyla kullanılan bir yüzey işleme tekniğidir. Bu süreç, alüminyumun metal yüzeye nüfuz etmesiyle

gerçekleşir ve yüzey özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Bu işlemin çeşitli parametreleri, kaplamanın son özelliklerini doğrudan etkiler.

İşlem sıcaklığı ve süresi, kaplamanın kalınlığını, yapısını ve mukavemetini belirler. Genellikle, yüksek sıcaklık ve uzun süreler daha kalın ve mukavemetli kaplamalar oluşturabilir. Alüminyum kaynağının saflığı da önemlidir çünkü saflık derecesi, kaplamanın homojenliğini ve mukavemetini etkileyebilir. Altlık malzemenin bileşimi ve önceden yapılan işlemler de nihai kaplamanın özellikleri üzerinde etkilidir.

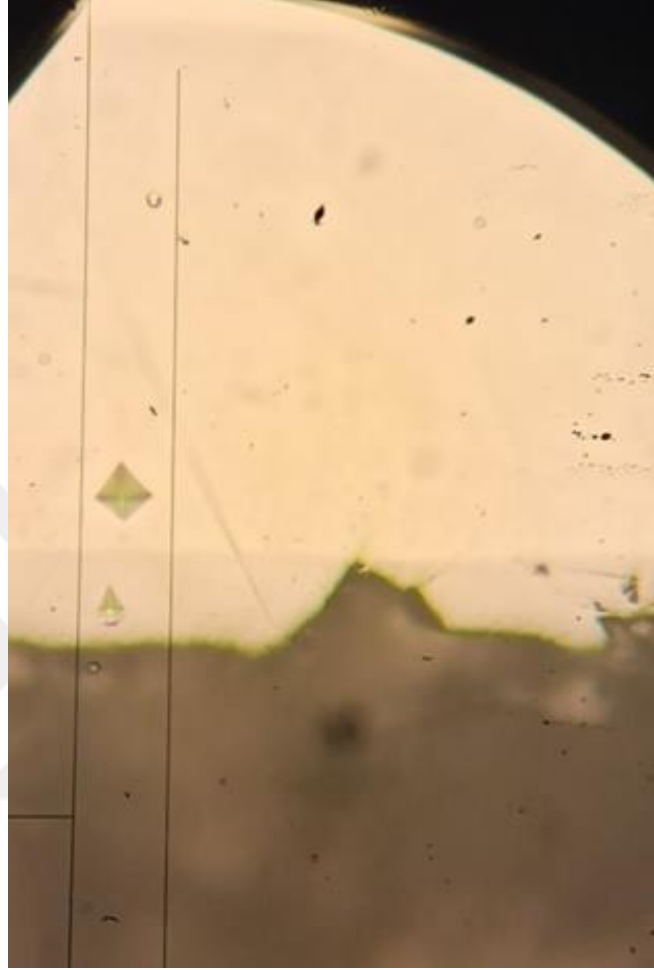
Bu prosesin bir parçası olarak yapılan sertlik ölçümleri, intermetalik nikel alüminit tabakasının mukavemetini, tokluğunu ve altlık malzemenin sertliğini, ayrıca yüzeyden merkeze kadar olan sertlik dağılımını belirlemekte kullanılır. Sertlik özelliği, malzemenin aşınma direnci hakkında bilgi verir ve bu nedenle özellikle altlık malzemesinin çalışma koşulları dikkate alındığında önem taşır.

Mikro sertlik taraması yapılırken, test numunelerinin dikkatli bir şekilde hazırlanması gerekmektedir. Zımparalama ve parlatma gibi metalürjik ön hazırlık işlemleri, numunenin mikro sertlik testi sırasında camsı parlak bir yüzeye sahip olmasını sağlar. Bu da, optik lens aracılığıyla ışığın daha doğru yansımaları ve dolayısıyla daha kesin Vickers sertlik değerlerinin elde edilmesini mümkün kılar. Sertlik ölçümleri yüzeyden merkeze doğru alüminit tabakasının büyüme yönüne dik doğrultuda sabit yükler altında gerçekleştirilmiştir. Her bir sertlik kaplama üzerinde HV_{0,025} ve HV_{0,05} metotları ile gerçekleştirilmiş olup, ölçümler standart sapma hesaplarından sonra değerlendirilmiştir. Her bir ölçüm yapılan hat boyu her zaman esas tabaka kalınlığını yansıtmamaktadır, ancak ortalama bir değer vermektedir. HV_{0,50} denemelerde iz büyüklüğünün kaplama tabakasında kapladığı alan sebebiyle çalışılmaya devam edilmemiş ve daha sonraki çalışmalarda kaplama alanının faydalı kullanımı açısından HV_{0,025} tercih edilmiştir. Kutu alüminyumlama işlemi, difüzyon kaplaması olarak bilinen bir süreçtir ve bu işlem sırasında nikel alüminit tabakalarının oluşumu gerçekleşir. Hastelloy C-276 nikel alaşımı matrisi içerisinde, alüminyum atomları kendilerine yer bulmakta ve CVD benzeri bir birikim süreci ile yüzeyde kaplama oluşmaktadır. Bu reaksiyon, alüminyum kaynağı tükenene kadar devam eder ve kaplama kalınlığı, işlem süresine ve sıcaklığına bağlı olarak artar. Sertlik ölçümleri sırasında, yüzeyde biriken intermetalik nikel alüminit tabakasının en sert tabaka olduğu, ancak matrise geçişte aniden sertlikte bir düşüş yaşandığı gözlemlenir. Ana matriste yer bulan alüminyum nedeniyle yüzeye yakın bölgelerde farklı sertlikler

gözlenebilirken, matrise doğru gidildikçe sertlikte belirgin bir düşüş görülebilir. Oluşan fazlar arasında ise yer yer sertlikte dalgalanmalar tespit edilmiştir.

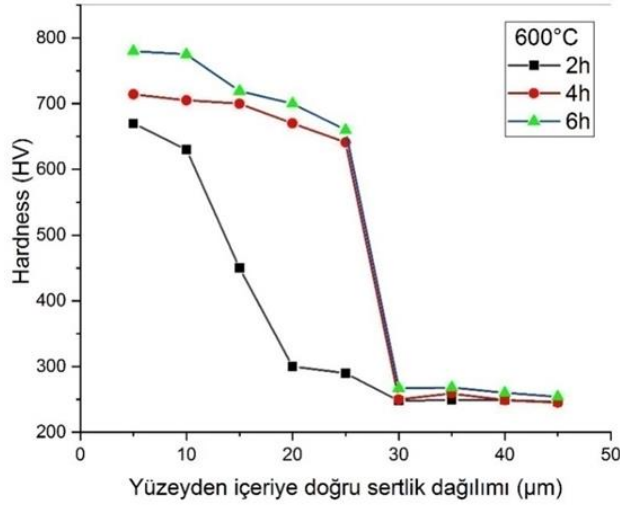
Mikro sertlik ölçümünde, nikel alüminit tabakasının kalınlığı önemli bir faktör olarak belirlenmiştir. HV_{0,025} metodu, bu sertlik çalışması için en doğru deformasyon parametresi olarak kabul edilmiştir. Elde edilen değerler, sertlik değerlerinin ana proses parametreleri olan sıcaklık ve süreye bağlı olarak lineer bir artış göstermediğini ortaya koymuştur. Hastelloy C-276 alaşımının sertlik değerlerinde zaman zaman dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmaların nedeni, işlem sıcaklıkları, oluşan farklı alüminit fazları ve alaşımın içerdiği mikro alaşım elementlerinin oluşturduğu bileşikler olabilir. Yener, T. ve arkadaşlarının çalışmaları, 600°C'de 2 saat süren demir esaslı mirrax alaşımı kutu alüminyumlama işlemi sonucunda oluşan çatlak içeren tabakalar ve 650HV sertlik değerleriyle desteklenmektedir [82]. Hastelloy C-276 kaplama işlemi öncesi gerilim giderme işlemi yapıp yapılmadığı bilinmemektedir. Bu durum, kaplama işlemi sonrasında soğuma hızını etkileyen önemli bir faktör olabilir. Termalşok sonucunda intermetalik malzemelerde mikro çatlak oluşumu gözlemlenebilir. Ayrıca, metalografik hazırlık süreçlerinde uygulanan basınç nedeniyle de yüzeye dik çatlaklar oluşabilir. Ş. H. Atapek ve arkadaşları tarafından yapılan paket özelliklerinin ve proses parametrelerinin alüminit kaplı Inconel 625 alaşımının özelliklerini araştırması çalışmalarında, 700°C ve 1000°C' de 2 ve 4 saatlik yaptıkları çalışmalarda yüzeyden matrise alınan sertlik değeri 1396 HV sonuçlarını ortaya koymaktadır [78]. Yapılan bu tez çalışmasında, sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak kaplama tabakasında artış olduğu görülmüştür. En düşük sertlik ve kaplama kalınlığı başlangıç süre ve sıcaklığı olan 600°C'de 2 saatte alınmış olan sertlik 250 HV ve 11 micron kaplama kalınlığı, en yüksek alınan sertlik ve kaplama kalınlığı değeri ise 700°C'de 6 saatte 850 HV ve 42 micron kaplama kalınlığı ile bitiş değerleri görülmüştür. NiAl₃ sertliği Ni₂Al₃ sertliğinden düşük çıkmıştır. Ni oranı arttıkça sertlik değerlerinde yükselme gözlemlendi. Yener ve arkadaşlarının düşük sıcaklıkta alüminize edilmiş IN600'ün aşınma ve oksidasyon performansları çalışmalarında bulduğu sonuçlarla Ni oranının artması sonucunun sertliği arttırdığı sonucuyla örtüşmektedir. 2 fazlı katman varlığı kaplamada kademeli sertlik artış/azalışına sebep olmaktadır ve yüzeyden matrise yapılan test çalışmalarında sertlik artış oranları 250HV ile 850 HV arasında değişmektedir [34]. Şekil 5.35'de görüldüğü gibi sertlik kaplama üst yüzeyinden başlayarak dik bir şekilde altlık ana malzemenin çekirdeğine

kadar mikrosertlik taraması gerçekleştirilmiştir. 0.025 kg yük altında sertlik ölçümü yapılan yüzeyde çatlak sebebiyle normalde 850 HV ölçülen değer 581 HV değerine düşmüştür. Yüzeyde görülen koyu tabakalar grafit kümeleridir.



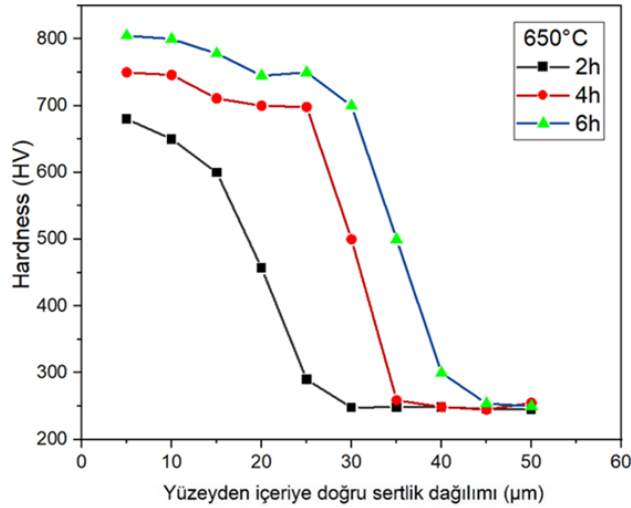
Şekil 5.35. Kaplama ve matrisin sertlik cihazı ekran görüntüsü.

Şekil 5.36’da 600°C’ de farklı sürelerde alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımının yüzeyden itibaren mesafeyle sertlik değişimi görülmektedir. Yüzeyden iç kesime sertlik değerleri alındığında süreye bağlı olarak sertliğin en fazla olduğu süre 6 saat olduğu belirlenmiştir. 600°C 2 saat süresinde 650 HV olan değer 6. Saatte 780 HV seviyelerine ulaşmıştır. Bu da kaplamanın uzun sürede daha yoğun birikim göstermiş olduğunu kanıtlamaktadır ve böylelikle yoğunluk artarken sertlik değerlerinde de artış gözlemlenmiştir.



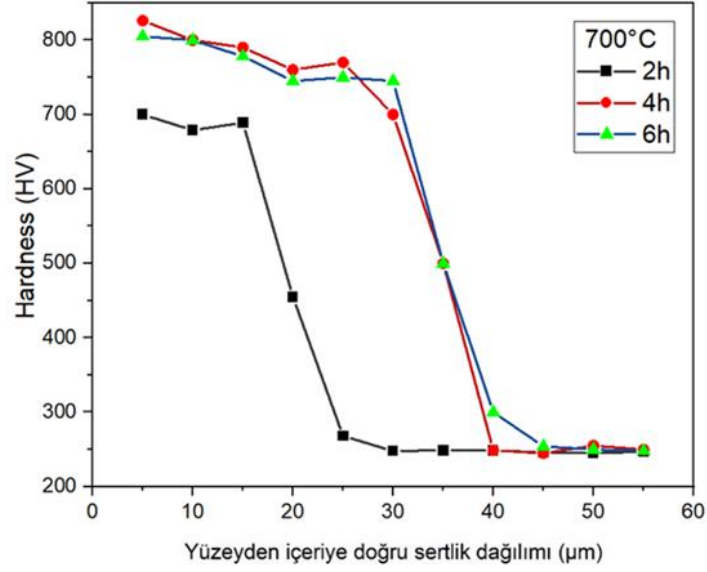
Şekil 5.36. 600°C’ de farklı sürelerde alüminyumlanan alaşımların yüzeyden itibaren mesafeyle sertlik değişimi.

Şekil 5.37’de 650°C’ de farklı sürelerde alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımlarının yüzeyden itibaren mesafeyle sertlik değişimi görülmektedir. 6 saat süre için sertliği en fazla değer elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.37. 650°C’ de farklı sürelerde alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımlarının yüzeyden itibaren mesafeyle sertlik değişimi.

Şekil 5.38’de 700°C’ de farklı sürelerde alüminyumlanan Hastelloy C-276 alaşımlarının yüzeyden itibaren mesafeyle sertlik değişimi görülmektedir. 4 saat süre için sertlik değerinin en yüksek olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 5.38. 700°C’ de farklı sürelerde alüminyumlanan alaşımın yüzeyden itibaren mesafeye sertlik değişimi.

K.M. Döleker ve ark. düşük sıcaklıkta alüminize etme yoluyla Inconel 718’in aşınma ve oksidasyon davranışlarının artırılması çalışmasında, tatmanın yüzeyden içeriye doğru değişimi 8 ila 80 μm arasında değişmiştir ve bu, daha yüksek alüminizasyon sıcaklığı ve daha fazla süre ile arttığı gözlemlenmiştir. Kaplama tabakasında sertlik değeri 960 HV, matris sertliği ise 260 ± 10 HV olarak belirlendiği bunun da yüzeyden matrise sertliğin azaldığı sonuçlarına erişmişlerdir. Katman parabolik büyüme kuralına uygun bir şekilde gelişme göstermektedir [51].

5.6. Alüminyumlama Kinetiği

Difüzyon kinetiği ve mekanizmaları, genellikle 1. Fick kanunu ile kararlı hal difüzyonunu ve 2. Fick kanunu ile kararsız hal difüzyonunu açıklar. Difüzyon sürecinde, belirli iki nokta arasında bileşim değişebilir veya sabit kalabilir.

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial X} \quad (5.10)$$

- Arrhenius Denklemleri: Bu denklemler, kimyasal reaksiyon hızının sıcaklıkla nasıl değiştiğini açıklar. Alüminyum kaplama gibi işlemlerde, kaplama işleminin hızı sıcaklık arttıkça genellikle artar. Arrhenius denklemleri, reaksiyon hızının sıcaklıkla nasıl ilişkili olduğunu nicel olarak açıklamaktadır.

- Fick Kanunları: Bu kanunlar, madde transferinin, yani bir maddenin başka bir madde içindeki yayılımının zamanla nasıl değiştiğini açıklar. Alüminyum kaplama sürecinde, alüminyumun yüzeydeki madde ile nasıl etkileşime geçtiği ve bu maddeyi kaplama işlemi boyunca nasıl emdiği veya yaydığı Fick kanunlarıyla açıklanabilmektedir. Difüzyon kinetiği ve mekanizmaları, genellikle 1. Fick kanunu aracılığıyla bileşimsel gradyana bağlı olarak akı olarak ifade edilir. Bu kanun, D difüzyon katsayısını, kompozisyonun azalmasına bağlı olan 'x' mesafesi ile ilişkilendirir. Difüzyon hızı aslında, kısmi molar serbest enerji veya kimyasal bileşik gibi faktörlere bağlıdır [75]. Kararsız durumlarda, difüze edilecek atomun miktarı, belirli bir süre içinde uygulandığında difüzyonun atomun yerleşme yeteneğini azaltır. Bu durumda, kimyasal potansiyel gradyanı veya kompozisyon gradyanı değişir. Kararlı durumlarda, kompozisyon genellikle mesafe boyunca sabit kalırken, kompozisyonun zamanla değişmesi tipik olarak kararsızlığın bir göstergesidir. Eğer çözünen atomlar bir süre içinde tamamen karıştırsa, sistem kararlı bir hale gelir ve kompozisyon sabitlenir. Bu durum, örneğin 10 saatlik bir alüminyum işlemi sonucunda gözlemlenebilir. Artan birikim hızı zamanla sabit bir seviyeye ulaşmaktadır. Difüzyon derinliği ve gerçekleştiği süre 2. Fick kanunuyla incelenir. Karbon, azot, bor gibi atom türlerinin boyutları genellikle latiste boşluk oluşturmaz. Ancak küçük boyuttaki atomlar, boşluklar boyunca hedeflerine doğru yol alabilir. Bu durumda, küçük çaplı atomlar, kafeste bulunanlardan daha küçük yarıçapa sahip oldukları için arayer pozisyonunu bulmakta zorluk çekmezler. Ancak genellikle arayer atomları, arayer boşluklarından daha büyüktür; bu durumda arayer atomunun hareketi gerilim oluşturur ve çözünmeyi zorlaştırmaktadır [68]. Diğer yandan, Al, Si, Cr, Mn, Zn gibi elementlerin atom boyutları, kafeste bulunan atomlarla benzerdir. Bu durumda farklı bir mekanizma devreye girer: 'atomik boşluk değişimi'. Bu mekanizma, bir atomun bulunması gereken pozisyondan ayrılarak yerini boş bırakması ve dışarıdan gelen bir atomun bu boşluğa yerleşmesiyle gerçekleşir.

Dışarıdan difüzyonu sağlayacak bileşenler sıvı, gaz veya katı olabilir. Atom, boş pozisyona geçerek burayı işgal eder ve boşluk oluşturarak yer değiştirme sağlar. Bu süreçlerde aktivasyon önemlidir. Örneğin; alüminyum, krom gibi atomlar için aktivasyon bariyeri, karbon, azot ve bor gibi atomlardan daha fazla işlem zorluğuna neden olmaktadır.

Do: Difüzyon sabiti (cm²/sn)

Q: Aktivasyon enerjisi (j/mol)

T: Sıcaklık (K)

R: Ryberg ideAl gaz sabiti (8.314 j/mol)

Öncelikle denklem 6.12 yardımı ile çizilen (x²-t) diyagramlarının eğiminden difüzyon katsayıları hesaplanmıştır.

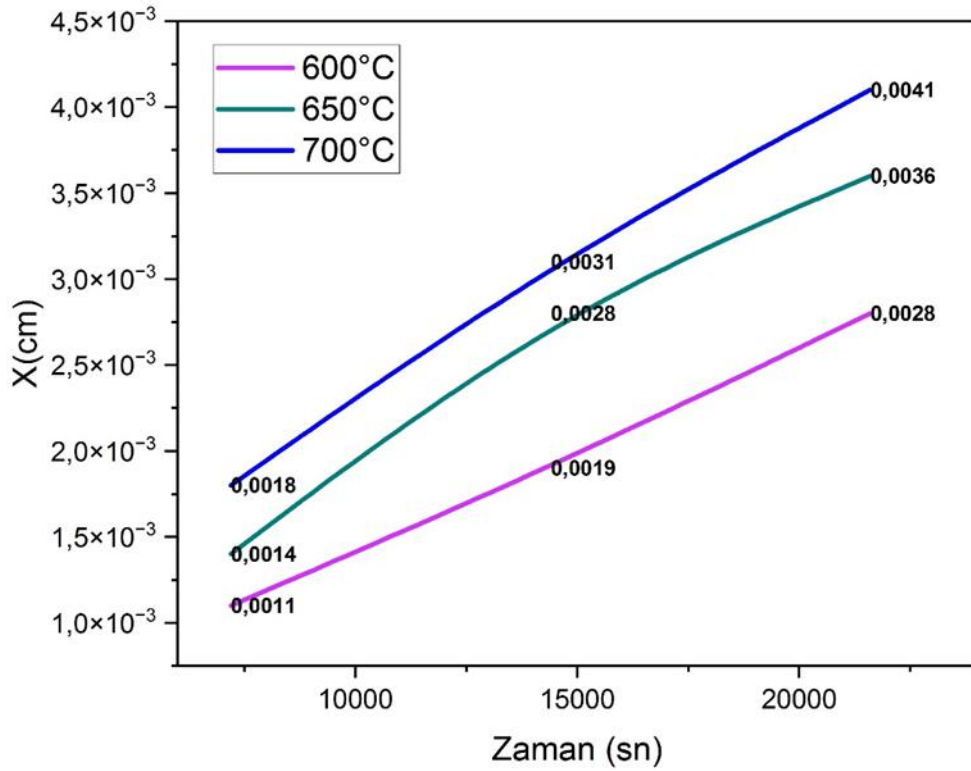
$$x^2 = D * t \quad (5.12)$$

x: Nikel alüminit tabaka kalınlığı (cm)

D: Difüzyon katsayısı (cm²/sn)

t: Alüminyumlama işlem süresi

Şekil 5.39'da Hastelloy C-276 alaşımının tabaka kalınlığının zamana olan grafiği (x-t) diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.39. Hastelloy C-276 alaşımının (x-t) diyagramı.

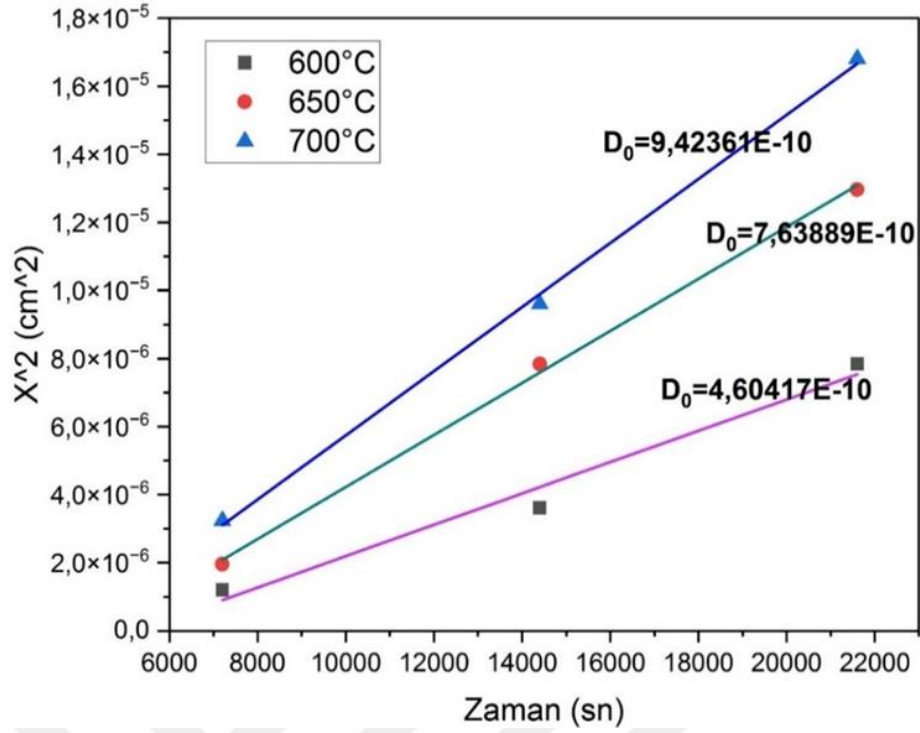
Şekil 5.40'da Hastelloy C-276 alaşımının (x²-t) diyagramı verilmiştir. Denklem 5.12'deki formülden yararlanılarak birimler eşitlendiğinde difüzyon sabiti olan D (cm²/sn) bulunur. Aynı sıcaklıkta süreye bağlı olarak parabolik tabaka kalınlığı artışı

daha net görülmektedir. En yüksek ve en düşük sıcaklıklar baz alındığında katman artışının düzeni net bir şekilde görülmektedir. Bu grafik, bir sürecin veya reaksiyonun sıcaklıkla nasıl değiştiğini ve zamanın ilerlemesiyle olan evrimini incelemek için kullanılabilir. Özellikle, x^2 değerlerinin sıcaklık ve zamanla nasıl değiştiğini analiz ederek, sürecin kinetiği veya difüzyon karakteristikleri hakkında bilgi edinebilmektedir.

İlk olarak, x^2 değerlerinin zamanla doğrusal bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Bu, sürecin zamanla sürekli ve düzenli bir şekilde ilerlediğini gösterir. Özellikle, her sıcaklıkta, x^2 değerleri zamanın artmasıyla birlikte artmaktadır. Bu, sürecin zamanla ilerledikçe hızlandığını veya ilerlediğini göstermektedir. İkinci olarak, sıcaklığın artışıyla birlikte x^2 değerlerinin daha hızlı arttığı görülmektedir. Örneğin, 7200 saniyede 600°C'de $x^2=0,00000121\text{cm}^2$, 650°C'de $x^2=0,00000196\text{ cm}^2$ ve 700°C'de $x^2=0,00000324\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür. Bu, sürecin sıcaklık artışıyla hızlandığını gösterir ve Arrhenius denkleminin bir sonucu olarak kinetik enerji ve aktivasyon enerjisi teorileriyle uyumludur.

Üçüncü olarak, bu verilerin difüzyon kontrolü altında bir süreç olduğu düşünülebilir. Difüzyon kontrollü süreçlerde, x^2 ve zaman (t) arasındaki ilişki doğrusaldır. Veriler bu özelliği göstermektedir. Difüzyon oranının sıcaklıkla arttığı göz önüne alındığında, bu, Arrhenius bağımlılığının bir yansıması olarak kabul edilebilmektedir.

Sonuç olarak, sıcaklık artışıyla birlikte sürecin hızlandığını ve zamanla sürekli ilerlediğini göstermektedir. Difüzyon kontrollü bir sürecin karakteristik özelliklerini yansıtır ve materyal bilimi, kimya veya fizikteki süreçlerin sıcaklık bağımlılığını incelemek için kullanışlı bir örnek teşkil eder. Ancak, daha kapsamlı bir analiz ve kesin sonuçlar için ek verilere ve detaylı deney düzenlemelerine ihtiyaç vardır.



Şekil 5.40. Hastelloy C-276 alaşımasının (x²-t) diyagramı.

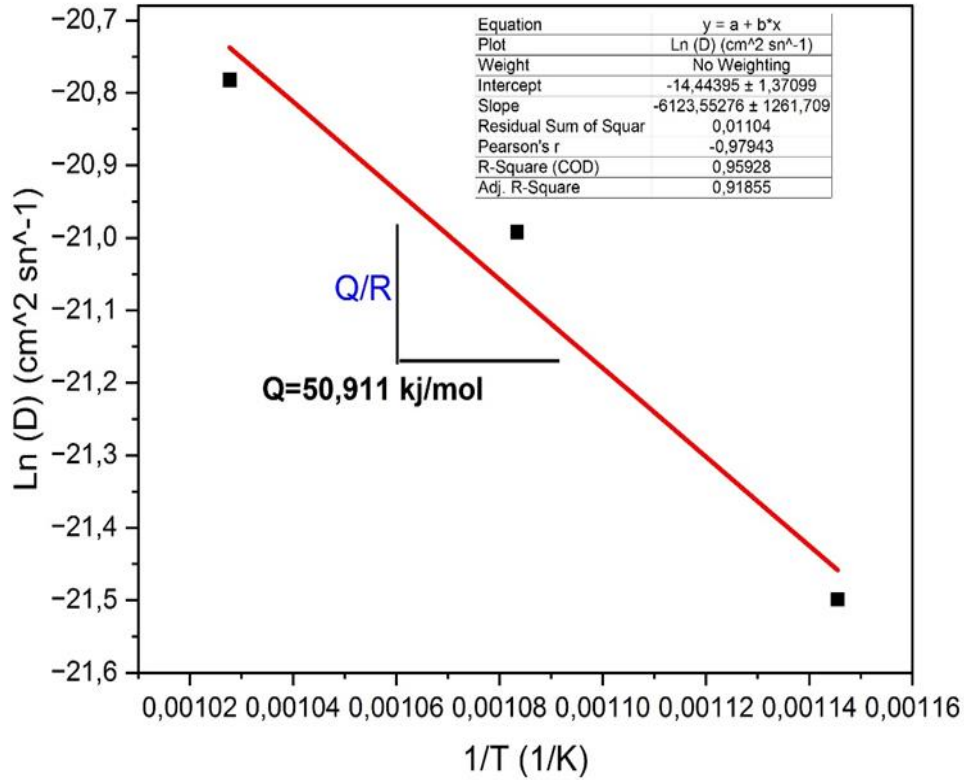
Tablo 5.4. 600,650 ve 700°C sıcaklıklardaki difüzyon katsayı değerleri.

Sıcaklık (°C)	D (cm ² /Sn)
600 °C	4,60E-10
650 °C	7,64E-10
700 °C	9,42E-10

İncelenen sistemde, difüzyon katsayılarının sıcaklıkla olan ilişkisi, termalenerjinin moleküler düzeyde hareketliliği artırma kabiliyetini açıkça ortaya koymaktadır. 600°C, 650°C ve 700°C olarak belirtilen sıcaklık değerlerinde sırasıyla 4.60E-10, 7,64E-10 ve 9,42E-10 olarak ölçülen difüzyon katsayıları, sıcaklığın artışıyla birlikte difüzyon hızının da belirgin bir şekilde arttığını göstermektedir. Bu artış, termalaktivasyon teorisine uygun olarak, yüksek sıcaklıklarda atomların veya moleküllerin daha hızlı hareket ettiğini ve böylece bir materyalden diğerine geçişlerinin daha kolay olduğunu ima etmektedir. Bu veriler, özellikle malzeme bilimi, kimya ve fizik alanlarında, termal işlemlerin malzemenin mikro yapısal özelliklerini nasıl etkileyebileceğini anlamak için önemlidir. Ayrıca, bu tür bir sıcaklık bağlı difüzyon davranışı, malzemelerin termalstabilitesi, reaktifliği ve yaşlanma süreçleri gibi kritik özelliklerinin değerlendirilmesinde de kilit rol oynamaktadır. Bu, faz dönüşümleri, atomik veya moleküler yapıdaki yeniden düzenlemeler veya belki de

difüzyon mekanizmasının kendisindeki bir değişikliği ifade edebilir. Bu nedenle, bu tür bir analiz, ilgili malzemenin sıcaklıkla değişen mikro yapısal davranışlarını anlamak için daha derinlemesine yapılan araştırmaların temelini oluşturulabilmektedir. Erdoğan, A. ve arkadaşları Nimonic 80A çalışmalarında karşılaştıkları difüzyon sırasında sıcaklığın süreden daha net verilere ulaşmaya yarayan bir etken olduğu sonucuna ulaşmıştır [79]. Döleker, K.M. ve arkadaşları da yaptıkları Inconel 718 çalışmalarında kaplama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak yüksek sıcaklığın en yoğun kaplamaya ulaşmalarını sağlamış ve yapılan tez çalışmayla örtüşmektedir [51]. Denklem 5.11'deki formülün iki tarafını $\ln$ 'i alınmalı ve formül $\ln D = \ln D_0 - Q/RT$ haline getirilmelidir. Bu eşitlikten faydalanılarak $\ln D$ ile $1/T$ arasında çizilen diyagramın eğiminden Q (Aktivasyon enerjisi) değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 5.41'de $\ln D - 1/T$ diyagramı verilmiştir. Diyagramlarda elde edilen eğrilerin ordinatı kesim noktası frekans faktörü değerini (D_0), eğrinin eğimi ise aktivasyon enerjisini (Q) vermektedir. Aktivasyon enerjisi Q , 50,911 kJ/Mol olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.41. Hastelloy C-276 alaşımının $\ln D - 1/T$ grafiği.

Mahmudi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, Ni bazlı bir süper alaşımın IN738 alüminyumlamasının oksidasyon davranışını incelemişlerdir ve alüminit kaplamaların büyüme aktivasyon enerjisinin, geleneksel alüminyumlama teknikleri için literatürde verilen değerlerden daha az olan yaklaşık 83 kJ/mol olduğu hesaplanmışlardır [80].

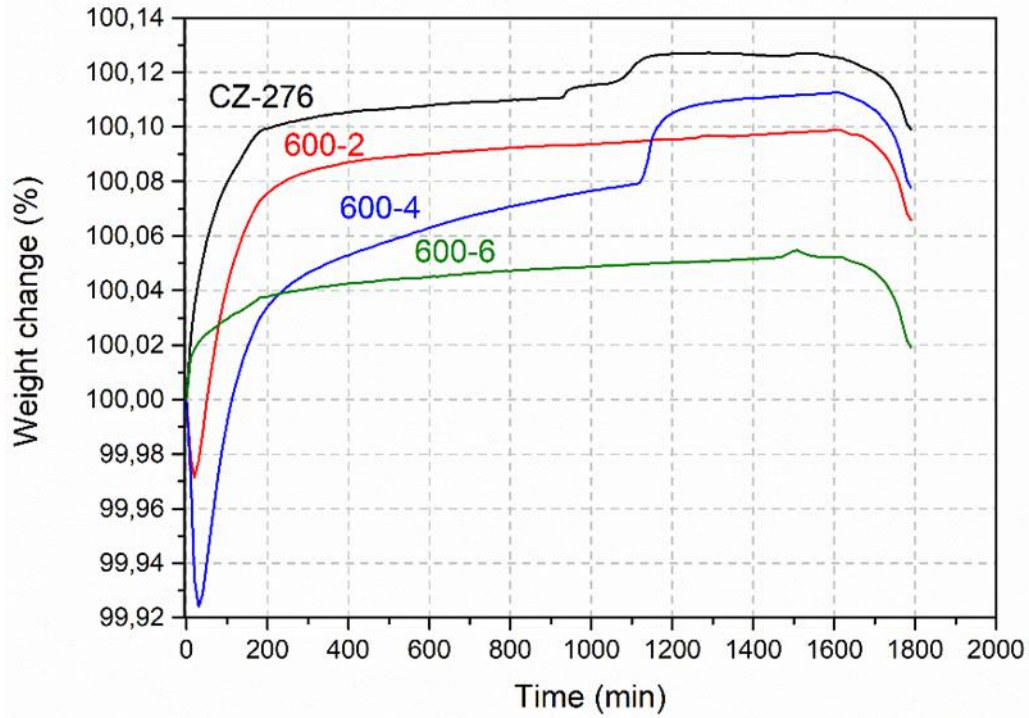
5.7. Oksidasyon Sonuçları ve TG analizi

Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve Termogravimetrik Analiz (TG), malzemelerin termal özelliklerini incelemek ve anlamak amacıyla kullanılan analitik tekniklerdir.

- Diferansiyel Termal Analiz (DTA): DTA, bir numunenin sıcaklık değişimine karşı referans bir madde ile karşılaştırılmasını içerir. Bu süreçte, numune ve referans aynı sıcaklıkta ısıtılır, ancak numunedeki termal değişiklikler (endotermik veya egzotermik reaksiyonlar, faz değişiklikleri vb.) referansa göre belirlenir.
- DTA, malzemenin ısı alımı veya salımıyla ilgili bilgileri sağlar, bu da özellikle reaksiyonların veya faz değişikliklerinin tespiti için önemlidir.

Termogravimetrik Analiz (TG): TG, bir numunenin sıcaklığa karşı ağırlık değişimini ölçer. Numune, belirli bir sıcaklık aralığında ısıtılır ve bu sırada ağırlığındaki değişiklikler kaydedilir. Bu, malzemenin termal bozunma, buharlaşma, oksidasyon veya diğer kimyasal reaksiyonlara olan tepkilerini değerlendirmek için kullanılır. Ağırlık kaybı veya kazançları, malzemenin kararlılığı, termal davranışı ve bileşenler arasındaki etkileşimler hakkında bilgi sağlamaktadır. DTA ve TG analizleri, malzemelerin özelliklerini anlamak, üretim süreçlerini optimize etmek, kalite kontrolü yapmak, yeni malzemeler geliştirmek ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin performansını değerlendirmek için önemli araştırma ve geliştirme araçlarıdır. Hastelloy C-276 süperalaşımına yönelik ve kutu sementasyon yöntemi ile uygulanan alüminyumlama işlemine odaklanan bu çalışma, numune yüzeylerinde meydana gelen intermetalik bileşiklerin NETZSCH STA 449F1 Termal Analiz cihazı ile sistemde olası değişiklikleri belirlemeyi amaçlamaktadır. İşlem görmemiş Hastelloy C-276 süperalaşımı ile 600°C 2, 4 ve 6 saat sürelerle alüminyumlama işlemine tabi tutulan Hastelloy C-276 alaşımının TG analizleri, açık atmosferde 10 °C/dk ısıtma hızıyla 25 °C'den 1000°C'ye kadar gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, kaplama termal kararlılığı ve oksidasyon direnci üzerindeki etkileri değerlendirmek amacıyla detaylı bir termal karakterizasyon sağlamaktadır. Şekil 5.42'de 600°C (2-4-6 saat) alüminit kaplanan Hastelloy C-276 alaşımının TG analiz grafiği verilmiştir.

Oksidasyon direnci kaplamalı numunelerde kaplamasız numuneye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Ağırlık artışı kaplamasız numuneye göre daha az olduğu görülmektedir. 600°C 4 saat alüminyumlama yapılan numunede süreye bağlı ağırlık artışı diğerlerinden çok olarak oksidasyon direnci diğer kaplamalı numunelere göre daha düşük olduğu söylenebilmektedir. Sarraf ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında, nikel esaslı bir süper alaşımın (IN738LC) reaktif havayla alüminyumlanmış numunenin statik hava atmosferinde 5 °C'dak -1 ile 700°C sıcaklıkta kurutulmuş Al-PVA bulamacının DTA ve TG eğrilerinin verilerini vermişlerdir. DTA eğrisinde tespit edilen tek tepe, Al parçacıklarının 660°C'deki erimesiyle ilgili olduğunu belirtmişlerdir. 500 °C'ye kadar daha düşük bir ağırlık kaybı gözlemişlerdir. Yüzeyde alüminyum oksit tabakasının oluşması nedeniyle numunenin ağırlığı 700°C'ye kadar artış sergileyeceğini belirtmektedirler [81].



Şekil 5.42. 600°C (2-4-6 saat) alüminit kaplanan alaşımın TG analiz grafiği.

6. GENEL SONUÇLAR

- Alüminit kaplamalar, kutu sementasyon yöntemiyle düşük sıcaklıklarda Ni bazlı bir süper alaşım üzerine başarıyla uygulanmıştır. Araştırmada, sertlik, mikroyapısal faz analizleri yapılmıştır ve 600°C oksidasyon özelliklerini incelemiştir. Elde edilen bulgular aşağıda kısaca özetlenmiştir:
- Bu çalışmada Hastelloy C-276 alaşımının yüzeyi sırasıyla 600°C, 650°C ve 700°C, sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat sürelerinde alüminyumlama işlemine tabi tutulmuştur ve bu işlemden sonra oluşan nikel alüminit tabakasının morfolojik, mekanik özellikleri, kaplama kimyasal bileşimi ve kinetiği araştırılmıştır.
- Hastelloy C-276 alaşımı yüzeyinde, sert, aşınmaya ve yüksek sıcaklığa dayanıklı nikel alüminit intermetalik tabakaları başarı ile üretilmiştir.
- Kutu alüminyumlama işlemi sonrasında oluşan, çoklu tabakaya sahip, nikel alüminit tabakasının morfolojileri SEM-EDS yardımıyla incelenmiştir. Homojen ve uniform bir tabakaya ait karakteristik özellikler sağlayan kaplama bünyesinde, yüksek sıcaklık ve sürelerde kaplama kalınlık ve sertlik değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda 600°C, 650°C, 700°C, 2, 4 ve 6 saat işlem ve sıcaklıkları gibi değişken sıcaklıklarda ve süredeki işlemlerde artış/azalışlar incelenmiştir. 700°C'de 4 saat ve 6 saat işlem sürelerinde, uzayan işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak oksit oluşumu görülmektedir ve tabaka bir miktar nispi olarak diğer sıcaklıklara oranla bozulmaya başladığı görülmektedir.
- İncelemeler sonunda Al-Ni ikili faz diyagramı yardımıyla kaplama bünyesinde baskın olarak NiAl_3 - Ni_2Al_3 gibi alüminit fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir.
- Numunlerin XRD analizi gerçekleştirilmiş olup, XRD pikleri ile SEM-EDS analizlerinin örtüştüğü gözlemlenmiştir. Artan işlem süreleri sonucunda Al_3Ni gibi yüksek nikelli fazların difüzyon etkisi ile Ni_2Al_3 gibi fazlara dönüşüm gösterdiği tespit edilmiştir. Aynı şekilde, çok fazlı sistemin interdifüzyon olayı nedeniyle, yüksek sürelerde faz sayılarının azaldığı gözlemlenmiştir.

- Nikel alüminite tabakalarının mikro sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Kaplama yüzeyinden matrise kadar yapılan tarama sonucunda, koruyucu nikel alüminite tabakası oluşumuna paralel olarak, yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Sertlik değerleri sıcaklık artışıyla doğru orantılı artmıştır. 700°C’de sertlik 4 saat sürelerinde artış gerçekleşmiş olup 850 HV ile en yüksek sertlik tespit edilmiştir. Hastelloy C-276 alaşımının sertliklerinde yer yer, azalıp artan değerler tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak işlem sıcaklıkları, oluşan farklı alüminite fazları ve alaşımın ihtiva etmiş olduğu mikro alaşım elementlerinin oluşturduğu bileşiklerin neden olduğu düşünülmektedir. Aynı fazları içeren nikel alüminite tabakasında, sertlikte meydana gelen bazı farklılıkların sebebi muhtemelen nikel alüminite ait elastik-plastik parametreler arasındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- İncelenen sistemde sıcaklık artışıyla difüzyon katsayılarının belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle 600°C, 650°C ve 700°C sıcaklık değerlerinde ölçülen difüzyon katsayıları (sırasıyla 4.60E-10, 7,63E-10 ve 9,42E-10) bu eğilimi destekler niteliktedir. Bu artış, termal aktivasyon teorisi çerçevesinde, yüksek sıcaklıklarda atom veya moleküllerin hareketliliğinin arttığını ve bu durumun malzemeler arası geçişleri kolaylaştırdığını göstermektedir. Bu durum, faz dönüşümleri, atomik veya moleküler yapıdaki yeniden düzenlemeler veya difüzyon mekanizmasında bir değişikliğin varlığını düşündürülebilir.
- Kaplama kinetiği hesapları sonucunda büyüme türünün Arrhenius kuralına uyan parabolik özellikte olduğu tespit edilmiştir. 600-650-700°C arasında yapılan çalışmaların sonucunda çok fazlı yapının birden fazla alüminite yapısı içerdiği görülmektedir. Katman parabolik büyüme kuralına uygun bir şekilde gelişmiş olup kaplama aktivasyon enerjisi 50,911 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.
- Daha düşük çalışma sıcaklıklarında ve daha düşük işlem süresinde optimum parametreler olarak 700°C, 6 saat tespit edilmiştir. Bu işlem sıcaklıklarında ve işlem süresinde alüminyumca zengin 42 mikronluk tabaka elde edilmiştir. Oluşan çok fazlı katman, matrisde ölçülen sertlik 250 HV değerlerinden 850 HV gibi yüksek bir sertlik değerine ulaşmıştır. Tabaka dominant olarak NiAl₃ ve Ni₂Al₃ gibi oksidasyon direnci yüksek fazlardan oluşmaktadır. Bu çoklu fazlardan oluşan tabaka kontrollü olarak oksidasyon direncine karşı Al₂O₃ oluşturulmasına uygun zemin hazırlayabilecek niteliktedir.

KAYNAKLAR

- [1] Singh, Gurpreet, et al. "Performance investigations for sustainability assessment of Hastelloy C-276 under different machining environments." *Heliyon* 9.3 (2023).
- [2] KARAHAAN, Tuba. "Hastelloy C-276/UNS S32205 Malzeme Çiftinin Birleştirilmesinde ER 316 L İlave Metal Kullanımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi." *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 35.3 (2020): 737-744.
- [3] Qiu, Zhijun, et al. "Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C-276 Alloy." *Materials & Design* 195 (2020): 109007.
- [4] Manikandan, M., et al. "Microstructure and mechanical properties of alloy C-276 weldments fabricated by continuous and pulsed current gas tungsten arc welding techniques." *Journal of Manufacturing processes* 16.4 (2014): 563-572.
- [5] Westin, E.M., Olsson, C.A., Hertzman, S., 2008. Weld Oxide Formation on Lean Duplex Stainless Steel. 50, 2620–2634. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.024>
- [6] Sharma, S., Taiwade, R.V., Vashishtha, H., 2017. Effect of Continuous and Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding on Dissimilar Weldments Between Hastelloy C-276/AISI 321 Austenitic Stainless Steel. *J Mater Eng Perform* 26, 1146–1157. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2570-5>
- [7] *Metals Handbook*, Ninth edition, (1983). ASM (American Society for Metals), Metals Park, Ohio, 10: 761.
- [8] Reed, R.C., (2006). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [9] *Metals Handbook Volume 9*, (2004). Metallography and Microstructures of Heat Resisting Alloys. ASM International, USA.
- [10] Davis, J.R., (1997). *Heat Resistant Materials*. ASM Specialty Handbook, ASM International, 221-254.
- [11] Reed, R.C., (2006). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [12] Donachie, M. J., Donachie, S. J., (2000). *Superalloys: A Technical Guide* (2nd Edition). ASM International
- [13] bircelik.com/tr/kategori/hastelloy-c-276
- [14] Quested, P. N., et al. "Measurement and estimation of thermophysical properties of nickel based superAlloys." *Materials Science and Technology* 25.2 (2009): 154-162.

- [15] Kesavan, J., V. Senthilkumar, and S. Dinesh. "Experimental and numerical investigations on machining of Hastelloy C-276 under cryogenic condition." *Materials Today: Proceedings* 27 (2020): 2441-2444.
- [16] epowermetals.com/tr/a-comprehensive-guide-to-nickel-based-alloy-hastelloy-c-276-uns-n10276.html
- [17] zormetal.com/products/hastelloy-c276/
- [18] www.akyaymetal.com.tr/hastelloy-c276/
- [19] turkish.materialalloy.com/sale-11171307-hastelloy-c276-grade-hastelloy-alloy-bar-with-outstanding-mechanical-properties.html
- [20] ferhatdokum.com.tr/alasimlar-ve-ozellikleri-7-tr-haber.html
- [21] wikipedia.org/wiki/Kategori:Nikel_ala%C5%9F%C4%B1mlar%C4%B1
- [22] Wu, Lushen, et al. "A method for improving the crack resistance of aluminum alloy aircraft skin inspired by plant leaf." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 106 (2020): 102444.
- [23] cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/intermetalikmalzemeler1.pdf
- [24] American Association of Physics Teachers (AAPT), (1995), 653-658
- [25] Yüz Yıllık Bir Bilim Ocağı: Türkiye Kimya Derneği N.D.
- [26] (Aluminyum Esaslı İntermetalik Bileşikler N.D.)
- [27] Gedevanishvili, S., and S. C. Deevi. "Processing of iron aluminides by pressureless sintering through Fe+ Al elemental route." *Materials Science and Engineering: A* 325.1-2 (2002): 163-176.
- [28] *Materials Science and Engineering: A* (2002) 325(1-2) 163-176
- [29] Özdemir Ö., (2004), "Ni-Al İntermetalik Malzemeler" Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Esentepe Kampüsü-Adapazarı.
- [30] Stoloff N.S, Liu C.T. Deevi S.C., (2000), "Emerging Applications of Intermetallics", *Intermetallics*, Elsevier Science B.V., 1313-1320.
- [31] AKKAŞ, MEHMET. "Östenitik paslanmaz çeliğin bor katkılı Ni₃Al ile kaplanabilirliğinin araştırılması/Investigation of boron doped Ni₃Al coating of austenitic stainless steel." (2013).
- [32] *Metals Handbook* ASM, (1990), Metals Park, Ohio 10th basım. Cilt:2, sayfa:913- 939.
- [33] Morsi K., (2001), "Reaction synthesis processing of Ni–Al intermetallic materials synthesis", *Materials Science and Engineering A*, volume:299, pp:1-15.
- [34] Yener, Tuba, et al. "Wear and oxidation performances of low temperature aluminized IN600." *Surface and Coatings Technology* 436 (2022): 128295.
- [35] Okamoto, Hiroaki, Mark E. Schlesinger, and E. M. Mueller. "Alloy phase diagrams." *ASM international* 4 (2016).

- [36] Massalski T. B H Okamoto and ASM International. 1990. Binary Alloy Phase Diagrams. 2nd ed. Materials Park Ohio: ASM International
- [37] Batalu, D., Georgeta Cosmeleata, and A. Aloman. "Critical analysis of the Ti-Al phase diagrams." UPB Sci. Bull. Ser. B Chem. Mater. Sci 68.4 (2006): 77-90.
- [38] Robertson, I. M., and C. M. Wayman. "Ni₅Al₃ and the nickel-aluminum binary phase diagram." Metallography 17.1 (1984): 43-55.
- [39] Saunders, N. "Phase diagram cAlculations for Ni-based superalloys." ROLLS ROYCE PLC-REPORT-PNR (1996).
- [40] Okamoto, H. (1993). Al-Ni (Aluminum-nickel). Journal of phase equilibria, 14(2), 257-259
- [41] Ma, Yong, and alan J. Ardell. "The ($\gamma + \gamma'$) / γ' phase boundary in the Ni–Al phase diagram from 600 to 1200° C." International Journal of Materials Research 94.9 (2022): 972-975.
- [42] Nagpal, P., and I. Baker. "Effect of cooling rate on hardness of FeAl and NiAl." Metallurgical Transactions A 21 (1990): 2281-2282.
- [43] Westbeook, J. H. "Temperature Dependence of Hardness of the Equi-Atomic Iron Group Aluminites." Journal of the electrochemicAl society 103.1 (1956): 54.
- [44] Kaneno, Y., T. Yamaguchi, and T. Takasugi. "Hot rolling workability, texture and grain boundary character distribution of B2-type FeAl, NiAl and CoTi intermetallic compounds." Journal of materiAls science 40 (2005): 733-740.
- [45] Kogachi, M., S. Minamigawa, and K. Nakahigashi. "Determination of long range orderand vacancy content in the NiAl β' -phase alloys by x-ray diffractometry." Acta metallurgica et materiAlia 40.6 (1992): 1113-1120.
- [46] Davis, Joseph R., ed. ASM specialty handbook: heat-resistant materials. Asm International, 1997.).
- [47] Massalski, Thaddeus B. "Binary alloy phase diagrams." ASM 2 (1986).
- [48] Matsuura, Kiyotaka, et al. "Padding, welding and freeform fabrication of nickel aluminite intermetallic compound by reactive rapid prototyping process." Materials transactions 43.5 (2002): 1146-1152.
- [49] Davis, Joseph R., ed. ASM specialty handbook: heat-resistant materials. Asm International, 1997.
- [50] Yener, Tuba, et al. "Low temperature aluminising of Inconel 718 alloy by pack cementation (ICCESEN 2017)." (2019).
- [51] Döleker, Kadir Mert, et al. "Enhancing the wear and oxidation behaviors of the Inconel 718 by low temperature aluminizing." Surface and Coatings Technology 412 (2021): 127069.
- [52] Wang, Jiqiang, et al. "Oxidation behavior of thermalbarrier coatings with a TiAl 3 bond coat on γ -TiAl alloy." Journal of Thermal Spray Technology 24 (2015): 467-475.

- [53] Cinca, N., and J. M. Guilemany. "Thermalspraying of transition metal aluminates: An overview." *Intermetallics* 24 (2012): 60-72.
- [54] Rosa, Roberto, et al. "Single step combustion synthesis of β -NiAl-coated γ -TiAl by microwave ignition and subsequent annealing." *Surface and Coatings Technology* 232 (2013): 666-673.
- [55] Masset, Patrick J., ve diğeri. "CVD ile nikel aluminizasyonunun optimizasyonu." *Kusur ve Difüzyon Forumu*. Cilt 323. Trans Tech Yayınları Ltd, 2012.
- [56] Bozza F, Bolelli G, Thoma M *Surface and Coatings Technology* (2014) 239 147-159.
- [57] Muhaffel, Cempura, Menekse, & Czyrska-Filemonowicz, 2016
- [58] Sistemteknik/ferrous/nitrasyon/20-03
- [59] tr.iksvacuum.com/news/what-is-physical-vapor-deposition-pvd-18975486.html
- [60] Shimada, Masashi. Report on the deuterium retention in CVD coated W on SiC in support of the Ultramet Company's Small Business Innovation Research (SBIR) project: SOW DE-FG02-07ER84941. No. INL/EXT-12-26209. Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States), 2012.
- [61] malzemebilimi.net/cvd-kimyasal-buhar-biriktirme-kaplama-nedir.html
- [62] Guo, Rui, et al. "Clinical outcomes of volume-modulated arc therapy in 205 patients with nasopharyngeal carcinoma: an analysis of survival and treatment toxicities." *PLoS One* 10.7 (2015): e0129679.
- [63] Bai, C. Y., Luo, Y. J., & Koo, C. H. (2004). Improvement of high temperature oxidation and corrosion resistance of superalloy IN-738LC by pack cementation. *Surface and Coatings Technology*, 183(1), 74-88. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.011>
- [64] Westbook, J. H. "Temperature Dependence of Hardness of the Equi-Atomic Iron Group Aluminates." *Journal of the electrochemical society* 103.1 (1956): 54.
- [65] Özdoğan, L. (2017). Takım çeliklerinin kutu sementasyon tekniği kullanılarak yüksek aşınma direncine sahip TiBC tabakasıyla kaplanması [Yüksek Lisans Tezi]. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi.
- [66] ASM Handbook 13A Corrosion, Vol 13, 2003.
- [67] (Pérez, FJ ve diğeri. "Müllitin koruyucu kaplamalarının öncüsü olarak akışkan yataklı reaktör tekniğinde kimyasal buhar biriktirme yoluyla alüminyum ve silikonun birlikte biriktirilmesi." *Yüzey ve Kaplama Teknolojisi* 184.2-3 (2004): 361-369.
- [68] Ravi, Vilupanur Alwar. Simultaneous chromizing-aluminizing of nickel and nickel base alloys by halide activated pack cementation. The Ohio State University, 1988.
- [69] Lin, N., Xie, F., Wu, X., Tian, W., Influence of process parameters on thickness and wear resistance of rare earth modified chromium coatings on P110 steel synthesized by pack cementation. *J. Rare Earths*, 29(4) 396–400, 2011.

- [70] Bianco, R., Rapp, R. A., Pack cementation diffusion coatings., in Metallurgical and Ceramic Protective Coatings, Springer Netherlands, 1996, 236–260.
- [71] E. O. Ezugwu, J. Bonney, and Y. Yamane, “An overview of the machinability of aeroengine alloys,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 134, sayı 2, ss. 233–253, 2003.
- [72] Guo, Y., Wang, Y., Wen-Ping, W. and Zhao, D., “Atomistic simulation of martensitic phase transformation at the crack tip in B2 NiAl”, *Acta Materialia*, 55 (11): 3891-3897 (2007).
- [73] Mutlu, Enes. Termoreaktif difüzyon yöntemi ile nikel alüminite oluşturulması ve özelliklerinin incelenmesi= Creation of nickel aluminite by the thermoreactive diffusion technique and investigation of its properties. MS thesis. Sakarya Üniversitesi, 2023.
- [74] Arabacı, E. (1994). Çelik bantların sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanması (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [75] Paul, Aloke, and Sergiy Divinski, eds. *Handbook of Solid State Diffusion: Volume 1: Diffusion Fundamentals and Techniques*. Vol. 1. Elsevier, 2017.
- [76] Ke, Liming, et al. "Al–Ni intermetallic composites produced in situ by friction stir processing." *Journal of alloys and Compounds* 503.2 (2010): 494-499.
- [77] Yener, Tuba, Suayb Cagri Yener, and Sakin Zeytin. "Electromagnetic-shielding effectiveness and fracture behavior of laminated (Ni–NiAl₃) composites." *Mater. Tehnol* 50.6 (2016): 899-902.
- [78] Atapek, Şaban Hakan, et al. "Effect of pack characteristics and process parameters on the properties of aluminite-coated Inconel 625 alloy." *Materials Testing* 65.11 (2023): 1657-1667.
- [79] Erdogan, Azmi, et al. "Low-temperature aluminizing influence on degradation of nimonic 80A surface: Microstructure, wear and high temperature oxidation behaviors." *Surfaces and Interfaces* 25 (2021): 101240.
- [80] Mahmoudi, H., Mehdi Hadavi, S. M., & Palizdar, Y. (2021). Characterization, growth kinetics and formation mechanism of aluminite coating by plasma paste aluminizing on IN738. *Vacuum*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109968>
- [81] Sarraf, S. H., Soltanieh, M., & Rastegari, S. (2023). Reactive air aluminizing of a nickel-based superalloy (IN738LC): Coating formation mechanism. *Surface and Coatings Technology*, 456. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129229>
- [82] Yener, Tuba, et al. "Formation, characterization, and wear behavior of aluminide coating on mirrax® ESR steel by low-temperature aluminizing process." *Journal of Tribology* 143.1 (2021): 011703.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Muhammet ALAOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2024 , Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM

- 2021-Halen Mes Makine Elek. Kim. San. A.Ş.'de 2,5 yıl Üretim Mühendisi olarak çalıştı ve Kalite Mühendisi olarak devam etmekte.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- 3rd International Conference on Scientific and Academic Research dergisinde makale yayınlandı.

DİĞER ESERLER:

- TÜBİTAK 2209-B Sanayi Destekli Lisans Bitirme Projesi yaptı