

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TOZ YATAKLI LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN INCONEL
718 SÜPERALAŞIMININ BORLAMA İŞLEMİ SONRASI
KARAKTERİZASYONU

Uğur MOGAN

Danışman
Doç. Dr. Ahu ÇELEBİ

Ek Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İlyas TÜRKMEN

MANİSA-2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Uğur MOGAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Uğur MOGAN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

Doç. Dr. Ahu ÇELEBİ

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İlyas TÜRKMEN

Inconel 718, uçak ve uzay endüstrisinde gaz türbin motor parçaları gibi yüksek sıcaklık ortamlarında çalışmaya uygun, çökme sertleşmesi mekanizmasıyla dayanımı arttırılan nikel esaslı bir süper alaşımdır. Yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanımını muhafaza edebilmesi, korozyon direnci, ısıl yorulma dayanımı, oksidasyon direnci, kolay dövülebilirlik ve kaynaklanabilirlik alaşımın öne çıkan özelliklerindendir. Bu mekanik özellikler alaşımı; kompresör, türbin diski gibi uçak motor parçaları uygulamaları için tercih edilen bir malzeme yapmıştır. Seçici Lazer Ergitme (SLE) yönteminde, tabla üzerine serilmiş olan tozlar, nihai parçayı oluşturuncaya dek katman katman lazer ışınları ile ergitilerek parça üretimi gerçekleştirilir. Bu sayede, yüksek hassasiyet ve karmaşıklığa sahip üç boyutlu bileşenlerin oluşturulması mümkün hale gelir. Bu yöntemle, kobalt-krom, paslanmaz çelik, titanyum, Inconel ve benzeri metal tozlarından tamamen işlevsel parçaların oluşturulması mümkündür. Borlama, yüzeyin sertleştirilmesi için uygulanan termokimyasal bir kaplama yöntemidir ve yüksek sıcaklıklarda bor elementinin metal yüzeye difüzyonu sonucu altlık malzeme yüzeyinde borür katmanı oluşturulması esasına dayanmaktadır. Kutu borlama tekniği, karbürizasyon sürecine benzer olup, diğer borlama metodlarına kıyasla daha basit ve ekonomik bir seçenek oluşturur. Bu çalışmada, SLE yöntemi ile üretilen Inconel 718 alaşımında, farklı ısıl işlem sürelerinin kaplama kalınlığına etkisi ve mikroyapıda oluşan fazların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Buna ek olarak yapılan kaplama uygulamalarının aşınma, korozyon direnci ve mikrosertlik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Borlama prosesi sonrasında yapıda oluşan fazların ve oluşan borlama tabakasının özelliklerinin incelenmesi amacıyla, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, optik mikroskop analizi, X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi, mikrosertlik ölçümleri, korozyon ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Inconel 718, eklemeli imalat, ısıl işlem, borlama.

2024, 74 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Uğur MOGAN

Manisa Celal Bayar University

Graduate School of Education

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor

Assoc. Prof. Ahu ÇELEBİ

Co-Supervisor

Asst. Prof. Dr. İlyas TÜRKMEN

Inconel 718 is a nickel-based superalloy whose strength is increased by precipitation hardening mechanism, suitable for working in high temperature environments such as gas turbine engine parts in the aircraft and space industry. The alloy is characterized by its ability to maintain its high strength at high temperatures, corrosion resistance, thermal fatigue strength, oxidation resistance, easy forgeability and weldability. These mechanical properties make the alloy a preferred material for aircraft engine parts applications such as compressors and turbine disks. In the Selective Laser Melting (SLE) method, the powders laid on the table are melted with laser beams layer by layer until they form the final part. This makes it possible to create three-dimensional components with high precision and complexity. With this method, it is possible to create fully functional parts from metal powders such as cobalt-chromium, stainless steel, titanium, Inconel and the like. Boriding is a thermochemical coating method applied for surface hardening and is based on the formation of a boride layer on the surface of the base material as a result of the diffusion of the element boron into the metal surface at high temperatures. The pack boriding technique is similar to the carburization process and provides a simpler and more economical option compared to other boriding methods. In this study, it is aimed to determine the effect of different heat treatment times on the coating thickness and the phases formed in the microstructure of Inconel 718 alloy produced by SLE method. In addition, the effects of coating applications on wear, corrosion resistance and microhardness properties were investigated. Scanning electron microscopy (SEM) analysis, optical microscope analysis, X-ray diffraction (XRD) analysis, microhardness measurements, corrosion and wear tests were carried out in order to investigate the phases formed in the structure and the properties of the boriding layer formed after the boriding process.

Keywords : Inconel 718, additive manufacturing, heat treatment, boriding.

2024, 74 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Inconel 718, uçak ve uzay endüstrisinde gaz türbin motor parçaları gibi yüksek sıcaklık ortamlarında çalışmaya uygun, çökme sertleşmesi mekanizmasıyla dayanımı arttırılan nikel esaslı bir süper alaşımdır. Bu çalışmada, SLE yöntemi ile üretilen Inconel 718 alaşımı, ısıtıl işlem ile birlikte eş zamanlı olarak farklı sürelerde borlama yapılarak, farklı borlama sürelerinin kaplama kalınlığına etkisi incelenmiş ve mikroyapıda oluşan fazların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Buna ek olarak yapılan borlama uygulamalarının aşınma, korozyon direnci ve diğer mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Borlama prosesi sonrasında yapıda oluşan fazların, oluşan kaplama tabakasının özelliklerinin, aşınma ve korozyon özelliklerinin incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM), optik mikroskop analizi, X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi, sertlik ölçümleri, aşınma ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir.

Yüksek Lisans öğrenimim boyunca her türlü desteği sağlayan ve araştırmalarımın yön veren saygıdeğer tez danışmanım Doç. Dr. Ahu ÇELEBİ ve tez ek danışmanım Dr. İlyas TÜRKMEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda destek olan çok değerli arkadaşlarım Doğukan KALINDAMAR, Bedirhan TURAN ve Merve KALKAN'a, iş hayatımda lisansüstü eğitimimi tamamlayabilmek adına anlayışla destek olan yardımlarına sıklıkla başvurduğum çok değerli çalışma arkadaşlarım Mert KARA ve Bihter DÖKEL'e şükranı bir borç bilir, teşekkürlerimi sunarım.

Uğur MOGAN

Manisa, 2024

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC : Air Cooling

DA : Direct Age

EDS : Enerji Dağılımlı X-ışınları Analizi

FDM : Ergiyik Yığarak Biriktirme

HMK : Hacim Merkezli Kübik

HMT : Hacim Merkezli Tetragonal

HSP : Hegzagonal Sıkı Paket

LPBF : Toz Yataklı Lazer Ergitme

Ni₃Nb : İkincil Sertleştirici Faz

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

SLE : Seçici Lazer Ergitme

SLS : Seçici Lazer Sinterleme

STD : Standart Heat Treatment

TCP : Topologically Close Packed

TEM : Geçirimli Elektron Mikroskobu

TTT : Time-Temperature-Transformation

YMK : Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Seçici lazer ergitme yöntemi (SLE) [2].	5
Şekil 2. 2. Kristal yapılar: (a) östenitik matris (γ) YMK kristal yapısı, (b) γ' - Ni ₃ (Al,Ti) YMK yapısı [18].	15
Şekil 2. 3. Nikel esaslı süper alaşımlarda fazlar ve krom miktarına bağlı mikroyapı değişimi [13].	17
Şekil 2. 4. Uçak gaz türbin parçaları: (a) türbin diski, (b) türbin kanatçıkları [17]. ..	19
Şekil 2.5. Isıl işlem koşullarına bağlı değişen Inconel 718 çekme dayanımı [23].	23
Şekil 2.6. Yüksek sıcaklıkta solüsyona alınmış ardından 650°C’de yaşlandırılmış Inconel 718, sertlik-yaşlandırma süresi ilişkisi [23].	24
Şekil 2.7. Inconel 718 ısıtma işlem soğutma hızı-sertlik ilişkisi [23].	25
Şekil 2.8. Inconel 718 sıcaklık-zaman dönüşüm diyagramı [24].	27
Şekil 2.9. 927 °C tavlama sıcaklığında, tavlama süresi- δ fazı çökelme davranışı [23].	28
Şekil 2.10. Sıcak haddelenmiş Inconel 718: (a) 954°C’de solüsyona alınmış, 1000X büyütme, (b) 1066°C’de solüsyona alınmış, 100X büyütme [25].	29
Şekil 2.11. Solüsyona alınmış ve 955°C’de 3,5 saat yaşlandırılmış Inconel 718 tane sınırlarında oluşan karbür çökeltileri ve δ fazı: (a) 1000X büyütme, (b) 5000X büyütme [20].	29
Şekil 2.12. Inconel 718 uygulama alanları: (a) kompresör rotoru, (b) krayojenik tank, (c) shaft, (d) türbin diski.	30
Şekil 2.13. Kutu (katı) borlama işleminin şematik gösterimi [35].	33
Şekil 3.1. Deneysel çalışmaların yol haritası.	36
Şekil 3.2. ENAVISION-250 metal eklemeli imalat makinesi [44].	38
Şekil 3.3. Inconel 718 deney numunelerinin SLE cihazında üretildikten sonraki görüntüleri.	38
Şekil 3.4. Micromeritics AccuPyc II 1345 gaz piknometre yoğunluk ölçüm cihazı.	39
Şekil 3.5. Numunelere uygulanan ısıtma işlem rejimi.	40

Şekil 3.6. Borlama kutusu ölçüleri [47].	41
Şekil 3.7. Struers Labotom-3 masa üstü numune kesme cihazı.	43
Şekil 3.8. Struers CitoPress-1 otomatik bakalite alma cihazı.	44
Şekil 3.9. Nikon LV 100 marka optik mikroskop.	44
Şekil 3.10. Borlama işlemi için kullanılan ısıtma fırınları.	44
Şekil 3.11. Mikrosertlik ölçümü için kullanılan ölçüm cihazı.	45
Şekil 3.12. Korozyon ölçümü için kullanılan düzenek.	47
Şekil 3.13. CSM Instrument Tribometer ball on disk aşınma testi cihazı.	48
Şekil 4.1. Partikül boyut analizi, Hacim Yoğunluğu- Parçacık Boyutu grafik gösterimi.	49
Şekil 4.2. Inconel 718 tozunun SEM görüntüsü.	49
Şekil 4.3. 250 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B4 numunesi, (b) BA2 numunesi.	52
Şekil 4.4. 500 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B2 numunesi, (b) B4 numunesi, (c) BA2 numunesi.	52
Şekil 4.5. 1000 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B2 numunesi, (b) B4 numunesi, (c) BA2 numunesi.	53
Şekil 4.6. 2000 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B2 numunesi, (b) B4 numunesi, (c) BA2 numunesi.	53
Şekil 4.7. Isıl işlem ve kaplama sonrası Inconel 718 numunelerinin XRD analizi. ..	55
Şekil 4.8. 5000 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B2 numunesi, (b) BA2 numunesi.	56
Şekil 4.9. 10000 X büyütmedeki 954-2 saat borlama SEM görüntüsü.	56
Şekil 4.10. B2 numunesinin kesitinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.	57
Şekil 4.11. B4 numunesinin kesitinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.	58

Şekil 4.12. BA2 numunesinin kesitinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.	59
Şekil 4.13. Kaplama sonrası mikrosertlik ölçüm gösterimi.	60
Şekil 4.14. A1 numunesine ait aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri.	61
Şekil 4.15. B2 numunesine ait aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri.	62
Şekil 4.16. B4 numunesine ait aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri.	62
Şekil 4.17. BA2 numunesine ait aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri.	63
Şekil 4.18. Aşınma testi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe grafiği.	63
Şekil 4.19. Aşınma testi sonucunda elde edilen ortalama aşınma alanları.	64
Şekil 4.20. Korozyon analiz grafikleri, a) OCP, b) Tafel.	66
Şekil 4.21. Korozyon hızları (mm/yıl).	67

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2. 1. Eklemeli imalat yöntemleri gösterimi [8].....	4
Tablo 2. 2. Süper alaşımlarda alaşım elementleri % kompozisyon miktarları [13]... 10	
Tablo 2. 3. Süper alaşımların sınıflandırılması [13].	12
Tablo 2.4. Inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri [22].	20
Tablo 2.5. Isıl işlem koşullarına bağlı olarak Inconel 718 mekanik özellikleri [17]. 22	
Tablo 2.5. Inconel 718 % ağırlıkça nominal kimyasal kompozisyonları [22].....	25
Tablo 3.1. Inconel 718 tozu özellikleri.	37
Tablo 3.2. Inconel 718 tozunun kimyasal bileşimi.	37
Tablo 3.3. Inconel 718 numunesinin üretim parametreleri.....	38
Tablo 3.4. Numunelere uygulanan ısıl işlem rejimleri.	39
Tablo 3.5. Kutu borlamada kullanılan tozların kimyasal ve fiziksel özellikleri, ağırlıkça % dağılımları.	41
Tablo 3.6. Kutu boralüminyumlamada kullanılan tozların kimyasal ve fiziksel özellikleri, ağırlıkça % dağılımları.....	42
Tablo 4.1. Çözeltiye alınmış ve kaplanmış numunelerin farklı büyütme ölçeklerinde mikroyapı görüntüleri.	51
Tablo 4.2. Kaplanmış numunelerin kaplama kalınlıkları ve mikroyapı görüntüleri. 54	
Tablo 4.3. Mikrosertlik ölçümleri sonucu elde edilen ortalama Vickers sertlik (HV) değerleri.....	60
Tablo 4.4. Aşınma testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.....	64
Tablo 4.5. Aşınma testi uygulanan numunelerin aşınma testi sonuçları.....	65
Tablo 4.6. Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon verileri.....	67
Tablo 4.7. Elde edilen sonuçların genel gösterimi.....	70

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLOLAR DİZİNİ	xii
İÇİNDEKİLER	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi ve Sınıflandırılması	4
2.1.1. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi	5
2.2. Süper Alaşımlar	8
2.2.1. Süper Alaşımların Sınıflandırılması.....	11
2.2.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar	12
2.2.3. Süper Alaşımların Uygulama Alanları	17
2.3. Inconel 718 Süper Alaşımı Genel Özellikleri	19
2.3.1. Isıl İşlem Rejimi.....	21
2.3.2. Alaşım Elementlerinin Etkileri	25
2.3.3. Inconel 718 Faz Dönüşümleri ve Mikroyapı Özellikleri	26
2.3.4. Inconel 718 Uygulama Alanları	30
2.4. Borlama	31
2.4.1. Kutu Borlama Yöntemi	32
2.4.2. Borlama Bileşimi	33
2.5. Boralüminyumlama.....	34
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36

3.1.	Kullanılan Hammadde ve Cihazlar	36
3.2.	Eklemeli İmalat ile Numune Üretimi	37
3.2.1.	Proses Parametreleri	37
3.3.	Numune Isıl İşlem ve Kaplama Uygulamaları	39
3.3.1.	Isıl İşlem Rejimi	39
3.3.2.	Borlama İşlemi	40
3.3.3.	Boralüminyumlama İşlemi	42
3.4.	Metalografik Numune Hazırlama	42
3.5.	SEM İncelemeleri	45
3.6.	Mikrosertlik Ölçümleri	45
3.7.	XRD Analizi	46
3.8.	Korozyon Testi	46
3.9.	Aşınma Testi	47
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	49
4.1.	Tozun Karakterizasyonu	49
4.2.	SLE ile Üretilmiş Numunelerin Yoğunluk Ölçümü	50
4.3.	Borlama ve Boralüminyumlama Uygulanan Numunelerin Mikroyapı ve Yüzey Karakteristiğinin Değerlendirilmesi	50
4.4.	Borlama ve Boralüminyumlama Uygulanan Numunelerin XRD Analiz Sonuçları	54
4.5.	Elementel Analiz Sonuçları (EDS Analizi)	55
4.6.	Mikrosertlik Ölçümü Sonuçları	59
4.7.	Aşınma Testi Sonuçları	60
4.8.	Korozyon Testi Sonuçları	65
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	69
	KAYNAKLAR	72

1. GİRİŞ

Inconel 718 alaşımı yüksek sıcaklık performansı, yüksek akma ve çekme gerilmesine sahip, sürünme direnci yüksek, iyi oksidasyon ve korozyon direnci nedeniyle havacılık, uzay, nükleer enerji, enerji ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılan nikel esaslı bir süper alaşımdır. Dayanımı, çökme sertleşmesi mekanizmasıyla arttırılmıştır. Özellikle bu alaşım, uçak ve uzay endüstrisinde tercih edilen bir malzemedir çünkü yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığını korur, korozyon direnci sağlar ve termal yüklerle başa çıkabilir. Ayrıca, kolayca dövülebilir ve kaynaklanabilir olması da dikkat çekicidir. Bu mekanik özellikler, uçak motorlarında kullanılan parçalar için ideal bir seçim yapar [1].

3D yazıcılar, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, istenen şeklin katmanlar halinde üst üste eklenmesiyle parça oluşturur. Bu süreç, voksel denilen hacim elemanlarının bir araya gelmesiyle gerçekleşir ve eklemeli imalat olarak bilinir. Burada, üç boyutlu bir CAD modeli, üçgensel bir ağ yapısına sahip bir model olan STL dosyası formatına dönüştürülür. Ardından, özel yazılımlar kullanılarak model katmanlara ayrılır ve 3D yazıcıda bu katmanlar birbirinin üzerine eklenerek parça oluşturulur. Bu esnek süreç, tasarımın basitleştirilmesine ve karmaşık bileşenlerin hızlı ve kolay bir şekilde üretilmesine olanak tanır [2].

Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi, Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemine oldukça benzer olsa da SLE'nin belirgin bir özelliği işlem sırasında toz malzemelerin tamamen ergitilmesidir. SLE işlemi sırasında, tozlar katman katman ergitilerek bitmiş parça oluşturulur. Bu şekilde, yüksek hassasiyet ve karmaşıklığa sahip üç boyutlu bileşenler üretilebilir. Bu teknikle, kobalt-krom, paslanmaz çelik, titanyum, inconel gibi metal tozlarından tamamen işlevsel parçalar üretmek mümkündür. Bu yöntem, sürekli evrilen tasarımlar ve parçalar için idealdir. Ancak, sabit tasarımlı ve büyük ölçekte üretim gerektiren parçalar için maliyetli olabilir. Ayrıca, 3D metal yazıcıların belirli bir üretilebilir parça boyut sınırlaması olduğu için, çok büyük boyutlardaki parçaların üretimi için uygun olmayabilir [3,4].

Havacılık ve uzay endüstrilerinin öncelikli ihtiyaçlarından biri, az sayıda üretilen ancak yüksek mekanik özelliklere, hafifliğe ve karmaşık geometriye sahip parçaların sürekli olarak elde edilmesidir. Bu ihtiyaçlar, havacılık uygulamaları için hayati bir imalat prosedürü olan eklemeli üretim metodunu ortaya çıkarmıştır.

Havacılık alanında en yaygın olarak kullanılan eklemeli üretim teknikleri Elektron Işını Eritme (EBM), Seçici Lazer Ergitme (SLE) ve Elektron Işını Erozyonu (EIE) olmuştur. Ancak, eklemeli üretim yönteminin bazı kısıtları da bulunmaktadır. Bu kısıtlar mekanik anizotropi, mikro yapısal homojenlik eksikliği, kalıntı stresler, boyutsal hassasiyet ve yüzey düzeltme ihtiyacını içerir.

Eklemeli üretim teknolojilerine olan talebin ve kullanımının artmasıyla birlikte, malzeme ve ekipman maliyetlerinin önümüzdeki 10 ila 30 yıl içinde önemli ölçüde düşmesi beklenmektedir. Son yedi yılda eklemeli üretim sektörü yaklaşık olarak 5,7 kat büyümüştür. Havacılık endüstrisinde eklemeli üretim teknolojilerinin kullanımındaki artışın ise yaklaşık 1 milyar dolarlık bir değere ulaşması beklenmektedir [5,6].

Borlama, yüzeyin sertleştirilmesi için bir termokimyasal prosedürdür. Yüksek sıcaklıklarda bor elementinin metal yüzeye emdirilmesi sonucu borür katmanı oluşur. Herhangi bir bor bileşiği bor kaynağı olarak kullanılabilir. Borlama genellikle demir dışındaki metaller ve sermetler gibi materyallere uygulanır. Termokimyasal yüzey düzeltme işlemi, genellikle 700-1050 °C arasında ve 1-12 saat sürede gerçekleştirilir. Bu teknik, katı, sıvı ve gaz halindeki ortamlarda uygulanabilir. Kutu borlama tekniği, karbürizasyon sürecine benzer ve diğer borlama metodlarına kıyasla daha teknolojik, basit ve ekonomik bir seçenek sunar [7].

Bu çalışmada, yüksek sıcaklık performansı, yüksek akma ve çekme gerilmesine sahip, sürünme direnci yüksek, iyi oksidasyon ve korozyon direnci nedeniyle havacılık, uzay, nükleer enerji, enerji ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılan Inconel 718 alaşımı, toz yataklı lazer ergitme (SLE) yöntemiyle üretildikten sonra borlama ve boralüminyumlama işlemi uygulanması planlanmıştır. Farklı kaplamaların aşınma davranışı, korozyon direnci, mikrosertlik ve mikroyapı üzerine etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Inconel 718 alaşımı geçmişten günümüze yoğun şekilde geleneksel yöntemler kullanılarak ürüne dönüşmüştür. Ancak özellikle kullanım açısından bakıldığında Inconel 718 alaşımı havacılık, uzay, nükleer enerji, enerji gibi stratejik alanlarda kullanıldığından geleneksel üretimlerin yanı sıra eklemeli imalatla oldukça fazla araştırılan bir alaşım haline gelmiştir. Karmaşık geometriye sahip parçaların imalatı, eklemeli imalat teknolojilerinden herhangi birini kullanmanın ana avantajlarından biridir. Dolayısıyla bu projede, toz yataklı lazer ergitme eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Inconel 718 alaşımına, bor ve boralüminyum olarak 2 farklı

kutu borlama karışımı hazırlanarak borlama ve boralüminyum kaplama uygulamaları yapılmıştır. Kaplama uygulanan numunelerde mikroyapıda, aşınma, korozyon davranışında ve malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Borlama yapılan numunelerde 2 farklı (2-4 saat) borlama süresinde, boralüminyumlama yapılan numunede sadece 2 saat boralüminyumlama süresinde argon (Ar) atmosferi altında tüp fırında ısıtılma işlemi ile birlikte uygulanmıştır. Ayrıca kaplamaların etkisinin daha iyi anlaşılması için standart AMS 5662 ısıtılma işlemi (954°C’de 1 saat çözeltiye alma, 718 °C’de 8 saat 1. yaşlandırma, 621 °C’de 18 saat 2. yaşlandırma) uygulanan numune de çalışmaya dahil edilmiştir. Kutu borlama prosesi sonrasında yapıda oluşan fazlar, oluşan kaplama tabakasının özellikleri incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM), optik mikroskop analizi, kimyasal-elementel (X-ışınları difraksiyonu (XRD), EDS analizleri), mekanik karakterizasyon (mikro sertlik ölçümleri, aşınma testi, yüzey pürüzlülük ölçümleri) yapılmış ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi ve Sınıflandırılması

Eklemeli (katmanlı) imalat, çeşitli malzemeler kullanılarak nesnelerin üç boyutlu geometrik verilerine göre oluşturulan katmanlarının üst üste eklenmesi prensibiyle çalışan bir imalat yöntemidir. Bu yöntem, ilk olarak 1980'lerde stereolitografi teknolojisi ile geliştirilmiş ve hızlı prototipleme ihtiyacını karşılamak amacıyla ortaya çıkmıştır. Ardından farklı şirketler tarafından seçmeli lazer sinterleme (SLS), eriyik yığarak modelleme (FDM) gibi metodlar piyasaya sürülmüştür.

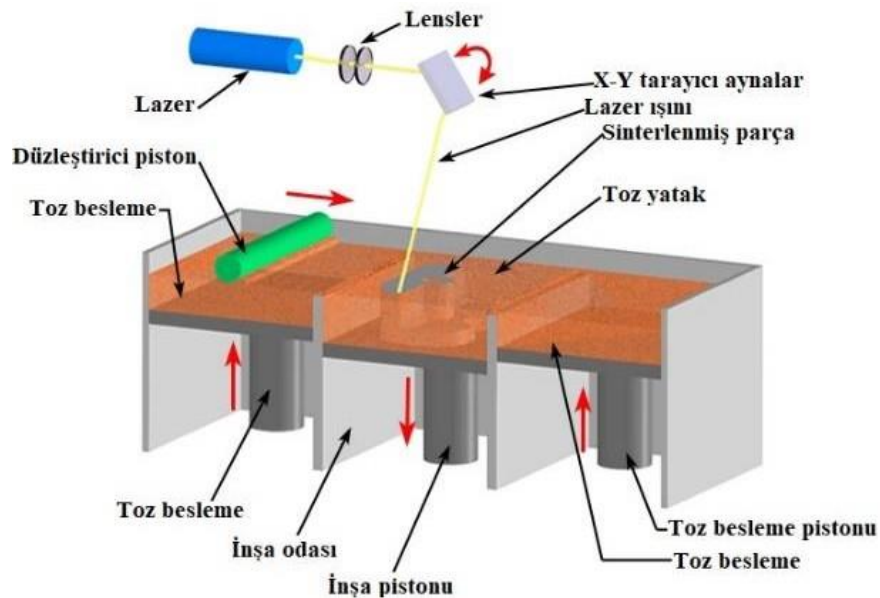
Tablo 2. 1. Eklemeli imalat yöntemleri gösterimi [8].

	TİP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
EKLEMELİ İMALAT	SIVI	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal Enerji	-Düşük yazıcı maliyeti -Çoklu malzeme ile baskı -Yüksek mukavemet -Düşük parça çözünürlüğü -Zayıf yüzey iş-sonu -Düşük baskı hızı
		Polimerize edilebilir	Fotopolimerizasyon	SL (SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV ışını	-Yüksek baskı hızı -Yüksek parça çözünürlüğü -Yüksek detay -Malzeme maliyeti yüksek
				DLP		Projeksiyon	-Yüksek baskı hızı -Çözünürlük,projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır
			Malzeme püskürtme	PJ	Fotopolimer, Wax	UV ışını	-Çoklu malzeme ile baskı -İyi yüzey iş-sonu -Yüksek doğruluk -Yüksek detay
	KATI	Yapışık objeler	Sac laminasyon	LOM	Kağıt Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer Işını	-İyi yüzey iş-sonu -Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük -Büyük boyutlu malzeme basabilme -Dikey yönde zayıf mukavemet
	TOZ	Eritme	Toz yataklı eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek-Güçlü Lazer Işını	-Yüksek doğruluk -Yüksek detay -Tam dolu parça üretimi -Yüksek mukavemet -Destek yapıları gerekmez
				DMSL			
				SLM	Metal tozu, Seramik tozu		
				EBM			
		Direk enerji depoalama	LENS	Erimiş metal tozu	Lazer Işını	-Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme -Son-işlem gerekir	
			EBAM				
	Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, Kum	Termal Enerji	-Renkli obje baskısı -Destek yapıları gerekmez -Geniş malzeme seçeneği -Yüksek baskı hızı -Son-işlem için infiltran malzeme gerektirir -Düşük dayanım -Yüksek gözeneklilik	

Katmanlı imalat, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla yeni bir teknoloji olmasına rağmen, halk arasında genellikle 3B baskı olarak bilinir. Parça geometrisi bilgisayar ortamında oluşturulur ve çeşitli yazılımlarla katmanlara ayrılıp 3B yazıcılara dijital dosya formatında iletilerek baskıya hazır hale getirilir. Bu yöntemde daha az hammadde kullanılır ve birçok ebatta yazıcı tipi bulunmaktadır. Katmanlı imalatın en önemli avantajı karmaşık geometrilere sahip parçaların yüksek doğruluk ve hassasiyette üretilebilmesidir. Ancak, yüksek üretim adetlerine uygun olmayabilir ve genellikle baskı işlemi tamamlandıktan sonra ikincil yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulabilir. Günümüzde eklemeli imalat, özellikle uzay ve havacılık, biyomedikal gibi özel parçaların üretildiği sektörlerde kullanılmaktadır [8]. Eklemeli imalat yöntemleri ve karşılaştırmaları Tablo 2.1’de verilmiştir.

2.1.1. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi

Seçici lazer ergitme (SLE) ya da başka bir deyişle lazer toz yatağında füzyon yöntemi, metal tozlarının bir tabla üzerine serilmesi ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir lazer vasıtasıyla ergitilerek katman katman parça üretilmesi yöntemidir. Parça sanal ortamda katmanlarına ayrılarak her bir tabaka kalınlığı ve her tabaka kalınlığına karşılık gelen lazerin ergiteceği alan programlanır. Ardından kapalı bir ortamda üretime başlanır. Şekil 2.1. seçici lazer ergitme yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 1. Seçici lazer ergitme yöntemi (SLE) [2].

Son yıllarda, özellikle havacılık ve biyomedikal alanlarda, Ni ve Ti alaşımları ile paslanmaz çeliklerin üretiminde Seçici Lazer Ergitme (SLE) yönteminin yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmektedir. Bu alanda yapılan çalışmaların arttığı görülmektedir. Havacılık, uzay, otomotiv, ve tıp gibi sektörlerde, SLE yöntemi ile üretilen parçaların yüksek yorulma ömürlerine sahip olması ve yüzey sorunlarının minimize edilmesi beklenmektedir. SLE yöntemi, karmaşık yapıdaki parçaların üretimine olanak sağlamanın yanı sıra güçlü ve dayanıklı parçaların üretimini de mümkün kılar. Ancak, literatür taraması yapıldığında, bu imalat yöntemi ile üretilen parçaların mekanik ve yüzey özellikleri hakkında yeterli çalışmanın olmaması ve deneyimin az olması, bu yöntemin geleneksel imalat yöntemlerinin yerini alma sürecini yavaşlatmaktadır. Özellikle havacılık, uzay endüstrisi ve savunma sanayinde kullanılacak parçaların kritik fonksiyonlara sahip olduğu ve bu parçaların üretim aşamalarının performanslarını ve güvenilirliğini etkileyeceği bilinmektedir.

SLE, geleneksel üretim yöntemlerine ve diğer eklemeli imalat teknolojilerine kıyasla birçok üstünlüğü bulunan ama aynı zamanda işletme maliyeti yüksek bir 3B baskı teknolojisidir. Nispeten daha yüksek sıcaklıklar tozları yoğun parçalar halinde tamamen kaynaştırabilmesinden dolayı, en çok saf metallerden yapılmış parçalar oluşturmak için kullanışlıdır. SLE parçaları, diğer birçok metal 3B baskılı parçadan çok daha güçlüdür ve bu teknoloji, üst düzey uygulamalarda imrenilen bir teknoloji haline gelmiştir. Aşağıda, SLE teknolojisinin avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir [9]:

Avantajları:

1. SLE, son derece hassas işleme toleranslarına sahip olan tamamen metal bazlı, yüksek performanslı parçalar oluşturur.
2. Yüksek mukavemetli ve özel metalleri kapsayan geniş bir malzeme yelpazesine sahiptir.
3. SLE teknolojisi aracılığıyla herhangi bir karmaşık şekilli geometrinin imalatında pratik olarak hiçbir kısıtlama yoktur. Diğer geleneksel yöntemlerle imal edilmesi teknik olarak mümkün olmayan biyomedikal malzeme bileşenleri, örneğin karmaşık gözenekli iskeleler ve özel olarak tasarlanmış gözeneklere sahip bileşenler, SLE ile tam olarak üretilir.

4. Parçaların işlenmesi sırasında özelliklerin ayarlanabilmesi, fonksiyonelliğin ve işlevselliğin artması.

5. SLE, metal bazlı malzemelerin üretim tekniklerini hızlandırır, parça ve malzeme onarımlardaki gecikmeleri azaltır ve üretim hızını artırır.

6. SLE, özellikle geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında malzeme kullanımını ve israfı azaltır, net şekilli üretim sağlar.

7. SLE'nin çeşitli proses parametrelerinin optimizasyonu, Ti alaşımları için %99,98'e varan parça yoğunlukları ile sonuçlanır. Bu durum medikal veya dental parçaları üretiminin gerekliliklerini yerine getirmek için fabrikasyon parçaların mekanik özelliklerine, korozyon davranışlarına ve işlem hassasiyetlerine olanak sağlar.

8. Net şekilli üretim sağladığı için pahalı takım malzemeleri yatırımına gerek yoktur.

9. SLE, çok ince ve gözenekli yapılar üretmenin önemli avantajlarını sunarken aynı zamanda sadece prizmatik olanlarla sınırlı olmayan çeşitli şekilleri barındırır. Bu özellik SLE'yi implantlar üretmek için tercih edilen teknoloji haline getirir.

Dezavantajları:

1. SLE'de yalnızca tek bileşenli metaller ve iyi akış özelliklerine sahip tozlarla belirli malzemeler kullanılabilir.

2. SLE, parçaları zorlayan/delaminasyona sebebiyet veren ve yapısal bütünlüklerini tehlikeye atabilen sıcaklık gradyanlarına yol açan yüksek enerjili bir işlemdir.

3. SLE parçaları kapsamlı destek yapılarına ihtiyaç duyar ve SLE parçaları bir inert gaz kaynağı gerektirir.

4. SLE parçalarının yüzeyleri pürüzlü bir yüzey kaplamasına sahiptir ve istenilen yüzey için kumlama taşlama ve parlatma gibi ardıl işlem(ler) gerektirir.

5. Ek olarak, imalat işlemi sırasında yüksek iç gerilimi kaldıramayan kırılğan malzemeler ve yüksek sıcaklık malzemeleri, parçaların çatlamasına yol açacaktır ve bu, soğutma hızının düşürülmesiyle (üretim tabla ısıtması kullanılarak) belirli bir dereceye kadar üstesinden gelinebilir.

6. SLE'nin üretilecek parçalar özelinde üretim haznesinin boyutları kadar bir boyut kısıtlaması vardır ve işletme maliyeti yüksektir, ayrıca küçük seri üretim çalışmaları ile sınırlıdır [10,11].

2.2. Süper Alaşımlar

Süper alaşımlar, $\sim 540^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmak üzere geliştirilmiş, Grup VIII B elementleri ve genellikle Fe, Ni, Co ve Cr'un çeşitli kombinasyonları ile eser miktarda W, Mo, Ta, Nb, Ti ve Al içeren alaşımlardır. Süper alaşımların çok yönlü olmaları, yüksek sıcaklıkta yüksek dayanım ile düşük sıcaklıkta sünekliliği ve mükemmel yüzey kararlılığını bir arada bulundurmalarından kaynaklanmaktadır [12]. Yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen diğer uygulamalara kıyasla daha şiddetli mekanik gerilmelerin olduğu ve yüksek yüzey kararlılığının gerekli olduğu uygulamalarda kullanılan alaşımlardır [13,14]. Süper alaşım terimi, ilk olarak II. Dünya Savaşı'ndan kısa bir süre sonra yüksek sıcaklıklarda yüksek performans gerektiren turbo şarjlar ve uçak türbin motorlarında kullanılmak üzere geliştirilmiş bir grup alaşımı tanımlamak amacıyla kullanılmıştır. Modern türbin sistemlerinde yakıt verimliliğini artırma ve emisyonu azaltma amaçlı süper alaşımların performansı üzerine yapılan inceleme, yüksek sıcaklık uygulamaları için bu alaşımların üstünlüğünü ortaya koymaktadır [15,16].

Süper alaşımlar, soğuk deformasyon sonrası sertleştirilebilir ancak bu sertlik genellikle yüksek sıcaklıklara dayanamaz. Bu durum, süper alaşımların yalnızca östenitik yapıda yüzey merkezli kübik (YMK) matrisin doğasından değil, aynı zamanda çökelti oluşturan sertleştirici fazların etkisiyle yüksek dayanıma sahip olmalarından kaynaklanır. Süper alaşımlar genellikle nikel, demir-nikel ve kobalt esaslı olarak sınıflandırılır. Demir-nikel esaslı süper alaşımların dayanımları, nikel esaslı alaşımlara göre daha düşüktür. Ancak, yüksek sıcaklıklarda nikel ve kobalt esaslı süper alaşımların daha yüksek dayanıma sahip olduğu gözlemlenir. Bu nedenle, daha uzun ömürlü uygulamalarda ve yüksek mekanik zorlamalarda nikel ve kobalt esaslı alaşımlar tercih edilir. Düşük sıcaklıklarda ve ihtiyaç duyulan mukavemet çeşidine bağlı olarak, demir-nikel esaslı süper alaşımlar, kobalt veya nikel esaslı süper alaşımlara göre daha yaygın olarak kullanılabilir, çünkü daha düşük maliyetlidirler [13].

Süper alaşımların uygun kimyasal kompozisyona sahip olanları dövülebilir, hadde ile levha haline getirilebilir veya farklı yöntemlerle üretilirler. Genellikle çok daha yüksek oranda alaşımlandırılmış içeriklere sahip olanlar, döküm yöntemiyle üretilirler. Fabrikasyon yapılar, kaynak yaparak veya sert lehimleme ile üretilirler, ancak yüksek oranda alaşımlandırılmış ve yüksek miktarda sertleşme fazı içeren süper alaşımların kaynak yapılması zor olabilir. Dövme süper alaşımların çoğu, krom metali bakımından zengindir ve bu özellik alaşıma yüksek korozyon direnci sağlar.

Dökme süper alaşımlarda ise, başlangıçta krom miktarı fazla iken ilerleyen yıllarda süper alaşımların yüksek sıcaklık dayanımını arttıran diğer alaşım elementlerinin ilavesi sebebiyle azalmıştır [13]. Türbin diskleri, jet türbin kanatçıkları, egzost valfleri, zincir kancaları, ısı dönüştürücülerin başlıkları, valflerin ve pompaların gövdeleri kapalı kalıp dövme yöntemleriyle nikel esaslı alaşımlardan imal edilirler [15].

Süper alaşımlar, 650°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dayanıklılıklarını ve yüzey kararlılıklarını koruyabilen nikel, demir-nikel ve kobalt esaslı alaşımlardır. Süper alaşımın özellikleri, kimyasal bileşimi ve üretim koşulları kontrol edilerek, nihai ürünlerde mükemmel yüksek sıcaklık dayanıklılıkları elde edilebilir. Demir, nikel ve kobalt süper alaşımların matris yapısını oluşturduğunda östenitik yüzey merkezli kübik kristal yapıda bulunurlar. Ancak, saf metal olarak ele alındıklarında kobalt ve demir oda sıcaklığında yüzey merkezli kübik yapıda değildirler. Yüksek sıcaklıklarda veya diğer elementlerle alaşım yapıldığında, demir ve kobalt, allotropik dönüşüme uğrayarak yüzey merkezli kübik yapıya dönüşürler. Nikel ise tüm sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik (YMK) yapısını korur. Süper alaşımlarda mukavemeti artırmak için Mo, Ta, Re, W gibi alaşım elementleri; Cr ve Al oksidasyon direncini sağlamak için, Ti sıcak korozyon direncini sağlamak için ve Ni ise faz kararlılığını sağlamak için ilave edilir. Al ve Ti gamma üssü (γ'), Nb ise gamma iki üssü (γ'') çökelti fazlarını oluşturmak üzere Ni ile birleştirilir. Son zamanlarda, bu alaşım elementleri içinde reniyum (Re) önemli bir yer edinmiştir. Re, γ' fazı kabalaşma hızını azaltmaya yardımcı olur. Tablo 2.2'de süper alaşım türleri içinde alaşım elementlerinin % ağırlıkça kompozisyon miktarları verilmiştir.

Tablo 2. 2. Süper alaşımlarda alaşım elementleri % kompozisyon miktarları [13].

Element	% Kompozisyon	
	Fe-Ni ve Ni esaslı	Co esaslı
Cr	5-25	19-30
Mo,W	0-12	0-11
Al	0-6	0-4,5
Ti	0-6	0-4
Co	0-20	...
Ni	...	0-22
Nb	0-5	0-4
Ta	0-12	0-9
Re	0-6	0-2

Nikel esaslı süper alaşımların yapısında genellikle %50-70 Ni bulunur. Bu alaşımların kullanım verimliliğini artırmak için Mo, Co, Nb, Zr, B, Fe ve diğer elementler ilave edilmiştir. Karbon, tüm alaşımlarda bulunur ve genellikle nikel ve demir-nikel esaslı süper alaşımlarda yaklaşık %0,3'e kadar bulunur. Ancak, karbür dönüşümünün güçlenmesi için kobalt bazlı alaşımlarda daha yüksek miktarlarda bulunabilir.

Süper alaşımların malzeme ve döküm yöntemleriyle ilgili gelişmeler zaman içinde şu şekilde gerçekleşmiştir: İlk olarak 1940'larda polikristal eş eksenli döküm, 1960'larda yönlü katılaşma (DS: directionally solidified), ve son olarak 1970'lerde tek kristalli (SC: single crystal) yapı şeklinde olmuştur. Her bir döküm yöntemindeki ilerlemeler, daha yüksek kullanım sıcaklıklarında daha iyi sonuçlar doğurmuştur. Yönlü katılaşma (DS) yönteminde, sütunsal taneler büyüme eksenine paralel olarak oluşur. Nikel-esaslı süper alaşımlarda, büyüme yönü kristallografik yöndür. Bu yapı, su soğutmalı bir alt plaka içeren bir kalıba sıvı metalin dökülmesiyle elde edilir. Tek kristalli döküm yöntemi ise 1970'lerde geliştirilmiş olup, yönlü katılaşma döküm yöntemindeki teknolojik ilerlemelerin bir sonucudur.

Tek kristal döküm, tane seçimi yoluyla tek bir tane üzerinde yönlü katılaşma yöntemine benzer bir şekilde ilerler. Katılaşma sürecinde, bu tek tane tüm hacmi boyunca büyür. Tek kristalli yapı, tane sınırlarının olmadığı eş eksenli ve yönlü katılaşmış malzemelerde bulunan tane sınırlarını ortadan kaldırarak mükemmel dayanım sağlar. Ayrıca, tane sınırı dayanımını sağlayan karbon, bor, silisyum ve

zirkonyum gibi elementlerin ortadan kaldırılması, tek kristalli malzemenin ergime noktasını yükseltir. Bu durum, alaşımın ergime sıcaklığını artırarak ısı işlem sıcaklığı homojenliğini iyileştirebilir. Böylece γ' fazında tam bir çözünme sağlanır ve alaşımın dayanımı ile maksimum kullanım sıcaklığı artar [12].

2.2.1. Süper Alaşımların Sınıflandırılması

Süper alaşımlar, başlangıçta uçak motoru turboşarjlarında kullanılmak üzere geliştirildi ve son 60 yılda, gaz türbin motoru teknolojisindeki taleplerin artmasıyla hızla gelişti. Bu alaşımlar genellikle üç temel grupta sınıflandırılır: nikel, demir-nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar. Nikel esaslı olanlar, diğer gruplara göre daha düşük ergime sıcaklığına sahiptir (1204°C - 1371°C), ancak mekanik gerilmeler altında en yüksek sıcaklık dayanımına sahiptirler. Kobalt esaslı süper alaşımların, nikel esaslı alaşımlara göre daha iyi kaynaklanabildiği ve daha yüksek termal yorulma direncine sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca, ergime sıcaklığı avantajı nedeniyle, polikristal dökme kobalt esaslı süper alaşımların dayanımı, 2000°F (1093°C) üzerindeki hizmet sıcaklıklarında nikel esaslı süper alaşımlardan daha yüksektir [13].

Mukavemet açısından değerlendirildiğinde, kobalt esaslı alaşımlar genellikle 980°C 'nin üzerindeki sıcaklıklar dışında nikel esaslı alaşımların yerine tercih edilmezler. Özellikle 1200°F (649°C) üzerindeki sıcaklıklarda, nikel ve demir-nikel esaslı süper alaşımlar genellikle katı eriyik sertleşme ile mukavemetlendirilirken, kobalt esaslı süper alaşımlar çökelme sertleşmesi veya karbür çökmesi ile mukavemet kazanırlar ve bu nedenle sürünme-kopma dayanımı daha düşüktür [13]. Yüksek erime noktasına sahip ısıya dayanıklı alaşımlar, uçak motorlarının bileşenlerini üretmede temel malzemelerdir. Bu süper alaşımların yüksek sıcaklıkta güçlü mekanik ve kimyasal özellikleri, jet motorlarında yüksek ısıda çalışan statik ve dinamik parçaların üretimi için elzem hale gelmiştir [14]. Tablo 2.3'te süper alaşım grupları, yapılarındaki alaşım elementlerine göre isimlendirilmiş şekilde verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere Inconel 718 alaşımı, nikel esaslı dövme alaşımlar grubunda yer almaktadır. Endüstride en yaygın olarak kullanılan dövme demir-nikel ve kobalt esaslı ile döküm kobalt esaslı süper alaşımlar tabloda belirtilmiştir.

Tablo 2. 3. Süper alaşımların sınıflandırılması [13].

SÜPER ALAŞIMLAR				
Nikel Esaslı		Demir-Nikel Esaslı	Kobalt Esaslı	
Dövme	Döküm	Dövme	Dövme	Döküm
Inconel (600,601,617,625,702, 706,718,721,X-750)	Inconel (713C, 738)	Incoloy (800,801,802,907, 909,925)	Haynes (25,188)	V-36
Hastelloy (W,B, C-276)	M 252	Haynes 556	Stellite B	X-40
Pyromet 860	Hastelloy X	A-286	S-816	MAR-M918
Nimonic (75,80A, 90,95,100,115)	Udimet 500	V-57		
Udimet (500,520, 630,700)	Rene (80,100)			
Waspaloy	MAR-M 246			

2.2.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımların kombinasyonu olan mukavemet ve dayanıklılık, 700°C'nin üzerindeki sıcaklık koşullarında mekanik özellikleri sağlayarak, yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilen ana malzeme haline gelir. Bu tür alaşımların yüksek sıcaklıkta sürünme, yorulma ve çevresel bozunmalara karşı gösterdiği direnç, bu sıcaklıklardaki kullanımını yaygınlaştırmıştır [16]. Nikel esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmesinin sebepleri şu şekilde sıralanabilir: İlk olarak, nikelin yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısı, atomlar arası bağların artan kohezif enerjisiyle birlikte tokluk ve süneklilik sağlar. Ayrıca, nikel YMK formunda oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar kararlılık gösterir. Bu durum, yapıda yüksek sıcaklık bileşeni olarak kullanılabilmesini sağlar, çünkü bu koşullarda faz dönüşümü gerçekleşmez. Benzer şekilde, nikel gibi YMK yapıli metallerde difüzyon hızı düşüktür, bu da yüksek sıcaklıklarda mikroyapısal kararlılığı sağlar. [13,16]. Nikel esaslı süper alaşımlar üç temel grupta incelenir: Katı

eriyik sertleştirici elementlerle güçlendirilenler, çökelti ile sertleştirilenler ve oksit-dağılım ile güçlendirilenler (ODS).

Katı eriyik alaşımlar, genellikle hiç veya çok az miktarda alüminyum (Al), titanyum (Ti) ve niyobyum (Nb) içerir. Çökelti ile sertleştirilen alaşımlar ise, alüminyum ve titanyum dışında genellikle önemli miktarda niyobyum içerir. ODS alaşımlarında ise, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen, içinde küçük miktarda ince oksit partikülleri bulunan alaşımlar bulunur.

Yaşlandırma ile sertleştirilen (çökelme sertleşmesi) nikel esaslı alaşımlar, alüminyum ve titanyum ilavesiyle oluşan γ' çökeltisi ve karbür çökelticilerle güçlendirilir. Optimal yüksek sıcaklık özellikleri elde etmek için γ' çökelti fazı büyük önem taşır. Alüminyum ve titanyumun miktarı ve alüminyum/titanyum (Al/Ti) oranı ısıtılma işlem süresince kritik öneme sahiptir. Bu oranın artması, yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirir. Ayrıca, γ' fazının hacimsel oranı, boyutu ve dağılımı da kontrol edilmesi gereken önemli parametrelerdir. [16].

Nikel esaslı süper alaşımlar, uçak motorlarının önemli bir bileşenidir ve bu alaşımlar uçak motorlarında kullanılan malzemelerin yaklaşık yarısını oluşturur. Özellikle yüksek sıcaklık dirençleri nedeniyle uçak türbinleri, türbin ve pervane kanatları, yanma odası astarları ve bağlantı bölümlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Çökelti ile sertleştirilen alaşımlar, katı-eriyik ile sertleştirilen alaşımlara kıyasla daha yüksek dayanıklılığa sahiptir. Bu nedenle, yüksek sıcaklık uygulamalarında γ' çökeltisi ile sertleştirilen alaşımlar tercih edilir. Katı eriyik ile sertleştirilen alaşımlar ise, kaynak edilebilirlikleri ve üretim kolaylıkları nedeniyle genellikle servis koşullarına bağlı olarak kullanılırlar [13,17].

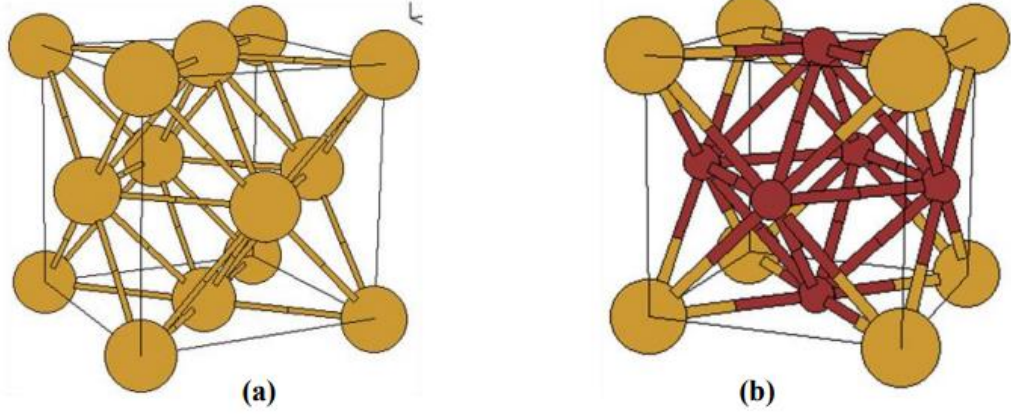
Nikel esaslı süper alaşımların kimyasal bileşimi ve mikroyapısı oldukça karmaşıktır. Ana alaşım elementi olan nikel, östenitik nikel matrisin yüksek faz kararlılığına sahiptir ve çeşitli şekillerde alaşımlandırılabilir. Bu alaşımın özellikleri, genellikle yüksek krom (Cr) ve alüminyum (Al) ile alaşımlanmasıyla geliştirilmiştir. Nikel esaslı alaşımların tipik kimyasal bileşimi genellikle %10-20 krom (Cr), %8 civarında Al ve Ti kombinasyonu, %5-15 kobalt (Co) ve küçük miktarlarda bor (B), zirkonyum (Zr), hafniyum (Hf) ve karbon (C) içerir. Bu bileşenler, alaşımın istenen mekanik ve termal özelliklerini elde etmek için dikkatle kontrol edilir. Bu elementlere ek olarak, molibden (Mo), niyobyum (Nb), tantal (Ta), reniyum (Re) ve tungsten (W),

katı eriyik sertleştirici ve karbür oluşturan bileşenler olarak bulunur. Krom (Cr) ve alüminyum (Al) ilavesi, Cr_2O_3 ve Al_2O_3 gibi oksit tabakalarının oluşmasını sağlayarak yüzey kararlılığını artırır. Genel olarak, nikel esaslı alaşımlarda tantal, tungsten ve reniyum katı eriyik sertleştirici elementler olarak yer alırken, titanyum ve alüminyum çökelti oluşturan elementlerdir. Düşük servis sıcaklıklarına yönelik olarak geliştirilen Inconel 600 ve Hastelloy serisi nikel esaslı alaşımlar ikincil faz oluşturmada, krom (Cr), molibden (Mo), demir (Fe) ve tungsten (W) gibi katı eriyik elementleri içerir [17]. Nikel esaslı süper alaşımların mikroyapısı incelendiğinde oluşan fazlar şu şekildedir:

Gamma matris (γ): Ana alaşım elementi nikel olan YMK yapıda östenitik matris, yüksek miktarda, kobalt, demir, krom, molibden ve tungsten gibi katı eriyik elementleri içermektedir. Alaşım içerisinde bulunan krom, oksijenle birleşerek Cr_2O_3 tabakası oluşturma eğilimindedir. Böylece metalik elementlerin dışarıya difüzyonunu engelleyerek, yüzey kararlılığını sağlar.

Gamma prime (γ') çökeltisi, östenitik matrisle uyumlu bir şekilde oluşan, L12 düzeninde yüzey merkezli kübik yapıda (YMK), $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ kimyasal kompozisyonuna sahip bir intermetalik bileşiğidir. Alüminyum ve titanyumun ilavesiyle ortaya çıkar ve yüksek sıcaklıkta dayanım ve sürünme direnci sağlar. Özellikle nikel esaslı süper alaşımlar için birincil sertleştirme fazıdır. γ' çökelti fazının şekli, düşük hacimsel oranlarda genellikle küresel iken, yüksek alüminyum ve titanyum miktarlarında kübik bir morfolojiye sahip olma eğilimindedir.

Morfolojideki bu değişim, γ' matris/çökelti kafes uyumsuzluğu ile ilgilidir. Bu uyumsuzluk oranı %0-0,2 arasında olduğunda genellikle küresel, %0,5-1 arasında olduğunda kübik, %1,25'ten büyük olduğunda ise plaka şeklinde çökelti oluşur. Çoğu nikel esaslı süper alaşımında, çökelti genellikle çok küçük boyutlarda küresel morfoloji gösterir. Ancak γ' çökelti büyüdüğüçe, uyumsuzluk miktarına bağlı olarak küresel yapıdan küp formuna veya plakalara dönüşebilir. Bu durum, çökelti fazının büyümesi sırasında koharent (uyumlu) durumun kaybına bağlı olarak ortaya çıkar [13,17]. Östenitik matris ve γ' fazı kristal yapıları Şekil 2.2 (a)-(b)'de şematik görünümüleri verilmiştir. γ' fazı kristal yapısında alüminyum atomları kübün köşelerinde, nikel atomları yüzey merkezlerinde yer almaktadır.



Şekil 2. 2. Kristal yapılar: (a) östenitik matris (γ) YMK kristal yapısı, (b) γ' - $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ YMK yapısı [18].

Dövme nikel süper alaşımların çoğunluğu, hacimsel olarak %20 ila %45 arasında γ' faz içerir. Buna karşılık, dökme nikel süper alaşımlarının yaklaşık olarak %60'ı γ' fazına sahiptir. Artan γ' hacimsel oranıyla birlikte, sürünme dayanımı da artar [17].

Gamma double prime (γ''): Nikel-esaslı alaşımlarda yeterli miktarda demir içeriği bulunan durumlarda, Ni ve Nb'nin birleşimiyle oluşan Ni_3Nb intermetalik bileşiği, hacim merkezli tetragonal (HMT) yapıda disk morfolojisine sahip olur ve DO22 düzeninde yer alır. Bu çökelti, matrisle uyumlu bir şekilde bulunur ve %2,9'luk bir kafes uyumsuzluğu gerilimi yaratır. Düşük ve orta sıcaklıklarda, bu faz yüksek mukavemet sağlar ancak 650°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda kararsız hale gelir. Genellikle IN-718 ve IN-706 gibi nikel-demir esaslı süper alaşımlarda bulunan bir çökelti fazıdır. Gamma iki üssü (γ''), Inconel 718 alaşımlarında gamma üssü (γ') ile birlikte çökeler; ancak ana sertleştirici faz γ'' (Ni_3Nb) fazıdır.

Delta (δ) fazı: Inconel 718'in yüksek sıcaklıktaki mükemmel mekanik özellikleri, γ'' fazının sağladığı etkiye dayanmaktadır. γ'' fazı ile sertleştirilen nikel-esaslı alaşımlar aşırı yaşlandırma koşullarında, bu fazın (Ni_3Nb) ortorombik delta (δ) fazına dönüşme eğilimi gösterir. İnkoherent bir yapıya sahip olan bu faz, büyük miktarlarda meydana geldiğinde dayanım sağlamaz. Bununla birlikte, az miktarda çökelti oluşturan δ fazı, tane boyutu kontrolü sağlar ve yorulma dayanımı ile sürünme-kopma sünekliliği gibi özelliklerin gelişimine katkıda bulunur. Ancak, ısıtma işlemi sırasında yoğun bir şekilde oluşan delta fazı (δ), birçok mekanik özelliği olumsuz yönde etkilediğinden yapının içinde oluşumu önlenmelidir [16, 17, 19].

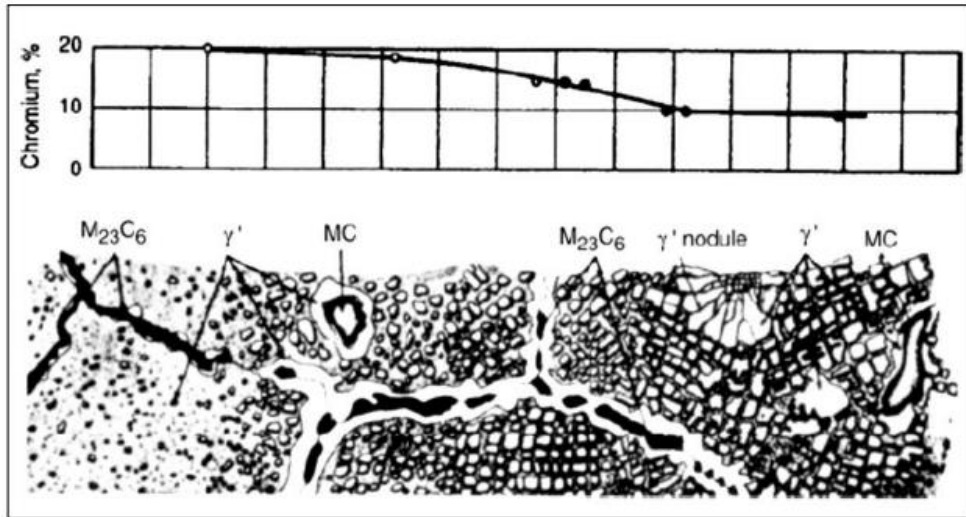
η (eta) fazı: Eta fazı, özellikle uzun süreli yüksek sıcaklık koşullarında nikel, demir-nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlarda gözlenen bir fazdır. Bu faz, hegzagonal DO₂₄ kristal yapısında ve Ni₃Ti kimyasal kompozisyonuna sahip intermetalik bir bileşik olarak bulunur. Eta fazı, yavaş bir hızda çökelirken hızlı bir şekilde büyüyerek, γ' (Ni₃Nb) fazından daha büyük partiküller oluşturur. Bu faz, genellikle iki morfolojide bulunur: tane sınırlarında hücresel biçimde veya tane boyunca iğnemsî şekilde. Her iki durumda da, sürünme-kopma dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir.

Topolojik sıkı-paket fazlar (TCP) : Belirli bir kompozisyonda ve işlem koşullarında oluşan σ , μ ve Laves gibi fazlar, plaka benzeri veya iğnesel morfolojiye sahiptir ve genellikle zararlıdır. Bu fazlar düşük kopma dayanımı ve süneklik sorunlarına neden olabilirler. Yüksek miktarda tantalum (Ta), niyobyum (Nb), krom (Cr), tungsten (W) ve molibden (Mo) gibi hacim merkezli kübik (HMK) metal elementlerini içeren alaşımlar, topolojik sıkı paket fazları oluşturma eğilimindedir. Bu fazlar iki temel nedenle zararlıdır: i) γ' ve γ'' gibi sertleştirici fazları bağlayarak sürünme dayanımını azaltır, ii) kırılgan yapıları nedeniyle çatlak başlangıcı gibi davranabilirler.

Nikel esaslı alaşımlarda genellikle σ ve μ fazlarının oluşumu gözlenir. σ fazının kimyasal formülü (Fe,Mo)_x(Ni,Co)_y şeklindedir, burada x ve y değişkenleri 1 ila 7 arasında değer alır. σ fazının sertliği ve plaka şeklindeki morfolojisi, düşük sıcaklıklarda çatlak başlangıcı gibi davranarak kırılma hasarına yol açar. Yüksek sıcaklıklarda kopma dayanımı üzerindeki etkisine bakıldığında, sigma (σ) fazı, γ matris içinde refrakter metallerin oluşumunu engelleyerek dayanımda düşüşe neden olur. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta kopma tane sınırları boyunca değil, plaka şeklindeki σ boyunca gerçekleşir; bu durum kopma ömrünü belirgin bir şekilde azaltır.

Laves fazı, genellikle demir-nikel esaslı alaşımlarda gözlenen AB₂ hegzagonal kristal yapıya sahiptir ve tane sınırlarında oluşan kaba partiküllerdir. Fe₂Ti, Fe₂Nb ve Fe₂Mo en bilinen intermetalik bileşikleridir. Silisyum ve niyobiyum, Inconel 718 alaşımında bu istenmeyen fazın oluşumunu teşvik eder. Yüksek miktarlarda bu faz, oda sıcaklığında süneklik ve sürünme özelliklerine zarar verir. Ayrıca, plakalar halinde μ fazı da oluşabilir, ancak bu fazın zararlı etkileri hakkında bilgiler sınırlıdır. (Fe, Co)₇(Mo, W)₆ kimyasal formülüne sahiptir. Genellikle yüksek miktarda molibden ve tungsten içeren alaşımlarda gözlenir ve yüksek sıcaklıklarda oluşur [17,19].

Karbürler: Karbon, titanyum, tantalum, hafniyum ve niyobyum gibi reaktif elementler, ağırlıkça % 0,02-0,2 oranında ilave edildiğinde, TiC, HfC ve NbC gibi metal karbür (MC) formlarına dönüşür. Isıl işlem sırasında MC karbürler genellikle bozunarak, tane sınırlarında $M_{23}C_6$ ve molibden, tungsten ve kromca zengin M_6C tipi karbürleri oluşturma eğilimindedir. MC tip karbürler genellikle büyük tanelerden oluşan düzensiz kübik yapıdadır. $M_{23}C_6$ formu, plaka morfolojisinde düzenli bir yapıya sahipken, tane sınırlarında düzensiz ve sürekli olmayan sınırlayıcı taneler olarak bulunur. M_6C fazı da tane sınırlarında sınırlayıcı bir faz olarak ortaya çıkabilir. Şekil 2.3'de, nikel esaslı süper alaşımlarda krom miktarına bağlı olarak fazlar ve mikroyapısal değişimler görülmektedir. Bu karbür yapılarının tamamı yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapıdadır. Karbürlerin genellikle uzun süreli servis koşullarında ortaya çıktığı ve alaşımanın yüksek sıcaklıkta kopma dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir [17,19].



Şekil 2. 3. Nikel esaslı süper alaşımlarda fazlar ve krom miktarına bağlı mikroyapı değişimi [13].

2.2.3. Süper Alaşımların Uygulama Alanları

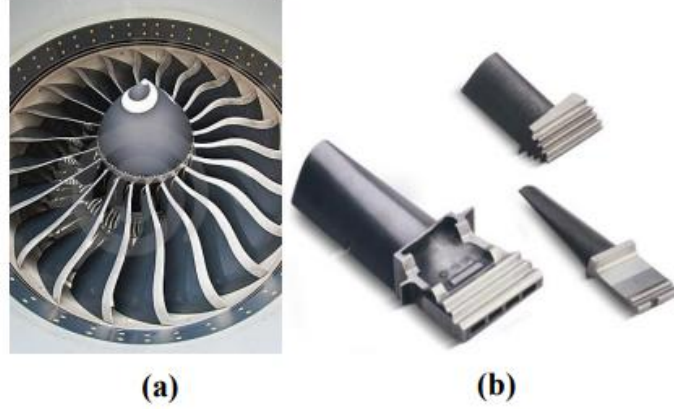
Süper alaşımların kullanım aralığı günümüzde birçok alanda genişlemiştir. Uçak ve endüstriyel gaz türbinleri, roket motorları, kimyasal endüstri ve petrol tesisleri gibi alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadırlar [12]. Modern türbin sistemlerinde yakıt verimliliğini artırmak ve emisyonu azaltmak amacıyla yapılan araştırmalar, süper alaşımların performansının yüksek sıcaklık uygulamalarında üstünlüğünü ortaya koymaktadır [16]. Süper alaşımların herhangi bir uygulama alanı seçimi sırasında,

mukavemet, sürünme dayanımı, yorulma dayanımı, şekillenebilirlik ve yüzey kararlılığı gibi mekanik özellikler dikkate alınmalıdır. Ancak bu özelliklerden biri için yararlı olan kimyasal kompozisyon ve mikroyapısal değişkenler, diğer özellikler için istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Örneğin, ince tane yapısı düşük sıcaklık çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve yüksek sıcaklık şekillenebilirlik için istenilen mikroyapı iken, sürünme dayanımını olumsuz etkileyebilir. Benzer şekilde, yüksek krom içeriği nikel esaslı alaşımlarda oksidasyon ve sıcak korozyon direncini artırırken, çekme ve sürünme dayanımında düşüşe ve aynı zamanda σ fazı oluşumuna sebep olabilir. Bununla birlikte, sıcaklığa daha dirençli alaşımlar kırılabilirliğe daha eğilimli olabileceğinden yalnızca döküm yöntemi kullanılarak şekillendirilebilir veya toz metalurjisi ile üretilmelidir [17]. Süper alaşımların kullanım alanları şu şekilde listelenebilir:

- Uçak/endüstriyel gaz türbin parçaları: diskler, cıvatalar, şaftlar, uçak pervaneleri, kanatçıklar, yakma hücreleri, art yakıcılar, geri iticiler,
- Buhar türbinli güç tesisleri parçaları: cıvatalar, pervaneler, baca gazı ilave ısıtıcıları,
- Otomotiv parçaları: turbo kompresörler, egzoz valfleri,
- Metal işleme malzemesi: yüksek sıcaklığa dayanıklı iş takımları ve kalıpları, döküm kalıpları,
- Medikal ekipmanlarda: dişçilikte, protez cihazlarda,
- Uzay mekiği parçaları: aerodinamik olarak ısıtılmış yüzeylerde, roket motor parçalarında,
- Isıl işlem parçalarında: bağlama ekipmanları, taşıma bantları,
- Nükleer güç sistemlerinde: kontrol çubuğu sürme mekanizmaları, supaplarda, kanal sistemleri,
- Kimyasal ve petrokimyasal endüstrilerde: cıvatalarda, valflerde, reaksiyon kazanlarında, borularda, pompalarda,

Tüm uygulamalarda yüksek sıcaklık mukavemeti gerekli değildir. Yüksek sıcaklık mukavemeti korozyon direnci ile birleştiğinde biyomedikal cihazlar için süper alaşım malzeme standartlarını belirlerler [13]. Özellikle kobalt esaslı süper alaşımlar

medikal ve dental implantlarda geniş kullanım alanına sahiptir. Haynes 25, gaz türbinleri sıcak bölümleri, nükleer reaktör parçalarının yanı sıra medikal uygulamalarda da kullanıldığı bilinen kobalt esaslı süper alaşımdır. Haynes 188 ve S-816 kobalt esaslı alaşımlar ise yüksek basınç türbin kanatçıkları ve gaz türbini yanma odasında kullanım alanı bulmaktadır [17].



Şekil 2. 4. Uçak gaz türbin parçaları: (a) türbin disk, (b) türbin kanatçıkları [17].

Gaz türbin motorları gibi en çok talep edilen uygulamalarda, genellikle çökeltme sertleşmesi ile dayanımı artırılan Inconel 718 gibi nikel esaslı süper alaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. A-286 ve Incoloy 901 serileri ise demir-nikel esaslı süper alaşımlardır ve genellikle gaz türbin motorları, türbin bıçakları, türbin diskleri ve şaft parçalarında kullanılmaktadır.

2.3. Inconel 718 Süper Alaşımı Genel Özellikleri

Inconel 718, 1950'lerde International Nickel Corporation tarafından geliştirilmiştir. Uzun yıllar önce geliştirilmiş olmasına rağmen, günümüzde özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan uçak ve endüstriyel gaz türbin motor parçaları gibi birçok uygulama için geniş kullanım alanlarına sahiptir. Isıl yorulma dayanımı, oksidasyon direnci, korozyon direnci, kolay dövülebilirlik ve kaynaklanabilirlik, Inconel 718'in önemli özelliklerindendir [20].

Inconel 718, nikel esaslı süper alaşımlar grubunda bulunan ve %18-19 oranında demir içeren bir alaşımdır. Bu alaşım, koherent HMT γ' (Ni_3Nb) fazı tarafından sertleştirilir. Demir içeriği, yarı-kararlı γ' oluşumu için bir katalizör görevi görür. Ayrıca, ağırlıkça %3-5 oranında niyobyum içerir ve γ' ($\text{Ni}_3\text{Al,Ti}$) fazının oluşumunu sağlayan düşük miktarlarda alüminyum ve titanyum içerir. Ancak uygun olmayan ısı

işlem koşulları, Inconel 718 alaşımında istenmeyen ortorombik kristal yapıda, Ni_3Nb kimyasal kompozisyonuna sahip kararlı delta (δ) fazının oluşumuna neden olabilir. Dolayısıyla, uygun ısıtım işlem metotları, bu alaşım için kritiktir. Bu nedenle, istenilen faz dönüşümünün gerçekleşmesi için gerekli ısıtım işlem koşulları, sıcaklık-zaman-dönüşüm (TTT) diyagramı incelenerek belirlenebilir [17].

Inconel 718, γ matrisinde NbC, γ' , γ'' ve δ fazlarını içerir. Ancak, alaşımı sertleştirici etkisi bakımından, γ'' fazının önemi oldukça büyüktür. γ'' fazının yanı sıra, γ' fazının da sertliği etkilediği bilinmektedir. Ancak, yapıda oluşan δ fazının mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu durum, alaşımın performansını etkileyebilir ve istenmeyen sonuçlar doğurabilir [21]. Inconel 718'in maksimum kullanım sıcaklığı yaklaşık olarak 650°C 'dir, çünkü γ'' çökelti fazının kararsızlığı nedeniyle bu sıcaklık aralığında dayanımını hızla kaybeder. Bu süper alaşım, dayanımı en yüksek ve en geniş kullanım alanına sahip olanlardan biridir, ancak 650°C ile 815°C arasındaki sıcaklık aralığında dayanımını hızlı bir şekilde kaybeder. Bu kayıp, östenitik matris içerisinde çökelen γ'' fazının oluşturduğu matris/çökelti yüksek kafes uyumsuzluğu ile ilgilidir. Tablo 2.4'te Inconel 718 alaşımının oda sıcaklığında ve 650°C 'de mekanik özelliklerindeki değişimler verilmiştir. Fiziksel özelliklerine bakıldığında ise yoğunluğunun $8,19 \text{ g/cm}^3$ olduğu ve ergime sıcaklığının 1260°C ile 1336°C arasında olduğu görülmektedir. 650°C 'de % uzama değeri, oda sıcaklığındaki değerden farklılık göstermemektedir.

Tablo 2.4. Inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri [22].

Mekanik Özellikler	Oda Sıcaklığı	650°C
Çekme Dayanımı	1240 MPa	965 MPa
Akma Dayanımı	1034 MPa	861 MPa
% Uzama	12	12
Elastik Modül	210 GPa	163 GPa
Sertlik	35,5 HRc – 350 HV	-

Inconel 718, ikincil fazların (γ' , γ'') matris içinde çökmesi sonucu mukavemetlendirilir. Genellikle çoğu uygulamada, solüsyona alınmış ve yaşlandırma ısıtıl işlemi ile mukavemetlendirilmiş olarak kullanılır. Bu ikincil fazların çökmesi, nikel (alüminyum, titanyum, niyobiyum) bileşenlerinin 594°C-815°C sıcaklık aralığında yapılan ısıtıl işlemler sonucunda gerçekleşir. İkincil fazları oluşturan metalurjik reaksiyonların düzgün bir şekilde ilerleyebilmesi için alüminyum, titanyum ve niyobiyum bileşenlerinin matris içinde çözünebilmesi gerekir. Eğer farklı bir faz formunda çökelti oluşturlarsa, alaşımanın mukavemetlendirilmesi mümkün olmaz. Bu nedenle, alaşıma öncelikle solüsyona alma ısıtıl işlemi uygulanır [22].

2.3.1. Isıl İşlem Rejimi

Inconel 718 solüsyona alınmış ve yaşlandırılmış durumda kullanılmaktadır. Bu ısıtıl işlem koşullarında seçilen sıcaklık, süre ve soğutma hızı gibi parametreler uygulama alanına ve ihtiyaç duyulan mekanik özelliklere göre farklılık gösterir. Uçak ve uzay endüstrisi uygulamalarında yüksek çekme ve yorulma dayanımı, gerilme-kopma mekanik özelliklerine ihtiyaç duyulduğundan, δ solvus sıcaklığının (~1010°C) altında solüsyona alma ve iki basamaktan oluşan standart yaşlandırma işlemi yapılır. Söz konusu yaşlandırma işlemi şu şekildedir :

1. 925-1010°C sıcaklık aralığında 1-2 saat süreli solüsyona alma/havada soğutma
2. 720°C'de 8 saat yaşlandırma, 55°C/sa soğutma hızıyla fırında 620°C'ye soğutma.
3. 620°C'de toplam ısıtıl işlem süresi 18 saat olacak şekilde 8 saat yaşlandırma/havada soğutma.

Dövme işlemi ardından su verne ve iki aşamalı yaşlandırma işlemiyle, δ solvus sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilir. Bu ısıtıl işlem, solüsyona alma adımı olmadan gerçekleştirilir ve doğrudan yaşlandırma olarak adlandırılır. Bu işlem için, yüksek kaliteli ve homojen alaşımların kullanılması gerekmektedir. Solüsyona alma sıcaklığına bağlı olarak, doğrudan yaşlandırılmış ve solüsyona alınmış Inconel 718 alaşımlarının mekanik özellikleri Tablo 2.5'te sunulmuştur. Tabloda verilen tüm alaşımlara standart yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

Tablo 2.5. Isıl işlem koşullarına bağlı olarak Inconel 718 mekanik özellikleri [17].

Solüsyona alma sıcaklığı (°C)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	% Uzama	650°C’de 690 MPa ile gerilme-kopma ömrü (sa)
Direkt yaşlandırılmış	1330	1525	19	95
940°C, 1sa, a.c.	1240	1460	18	194
955°C, 1sa, a.c.	1180	1420	20	122
970°C, 1sa, a.c.	1145	1405	23	218
980°C, 1sa, a.c.	1172	1405	24	200
1010°C, 1sa, a.c.	1185	1390	22	270
1040°C, 1sa, a.c.	1165	1365	25	225

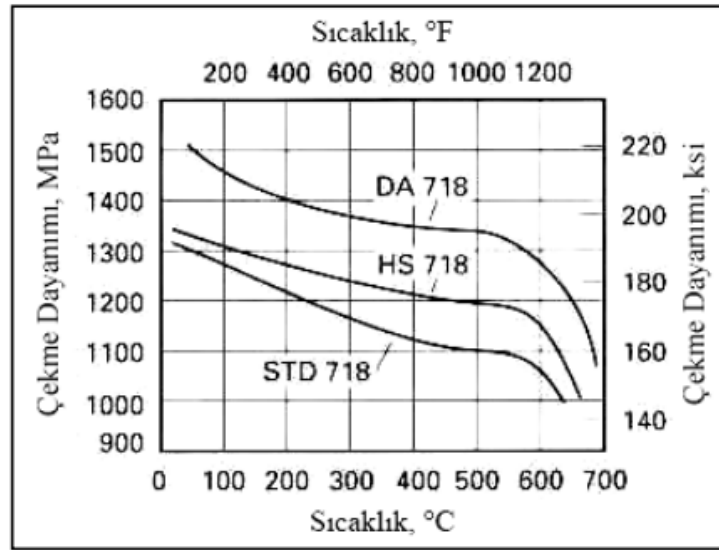
Bu durumda, en yüksek çekme dayanımı gerilme-kopma ömründe kayıpla birlikte doğrudan yaşlandırılmış malzemede gözlemlenmektedir. Daha düşük solüsyona alma sıcaklıklarında daha yüksek mukavemet elde edilirken, daha yüksek solüsyona alma sıcaklıklarında ise gerilme-kopma dayanımı daha yüksektir [17].

Inconel 718 alaşımında sıcaklığın fonksiyonu olarak üç farklı ısıl işlem türü göze çarpar:

- i) Standart solüsyona alınmış ve yaşlandırılmış (STD)
- ii) Yüksek mukavemetli Inconel 718 (HS)
- iii) Doğrudan yaşlandırılmış Inconel 718 (DA).

Standart solüsyona alınmış ve yaşlandırılmış Inconel 718, karmaşık ve zor şekillendirilmiş parçaların üretimi için tercih edilir. Yüksek mukavemetli Inconel 718 alaşımında da solüsyona alma ve yaşlandırma işlemi uygulanır; bu koşullardaki alaşım, daha yüksek gerilim altında ve daha az karmaşık parçaların üretimi için uygundur. Standart ısıl işleme göre daha ince bir tane yapısı elde edilir, böylece alaşımın kopma ve yorulma gibi mekanik özellikleri geliştirilir. Şekil 2.5’deki yüksek sıcaklıklara bağlı çekme dayanımındaki değişime bakıldığında, en yüksek mukavemet

ve yorulma özellikleri doğrudan yaşlandırılmış Inconel 718 alaşımında görülür [17,23].



Şekil 2.5. Isıl işlem koşullarına bağlı değişen Inconel 718 çekme dayanımı [23].

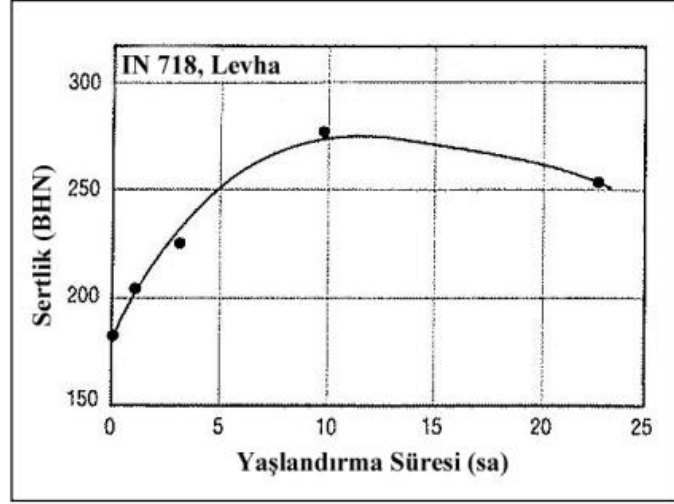
Uygulama alanına ve istenilen özelliklere bağlı olarak farklı ısıl işlem koşulları kullanılmaktadır. Optimum süneklilik ve düşük sıcaklıkta tokluluk gibi özellikler için uygulanan ısıl işlem şu şekildedir [10,23]:

- 1040°C - 1065°C solüsyona alma, ½ - 1 saat havada soğutma
- 760°C'de 10 saat yaşlandırma, 650°C'ye fırında soğutma
- 650°C'de toplam ısıl işlem süresi 20 saat olacak şekilde yaşlandırma, havada soğutma.

Petrol endüstrisinde kullanılan Inconel 718'in mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla tek aşamalı yaşlandırma işlemi uygulanır. Bu işlem, 1010°C ile 1065°C arasında solüsyona alma işlemini takiben 650°C ile 815°C arasında yaşlandırma işleminden oluşur. Tek aşamalı yaşlandırma sonrası, daha düşük mukavemet ancak daha yüksek kırılma tokluğu elde edilir [17].

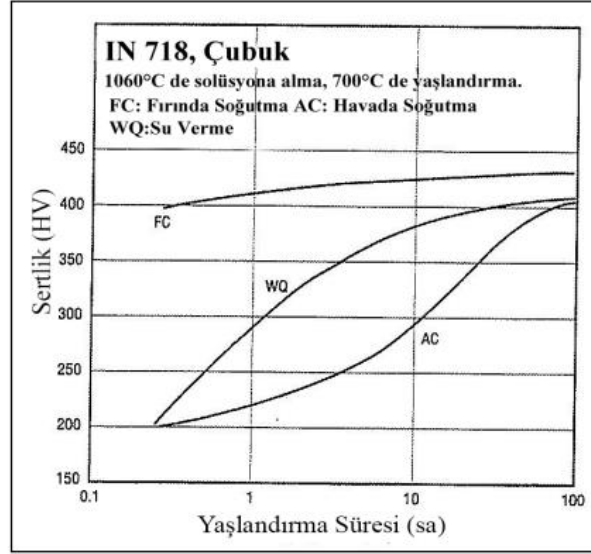
Yaşlandırma sıcaklığı ve süresi, ısıl işlem sırasında kritik parametrelerdir. Örneğin, solüsyona alma sonrası 650°C'de gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi, düşük mukavemetli bir yapı oluştururken yüksek darbe enerjisi sağlar. Ancak, yaşlandırma sıcaklığının 750°C'ye yükseltilmesi, akma dayanımında bir artış ve darbe enerjisinde

bir azalma sağlar. Yaşlandırma reaksiyonu yavaş ilerler ve maksimum sertliğe ulaşmak için geniş bir süreye ihtiyaç duyar [23]. Şekil 2.6’de levha formundaki Inconel 718 malzemesi 1165°C’de solüsyona alınıp, su verme işlemi ile soğutulduktan sonra 650°C’de yaşlandırılmıştır, buna göre yaşlandırma süresinin sertliğe olan etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Yüksek sıcaklıkta solüsyona alınmış ardından 650°C’de yaşlandırılmış Inconel 718, sertlik-yaşlandırma süresi ilişkisi [23].

Yavaş yaşlandırma hızı, niyobyumun nikel içindeki difüzyonun yavaş olmasından kaynaklanır, bu da sertleştirici fazların oluşumunun zaman almasına neden olur. Bu kinetik reaksiyon, optimum sertliğe ulaşmak için uzun süreler gerektiğini açıklar [13,23]. Solüsyona alma ısı işlemi sonrası soğutma hızındaki değişiklikler, yaşlandırma reaksiyonlarını etkiler. Su verme ve hava soğutma yöntemleri, başlangıçta yumuşak bir yapı sağlar, ancak yaşlandırma işleminden sonra malzeme sertleşir. Diğer yandan, yavaş soğutma hızları, soğuma sırasında yapıyı sertleştirir, ancak sonraki yaşlandırma işlemi sırasında yapıya düşük düzeyde ek sertlik kazandırır [23]. Sertlikteki bu artış γ'' fazı çökmesiyle desteklenir. Şekil 2.7’de ısı işlem sırasında soğuma hızına bağlı olarak sertlikteki değişim görülmektedir.



Şekil 2.7. Inconel 718 ısıtma işlemi soğutma hızı-sertlik ilişkisi [23].

Dengeli bir soğutma hızı sağlandığında, örneğin fırında soğutma gibi durumlarda, sertleştirici ikincil fazların yapısında oluşmasına olanak tanıyan bir difüzyon hızı sağlanır, bu da daha yüksek bir sertliğe yol açar. Inconel 718 alaşımında küçük tane boyutu, yüksek yorulma dayanımı için önemli bir faktördür. Standart ısıtma işlemi sırasında düşük solüsyona alma sıcaklıkları, ince tane yapısı ve mükemmel yorulma özellikleri sağlar.

2.3.2. Alaşım Elementlerinin Etkileri

Inconel 718 alaşımı, uçak gaz türbin motorları ve bunun gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan, yüksek sıcaklıklarda (~650°C) mükemmel mekanik özelliklere ve yapısal kararlılığa sahip niyobyum katkılı nikel esaslı bir süper alaşımdır [21]. Tablo 2.5’de Inconel 718 alaşım elementleri ağırlıkça nominal kompozisyon miktarı verilmiştir.

Tablo 2.5. Inconel 718 % ağırlıkça nominal kimyasal kompozisyonları [22].

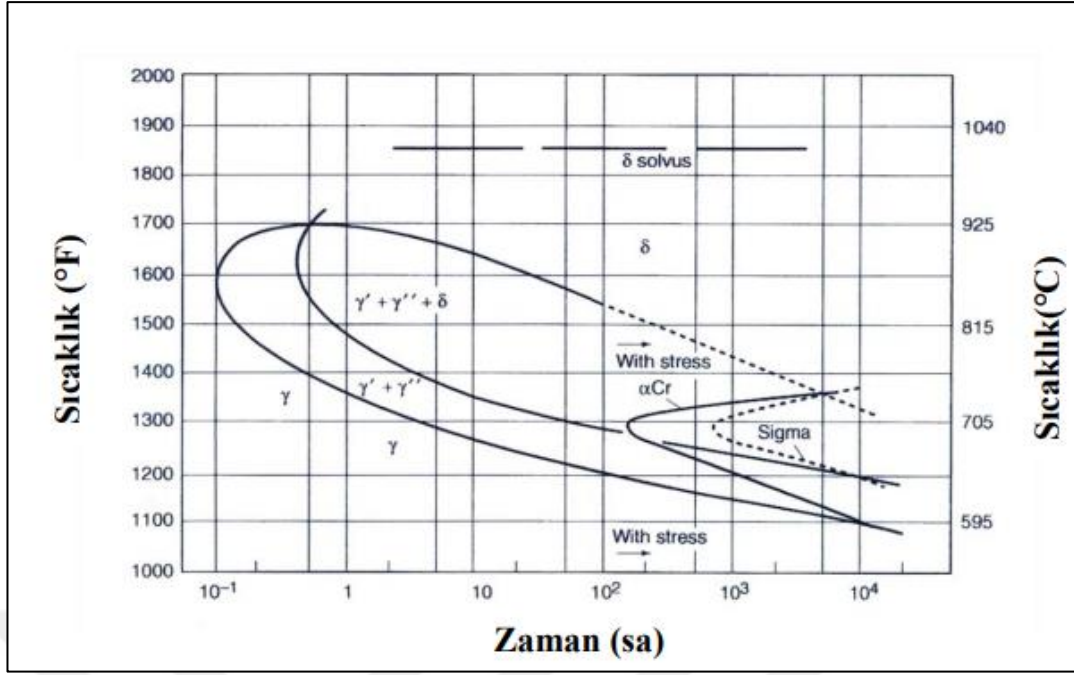
	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta	Ti	C	Co	Al
% Ağ.	50-55	17-21	17-19	2,80-3,30	4,75-5,50	0,65-1,15	< 0.08	< 1	0.20-0.80

İçerdiği demir, alaşımın ana sertleştirici fazı olan yarı-kararlı γ'' oluşumu için katalizör görevi görür. Alüminyum ve titanyum, diğer sertleştirici γ' fazının ana bileşenleridir ve eşit oranlarda ilave edilerek matriste yüksek hacimli çökelti oluştururlar. Katı halde, krom ve molibden östenitik nikel matris içinde katı eriyik sertleştirici elementler olarak bulunur ve krom alaşıma oksidasyon direnci sağlar. Ağırlıkça % 0,003 -0,03 miktarında ilave edilen bor ve düşük miktardaki zirkonyum alaşımın gerilme-kopma ve sıcak işlenebilirlik özelliklerini geliştirmeye yardımcı olmaktadır [17]. Ayrıca küçük miktarda ilave edilen karbon ve bor tane sınırı mukavemetini ve sünekliliği arttırmaktadır [23].

2.3.3. Inconel 718 Faz Dönüşümleri ve Mikroyapı Özellikleri

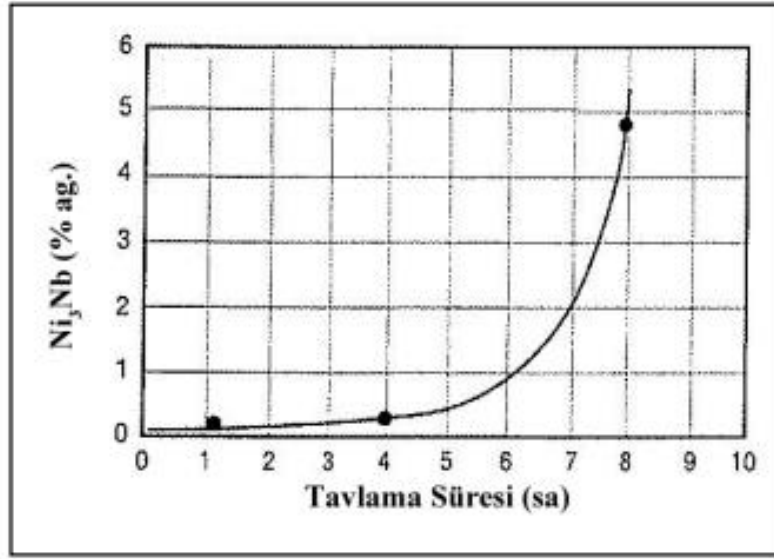
Inconel 718'in mikroyapısı analiz edildiğinde, solüsyona alma ve yaşlandırma ısı işlemlerinin etkisi altında δ fazıyla birlikte γ' ve γ'' sertleştirici fazlar meydana gelir. Bu fazların yanı sıra, nikel temelli matris içinde (γ) demir, kobalt, molibden ve tungsten gibi katı eritici elementler bulunmaktadır. İlgili ısı işlemler, yüksek sıcaklıkta yapılan tavlama işlemiyle ikincil fazların çözeltiye alınmasını, ardından tek veya çift aşamalı daha düşük sıcaklıkta yaşlandırmayı içerir. Bu süreç, sertleştirici fazların matris içinde çökmesine neden olur. Bazı sertleştirici fazlar, solüsyona alma sıcaklığından soğutma sırasında oluşur. İlk yaşlandırma işlemi, birincil çökeltilerin büyümesini tetiklerken, daha düşük sıcaklıkta gerçekleşen ikincil yaşlandırma işlemi, çekme dayanımını ve akma ömrünü artıran ince tane yapılı ek çökelti oluşumunu destekler [23]. γ'' ve δ fazları aynı kimyasal kompozisyona sahip Ni_3Nb intermetalik bileşiği şeklinde tanımlanmaktadır. HMT (DO22) yapıda γ'' Inconel 718 için ana sertleştirici fazdır ve matris ile koherent durumda çökelti oluşturur. δ fazı ise ortorombik kristal yapıda ve matrisle inkoherent durumda çökeler. Mukavemete etkisi olmayan fakat tane boyut kontrolü sağlayan fazdır [17,23].

Inconel 718 alaşımının ısı işlem koşullarına bağlı olarak mikroyapısında meydana gelen değişimleri anlayabilmek için Şekil 2.8'de verilen TTT (sıcaklık-zaman-dönüşüm) diyagramını incelemek gerekir. Bu diyagram incelendiğinde alaşımın özelliklerini etkileyen fazların oluşum şartları saptanabilmektedir.



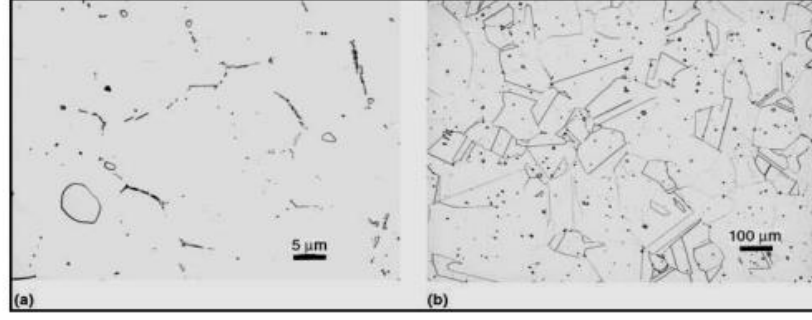
Şekil 2.8. Inconel 718 sıcaklık-zaman dönüşüm diyagramı [24].

Inconel 718 alaşımında γ'' (Ni_3Nb) fazı 705°C - 900°C sıcaklık aralığında oluşur, solvüs sıcaklığı yaklaşık 910°C 'dir [17]. $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ kimyasal kompozisyonuna sahip YMK yapıda γ' fazı, γ'' ile aynı sıcaklık aralığında daha uzun sürede oluşur. γ'' , Inconel 718 alaşımında γ' ile birlikte çökeler, fakat hacimsel oranının fazla olması sebebiyle birincil sertleştirici faz γ'' 'dir. γ'' , disk şekilli morfolojide çökelti oluştururken, γ' çökelti fazı küresel şekilli ve daha küçük çapta çökeler. δ fazı maruz kalınan ısı işlem süresine bağlı olarak 870°C - 1010°C sıcaklık aralığında çökeler ve 1010°C solvus sıcaklığına sahiptir [13,17]. Dövme Inconel 718 alaşımında işleme prosesleri δ solvüs sıcaklığı altında yapılır, böylece bu faz varlığında tane sınırı kayması engellendiği gibi ince tane yapıli mikroyapı korunmuş olur. Bu sıcaklık üzerinde ısı işlemlere maruz kaldığında δ fazı çözünür ve hızlı şekilde tane büyümesi başlar [23]. Isıl işlem süresine bağlı olarak δ fazı (Ni_3Nb) çökeltme davranışı Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



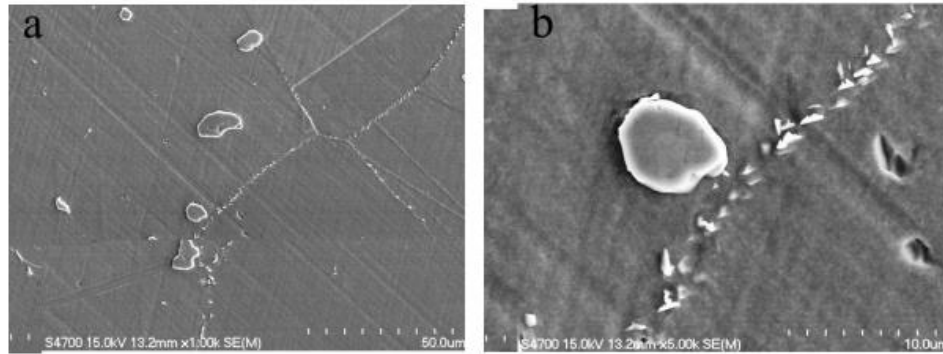
Şekil 2.9. 927 °C tavlama sıcaklığında, tavlama süresi- δ fazı çökeltme davranışı [23].

Dezavantajlarının dışında δ fazının tane boyutunu kontrol ettiği ve tane sınır kaymasını engellediği açığa çıkarılmıştır [20]. Inconel 718 alaşımının mikroyapısı eş eksenli tane yapısı ile birlikte, pek çok tavlama ikizlenmeleri ve matris boyunca çökelen MC tip karbürlerden oluşmaktadır [23]. İkizlenme, Inconel 718’de yaşlandırma öncesi ve sonrası yapının hemen her yerinde sıklıkla görülen plastik deformasyon mekanizmalarından biridir [20]. Solüsyona alma sıcaklığındaki artış, daha büyük tane yapısı, yüksek sürünme-kopma dayanımı fakat düşük çekme dayanımına sebep olmaktadır. Aşırı tane kabalaşması 1037°C-1049°C sıcaklık aralığında birincil NbC yapılarının çözünmesi sonucu gerçekleşir. Şekil 2.10’da Inconel 718 alaşımı sıcak haddelenmiş formda, farklı solüsyona alma sıcaklıklarına göre değişim gösteren mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.10. Sıcak haddelenmiş Inconel 718: (a) 954°C’de solüsyona alınmış, 1000X büyütme, (b) 1066°C’de solüsyona alınmış, 100X büyütme [25].

Bu alaşımda mekanik özellikleri olumsuz etkileyen topolojik olarak sıkı paketlenmiş fazlar (σ , η , μ) çok daha düşük miktarda oluşmaktadır. Örneğin laves fazı döküm ve kaynaklanmış alaşımın mikroyapısında gözlenirken, dövme formunda oluşmamaktadır. Laves fazı, A_2B kimyasal bileşiği şeklinde ifade edilir. A: nikel, demir, mangan, krom ve silisyum; B: niyobiyum, molibden ve titanyum elementlerini sembolize etmektedir. Laves fazı oluşumu daha çok silisyum, titanyum, niyobiyum ve krom tarafından teşvik edilirken, nikel bu fazın oluşumunu sınırlandırmaktadır. HMK kristal yapıda α -Cr, intermetalik fazların yapıda yoğun bir şekilde çökelediği nikelce yoksun bölgelerde küresel biçimde oluşur [13,17]. Inconel 718 alaşımında baskın olan karbür fazı, niyobiyumca zengin MC (NbC) tip fazdır. Bu faz solüsyona alınmış alaşımda, kaba düzensiz partiküller halinde hem tane içinde hem de tane sınırlarında bulunmaktadır. Şekil 2.11. (a)-(b)’de solüsyona alınmış ve yaşlandırılmış Inconel 718, karbür fazı yapısı SEM görüntüleri verilmiştir.

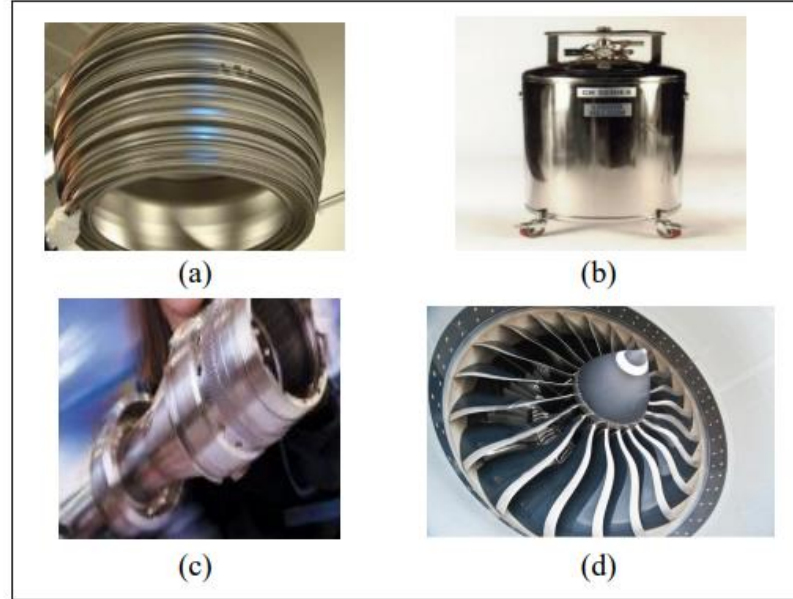


Şekil 2.11. Solüsyona alınmış ve 955°C’de 3,5 saat yaşlandırılmış Inconel 718 tane sınırlarında oluşan karbür çökeltileri ve δ fazı: (a) 1000X büyütme, (b) 5000X büyütme [20].

İlave karbür fazı yaşlandırma işlemi süresince çökelmektedir. Bu karbür çökeltileri tane sınırlarında çekirdeklenir ve γ'' , γ' çökeltilerinin bulunmadığı bölgelerin oluşmasına katkı sağlar. MC tip karbürlerin $M_{23}C_6$ ve M_6C formlarına dönüşüm eğilimi vardır. $M_{23}C_6$ karbürlere dönüşümü uzun süreli yaşlandırma sonucu gerçekleşir. M_6C tip karbürler ise $\sim 650^\circ\text{C}$ sıcaklık değerinde gerilme etkisinde oluşmaktadır [23, 25].

2.3.4. Inconel 718 Uygulama Alanları

Inconel 718 alaşımının özelliklerini belirleyen yeterli dayanım, iyi süneklilik ve yüksek sıcaklık sürünme direnci gibi mekanik özellikler, γ' , γ'' ve δ fazlarının tane boyutu ve miktarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesiyle sağlanmaktadır [21]. Bu özellikler sayesinde, Inconel 718 özellikle uçak gaz türbin motorlarında orta sıcaklık türbin diskleri için yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Ayrıca, 1970'lerden bu yana dünya çapında önde gelen dövme süper alaşımlar grubunda bulunmaktadır. Şekil 2.12 'de Inconel 718'in çeşitli uygulama alanlarından bazı örnekler gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Inconel 718 uygulama alanları: (a) kompresör rotoru, (b) krayojenik tank, (c) şaft, (d) türbin diskleri.

Özellikle 650°C 'ye kadar olan sıcaklık aralığında mükemmel mekanik özelliklere sahip olması, Inconel 718'in dünya standartlarında türbin disklerinde tercih edilen bir malzeme haline gelmesini sağlamıştır. Bu malzemenin türbin disk

uygulamaları için tercih edilmesindeki ana faktörlerden bazıları, homojenik bir yapıya sahip olması, istenilen sünekliğin elde edilebilmesi, tatmin edici bir yorulma direnci sergilemesi ve sürünme direncinin maksimum uygulama sıcaklıklarında yeterli olmasıdır [13]. Inconel 718, mükemmel korozyon ve oksidasyon direncinin yanı sıra, -217°C ile 705°C arasında mükemmel dayanım, süneklik ve tokluk özelliklerine sahiptir. Deniz suyu korozyon direncinin yüksek olması, bu alaşımı denizcilik uygulamalarında tercih edilen bir malzeme haline getirmiştir. Hem döküm hem de dövme şeklinde kullanılan Inconel 718, havacılık, uzay, nükleer ve petrokimya endüstrileri için vazgeçilmez bir malzemedir. Havacılık uygulamalarında, motor parçaları (kompresör, türbin diskleri, kanatçıklar), cıvata gibi parçalarda sıklıkla kullanılırken, kriyojenik tanklar ve uydu güç kaynağı bataryalarında da (-162°C sıcaklıklarda) kullanılmaktadır [23].

2.4. Borlama

Borlama yöntemi, yüzey işlemlerinin ana metotlarından olan yüzey dönüşüm işlemlerinden biri olup bu yöntem sayesinde malzeme yüzeyinde oluşturulan borür tabakaları ile yüzey sertliği önemli seviyede artırılabilirken bunun yanında tribolojik özellikleri ve korozyon direnci geliştirilebilmektedir [26]. Termokimyasal ve elektrokimyasal olarak uygulanabilen ve difüzyon esaslı bir yöntem olan borlama işlemiyle diğer yöntemlere nazaran daha iyi yüzey özellikleri (sertlik, aşınma, düşük sürtünme katsayısı vb.) elde edilebilmektedir. Borlama işlemi sonucunda metal yüzeyinde tek (Me_2B) ya da çok fazlı ($\text{Me}_2\text{B}+\text{MeB}$) intermetalik tabakalar oluşabilmektedir. Bor atomları ısı veya elektrik enerjisi ile metal yüzeyine difüze olarak ana metal atomlarıyla uygun borürler oluşturmaktadır. Borlama demir esaslı, demir dışı, sermet ve seramik malzemeler gibi çok çeşitli malzemelere uygulanabilmektedir. Borlama işlemi ile malzeme yüzeyinde yüksek sertlik ve aşınma dayanımı, düşük sürtünme katsayısı, yüksek korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci sağlanmaktadır [27].

Borlama işlemi, yüzeyi difüzyona engel olabilecek kirliliklerden iyice temizlenmiş malzemelere 800°C ile 1100°C sıcaklık aralığında 1-10 saat işlem süresi boyunca katı, sıvı, pasta, gaz gibi farklı bor kaynağı fonksiyonu gören ortamlarda gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca plazma borlama, akışkan yatakta borlama, PVD, CVD ve iyon biriktirme gibi borlama yöntemleri de kullanılmaktadır [28].

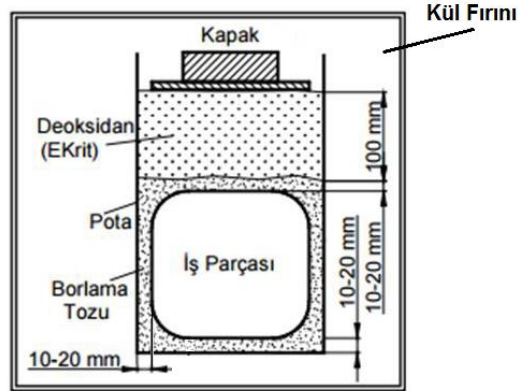
Borlama işleminde bor atomlarının malzeme yüzeyine difüze olmasıyla malzeme yüzeyinin üst kısmında borür tabakası, tabakanın altında geçiş bölgesi ve geçiş bölgesinin de altında matris bölgesi oluşumu gözlemlenmektedir [26]. Termokimyasal borlama metotlarıyla herhangi bir altlık malzemenin yüzeyindeki borür tabakası oluşumunun borlama bileşiminden bağımsız olarak iki tepkime basamağında gerçekleşmekte olduğu düşünülmektedir. İlk tepkime basamağında borlama bileşimi ile altlık malzemenin ara yüzeyi arasında gerçekleşen borür çekirdeklenmesidir. Çekirdeklenme hızı; borlama metodu, borlama bileşimi, elektrolit türü (oksit ya da florür), borlama bileşiminin borlanacak numune yüzeyini sarma kalınlığı, borlama sıcaklığı ve borlama süresine bağlıdır. İkinci tepkime adımı ise belirli bir kristalografik doğrultu boyunca bor atomlarının altlık malzemeye yayınımına bağlı olarak borür tabakasının gelişmesi ve büyümesidir [28]. Borlama yöntemi, borlama bileşimi, borlanacak malzeme ve malzemenin kimyasal bileşimi, proses süresi ve sıcaklığı bor elementinin yayınımına dolayısıyla da borür tabakasının kalınlığına ve morfolojik özelliklerine etki etmektedir [29,30].

Borlama ile diğer difüzyon esaslı yüzey geliştirme yöntemleri karşılaştırıldığında, elde edilen tabaka kalınlığı değeri sementasyon, alüminyumlama veya silisleme yöntemleriyle elde edilen tabaka kalınlıklarına göre daha düşük olmasına rağmen titanyum karbür kaplama hariç diğer metotlarla elde edilen tabakalara nazaran daha sert tabakalar elde edilebilmektedir [31,32].

2.4.1. Kutu Borlama Yöntemi

Kutu borlama yöntemi; uygun bir kutu içerisinde borlanacak malzemenin Şekil 2.13' te gösterildiği üzere borlama karışımıyla sarılarak belirli sıcaklık ve sürelerde bekletilmesiyle gerçekleştirilen termokimyasal borlama yöntemlerinden biridir. Kutu (katı) borlama prosesi yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygun, oksidasyona karşı dayanıklı potalar (paslanmaz çelik vb.) içerisinde gerçekleştirilmektedir [33]. Borlama işlemi genellikle 700-1050°C sıcaklıklarında 1-12 saat arasındaki işlem süreleri boyunca yapılmaktadır [30]. İstenilen borür tabakası yapısı ve kalınlığı için istenilen işlem sıcaklığı ve süresi tercih edilebilmektedir. Kutu borlama prosesi atmosferik koşullarda uygulanabilirken, atmosfer kontrollü (soy gaz atmosferinde) ortamlarda da yapılabilmektedir [34]. Kutu içerisindeki borlanacak malzemenin etrafı borlama

bileşimi (karışımı/tozu) ile en az 10-20 mm kalınlığında sarılmış olmalı ve kutu kapağı hava girişini engelleyecek şekilde tatlı sıkı geçme şeklinde kapatılmalıdır.



Şekil 2.13. Kutu (katı) borlama işleminin şematik gösterimi [35].

Uygulanabilirliğinin güvenli ve basit olması, borlama bileşiminin istenildiği şekilde değiştirilebilmesi, uygulama için gereken teçizat ve donanımın basitliği ile düşük maliyetli oluşu gibi faktörler dolayısıyla kutu borlama yönteminin uygulama alanı geniştir ve diğer yöntemlere nazaran tercih edilmektedir [36].

2.4.2. Borlama Bileşimi

Kutu borlama işleminde kullanılan borlama karışımları katı ve toz formda olup karışımı bor kaynağı, aktivatör ve seyreltici gibi bileşenler oluşturmaktadır [35,37]. Borlama ortamını atmosfer koşullarından korumak için borlama karışımının üst kısmına dolgu malzemesi olarak eklenen EKrit tozu da kullanılabilir [33,38].

Borür tabakasının oluşması ve büyümesi için gerekli bor, bor kaynaklarından sağlanmaktadır. Aktivatörler borlama işlemini aktive ederler, demir esaslı malzemelerde Fe ile reaksiyona girerek ilk borür tabakası çekirdeğinin yüzeyde oluşmasını sağlarlar. Bu olaydan sonra borür tabakası aktivatörden bağımsız olarak gelişmekte ve büyümektedir. Bor kaynağının belirli bir seviyeye kadar seyreltilmesinin (serbest bor konsantrasyonunun istenilen seviyede olması için) sağlanması için seyreltici görevindeki kimyasalın ortamda bulunması gerekmektedir. [27,39]. Sonuç itibarıyla seyrelticiler akışkanlık sağlamakta ve bor miktarını kontrol etmektedir [40]. Bor kaynağı olarak çoğunlukla B_4C , ferrobör ve amorf bor kullanılırken seyreltici olarak ise SiC ve Al_2O_3 kullanılmaktadır. Aktivatör olarak

genellikle NaBF_4 , KBF_4 , $(\text{NH}_4)_3\text{BF}_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ gibi kimyasallar tercih edilmektedir. Kutu borlama işlemi, ekseriyetle patentlerle korunan karışımlar ile yapılmaktadır. Genel olarak ticari karışımlar B_4C , KBF_4 ve SiC tozları içermektedir. Ayrıca kutu borlama işleminde çok çeşitli karışımlar da kullanılmaktadır [27].

Ayrıca borlama bileşimini oluşturan tozların tane boyutu da borür tabakası oluşumunu etkilemektedir. Tane boyutunun küçülmesi sonucunda, ana malzeme ile temas yüzeyi artmakta; böylece yayınma işlemi daha kolay hale gelmekte ve borür tabakası daha hızlı oluşmaktadır [27].

2.5.Boralüminyumlama

Boralüminyumlama, borlamaya benzer şekilde, kaplama karışımına alüminyum (Al) ilavesi ile kaplama karışımı elde edilmekte ve kaplama uygulaması gerçekleştirilmektedir. Boroalüminizasyon (boro-aluminizing), yüzeylerinde sert borür tabakaları oluşturarak metallerin ve alaşımların performansını ve dayanıklılığını artıran çok yönlü bir yüzey kaplama yöntemidir. Boralüminyum katman esas olarak Ni_3Al , Ni_2Al_3 , Ni_4B_3 fazlarından oluşur. Yöntem seçimi, özel uygulama gereksinimleri, malzeme özellikleri ve kaplanan yüzeyin istenen özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Bu işlem, zorlu endüstriyel uygulamalarda kullanılan bileşenlerin hizmet ömrünü uzatmada ve güvenilirliğini artırmada çok önemli bir rol oynamaktadır [48].

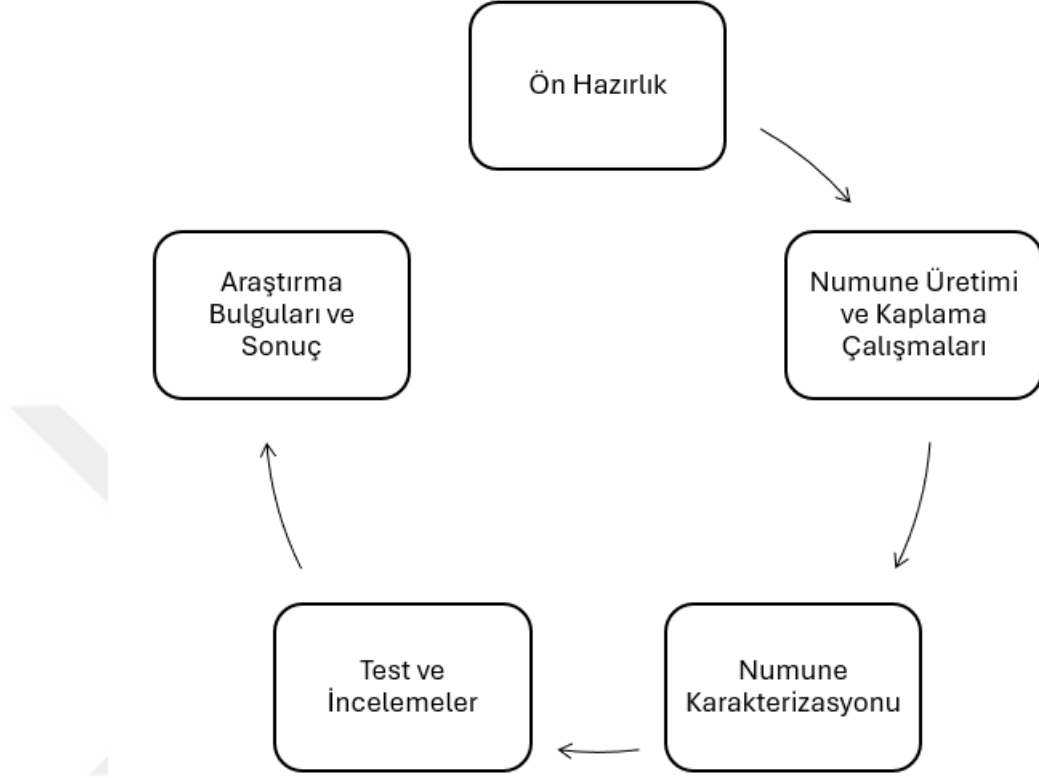
Boralüminyumlama, metallerin ve alaşımların yüzey özelliklerini iyileştirmek, özellikle sertliklerini, aşınma dirençlerini ve korozyon dirençlerini artırmak için kullanılan bir yüzey özelliklerini iyileştirme prosesidir. Boralüminyumlama, bor ve alüminyumun metal bir alt tabakanın yüzeyine difüzyonunu içermektedir. Bu işlem tipik olarak metalin toz haline getirilmiş bor ve alüminyum karışımında veya bu elementleri içeren erimiş tuz banyosunda ısıtılmasıyla yapılmaktadır. Boralüminyumlamanın birincil amacı metal yüzeyinde sert borür tabakaları oluşturmaktır. Borürler, ana metalin kendisinden çok daha sert olan metallerle bor bileşikleridir. Bu katmanlar malzemenin aşınma direncini önemli ölçüde artırır. Bunlara ek olarak alüminyumun, bor ve yapı içerisinde bulunan nikel ile oluşturduğu çeşitli bileşikler sayesinde sürünme, korozyon ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özelliklerde de artış meydana gelmektedir [49].

Boralüminyumlama, havacılıkta türbin kanatları, otomotivde çeşitli motor parçaları ve imalat sektöründe kesici takımlar gibi malzemelerin yüksek aşınmaya maruz kaldığı endüstrilerde uygulama alanları bulunmaktadır. Toz karışımlar kullanarak paket sementasyon, buhar fazı biriktirme ve erimiş tuz banyosu işlemleri dahil olmak üzere çeşitli boralüminyumlama yöntemleri vardır. Her yöntemin kendine özgü avantajları bulunmaktadır ve malzemelerin çalışma koşullarının özel gereksinimlerine göre uygun boralüminyumlama yöntemi seçimi yapılır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında izlenen yol haritası Şekil 3.1’de gösterilen akış içerisinde gerçekleştirilmiş ve tamamlanmıştır.



Şekil 3.1. Deneyisel çalışmaların yol haritası.

3.1.Kullanılan Hammadde ve Cihazlar

Eklemeli imalat prosesinde kullanılan Inconel 718 tozları ERMAKSAN MAKİNA SANAYİ ve TİCARET A.Ş. şirketi tarafından temin edilmiştir. SLE prosesinde kullanılacak olan tozun 20-45 µm aralığında olduğunu gösteren grafik lazer kırınımı prensibi ile ölçüm yapan sıvı dispersiyonlu Malvern Mastersizer 3000 partikül boyut dağılım cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cihaz, boyutunun ölçüleceği partiküllerin su ya da bir başka sıvı içinde sürekli karıştırma etkisiyle karıştırmakta ve çökmelerine izin vermemektedir. Bu sırada partiküllerin üzerine sürekli olarak lazer ışını gönderilmekte, ışınların kırınım açılarına bağlı olarak partiküllerin ortalama tane boyutu tayin edilmektedir. Kullanılan tozun görünür yoğunluk, sıkıştırılmış yoğunluk, akış hızı (Hall Flow) testi sonuçları ve Hausner oranı da Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Inconel 718 tozu özellikleri.

Akış Hızı (Hall Flow)	29.47 saniye
Görünür Yoğunluk	4.28 gr/cm ³
Sıkıştırılmış Yoğunluk	5.26 gr/cm ³
Hausner Oranı	1.22

Ayrıca, Inconel 718 süper alaşım tozunun kimyasal kompozisyonu, ağırlıkça % element miktarı Tablo 3.2’de verilmiştir. Tozun serilebilmesi ve paketlenabilirliğini etkileyen en önemli hususlardan biri tozun morfolojik yapısıdır. İlgili tez çalışmasında kullanılacak Inconel 718 süper alaşım tozunun morfolojik yapısını incelemek üzere Zeiss marka SEM Gemini 500 model cihaz ile SEM analizi yapılarak incelenmiştir.

Tablo 3.2. Inconel 718 tozunun kimyasal bileşimi.

	Al	Cr	Mo	Nb	Ni	Fe	Ti	C	O	N	S
Ağ. %	0,45	17,94	3,24	5,38	53,38	18,88	0,87	0,0441	0,0044	0,0104	0,0004

3.2.Eklemeli İmalat ile Numune Üretimi

3.2.1. Proses Parametreleri

Inconel 718 tozundan boyu 118 mm, çapı 11.9 mm, iç uzunluğu 45mm olmak çekme testi numuneleri ve diğer numuneler Şekil 3.2’de gösterilen 250x250x300 mm³ üretim hacimli 1 kW lazer gücüne sahip yerli ENAVISION-250 metal eklemeli imalat SLE makinesinde üretilmiştir. Inconel 718 malzemesinin oksijene karşı yüksek reaktifliğinden dolayı üretim kabini, koruyucu gaz olarak Argon gazı ile kontrol edilmiştir. Inconel 718 toz malzemesinden üretilen deney numunelerinin üretim parametreleri Tablo 3.3’te verilmiştir. Ayrıca, Inconel 718 deney numunelerinin SLE cihazında üretildikten sonraki görüntüleri Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.2. ENAVISION-250 metal eklemeli imalat makinesi [44].

Tablo 3.3. Inconel 718 numunesinin üretim parametreleri.

Katman Kalınlığı	t	0,03 mm
Laser Tarama Hızı	LS	800 mm/s
Laser Tarama Gücü	LP	220 W
Tarama Mesafesi	hd	0,1 mm
Laser Tarama Açısı		67°
Tabla Sıcaklığı	T	0 °C



Şekil 3.3. Inconel 718 deney numunelerinin SLE cihazında üretildikten sonraki görüntüleri.

Ayrıca, SLE ile üretilen numunelerin yoğunluk analizleri Şekil 3,4'te gösterilen Micromeritics AccuPyc II 1345 Gaz Piknometre Yoğunluk Ölçüm Cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Micromeritics AccuPyc II 1345 gaz piknometre yoğunluk ölçüm cihazı.

3.3. Numune Isıl İşlem ve Kaplama Uygulamaları

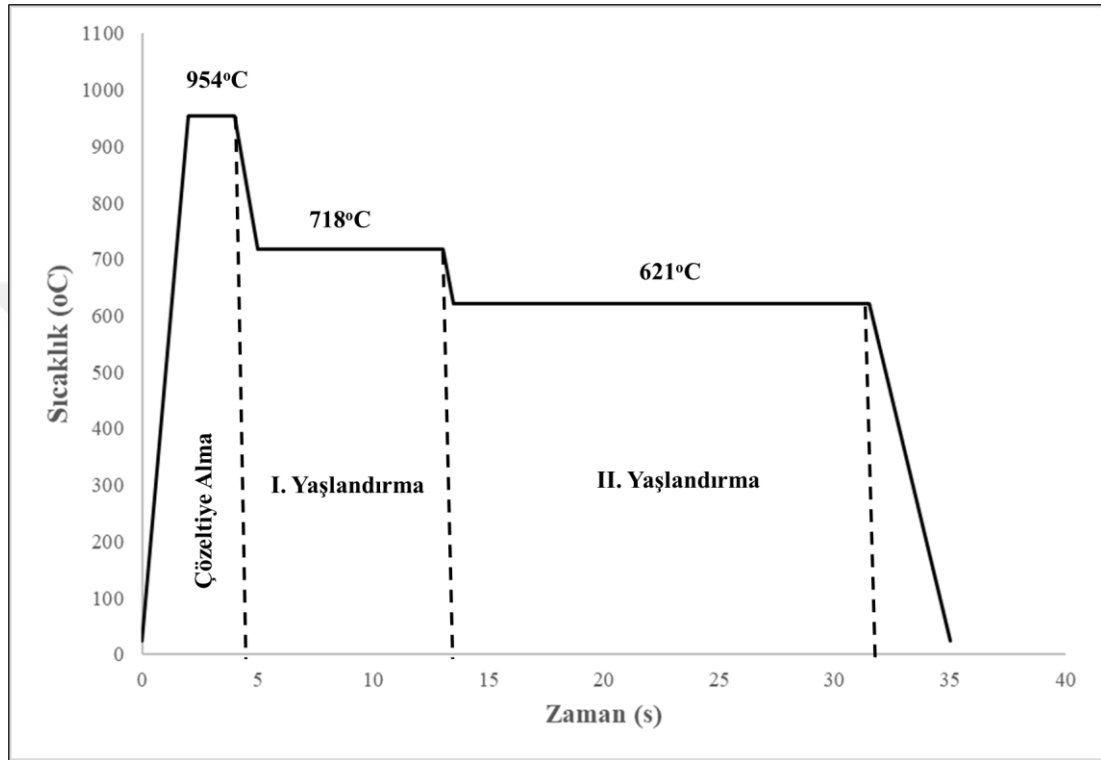
3.3.1. Isıl İşlem Rejimi

Tez çalışmasında 4 farklı numune üzerinde çözeltiye alma süresine bağlı olarak 3 farklı ısıl işlem rejimi uygulanmıştır. Isıl işlem rejimleri Şekil 3.5'te ve Tablo 3.4'te gösterildiği gibidir. A1 numaralı numune ısıl işlem uygulanmadan direkt olarak üretildiği gibi (as-print) standart numune olarak nitelendirilerek incelenmiştir. Yapılan ısıl işlemler sonucunda çözeltiye alma sürelerindeki değişimin mikroyapı ve faz dağılımlarında nasıl bir etki oluşturduğu incelenmiştir. Buna ek olarak borlama yapılan numunelerde çözeltiye alma süresinin bor tabakası kalınlığına olan etkisi ayrıca incelenmiştir.

Tablo 3.4. Numunelere uygulanan ısıl işlem rejimleri.

# Num une	Yüzey İşlemi / Isıl İşlem	Çözeltiye Alma Sıcaklığı (°C)	Çözeltiye Alma Süresi (saat)	1. Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	1. Yaşlandırma Süresi (saat)	2. Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	2. Yaşlandırma Süresi (saat)
A1	AMS 5662 Isıl İşlem	954	1	718	8	621	18

B2	Borlama	954	2	718	8	621	18
B4	Borlama	954	4	718	8	621	18
BA2	Bor alüminyum	954	2	718	8	621	18



Şekil 3.5. Numunelere uygulanan ısıtım işlem rejimi.

3.3.2. Borlama İşlemi

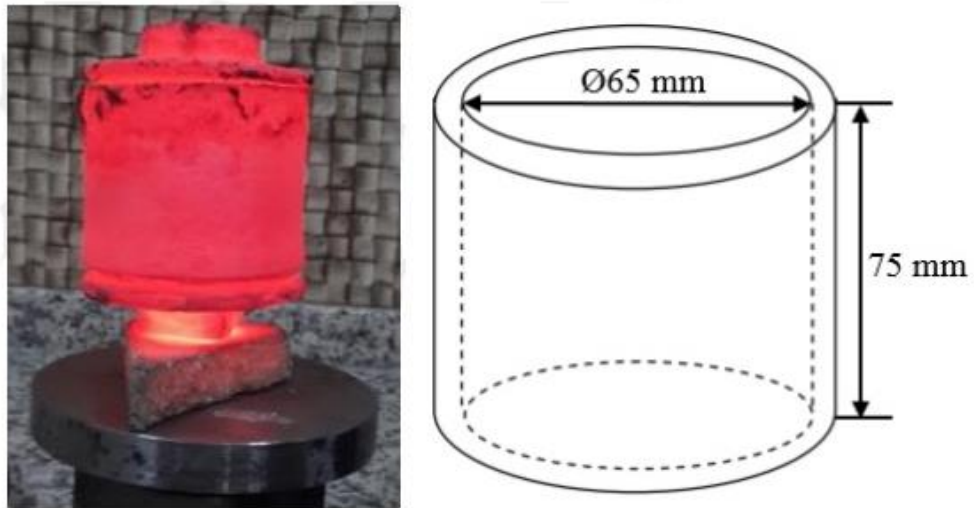
Pratik ve düşük maliyetli olması nedeniyle numunelere kutu borlama işlemi uygulanmıştır. Numuneler çelik kutulara konulup borlama işlemi yapıldığı için bu yöntem kutu borlama denmektedir. Şekil 3.6'da kutu borlama yapılan borlama kutusu görülmektedir. Borlama kutuları, dökme demir malzemeden üretilmiş olan 65 mm çap değerine sahip 2 adet kör tapa ve 1 adet manşonun revize edilerek montajlanmasıyla üretilmiştir.

Borlama yapılırken yüksek sıcaklıklara çıkılması nedeniyle metal borlama kutuları oksidasyona maruz kalmaktadır. Bu nedenle kutularda tufaller oluşmakta ve birkaç kullanımdan sonra kutular kullanılamamaktadır. Tablo 3.5.'te kutu borlama için

kullanılan 250 gr borlama karışımını oluşturan kimyasalların fiziksel özellikleri ve karışım içerisinde ağırlıkça % olarak dağılımları verilmiştir. Borlamadan sonra yüzeydeki oksitlerin giderilmesi ve tüm numunelerde birbirine yakın bir yüzey pürüzlülük değeri elde edilmesi için numuneler sırasıyla 400,600, 800 ve 1000 gritlik SiC aşındırıcı kağıtlar ile zımparalanmıştır. Numunelerin yüzeylerinde görülen yağ, pas ve kirlilikler aseton yardımıyla temizlenmiştir [47].

Tablo 3.5. Kutu borlamada kullanılan tozların kimyasal ve fiziksel özellikleri, ağırlıkça % dağılımları.

Borlama Karışım Bileşenleri	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Erime Noktası (°C)	% Ağırlık
Borik Asit	H ₃ BO ₃	61,83	1,51	450	22,15
Silisyum Karbür	SiC	40,09	3,21	2700	72,5
Potasyum Tetrafloraborat	KBF ₄	125,90	2,50	530	5



Şekil 3.6. Borlama kutusu ölçüleri [47].

3.3.3. Boralüminyumlama İşlemi

Borlama işlemiyle aynı şekilde kutu borlama yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.6’da, boralüminyumlamada kullanılan 250 gr boralüminyumlama karışımını oluşturan kimyasalların fiziksel özellikleri ve karışım içerisinde ağırlıkça % olarak dağılımları verilmiştir. Boralüminyumlamadan sonra yüzeydeki oksitlerin giderilmesi ve tüm numuneler için standart bir başlangıç yüzey pürüzlülük değeri elde edilmesi için numuneler sırasıyla 400, 800 ve 1000 gritlik SiC aşındırıcı kağıtlar ile zımparalanmıştır. Bunun yanında numunelerin yüzeylerindeki yağ, pas ve kirlilikler aseton yardımıyla temizlenmiştir [47].

Tablo 3.6. Kutu boralüminyumlamada kullanılan tozların kimyasal ve fiziksel özellikleri, ağırlıkça % dağılımları.

Borlama Karışım Bileşenleri	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Erime Noktası (°C)	% Ağırlık
Borik Asit	H ₃ BO ₃	61,83	1,51	450	11,25
Silisyum Karbür	SiC	40,09	3,21	2700	36,25
Potasyum Tetrafloraborat	KBF ₄	125,90	2,50	530	2,5
Alüminyum	Al	26,98	2,73	660	15
Alüminyum Oksit	Al ₂ O ₃	101,96	3,99	2072	32,5
Amonyum Klorür	NH ₄ Cl	53,49	1,53	338	2,5

3.4.Metalografik Numune Hazırlama

Toz yataklı seçici lazer ergitme yöntemiyle Inconel 718 alaşımından üretilmiş olan numuneler sırasıyla, kesme, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden

geçirilerek optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri için numunelerin yüzeyleri uygun hale getirilmiştir.

İlk olarak numuneler, Struers Labotom-3 masa üstü numune kesme cihazı ile kaplanmış yüzeylere dik doğrultuda kesit alanının incelenmesi amacıyla uygun boyutlarda kesilmiştir. Kesilen numuneler Struers CitoPress-1 otomatik bakalite alma cihazı yardımıyla bakalite alınmıştır. Ardından sırasıyla 120, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 mesh boyutlarına sahip SiC zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin ardından numunelerin yüzeyleri 1µm'luk monokristal elmas süspansiyon ile parlatılmıştır. Ardından, mikroyapının ortaya çıkmasını sağlamak amacıyla yüzeye daldırma işlemi yapılmıştır. Dağlanmış olan numunelerden Nikon LV 100 marka optik mikroskop yardımıyla farklı büyütme ölçeklerinde fotoğraflar alınmıştır. Borür tabakalarının kalınlık ölçümleri için optik mikroskop ile uyumlu olarak çalışan Clemex Vision Lite Edition yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Struers Labotom-3 masa üstü numune kesme cihazı.



Şekil 3.8. Struers CitoPress-1 otomatik bakalite alma cihazı.



Şekil 3.9. Nikon LV 100 marka optik mikroskop.



Şekil 3.10. Borlama işlemi için kullanılan ısıtım fırınları.

3.5.SEM İncelemeleri

Borür tabakasının mikroyapısal özellikleri ve morfolojik yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, belirlenen numunelerin yüzeyinden ve kesitinden EDS analizleri ile elementel analiz yapılarak element kompozisyonları belirlenmeye çalışılmıştır.

3.6.Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri Emcotest Durascan (Şekil 3.11) marka mikrosertlik cihazında Vickers ucu kullanılarak 50 gr yükün 10 sn boyunca uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Borlanmış ve boralüminyumlama uygulanmış numunelerin yüzeyden içeriye doğru kesit boyunca mikrosertlik ölçümleri yapılarak sertlik profilleri çıkarılmıştır. Ölçümler ASTM C1327 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Yüzeyden itibaren içeriye doğru tabakadan (üst-orta-alt) olmak üzere ölçüm noktaları belirlenmiş ve her nokta için 3'er adet sertlik ölçümü alınmıştır. Bunların ortalaması alınarak o noktanın sertlik değeri belirlenmiştir. Ayrıca kaplama yapılan Inconel 718 alaşımının iç bölgesinden de 3'er adet sertlik ölçümü alınmış ve ortalama değerleri verilmiştir.



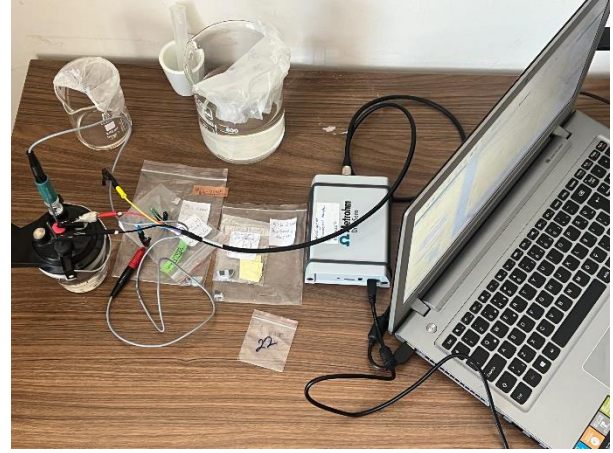
Şekil 3.11. Mikrosertlik ölçümü için kullanılan ölçüm cihazı.

3.7.XRD Analizi

X-ışını difraksiyonu (XRD) analizleri sonrasında elde edilen datalardan yola çıkarak, işlenmiş yüzeylerdeki mikro sertlik değerlerindeki değişimlerin, işlenmiş yüzey altında meydana gelen tane küçülmeleri ve ezerek parlatma operasyonundan kaynaklanan olası faz dönüşümü analizlerinin yorumlanmasına olanak sağlayan bir yöntemdir. XRD analizlerinden elde edilen değerler grafiklere dönüştürülür ve oluşan şekillerde piklerin şiddetine ve genişliğine bağlı olarak meydana gelen değişim yorumlanır [45]. SLE ile üretilen, iki farklı parametreyle yüzey iyileştirmeye tabi tutulan parçalara uygulanan XRD ölçümleri için Bruker D-8 Advance X-ışını Tek Kristal Kırınım Cihazı kullanılmıştır. Faz analizi kapsamında gerçekleştirilen XRD ölçümlerinde 1,54 Å dalga boyuna sahip Cu K α katot kullanılmış, akım ve voltaj değeri sırasıyla 40 mA ve 40 Kv olarak seçilmiştir. 2 Theta ölçüm aralığı literatür dikkate alınarak 20-80° seçilmiştir.

3.8.Korozyon Testi

Korozyon testi ölçümlerinde de açık devre potansiyeli (boş akım potansiyeli-ocp) 300 saniye süre ile 0,5 saniyede bir ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon potansiyel ölçümlerinden önce 120 saniye tekrar açık devre potansiyeli (OCP) ölçümü yapıp ölçülen potansiyel değerinin 1V altından ölçüm alınmaya başlanmıştır. Ölçümlerde her 0,001V değerinde bir ölçüm alarak bu 0,001V aralıkta 0,005 saniye bekleyerek ölçümler alınmıştır. Ölçüm aralığı OCP değerinin -1V değerinden başlayıp +1V a kadar çıkmıştır. Ölçümlerde üç elektrotlu korozyon hücresi kullanılmıştır. Elektrolit olarak %3.5 NaCl çözeltisi, her ölçüm için 100ml elektrolit olmak üzere kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak 0.25 cm² yüzey alanı hariç diğer yüzeyleri yalıtılmış numune kullanılmıştır. Karşıt elektrot olarak %99.99 saflıkta platin levha elektrot kullanılmıştır. Değerlerin okunmasında çift cidarlı ve her iki bölümünde de doymuş KCl çözeltisi bulunan referans elektrot kullanılmıştır. Ölçüm için Şekil 3.12'de görülen Mstat400 potansiyotat/galvanostat (Metrohm Dropsens, Oviedo, Asturias,Spain) marka cihaz ve hesaplamalarda cihaza ait metrohm dropsens firması tarafından geliştirilen cihaz ile entegre DropView8400 yazılımı kullanılmıştır. Hesaplamalar Tafel extrapolasyon yöntemi ile yapılmıştır.



Şekil 3.12. Korozyon ölçümü için kullanılan düzenek.

3.9. Aşınma Testi

Aşınma testleri tüm numunelere disk üzerinde bilye yoluyla (ball on disk) oda sıcaklığında ve kuru kayma şartlarında CSM Instrument Tribometer (Şekil 3.13) cihazında gerçekleştirilmiştir. Testler 10 N yük altında, 15 cm/s sabit kayma hızında, 3 mm iz yarıçapı kullanılarak 250 m mesafede gerçekleştirilmiştir. Numuneler 6 mm çapındaki Al_2O_3 bilyeye karşı aşındırılmıştır. Testler öncesinde tüm numunelerin yüzeyleri öncelikle borlama karışımı kalıntılarından temizlenmiştir. Daha sonra numuneler 20 sn boyunca SiC esaslı 2000 gritlik zımpara kağıdı ile zımparalanmış ve bu işlemde sonra yaklaşık 30 sn boyunca $1\mu m$ 'luk elmas süspansiyon ile parlatılmıştır. Aşınma testlerinden önce son olarak tüm numunelerin yüzeyi ve Al_2O_3 bilye etanol ile temizlenmiştir. Aşınma testi sonucunda her numune için mesafeye bağlı sürtünme katsayısı grafiği elde edilmiştir. Aşınan numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin aşınma derinlikleri Mitutoyo SurfTest SJ 301 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla belirlenmiştir. Her numunenin aşınma izinin farklı bölgelerinden 8 adet aşınma izi profili elde edilmiş ve aşınma izinin kesit alanı hesaplanmıştır. Ayrıca bu aşınma izleri dijital mikroskop ile görüntülenerek topografileri oluşturulmuş, aşınma genişlikleri ve derinlikleri analiz edilerek aşınma oranı hesaplanmıştır.

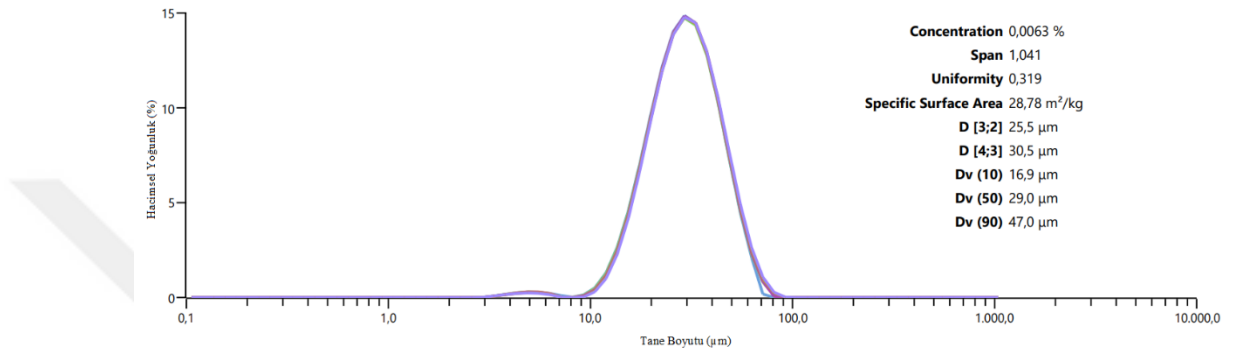


Şekil 3.13. CSM Instrument Tribometer ball on disk aşınma testi cihazı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

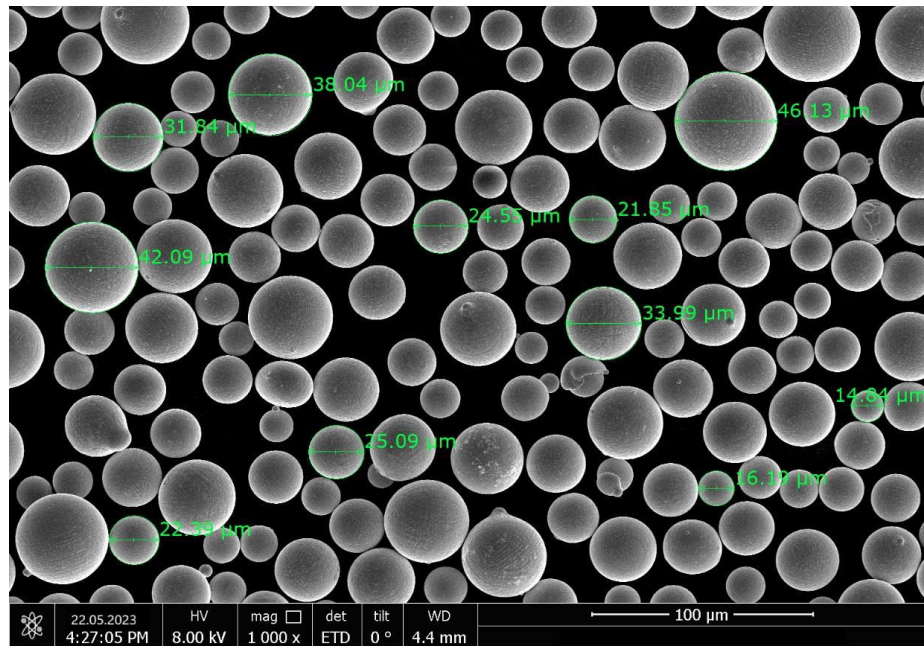
4.1.Tozun Karakterizasyonu

Seçici lazer ertitme ile üretim yapılırken, kullanılan tozun boyutunun 15 µm ile 45 µm arasında olması istenmektedir. Yapılan partikül boyut analizi sonucunda toz boyutu $D_{50} \approx 29.0$ µm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1.Partikül boyut analizi, Hacim Yoğunluğu- Parçacık Boyutu grafik gösterimi.

Inconel 718 toz malzemeye ait SEM görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde kullanılan tozun küresel geometrik özellikler sergilediği, kümelenme davranışının neredeyse olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.2. Inconel 718 tozunun SEM görüntüsü.

4.2.SLE ile Üretilmiş Numunelerin Yoğunluk Ölçümü

Enavision 250 toz yataklı seçici lazer ergitme cihazında üretilen parçanın helyum piknometresi ile yapılan yoğunluk analizinde numune parçasının yoğunluğu $8,1787 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Bu değeri Inconel 718 tozunun yoğunluğuna ($8,19 \text{ g/cm}^3$) oranladığımızda %99,86 gibi yüksek bir oran elde edildiği görülmüştür. Dolayısıyla ulaşılan yoğunluk değeri hesaplanan yazdırma parametrelerinin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.

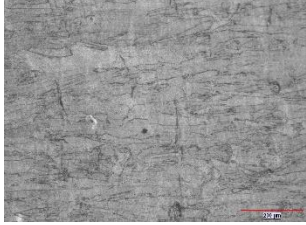
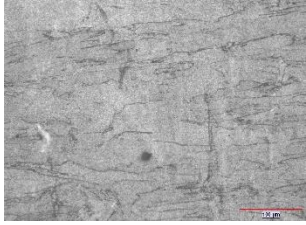
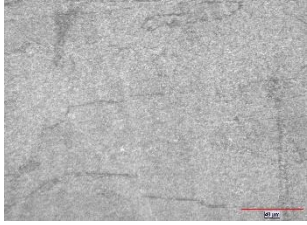
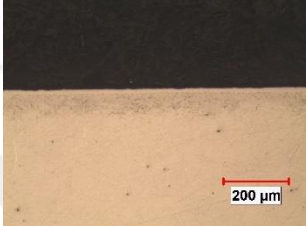
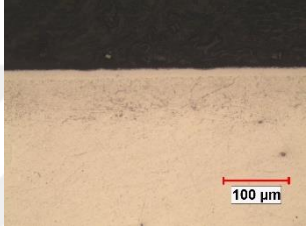
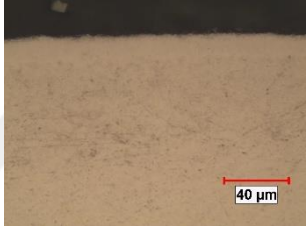
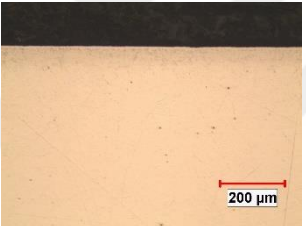
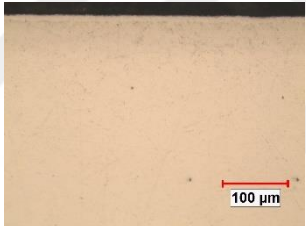
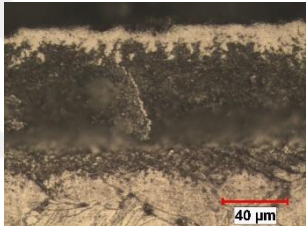
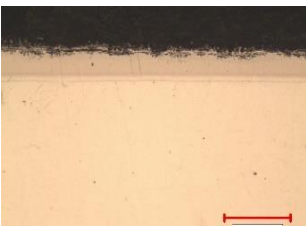
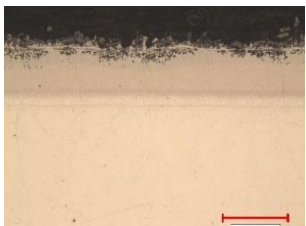
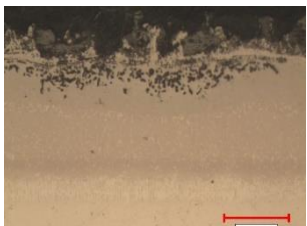
4.3.Borlama ve Boralüminyumlama Uygulanan Numunelerin Mikroyapı ve Yüzey Karakteristiğinin Değerlendirilmesi

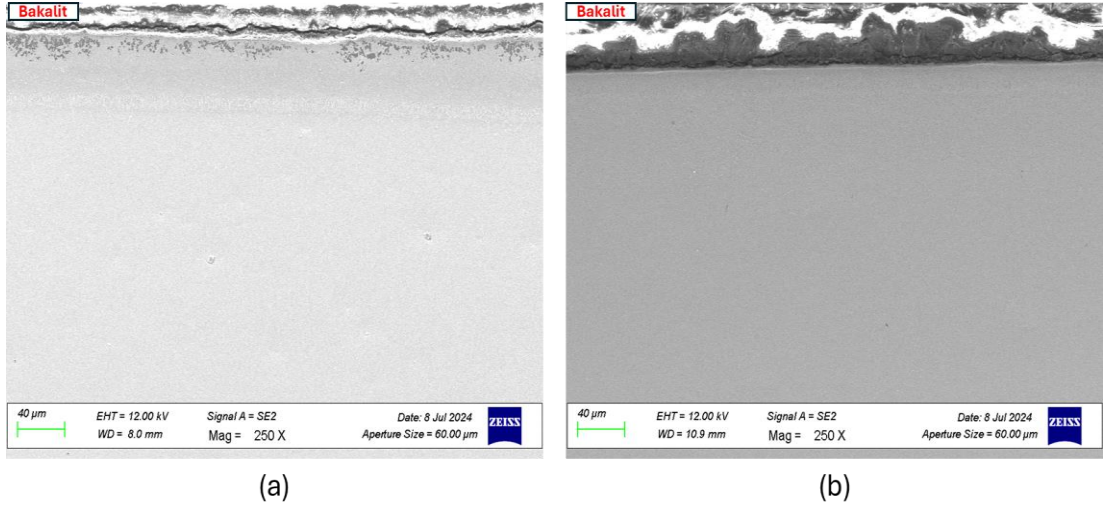
Isıl işlem uygulanmadan olduğu gibi üretilmiş standart (as-print) numune (A1 numunesi), 2 ve 4 saat olmak üzere farklı sürelerde ısıtılma işlemi ile birlikte borlama yapılmış numuneler (B2 ve B4 numuneleri) ve 2 saat ısıtılma işlemi ile birlikte boralüminyumlama yapılmış olan numuneye (BA2 numunesi) ait 100X, 200X ve 500X büyütmede optik mikroskoptan alınan mikroyapı görüntüleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Çözeltiye alma süresinin mikroyapıda meydana getirdiği değişimler ve kaplama yapılmış olan numunelerin yüzey ve yüzeyin hemen altında meydana gelen mikroyapı değişimleri görülmüştür. Yapılan incelemelerde çözeltiye alma ve kaplama süresinin artışıyla birlikte kaplama kalınlığının, difüzyon süresinin artması nedeniyle borür tabaka kalınlığında artış gözlemlenmiştir. Yüzeyden itibaren borlanan numunelerde ilk önce borür tabakası, tabakanın hemen altında geçiş bölgesi ve geçiş bölgesinin altında ise matris (altlık malzeme) bölgesi yer almaktadır. Boralüminyumlama yapılan numunede ise boralüminyum kaplama tabakası, tabakanın hemen altında ince taneli bir yapı ve altında daha iri taneli bir geçiş bölgesi ve geçiş bölgesinin altında ise matris (altlık malzeme) bölgesi yer almaktadır. Tablo 4.2’de 200X büyütmede kaplama kalınlıklarına ait optik mikroskop ile alınmış mikroyapı görselleri verilmiştir.

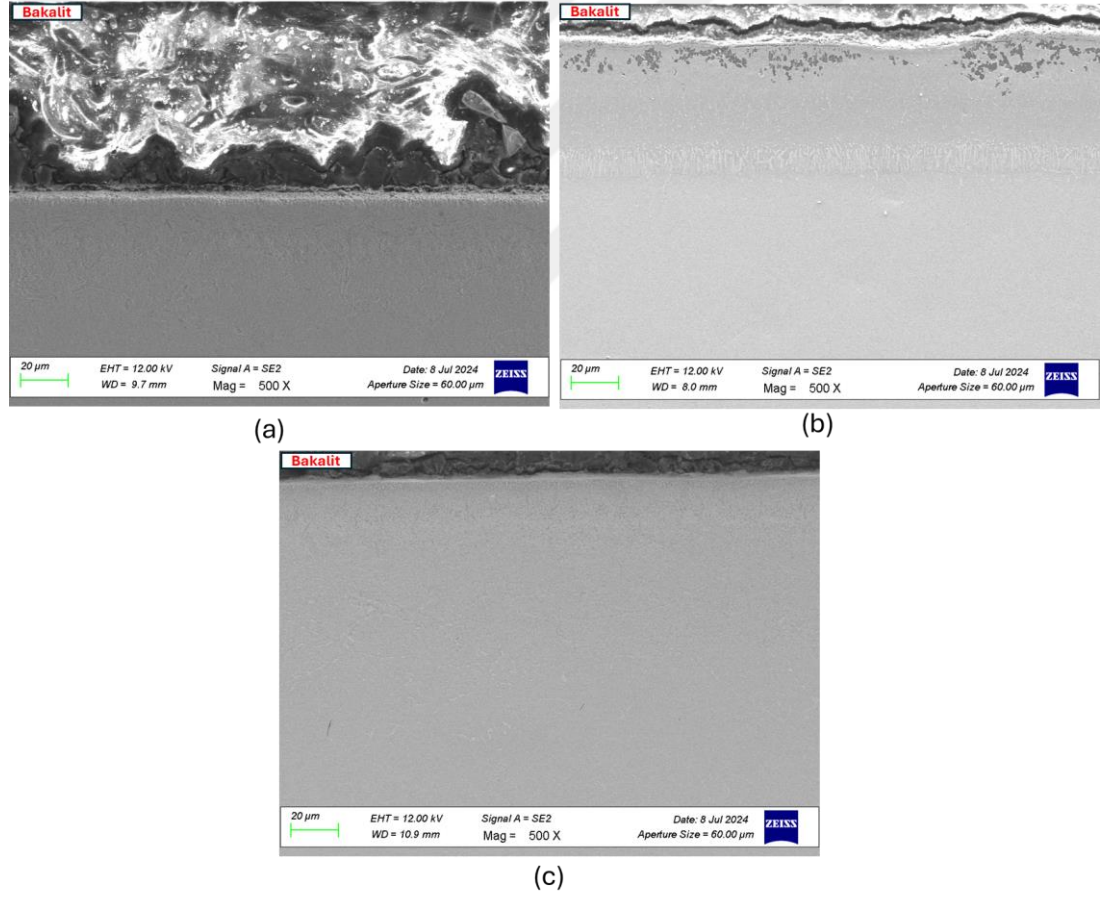
Numunelere ait SEM görüntüleri ise, Şekil 4.3’te 250X, Şekil 4.4’te 500X, Şekil 4.5’te 1000X ve Şekil 4.6’da 2000X büyütmedeki SEM görüntüleri olacak şekilde verilmiştir.

Tablo 4.1. Çözeltiye alınmış ve kaplanmış numunelerin farklı büyütmelerde mikroyapı görüntüleri.

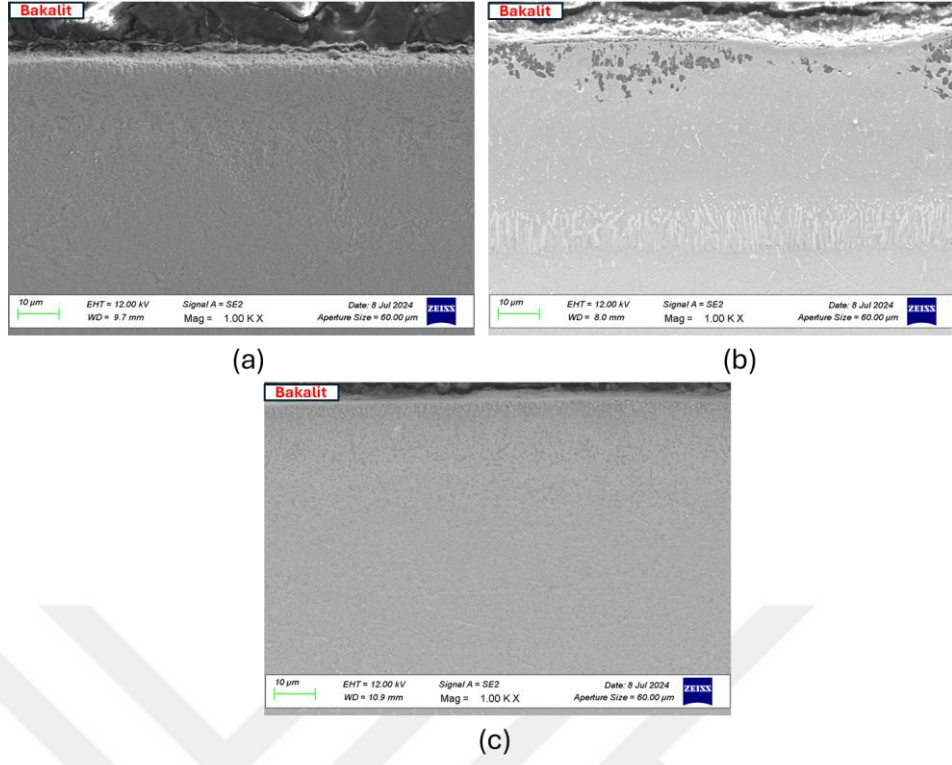
954 °C	100X	200X	500X
A1			
B2			
B4			
BA2			



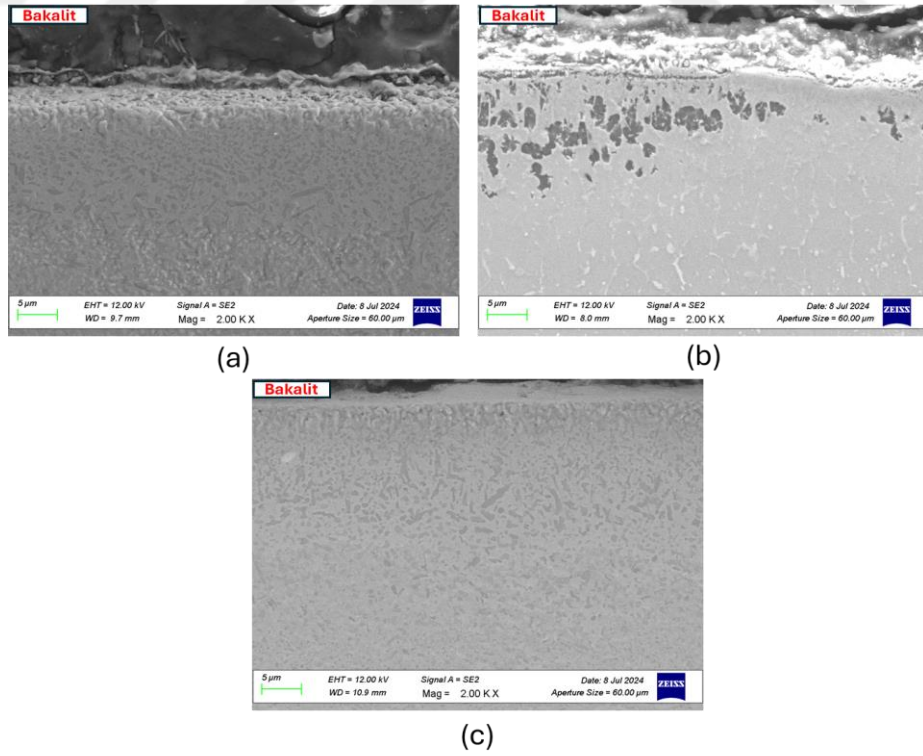
Şekil 4.3. 250 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B4 numunesi, (b) BA2 numunesi.



Şekil 4.4. 500 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B2 numunesi, (b) B4 numunesi, (c) BA2 numunesi.

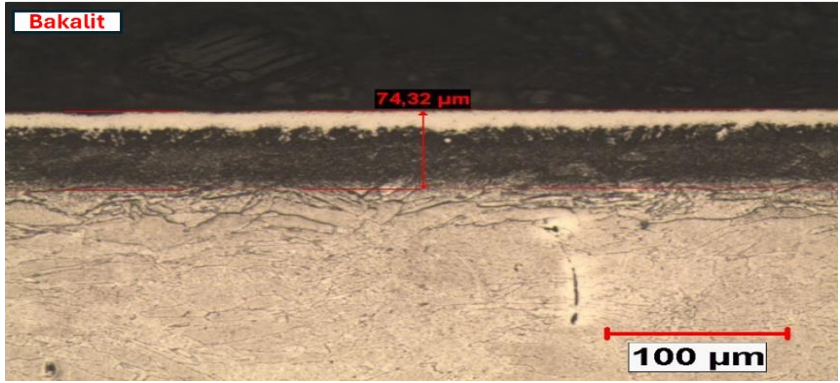
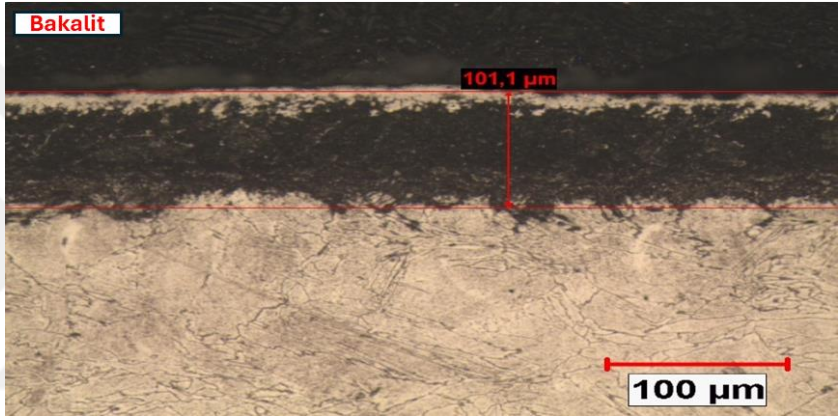
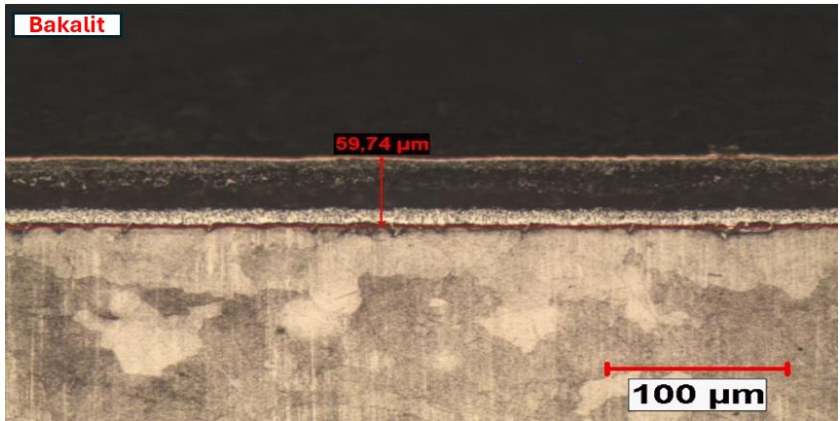


Şekil 4.5. 1000 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B2 numunesi, (b) B4 numunesi, (c) BA2 numunesi.



Şekil 4.6. 2000 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B2 numunesi, (b) B4 numunesi, (c) BA2 numunesi.

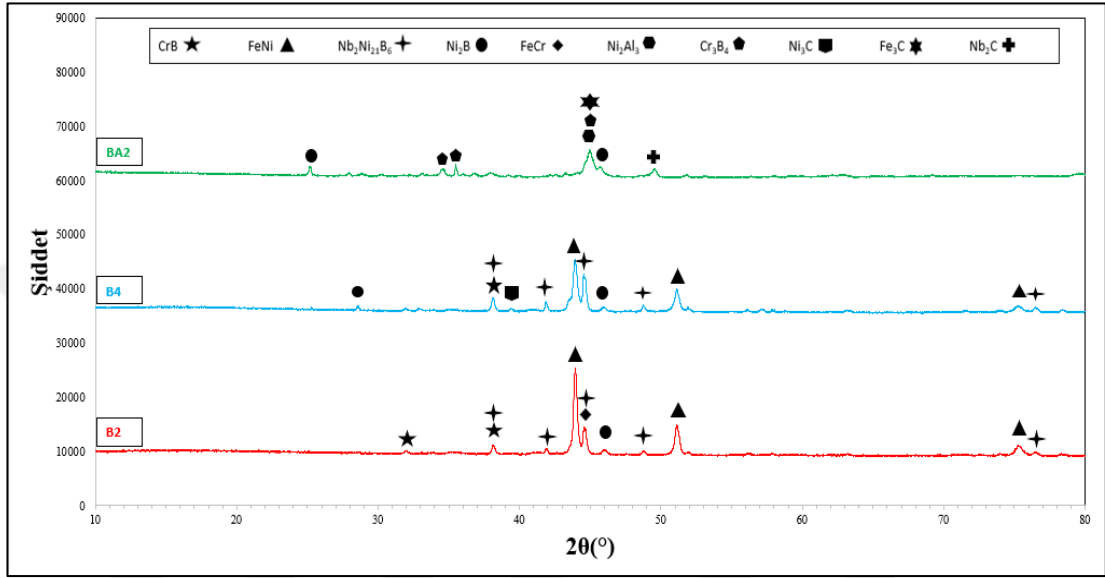
Tablo 4.2. Kaplanmış numunelerin kaplama kalınlıkları ve mikroyapı görüntüleri.

954 °C	200X
B2	
B4	
BA2	

4.4.Borlama ve Boralüminyumlama Uygulanan Numunelerin XRD Analiz Sonuçları

XRD analiz sonuçlarına ait paternler Şekil 4.7'de görülmektedir. XRD sonuçları borür tabakalarının kompleks bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Borlama süresinin artışına bağlı olarak borür miktarında ve tabaka kalınlıklarında artış meydana gelmektedir. $\text{Nb}_2\text{Ni}_{21}\text{B}_6$ (JCPDS-ICDD: 00-019-0836) fazını borlama yapılmış tüm numunlerde özellikle $45\text{-}50^\circ$ 2θ açısında pik yaptığı görülmektedir. Buna ek olarak borlama yapılmış olan numunlerde piklerin çeşidi ve dağılımı benzerlik göstermektedir. Borlama yapılmış olan numunlerde en dominant pikin FeNi fazı olduğu görülmektedir.



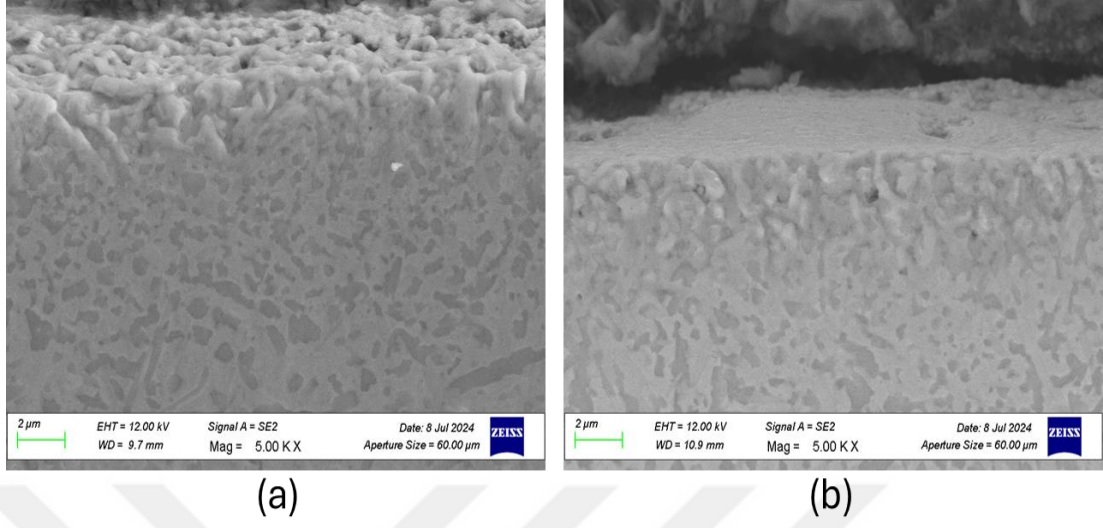
Şekil 4.7. Isıl işlem ve kaplama sonrası Inconel 718 numunelerinin XRD analizi.

Borlama süresinin artmasıyla borür fazlarının oluşumu da daha belirgin hale gelmektedir. Borür tabakası ağırlıklı olarak CrB (JCPDS-ICDD: 00-032-0277), $\text{Nb}_2\text{Ni}_{21}\text{B}_6$ (JCPDS-ICDD: 00-019-0836), Ni_3B (JCPDS-ICDD: 00-025-0576), Fe_3C (JCPDS-ICDD: 00-033-0644) gelmektedir. Boralüminyumlamada ise yapıda Ni_3Al_3 (JCPDS-ICDD: 00-012-1265) fazının en yüksek piki yaptığı ve Cr_3B_4 (JCPDS-ICDD: 01-076-0188) piklerinin fazla olması dikkat çekmektedir. Bunlara ek olarak yapı içerisinde demir esaslı FeNi (JCPDS-ICDD: 00-012-0736), FeCr (JCPDS-ICDD: 00-034-0396) pikleri ve buna ilave olarak Ni_3C (JCPDS-ICDD: 00-006-0697) ve Nb_2C (JCPDS-ICDD: 01-077-0988) karbür piklerinin olduğu da gözlenmiştir.

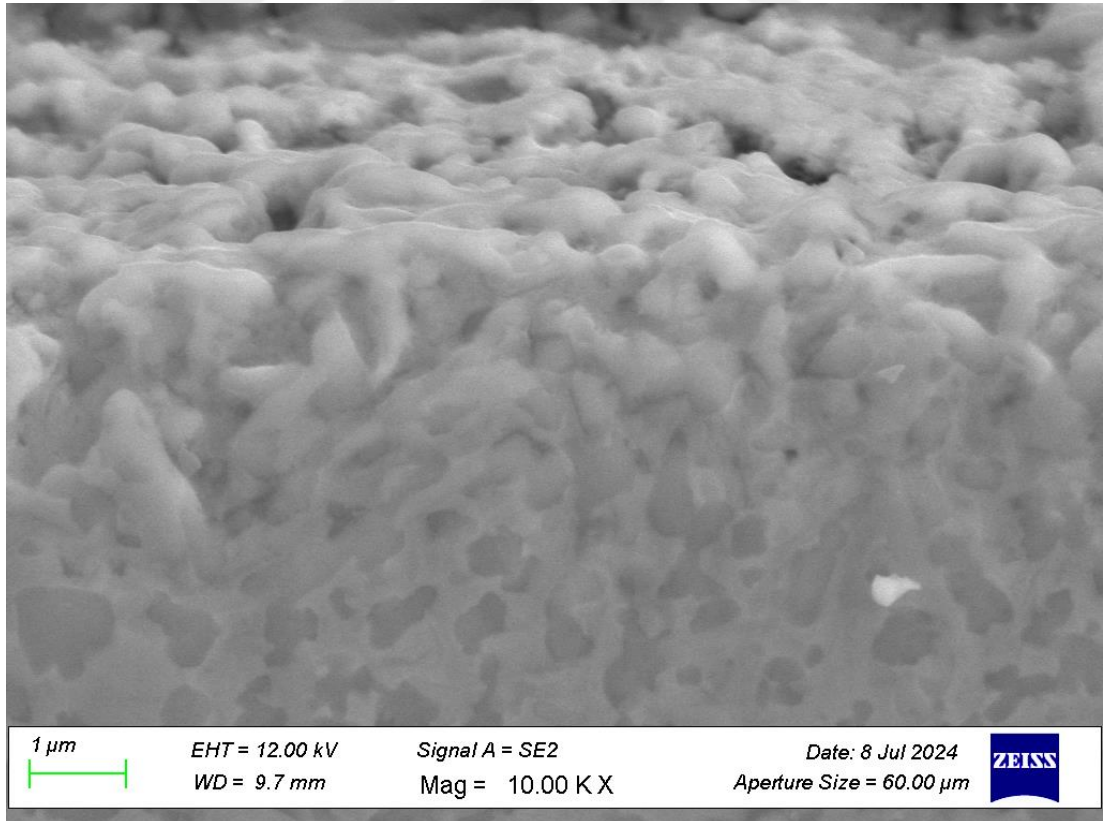
4.5.Elementel Analiz Sonuçları (EDS Analizi)

EDS (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) analizi borür tabakasının kimyasal bileşimini tanımlayarak hangi faz ya da fazlardan oluştuğunu tespit edebilmek için yapılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen EDS analizleri hem borlanmış

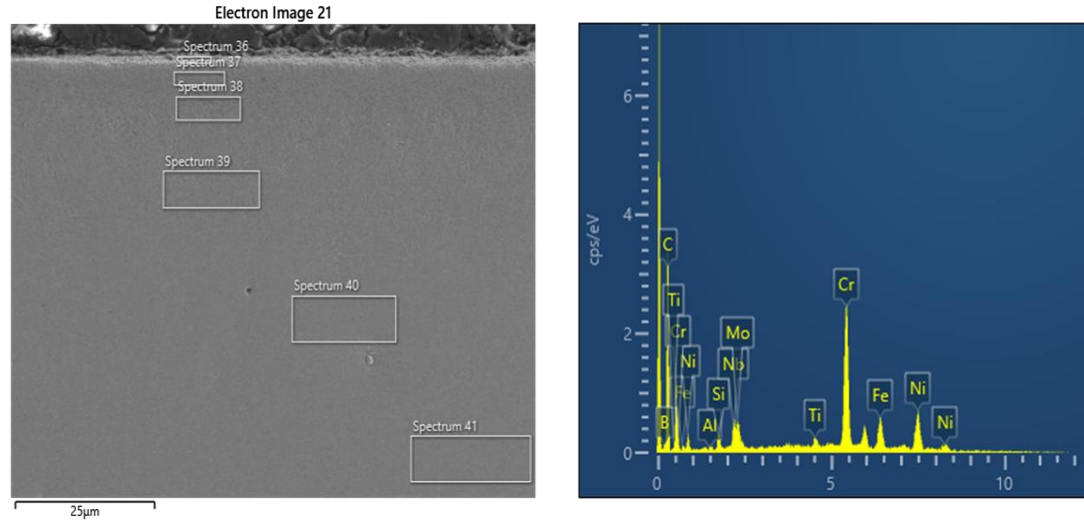
(B2 ve B4 numuneleri) hem boralüminyumlama (BA2 numunesi) uygulanmış numunelere uygulanmıştır.



Şekil 4.8. 5000 X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) B2 numunesi, (b) BA2 numunesi.



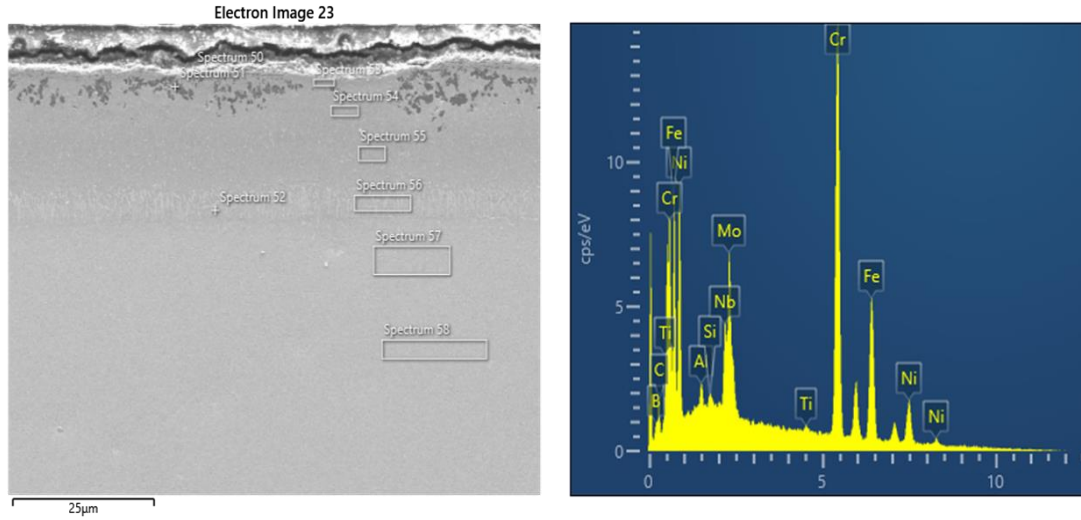
Şekil 4.9. 10000 X büyütmedeki 954-2 saat borlama SEM görüntüsü.



(Ağ.%)	B	C	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Si	Al
Spc-36	34,4	24,6	17,0	15,6	5,9	1,0	0,6	0,6	0,2	0,0
Spc-37	25,5	3,7	37,1	15,4	12,3	2,7	2,4	0,7	0,1	0,1
Spc-38	27,3	4,0	39,0	14,6	9,6	2,3	1,9	0,6	0,3	0,3
Spc-39	26,7	3,8	38,3	13,3	12,7	2,5	1,7	0,6	0,1	0,2

Şekil 4.10. B2 numunesinin kesitinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.

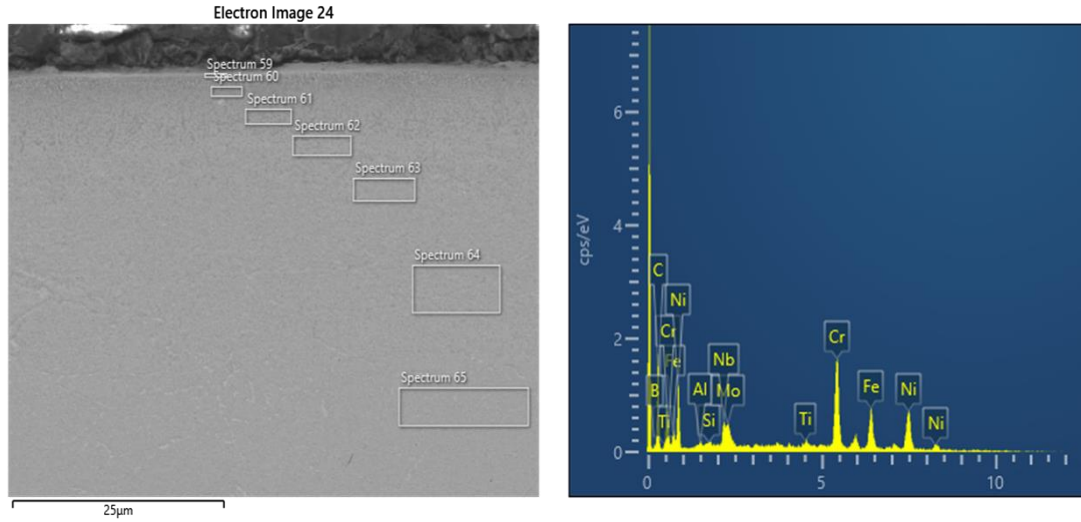
EDS nokta analizleri numunelerin kesitinde ve yüzeylerine yakın bir bölgede yapılmıştır. Şekil 4.10 ve 4.11’de EDS analiz sonuçları sırasıyla B2 ve B4 numuneleri için görülmektedir. Yapılan analizler ile yapıda bulunan elementlerinin ağırlıkça yüzde değerleri belirlenmiştir. XRD sonuçlarında da elde edildiği üzere yapı içerisinde birçok farklı kompleks fazların varlığı EDS sonucu elde edilen verilerle de doğrulanmıştır.



(Ağ.%)	B	C	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Si	Al
Spc-50	36,1	44,4	1,1	1,1	1,2	0,0	0,2	0,0	2,2	13,7
Spc-53	29,7	3,1	9,8	34,7	11,8	2,3	2,1	1,5	2,0	2,9
Spc-54	24,7	3,1	45,7	4,3	4,9	1,1	0,9	0,1	4,1	11,2
Spc-56	20,6	2,7	25,4	22,7	16,6	4,5	3,6	0,6	0,2	3,0

Şekil 4.11. B4 numunesinin kesitinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.

Şekil 4.12’de BA2 numunesine ait EDS sonuçları gösterilmektedir. XRD sonuçlarında görüldüğü üzere Ni_2B ve Cr_3B_4 fazlarının varlığını EDS analizlerinde elde edilen verilerle de doğrulanmıştır. Bu fazların yoğun olarak bulunması neticesinde boralüminyumlانmış numunenin mikrosertlik değerlerinin de borlanmış numunelerden daha yüksek olmasının sebebi olduğu düşünülmektedir.



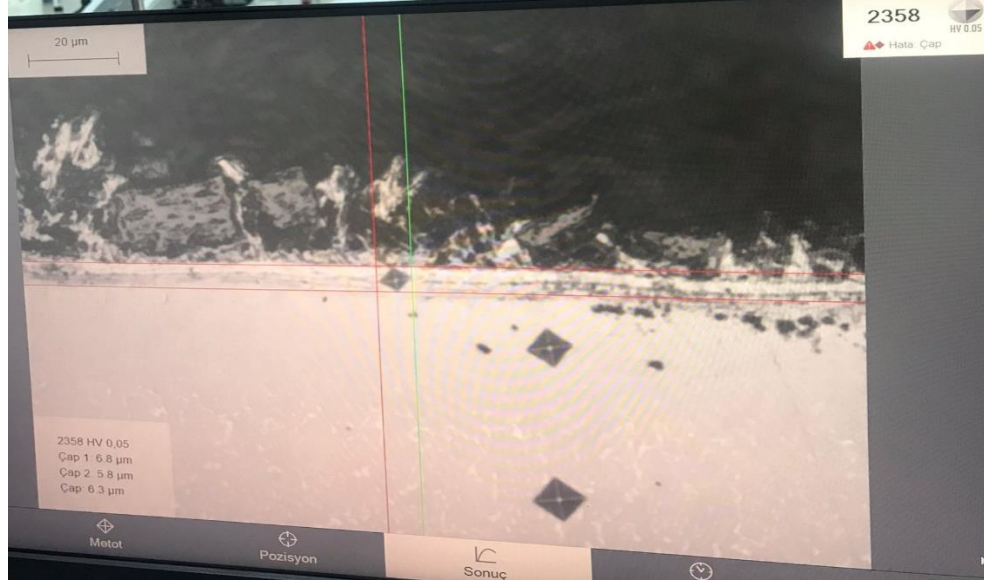
(Ağ.%)	B	C	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Si	Al
Spc-59	40,4	15,6	21,6	11,7	8,8	1,0	0,8	0,4	0,0	0,1
Spc-61	33,6	6,2	34,3	13,6	8,6	1,5	1,3	0,8	0,1	0,2
Spc-62	33,2	6,9	34,9	11,6	9,3	1,6	1,6	0,5	0,1	0,2
Spc-63	33,2	7,2	32,8	11,6	11,9	1,6	0,9	0,4	0,3	0,2

Şekil 4.12. BA2 numunesinin kesitinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.

4.6.Mikrosertlik Ölçümü Sonuçları

Borlama işlemi sonrasında numunelerin kesitinden mikrosertlik (HV) ölçümleri alınarak yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri değişimleri belirlenmiştir. Borlama işleminde kullanılan borlama karışımlarının, borlama sıcaklığının ve borlama süresinin numunelerin sertlik değerine etkisi incelenmiştir.

Yapılan ölçümlerde Şekil 4.13'te gösterilen şekilde kaplama tabakasından alt, orta ve üst bölgesinden ve altlık malzemesi olan Inconel 718 alaşımından 3'er ölçüm alınmış ve ortalamaları Tablo 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Kaplama sonrası mikrosertlik ölçüm gösterimi.

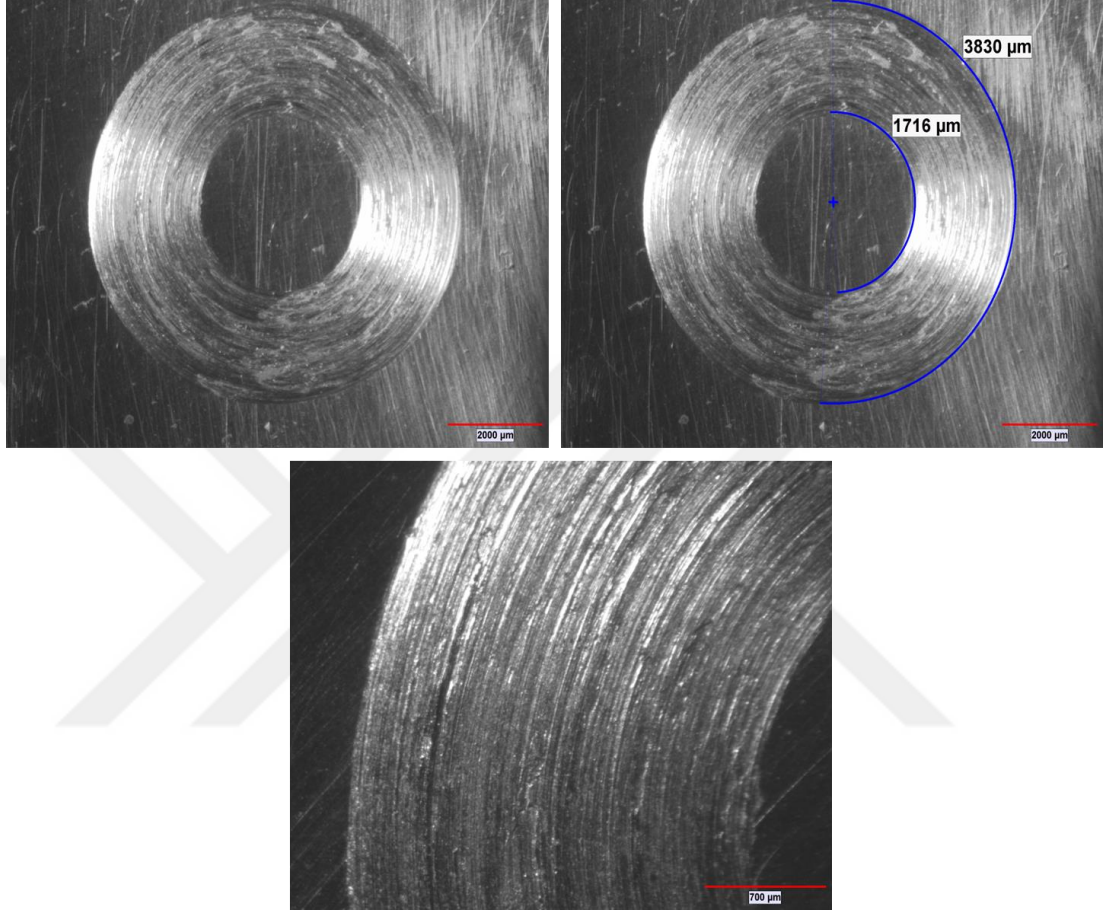
Tablo 4.3. Mikrosertlik ölçümleri sonucu elde edilen ortalama Vickers sertlik (HV) değerleri.

Numuneler	Kaplama Üst Yüzey (Ortalama)	Kaplama Orta Yüzey (Ortalama)	Kaplama Alt Yüzey (Ortalama)	Altlık (Inconel 718) (Ortalama)
BA2	2148± 37	1049± 16	842± 13	531± 16
B4	1525± 32	889± 18	723± 9	613± 19
B2	1208± 29	836± 21	600± 13	493± 9
A1	-	-	-	517± 14

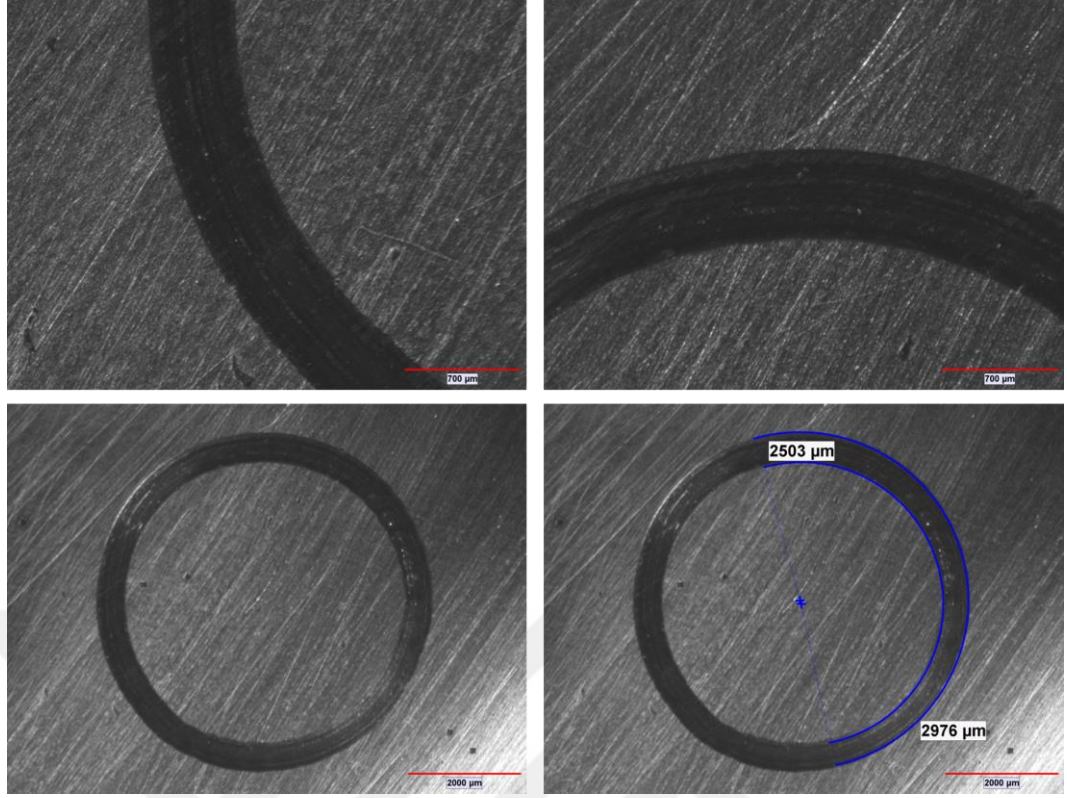
4.7.Aşınma Testi Sonuçları

Aşınma testi öncesinde A1, B2, B4, BA2 numaralı numunelerin yüzeylerine zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanarak numune yüzeyleri için standart bir başlangıç yüzey kalitesi elde edilmiştir. Tablo 4.4'te aşınma testi öncesinde numune yüzeylerinden alınan yüzey pürüzlülük değerleri görülmektedir. Elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine nispeten yakın olduğu görülmekle birlikte en düşük Ra değeri 0,27 µm olarak, borlanan numuneye ait olduğu görülmektedir. Disk üzerinde bilye (ball on disk) metodu kullanılarak gerçekleştirilen aşınma testleri 10 N yük altında, 4 mm iz yarıçapı belirlenerek, 20 cm/s sabit kayma

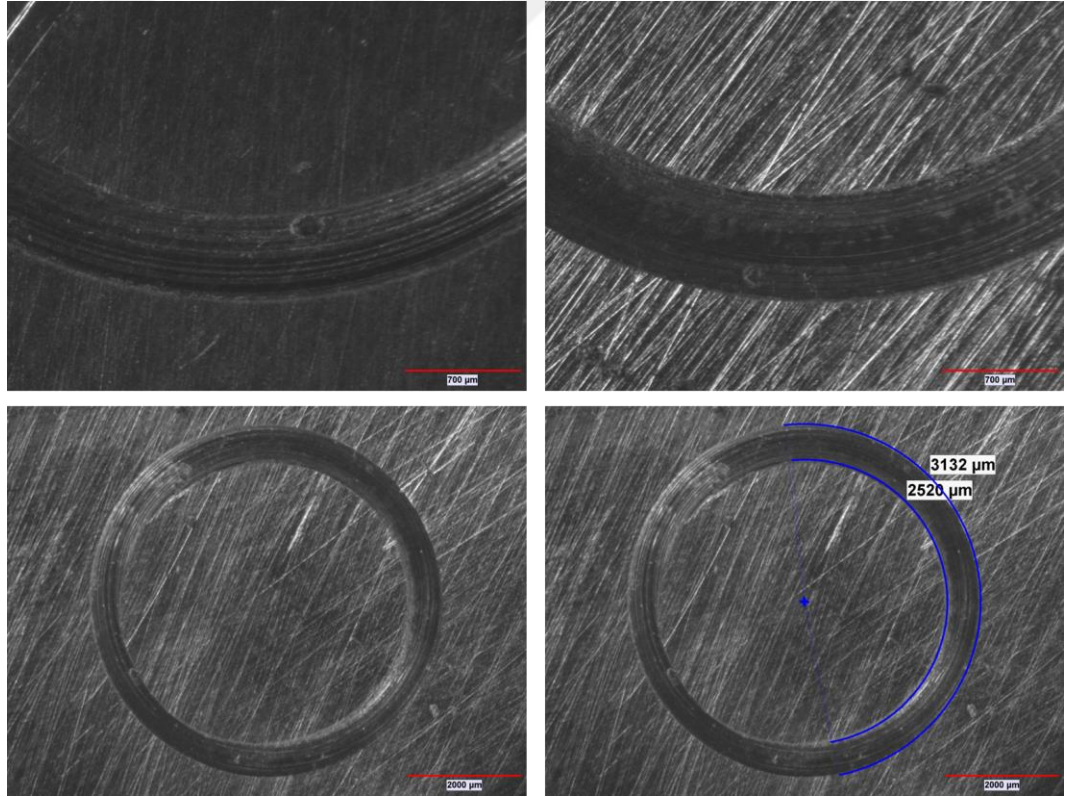
hızında ve 500 m mesafede gerçekleştirilmiştir. Her grup için 3'er numuneye aşınma testi uygulanmıştır. Tablo 4.18'deki sürtünme katsayıları, kayma mesafesine bağlı olarak kaydedilen sürtünme kuvvetinden elde edilmiştir.



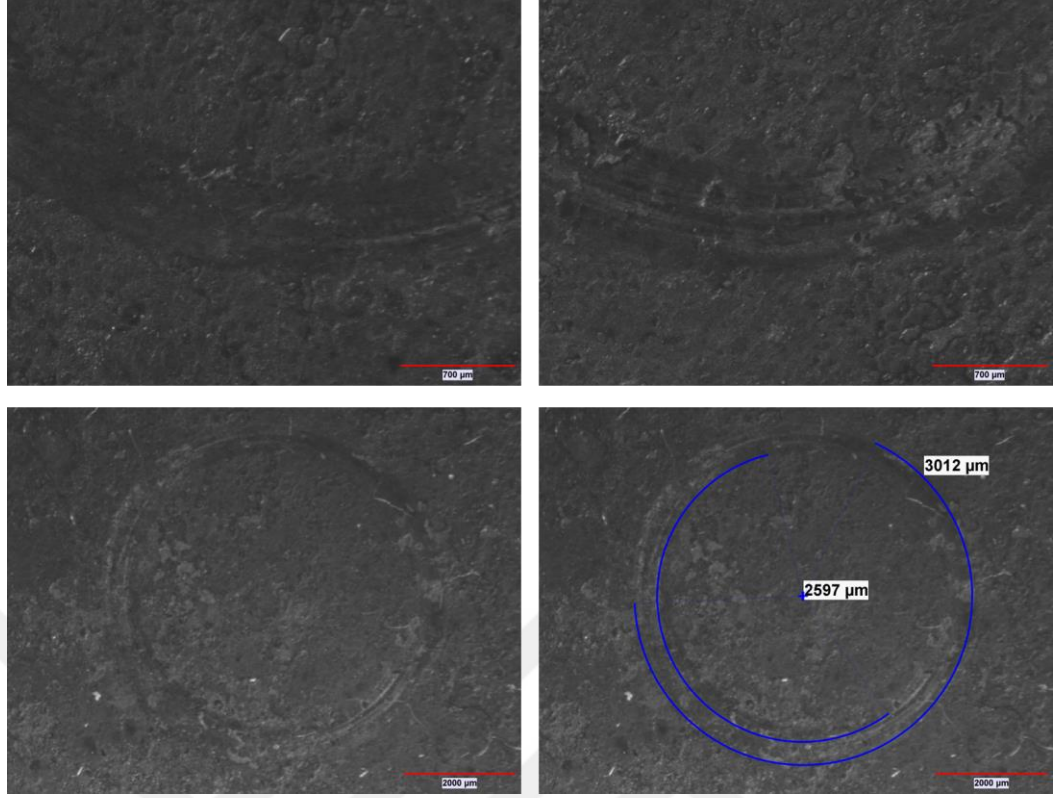
Şekil 4.14. A1 numunesine ait aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri.



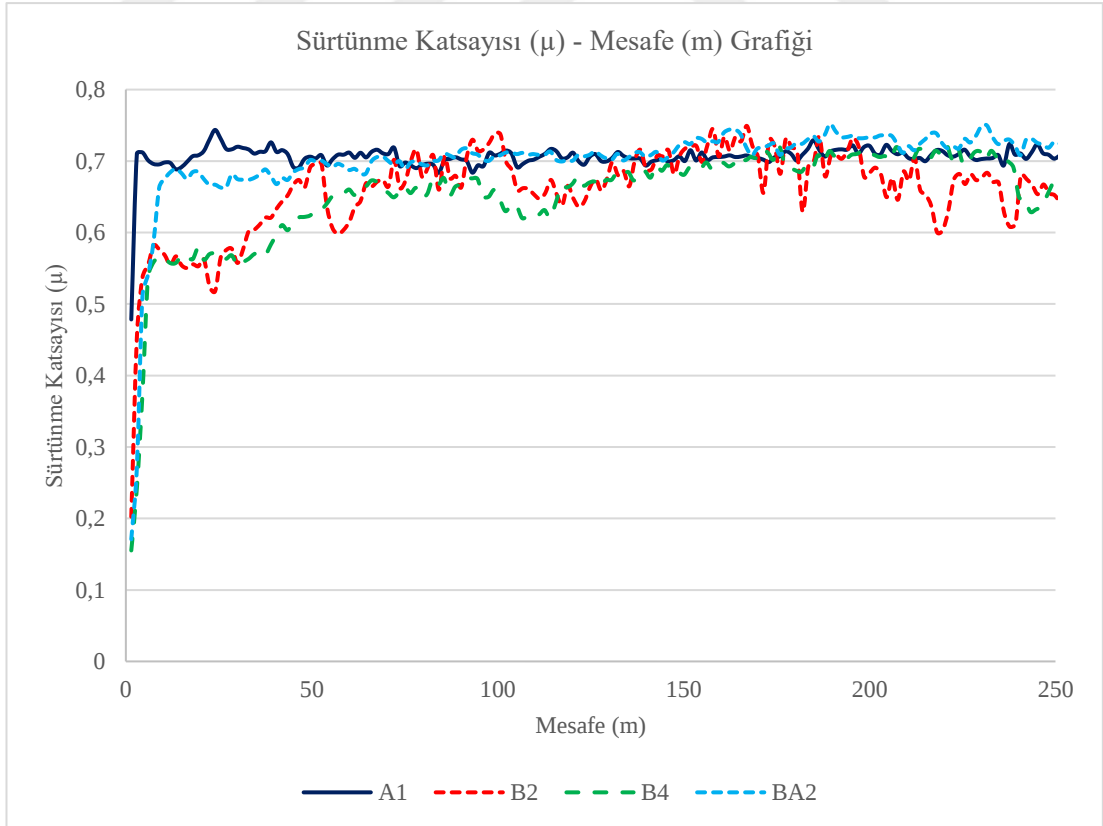
Şekil 4.15. B2 numunesine ait aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.16. B4 numunesine ait aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri.



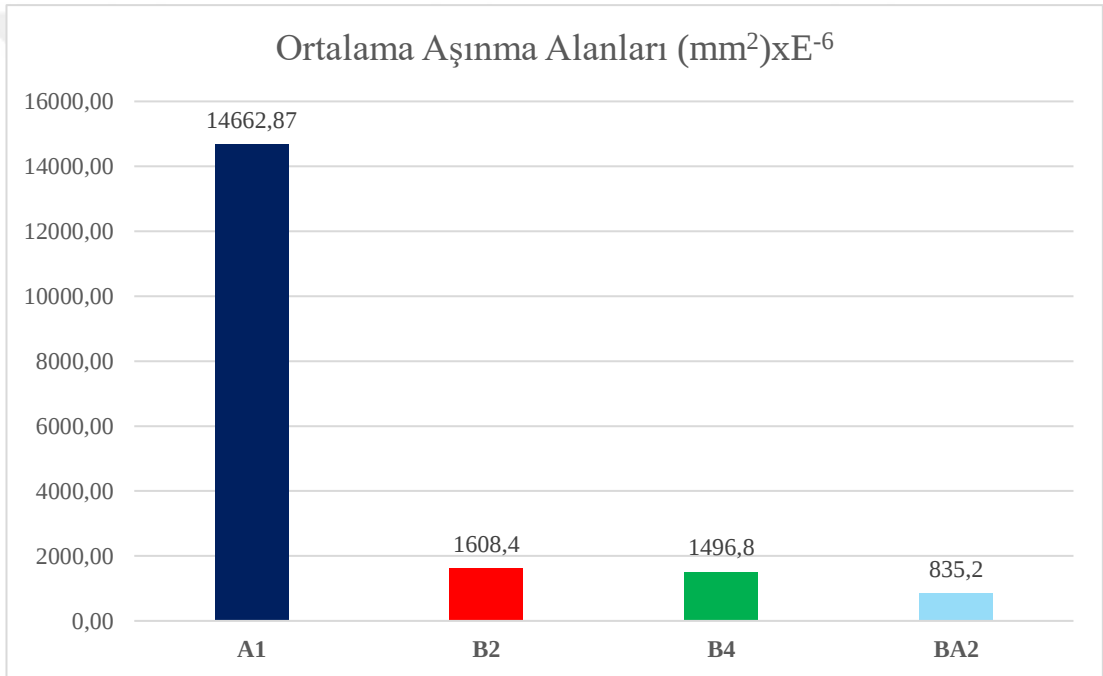
Şekil 4.17. BA2 numunesine ait aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.18. Aşınma testi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe grafiği.

Tablo 4.4. Aşınma testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

Numune	Başlangıç (μ)	Min (μ)	Max (μ)	Ortalama (μ)
A1	0,478	0,478	0,744	$0,703 \pm 0,20$
B2	0,202	0,202	0,749	$0,658 \pm 0,64$
B4	0,155	0,155	0,723	$0,652 \pm 0,73$
BA2	0,171	0,171	0,752	$0,700 \pm 0,61$



Şekil 4.19. Aşınma testi sonucunda elde edilen ortalama aşınma alanları.

Aşınma testi sonucunda numunelerin aşınan yüzey alanlarını incelendiğinde AMS 5662 standardına 1 saat borlama yapılan numunenin yüzeyinde en fazla aşınma meydana geldiği görülmüştür. Borlanmış numunelerde ısıtılma süresinin artmasıyla yüzeyde daha kalın bir tabaka oluşması nedeniyle 2 saat borlanmış olan numune 4 saat borlanmış olan numuneye kıyasla daha fazla aşınmıştır. 2 saatlik borlama ve boralüminyumlama numunelerini kıyasladığımızda ise alüminyum ilavesinin yüzeyde özellikle Ni_2Al_3 varlığı neticesinde aşınmaya karşı daha dirençli bir yapı oluşturduğu

düşünülmektedir. Ni(x) Al(y) intermetalik bileşikleri düşük yoğunluğa, iyi oksidasyon direncine ve mükemmel yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir. Bu metaller arası bileşikler sadece metallerin tokluğuna ve seramiklerin yüksek sıcaklık direncine sahip olmakla birlikte düşük yoğunluk ve yüksek erime noktası özelliklerine de sahiptir. Ni₂Al₃ intermetalik bileşikleri yüksek sıcaklıkta oksidasyon ve korozyona karşı iyi bir dirence sahiptir ve yüksek sıcaklık koruması alanında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bununla birlikte, Ni₂Al₃ intermetalik bileşiklerinin oda sıcaklığında yüksek kırılmalığa sahip olması dezavantajdır, bu nedenle Ni₂Al₃ intermetalik bileşiklerini oluşturmak ve işlemek zordur.

Tablo 4.5. Aşınma testi uygulanan numunelerin aşınma testi sonuçları.

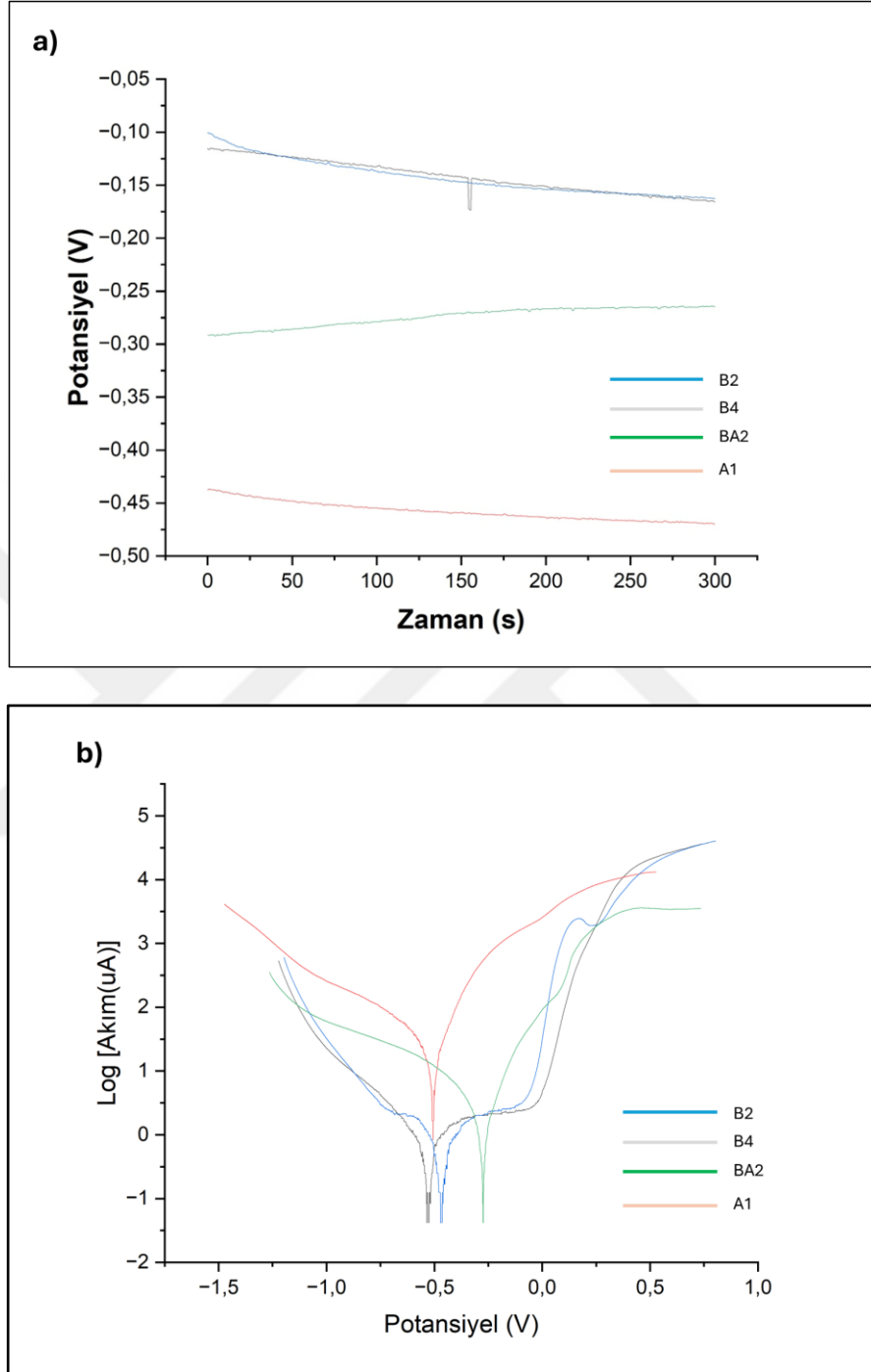
Numune	Ortalama Aşınma Alanı (mm ²) xE ⁻⁶	Ortalama Hacimsel Aşınma Kaybı (mm ³) xE ⁻⁶	Aşınma Oranı (mm ³ /Nm) xE ⁻⁶
A1	14662,87 ± 154,3	2523887,88 ± 26562,4	1009,6 ± 10,6
B2	1608,37 ± 126,3	276844,71 ± 21747,3	110,7 ± 8,7
B4	1496,80 ± 166,6	257640,98 ± 28670,7	103,1 ± 11,5
BA2	835,20 ± 125,8	143761,19 ± 21646,7	57,5 ± 8,7

Tablo 4.5'te gösterildiği üzere, aşınma oranlarına baktığımızda ise BA2 numunesinin aşınmaya karşı daha dirençli yüzey özelliklerine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Buna bağlı olarak da en az hacimsel aşınma kaybı BA2 numunesinde görülmüştür. Borlanmış numunelerin aşınma oranları ve hacimsel aşınma kayıpları birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Aradaki ufak farkların borlama süresine bağlı olarak oluşan borür tabakasının etkisinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

4.8.Korozyon Testi Sonuçları

Açık devre potansiyeli yani (OCP) ölçümleri 300 saniye süre ile yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçlarının negatif değerlere doğru gidiyor olması bir çözünme durumunun söz konusu olduğunu göstermektedir. Özellikle boralüminyumlama yapılan numunede

olduğu gibi pozitif doğru ilerlemesi ise yüzeyde koruyucu bir oksit tabakasının oluşması şeklinde yorumlanabilir.



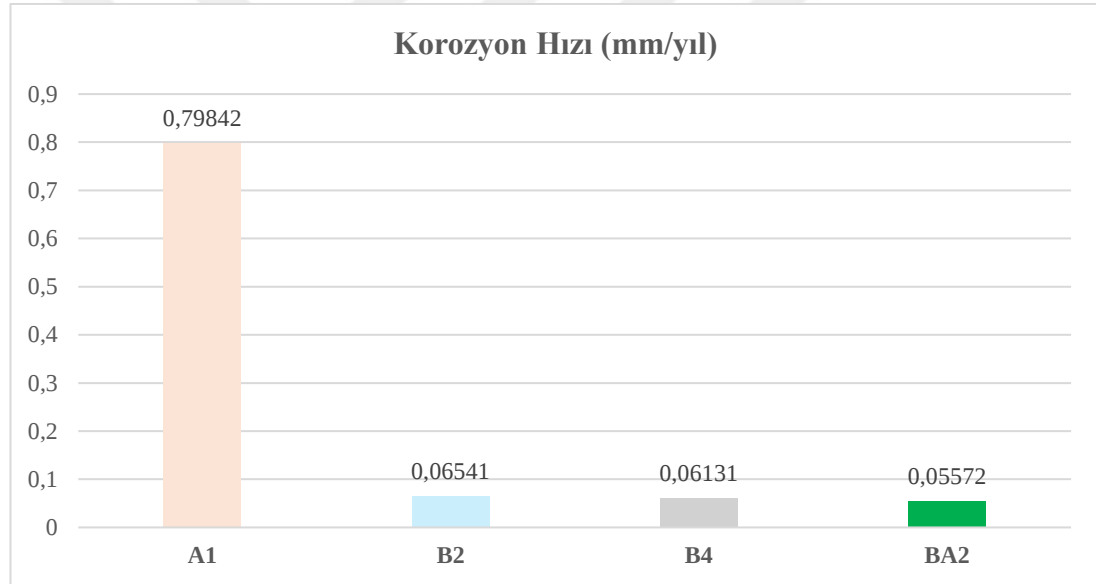
Şekil 4.20. Korozyon analiz grafikleri, a) OCP, b) Tafel.

OCP eğrileri, %3,5 NaCl çözeltisinde sabit bir potansiyel değeri elde etmek amacıyla 3600 saniye boyunca kaydedilmiştir. İyonik bir çözeltide ölçülen OCP potansiyeli, katodik ve anodik reaksiyonların denge potansiyelidir. Bu, çözeltideki

oksidasyon ve indirgenme aktivitelerini temsil eder. Çözeltinin korozif bir özellikte olması durumunda, bu OCP potansiyeli korozyon potansiyeli olarak kabul edilebilir. Karşılaştırılan kaplamaların açık devre potansiyelleri açısından daha pozitif olanların, daha negatif olanlara göre korozyona daha dirençli olduğu söylenebilir [46].

Tablo 4.6. Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon verileri.

Numuneler	E_{kor} (V)	I_{kor} (A)	Korozyon Hızı (mm/yıl)
A1	-0,498	$3,51 \times 10^{-5}$	0,79842
B2	-0,570	$28,7 \times 10^{-5}$	0,06541
B4	-0,487	$26,9 \times 10^{-5}$	0,06131
BA2	-0,254	$24,5 \times 10^{-5}$	0,05572



Şekil 4.21. Korozyon hızları (mm/yıl).

Korozyon akımı açısından kaplamaların performanslarını incelediğimizde, standart Inconel 718 numunesinin en yüksek akım değerine değere sahip olduğu görülmüş ve dolayısıyla en düşük korozyon direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. 954 °C’de borlama ve boralüminyumlama yapılmış olan numunelerin akım değerlerinin birbirlerine yakın olmaları neticesinde korozyona karşı dirençlerinin de birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Ancak korozyon potansiyelleri bakımından incelendiğinde borlama yapılan numunelerin performanslarının Şekil 4.20.(a)’da

görüldüğü üzere boralüminyumlamadan daha iyi olduğu görülmüştür. Boralüminyumlama yapılan numunenin ise yüzeyde oksidasyonu önleyici bir film oluşturduğu ve dolayısıyla standart ve borlama yapılan numunelerin korozyon potansiyellerinde zamana bağlı olarak bir azalma görülürken, boralüminyumlanmış olan numunenin potansiyelinde bir artış görülmektedir. Bu neticede boralüminyumlama yapılmış olan numunenin servis ömrünün borlama yapılan numunelere kıyasla daha uzun olacağı düşünülmektedir. Tafel deneyleri açık devre potansiyelinin 0,25 V altından, 0,25 V üstüne kadar olan potansiyel aralığında 1 mV/s tarama hızında ve %3,5 NaCl içeren çözelti içerisinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler Tafel ölçümü gerçekleştirilmeden önce dengeli bir potansiyel değeri elde edebilmek amacıyla %3,5 NaCl içeren çözelti içerisinde bir saat süreyle bekletilmiştir. Şekil 4.20.(b)'de üretilen kaplamaların Tafel ekstrapolasyon grafikleri karşılaştırma amacıyla bir arada sunulmuştur. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile elde edilen bu veriler neticesinde, alüminyum ilavesinin ana yapıyı korozyon dayanımı açısından çok ciddi derecede güçlendirdiği ifade edilebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, toz yataklı lazer ergitme eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş Inconel 718 alaşımının, 2 farklı kutu borlama karışımı hazırlanarak borlama ve boralüminyum kaplama uygulamaları arasında mikroyapıda ve malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelenmiş, buna ek olarak borlama yapılan numunelerde 2 farklı borlama süresinde çözeltiye alma uygulanarak borlanmış numunelerin kendi aralarında kıyaslaması yapılmıştır. Ayrıca kaplama yapılmış olan numunelerden elde edilen veriler herhangi bir kaplama yapılmadan AMS 5662 ısıtıl işlem uygulanarak standart numune ile kıyaslanmıştır. Tüm çalışmada toplamda 4 adet numune kullanılmıştır. Kutu borlama prosesi sonrasında yapıda oluşan fazlar, oluşan kaplama tabakasının özellikleri ve aşınma özelliklerinin incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM), optik mikroskop analizi, kimyasal-elementel (X-ışınları difraksiyonu (XRD), EDS analizleri), mekanik karakterizasyon (mikro sertlik ölçümleri, aşınma testi, yüzey pürüzlülük ölçümleri) yapılmış ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen veriler ışığında 2 saat ve 4 saat borlama yapılmış olan numuneler (B2 ve B4) kendi aralarında karşılaştırıldıklarında, çözeltiye alma süresine bağlı olarak oluşan kaplama tabakası kalınlığının çözeltiye alma süresiyle doğru oranda arttığı, bor elementinin daha uzun süre yapı içerisinde difüzyonunu sağlayabildiği için 4 saatlik numunede daha kalın bir tabaka elde edildiği gözlemlenmiştir. Borlanmış numunelerin kesit bölgelerinden alınan fotoğraflara bakıldığında borür tabakası, geçiş bölgesi ve matris olmak üzere kesit bölgesinin üç bölgeden oluştuğu görülmüştür. Sürenin artmasına bağlı olarak 4 saat borlanmış numuneden elde edilen EDS sonuçlarında ana matrise daha yakın konumlarda bor piklerine daha çok rastlanmıştır. Sertlik değerlerine bakıldığında 4 saat borlama yapılan numunenin 2 saat borlanan numuneye kıyasla daha sert bir yüzey özelliği gösterdiği ve aşınma testlerinde daha az aşındığı görülmektedir. Korozyona karşı gösterdiği direnç bakımından borlama yapılan her iki numune de birbirine yakın bir performans göstermiştir. Borlama yapılan her iki numune de, standart numuneye kıyasla, daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Bununla beraber aşınma ve korozyona karşı gösterdikleri direncin daha fazla olması nedeniyle servis ömürleri bakımından daha uzun sürelerde kullanılabilecekleri düşünülmektedir.

2 saat çözeltiye alınarak borlama ve boralüminyumlama yapılan numuneler kıyaslandığında ise, aynı sürede çözeltiye alınmalarına rağmen borlama yapılan numunen daha kalın bir kaplama kalınlığına sahip olduğu görülmüştür. Ancak sertlik değerleri ve aşınan yüzeyler açısından kıyaslama yapıldığında, boralüminyumlama yapılmış olan numunenin daha yüksek bir sertliğe ve daha az bir aşınmaya sahip olduğu görülmüştür. Bu durumun boralüminyum kaplanmış numunenin yüzey konstantrasyonunda borlama numunesine kıyasla daha yoğun bir karbür varlığının olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Korozyon hızlarına bakıldığında da Şekil 4.21’ de görüleceği üzere herhangi bir kaplama uygulanmayan numunenin daha hızlı korozyona uğradığı, borlama ve boralüminyumlama yapılan numunelerin ise yüzey özelliklerini iyileştirerek korozyona karşı daha dirençli bir yapı oluşturarak korozyon hızını düşürdüğü görülmüştür. Korozyon dirençleri bakımından karşılaştırıldıklarında ise borlama yapılan numuneler ilk başta daha dirençli olsalar da zamana bağlı olarak OCP eğrisi potansiyelinin negatife doğru yaklaşması dolayısıyla korozyon direncinde bir düşüş olduğu, buna karşın boralüminyumlanmış numunede ise zamana bağlı olarak OCP eğrisi potansiyelinin pozitifte yaklaştığı yani korozyon direncinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Boralüminyumlama yapılan numunede görülen bu pozitifte doğru ilerlemenin yüzeyde koruyucu bir oksit tabakasının oluşması neticesinde olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.7. Elde edilen sonuçların genel gösterimi.

	A1	B2	B4	BA2
Kaplama Üst Yüzey Sertlik (Ortalama) (HV)	517± 14	1208± 29	1525± 32	2148± 37
Sürtünme Katsayısı (Ortalama) (μ)	0,703 ± 0,20	0,658 ± 0,64	0,652 ± 0,73	0,700 ± 0,61
Ortalama Aşınma Alanı (mm^2) $\times 10^{-6}$	14662,87 ± 154,3	1608,37 ± 126,3	1496,80 ± 166,6	835,20 ± 125,8
Ortalama Hacimsel Aşınma Kaybı (mm^3) $\times 10^{-6}$	2523887,88 ± 26562,4	276844,71 ± 21747,3	257640,98 ± 28670,7	143761,19 ± 21646,7
Aşınma Oranı (mm^3 /Nm) $\times 10^{-6}$	1009,6 ± 10,6	110,7 ± 8,7	103,1 ± 11,5	57,5 ± 8,7
E_{kor} (V)	-0,498	-0,57	-0,487	-0,254
I_{kor} (A)	$3,51 \times 10^{-5}$	$28,7 \times 10^{-5}$	$26,9 \times 10^{-5}$	$24,5 \times 10^{-5}$
Korozyon Hızı (mm/yıl)	0,79842	0,06541	0,06131	0,05572

Tablo 4.7’de gösterildiği üzere, yapılan çalışmada elde edilen veriler, lazer toz yataklı ergitme yöntemiyle üretilmiş olan Inconel 718 alaşımına borlama ve boralüminyumlama yapılarak (B2, B4 ve BA2 numuneleri), standart numuneye kıyasla (A1 numunesi), yüzey özelliklerinin iyileştirilebildiği, yüzeyde daha sert matriste daha tok bir yapı elde edilebildiği ve yüksek sıcaklıklarda aşınma ve korozyon direncinde artış sağlanabildiği görülmüştür. Servis koşulları göz önünde bulundurulduğunda hem borlama hem de boralüminyumla yapılarak malzemenin servis ömrünü uzatılabileceği yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir.



KAYNAKLAR

1. İnanır, Z. (2012). Yüksek çalışma sıcaklıklarının Inconel 718 alaşımının yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi.
2. Gökhan, Ö. Z. E. R. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621.
3. Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018). Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerin etkisinin incelenmesi. *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 729-742.
4. Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2, 1-21.
5. Uriondo, A., Miguez, M. E., & Perinpanayagam, S. (2015). The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Journal of Aerospace Engineering*, 1-16.
6. Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018). Havacılık komponentlerinin bakım uygulamalarında katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı. *Mühendis ve Makine*, 59(691), 59-69.
7. Günen, A., & Çarboğa, C. (2013). Borlama işleminde kullanılan bor tozu tane boyutunun kaplama tabakası üzerine etkisi. *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1).
8. Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
9. All About Selective Laser Melting 3D Printing. (n.d.). Retrieved March 5, 2023, from <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturingfabricating/selective-laser-melting-3d-printing/>
10. Rıza, S. H., Masood, S. H., & Wen, C. (2014). Laser-assisted additive manufacturing for metallic biomedical scaffolds. *Comprehensive Materials Processing*, 10, 285-301.
11. Zhu, C. (2017). 3D printed functional nanomaterials for electrochemical energy storage. *Nano Today*, 15, 107-120.
12. ASM International. (2004). *Metals Handbook Volume 9: Metallography and microstructures of heat resisting alloys*. USA.
13. Donachie, M. J., & Donachie, S. J. (2000). *Superalloys: A technical guide* (2nd ed.). ASM International.
14. Sims, T. C., Stoloff, S. N., & Hagel, C. W. (1987). *Superalloys II*. John Wiley & Sons.
15. ASM International. (1983). *Metals Handbook* (9th ed., Vol. 10). Metals Park, OH.
16. Reed, R. C. (2006). *The superalloys: Fundamentals and applications*. Cambridge University Press.
17. Davis, J. R. (1997). *Heat resistant materials*. ASM Specialty Handbook, ASM International, 221-254.
18. Naval Research Laboratory. (2011). Nickel base alloys: IN-718. Retrieved October 19, 2011, from <http://cst-www.nrl.navy.mil/lattice/alloys/index.html>
19. Pawade, R. S., Joshi, S. S., Brahmankar, P. K., & Rahman, M. (2007). An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, 139-146.
20. Kuo, C. M., Yang, Y. T., Bor, H. Y., Wei, C. N., & Tai, C. C. (2009). Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 510-511, 289-294.

21. Wang, C., & Li, R. (2004). Effect of double aging treatment on structure in Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Science*, 39, 2593-2595.
22. Special Metals Corporation. (2011). Inconel alloy 718. Retrieved September 1, 2011, from <http://www.specialmetals.com/products/inconelalloy718.php>
23. Klopp, W. D. (1995). Nickel base alloys: IN-718. *Aerospace Structural Metals Handbook*. USA.
24. Radavich, J. F. (1989). The physical metallurgy of cast and wrought alloy 718. In E. A. Loria (Ed.), *Superalloy 718-Metallurgy and applications* (pp. 229-240).
25. Davis, J. R. (2000). *ASM Specialty Handbook: Nickel, cobalt, and their alloys*. ASM International Handbook Committee. USA.
26. Bekteş, M., alı, A., & Uçar, N. (2010). Fe-Mn ikili alaşımlarının mekanik özellikleri üzerine borlamanın etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi*, 14(2), 120-123.
27. Türkmen, İ. (2018). Farklı bor türevleri ile alternatif borlama bileşimlerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu (Doctoral dissertation, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa).
28. Kartal, G. (2011). Katodik redüksiyon-termal difüzyon yöntemi ile metallerin borlanması (KRTD-Bor) ve süreçlerin optimizasyonu (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbül Teknik Üniversitesi, İstanbül).
29. Baştürk, S., & Erten, M. (2006). Borlama ile yüzey sertleştirme alışmaları. *Mühendis ve Makina*, 47, 57-74.
30. Gnen, A. (2012). Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan östenitik paslanmaz eliğın mekanik özellikler ve korozyon davranışının araştırılması (Doctoral dissertation, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ).
31. ASM International. (1991). *ASM Handbook Volume 4: Heat treating*.
32. Sinha, A. K., & Matuschka, A. G. (1991). Boriding (boronizing) of steels. *ASM Handbook*, 4, 437-447. Ohio, USA.
33. Kayalı, Y., Barut, N., & Evcen, A. (2011). Borlanmış AISI 316L paslanmaz eliğın korozyon ve aşınma davranışlarının incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon*.
34. Kara, G. (2017). Farklı kristal yapılarıdaki titanyum ve alaşımlarının borlanması ve borlamanın bu malzemelerin mikroyapı, mekanik ve biyouyumluluk özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi (Doctoral dissertation, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon).
35. Bora, A. S. (2017). Alaşımsız düşük karbonlu yassı mamllerin elektrokimyasal olarak borlanması ve borlama işleminin mekanik özelliklere etkisi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbül Teknik Üniversitesi, İstanbül).
36. Aypar, A. (2010). Elektrokimyasal yöntemle titanyum ve titanyum alaşımlarının borlanması ve karakterizasyonu (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbül Teknik Üniversitesi, İstanbül).
37. Matuschka, A. G. (1980). *Boronizing*. Carl Hanser Verlag. Munich.
38. Karlı, M. A. (2005). AISI 440c ve 52100 yatak çelikleri üzerinde oluşturulan karbür ve borürlerin yüksek sıcaklıklarda aşınma davranışlarının incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon).
39. Spence, T. W., & Makhlof, M. M. (2005). Characterization of the operative mechanism in potassium fluoborate activated pack boriding of steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 127-136.
40. şeşen, F. E. (2015). elik yüzeylerinde elektrotermokimyasal ve termokimyasal difüzyon tabakası oluşumuna ve difüzyon tabakalarının özelliklerine işlem parametrelerinin etkisi (Doktora tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbl Teknik

Üniversitesi, İstanbul.

41. Davis, J. R. (2002). Surface hardening of steels. ASM International, 318.
42. Soegijono, B. (2012). The hardness of boride layer on the S45c iron (A preliminary study on surface hardening of ferrous material). *Aceh International Journal of Science and Technology*, 1, 47-50.
43. Kul, M., Oskay, K. O., Temizkan, A., Karaca, B., Kumruoğlu, L. C., & Topçu, B. (2016). Effect of boronizing composition on boride layer of boronized GGG-60 ductile cast iron. *Vacuum*, 126, 80-83.
44. 3D Eklemeli İmalat Makinesi. (2018). Retrieved April 8, 2023, from <https://www.ermaksan.com.tr/>.
45. Kaynak, Y., & Tascioglu, E. (2020). Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 5(2), 221-234.
46. Tozar, A., & Karahan, İ. H. (2014). Structural and corrosion protection properties of electrochemically deposited nano-sized Zn-Ni alloy coatings. *Applied Surface Science*, 318, 15-23.
47. Türkmen, İ. (2018). Farklı bor türevleri ile alternatif borlama bileşimlerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu.
48. Tang, Z., Yang, C., Duan, Y., Ma, L., Zheng, S., & Li, M. (2024). Corrosion and wear behaviors of Inconel 718 nickel-based alloy by boroaluminizing. *Surface and Coatings Technology*, 478, 130500.
49. Günen, A., & Ergin, Ö. (2023). A comparative study on characterization and high-temperature wear behaviors of thermochemical coatings applied to cobalt-based Haynes 25 superalloys. *Coatings*, 13(7), 1272.