



**Ti6Al4V ALAŞIMININ ALIŞILMAMIŞ İMAL USULLERİ İLE İŞLENMESİ
VE BİLYALI DÖVME SONRASI YÜZEY TAMLIĞININ ARAŞTIRILMASI**

Duran KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2017

Duran KAYA tarafından hazırlanan “Ti6Al4V ALAŞIMININ ALIŞILMAMIŞ İMAL USULLERİ İLE İŞLENMESİ VE BİLYALI DÖVME SONRASI YÜZEY TAMLIĞININ ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Mekatronik Mühendisliği, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 02/02/2017

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

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Duran KAYA

02/02/2017

Ti6Al4V ALAŞIMININ ALIŞILMAMIŞ İMAL USULLERİ İLE İŞLENMESİ VE BİLYALI DÖVME SONRASI YÜZEY TAMLIĞININ ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Duran KAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2017

ÖZET

Ti6Al4V alaşımı, yüksek özgül dayanımı, düşük elastisite modülü, yüksek alaşımlanma eğilimi yüksek korozyon direnci, biyouyumlu olması vb. özellikleri nedeniyle birçok sektörde kullanımı yaygınlaşmakta olan bir malzemedir. Bununla birlikte, Ti6Al4V'nin geleneksel imalat yöntemleriyle işlenmesi zordur. Tez çalışmasında, Ti6Al4V işparçaları, ana işleme yöntemleri olarak alışılmamış imal usullerinden Aşındırıcı Su Jeti ile İşleme, Lazer Işınıyla İşleme ve Telli Elektro Erozyon ile İşleme, geleneksel imal usullerinden frezeleme yöntemi kullanılarak işlenmiştir. İşlenmiş yüzeyler Bilyalı Dövme ile ikincil işleme tabi tutulmuştur. Ana işleme ve ikincil işlemenin etkileri yüzey tamlığı açısından incelenmiştir. İşparçalarının yüzey pürüzlülüğü, mikro sertliği ve mikro yapısı yüzey tamlığı kapsamında araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertlik sonuçları, grafik halinde gösterilmiştir. Mikro yapı incelemeleri, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu kullanılarak çekilen mikro fotoğraflar yardımıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca sadece alışılmamış imal usulleri ile kesilmiş işparçalarının yüzeylerinde, enerji dağılımı spektrometresi kullanılarak element analizleri gerçekleştirilmiştir. Bilyalı Dövme öncesi ve sonrası olmak üzere sonuçlar kıyaslanmış ve yorumlanmıştır. BD sonrasında yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve yüzey mikro yapısı birlikte değerlendirildiğinde Telli Elektro Erozyon ile İşlemede beş paso ile işlenmiş yüzeye sahip işparçalarının en iyi yüzey tamlığına, azot gazının yardımcı gaz olarak kullanıldığı Lazer Işınıyla İşleme yöntemi ile işlenmiş işparçalarının ise en kötü yüzey tamlığına sahip olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Üretim Teknolojileri, Yüzey Tamlığı, Alışılmamış İmal Usulleri, Bilyalı Dövme

Sayfa Adedi : 99

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

THE STUDY OF Ti6Al4V ALLOY PROCESSING WITH NONCONVENTIONAL
MANUFACTURING AND INVESTIGATION OF SURFACE INTEGRITY AFTER
SHOT PEENING

(M. Sc. Thesis)

Duran KAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2017

ABSTRACT

Ti6Al4V alloy is a material that is becoming widespread in many sectors due to its characteristics such as high specific strength, low elastic modulus, high alloying tendency, high corrosion resistance and biocompatibility properties. In addition to this, Ti6AL4V is difficult to process with conventional manufacturing methods. In this study, as main machining methods, Ti6Al4V workpieces were processed by using nonconventional manufacturing methods such as Abrasive Water Jet Machining, Laser Beam Machining and Wire Electro Discharge Machining, and by using conventional milling methods. Machined surfaces were post processed by shot peening. The effects of primary and secondary processing were examined in terms of surface integrity. Surface roughness, micro hardness and micro structure of workpieces were investigated within the scope of surface finish. Surface roughness and micro hardness results were shown graphically. Microstructure investigation was evaluated with the help of micro-photographs taken using an optical microscope and a scanning electron microscope. In addition, element analysis were performed only on the surfaces of the workpieces processed with nonconventional manufacturing methods, using energy distribution spectrometry. These results were compared and interpreted before and after shot peening. Surface roughness, micro hardness and surface microstructure were evaluated together after Shot Peening. It was found that the workpiece processed with five passes in Wire Electro Discharge Machining has the best surface integrity and the workpiece processed with Laser Beam Machining using nitrogen as the auxiliary gas has the worst surface integrity.

Science Code : 91438

Key Words : Manufacturing Technologies, Surface Integrity, Nonconventional
Manufacturing Processes, Shot Peening

Page Number : 99

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Tez çalışması sürecinde tüm ilgi ve desteğini esirgemeyen, araştırma ve deneylerin yapılmasında kıymetli görüş ve tavsiyeleri ile bana ışık tutan, bilgi ve deneyimlerinden faydalanma şansı verdiği için saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalara katkılarından ötürü TUSAŞ Talaşlı İmalat Birim Şefi Sayın Fatih YILDIRIM'a, ERMAKSAN MAKİNE A.Ş. Ar-Ge Koordinasyon Sorumlusu Sayın Fatih PITİR'a, ERMAKSAN Akademi Müdürü Sayın Soykan SOKULGAN'a ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü'ne ayrı ayrı teşekkür ederim.

Hayatımın her boyutunda olduğu gibi eğitim hayatım boyunca da her türlü teşvik ve özveriye gösteren, maddi manevi desteğini eksik etmeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
3. Ti6Al4V ALAŞIMI	17
4. YÜZEY TAMLIĞI	23
5. ÇALIŞMADA KULLANILAN ALIŞILMAMIŞ İMAL USULLERİ	25
5.1. Aşındırıcılı Su Jeti ile İşleme	25
5.2. Lazer Işını ile İşleme	29
5.3. Telli Elektro Erozyon ile İşleme	33
6. BİLYALI DÖVME	39
7. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	43
7.1. Malzeme	43
7.2. İşparçalarının Hazırlanması	43
7.2.1. Frezeleme.....	44
7.2.2. Aşındırıcılı su jeti ile işleme	44

	Sayfa
7.2.3. Lazer ışıınıyla işleme	45
7.2.4. Telli elektro erozyon ile işleme.....	46
7.2.5. Bilyalı dövme.....	48
7.3. Ölçümler.....	50
7.3.1. Metalografik hazırlık	50
7.3.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.....	51
7.3.3. Mikro sertlik ölçümü.....	51
7.3.4. Mikro yapı incelemesi.....	52
8. DENEY SONUÇLARI	53
8.1. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları	53
8.2. Optik Mikroskop ile Mikro Yapı İnceleme Sonuçları	58
8.3. Mikro Sertlik Sonuçları.....	64
8.4. Taramalı Elektron Mikroskopu ile Yüzey İnceleme Sonuçları.....	72
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	83
9.1. Sonuçlar.....	83
9.2. Öneriler	86
KAYNAKLAR	89
EKLER.....	95
EK-1. EDS Analiz Sonuçları	96
ÖZGEÇMİŞ	99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3. 1. Saf titanyumun alaşımlandırılmasında kullanılan elementler.....	17
Çizelge 4.1. Yüzey tamlığı veri setleri.....	24
Çizelge 6.1. Standart Almen Plakaları türü ve boyutları	41
Çizelge 7.1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal kompozisyonu	43
Çizelge 7.2. Ti6Al4V alaşımının malzeme özellikleri.....	43
Çizelge 7.3. Frezeleme yönteminde kullanılan işleme parametreleri	44
Çizelge 7.4. ASJİ yönteminde kullanılan kesme parametreleri	45
Çizelge 7.5. LIİ yönteminde kullanılan kesme parametreleri.....	46
Çizelge 7.6. TEEİ yönteminde kullanılan kesme parametreleri	47
Çizelge 7.7. BD uygulama parametreleri.....	48
Çizelge 7.8. Almen plakası özellikleri.....	49
Çizelge 7.9. Bilya özellikleri	49
Çizelge 8.1. Kesim yüzeyine en yakın ilk 5 mikro sertlik ölçüm sonuçları.	66
Çizelge 8.2. BD sonrası kesim yüzeyine en yakın ilk 5 mikro sertlik ölçüm sonuçları .	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ti6Al4V ve C45E'nin işlenmesinde talaş ve kesici takımındaki ısı dağılımı ..	11
Şekil 3.1. Arayer atomlarının Ti6Al4V'nin çekme dayanımına etkisi	18
Şekil 3.2. Ti6Al4V alaşımına ait faz diagramı.	19
Şekil 3.3. Spesifik dayanımın sıcaklığa bağlı değişim grafiği (Oda sıcaklığında spesifik dayanımın yüksekten düşüğe doğru: Kompozit, Ti6Al4V, IMI685, Alüminyum, Nimonic90, Inco901, Çelik).	20
Şekil 4.1. İşleme sonrası elde edilen ortalama yüzey pürüzlülükleri.....	24
Şekil 5.1. ASJİ tezgahlarında kullanılan nozul ve işlemenin şematik gösterimi.....	27
Şekil 5.2. ASJİ ile işleme sonrası yüzeyin şematik gösterimi, a) kesim yüzeyi, b) su jetinin çıkış yüzeyi, c) işleme bölgesi enine kesiti.....	28
Şekil 5.3. Lazer-işparçası etkileşiminde meydana gelen fiziksel olayların şematik gösterimi.	30
Şekil 5.4. LIİ yöntemi ile işleme mekanizmasının şematik gösterimi, a) emilim ve ısınma, b) ergime, c) buharlaşma	31
Şekil 5.5. LIİ yönteminin şematik gösterimi	31
Şekil 5.6. LIİ'de koniklik oluşumunun şematik gösterimi	32
Şekil 5.7. TEEİ işleme mekanizması gösterimi	34
Şekil 5.8. Elektro erozyon ile işlemede boşalım anı gösterimi.....	34
Şekil 5.9. EEİ yönteminin fiziksel prensibi	36
Şekil 6.1. BD'de tek bir bilyanın işparçası yüzeyine etkisinin şematik gösterimi	40
Şekil 6.2. İşparçası kalınlığına göre Almen plakası ve Almen yoğunluğu grafiği	41
Şekil 7.1. Hazırlanan çubuk işparçası ve kesilmiş işparçalarının şematik görünümü.....	44
Şekil 7.2. TEEİ ile çoklu paso ile işlemenin şematik gösterimi.	48
Şekil 8.1. Birincil işlem sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği.....	54
Şekil 8.2. İkincil işleme sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği.....	55

Şekil	Sayfa
Şekil 8.3. Birincil ve ikincil işleme sonrası işparçalarının yüzey pürüzlülüğü.....	56
Şekil 8.4. BD sonrası nüfuziyet derinlikleri.....	63
Şekil 8.5. Frezeleme ve ASJİ_P1 işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları	64
Şekil 8.6. Frezeleme ve ASJİ_P2 işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları	64
Şekil 8.7. Frezeleme ve LIİ_N2 işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları.....	65
Şekil 8.8. Frezeleme ve LIİ_AR işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları.....	65
Şekil 8.9. Frezeleme ve TEEİ_1P işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları.....	65
Şekil 8.10. Frezeleme ve TEEİ_5P işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları.....	66
Şekil 8.11. ASJİ_P1 ve ASJİ_P1_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri.....	68
Şekil 8.12. ASJİ_P2 ve ASJİ_P2_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri.....	68
Şekil 8.13. LIİ_N2 ve LIİ_N2_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri	68
Şekil 8.14. LIİ_AR ve LIİ_AR_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri.....	69
Şekil 8.15. TEEİ_1P ve TEEİ_1P_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri	69
Şekil 8.16. TEEİ_5P ve TEEİ_5P_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri	69
Şekil 8.17. FREZE ve FREZE_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri.....	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. TEEİ ile kaba işlenmiş yüzey kenarının optik mikroskop görüntüsü.....	36
Resim 7.1. ASJİ ile Ti6Al4V çubuklarının kesimi sırasında çekilmiş bir fotoğraf.....	45
Resim 7.2. LIİ ile Ti6Al4V alaşımından çubuk malzemenin kesiminden bir fotoğraf	46
Resim 7.3. TEEİ ile Ti6Al4V alaşımından çubuk malzemenin kesiminden bir fotoğraf	47
Resim 7.4. İşparçalarına BD uygulanabilmesi için hazırlanan bağlama kalıbı	49
Resim 7.5. BD işleminden bir fotoğraf.....	50
Resim 7.6. Bakalit kalıplanmış işparçası	51
Resim 7.7. Taylor Hubson Surtronic 3+ markalı profilometre.....	51
Resim 7.8. Mikro sertlik ölçüm cihazı.....	52
Resim 8.1. Ana işleme sonrası yüzeyler	53
Resim 8.2. Birinci ve ikinci işlem görmüş işparçası yüzeyleri.....	57
Resim 8.3. a) ASJİ_P1 işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) ASJİ_P1_BD işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı	59
Resim 8.4. a) ASJİ_P2 işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) ASJİ_P2_BD işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı	59
Resim 8.5. a) LIİ_N2 işparçasının 50X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) LIİ_N2_BD işparçasının 50X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı	60
Resim 8.6. a) LIİ_AR işparçasının 50X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) LIİ_AR_BD işparçasının 50X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı	60
Resim 8.7. a) TEEİ_1P işparçasının 500X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) TEEİ_1P_BD işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı	61

Resim	Sayfa
Resim 8.8. a) TEEİ_5P işparçasının 500X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) TEEİ_5P_BD işparçasının 200X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı	62
Resim 8.9. a) FREZE işparçasının 500X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) FREZE_BD işparçasının 200X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı	62
Resim 8.10. ASJİ_P1 işparçasının 250X büyütmede SEM fotoğrafı	73
Resim 8.11. ASJİ_P1 işparçasının 8 000X büyütmede SEM fotoğrafı	73
Resim 8.12. ASJİ_P2 işparçasının 650X büyütmede SEM fotoğrafı	74
Resim 8.13. ASJİ_P2 işparçasının 20 000X büyütmede SEM fotoğrafı	74
Resim 8.14. ASJİ_P1_BD işparçasının 124X büyütmede SEM fotoğrafı	74
Resim 8.15. ASJİ_P2_BD işparçasının 157X büyütmede SEM fotoğrafı	75
Resim 8.16. LIİ_N2 işparçasının 150X büyütmede SEM fotoğrafı	76
Resim 8.17. LIİ_N2 işparçasının 3 500X büyütmede SEM fotoğrafı	76
Resim 8.18. LIİ_AR işparçasının 150X büyütmede SEM fotoğrafı.....	76
Resim 8.19. LIİ_AR işparçasının 1 500X büyütmede SEM fotoğrafı.....	77
Resim 8.20. LIİ_N2_BD işparçasının 382X büyütmede SEM fotoğrafı.....	78
Resim 8.21. LIİ_AR_BD işparçasının 302X büyütmede SEM fotoğrafı	78
Resim 8.22. TEEİ_1P işparçasının 650X büyütmede SEM fotoğrafı	79
Resim 8.23. TEEİ_1P işparçasının 3 500X büyütmede SEM fotoğrafı	79
Resim 8.24. TEEİ_5P işparçasının 650X büyütmede SEM fotoğrafı	80
Resim 8.25. TEEİ_5P işparçasının 20 000X büyütmede SEM fotoğrafı	80
Resim 8.26. TEEİ_1P_BD işparçasının 237X büyütmede SEM fotoğrafı.....	81
Resim 8.27. TEEİ_5P_BD işparçasının 324X büyütmede SEM fotoğrafı.....	81

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

HV (kgf/mm²)

Vickers Sertliği

Nd:YAG

YAG kristali (Y₃Al₅O₁₂) katkılı Neodimyum

Ra (µm)

Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASJİ

Aşındırıcı Su Jeti ile İşleme

BD

Bilyalı Dövme

BHB

Başlangıç Hasar Bölgesi

EDS

Enerji Dağılımı Spektrometresi

EEİ

Elektro Erozyonla İşleme

KK

Kaba Kesim

Lİİ

Lazer Işını ile İşleme

PK

Pürüzsüz Kesim Yüzeyi

SEM

Taramalı Elektron Mikroskopi

TEEİ

Telli Elektro Erozyon ile İşleme

X-RD

X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Standartlarının kısıtlayıcılığı ve kalite beklentileri yüksek olan havacılık ve uzay sanayi, ortopedik ve dental cerrahi uygulamaları olan medikal sanayi gibi sektörler yeni malzemelerin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Mühendislik malzemelerindeki gelişmeler sonucunda, Ti6Al4V alaşımı gibi yüksek nitelikli alaşımlar geliştirilmiştir. Ti6Al4V alaşımı da bu sektörlerde yaygınlıkla uygulama alanı bulmakta olan güncel bir malzemedir. Ti6Al4V alaşımı, havacılık ve uzay sanayi, medikal sanayi ve uygulamaları, güç üretimi, otomotiv sanayi ve denizcilik endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [1, 2]. Ayrıca titanyum ve alaşımlarının ticari kullanımı incelendiğinde, pazar payının %60'ının Ti6Al4V alaşımına ait olduğu anlaşılmıştır [3]. Ti6Al4V alaşımı, saf titanyumun (Ti), alüminyum (Al) ve vanadyum (V) elementleri ile alaşımlandırılması yoluyla üretilmektedir. Yapının alaşıma kazandırdığı özellikler; yüksek özgül dayanım, yüksek sertlik, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, düşük ısıl iletkenlik, kimyasal reaktivite, düşük elastisite modülüdür. Titanyum alaşımlarının geleneksel imalat yöntemleri ile işlenebilirliği kısıtlıdır ve işlenmesi zor metaller arasında yer almaktadır [2, 4]. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde, yüksek maliyetlere rağmen tornalama, frezeleme gibi güvenilirliği ispatlanmış geleneksel imalat yöntemleri tercih edilmektedir. Bununla birlikte, alışılmamış imal usulleri de nihai ürün üzerindeki yüzey tamlığı sonuçlarını geliştirecek şekilde ilerlemeler kaydetmiştir. Böylelikle, işlenmesi zor olarak nitelendirilen Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde, geleneksel imalat yöntemlerine alternatif oluşturabilecek, yüzey tamlığı daha kaliteli işleme sonuçlarına sahip üretimler gerçekleştirilebilmektedir.

Alışılmamış imal usulleri, geleneksel imal usulleri ile işlenmesi zor olan malzemelerin işlenmesinde, karmaşık ve/veya yüksek hassasiyet gerektiren parçaların üretiminde yaygınlıkla kullanılmaktadır. Alışılmamış imal usulleri, işparçasının işlenmesinde mekanik, elektrik, ısıl ve kimyasal enerjinin kullanıldığı işleme mekanizmalarını barındırmaktadır. Bu yöntemlerden Aşındırıcı Su Jeti ile İşleme (ASJİ), havacılık ve uzay sanayisinde yaygın kullanılmakta olup Lazer Işını ile İşleme (Lİİ) ve Telli Elektro Erozyon ile İşleme (TEEİ) yöntemleri de sanayide kullanılan işleme teknolojileri arasında yer almaktadır. Lİİ ve TEEİ yöntemleri ile Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliği literatürde ASJİ'ye kıyasla daha kısıtlı olmakla beraber yeni çalışmalar da mevcuttur.

ASJİ yöntemi, basınçlandırılan suyun bir nozuldaki geçirilmeden önce içerisine aşındırıcı taneciklerin katılmasıyla, işparçasından aşınma yoluyla malzeme kaldırılması prensibi ile uygulanan mekanik bir alıştırılmış imalat usulüdür [5]. ASJİ yönteminde, termal çarpılmalar ve takım aşınması gözlenmemesi, yüksek işleme esnekliğinin bulunması, yüksek işparçası işleme hızına (İİH) sahip olması olarak sıralanabilir [6-8].

Lİİ yöntemi, yüksek enerjili bir ışın demetinin işparçası yüzeyinden ergime ve buharlaşma yoluyla malzeme kaldırmasına dayanan, ısı enerjisinin kullanıldığı bir alıştırılmış imalat yöntemidir. İşleme sonucunda yüzey altında ısı etkilenmiş bölge ve buna bağlı olarak kalıntı çekme gerilmesi oluşmaktadır. Lazer ışınının işparçası üzerinde ilerlemesine bağlı olarak işlenmiş yüzeylerde işleme çizgileri, yüksek yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumları gözlenmektedir [8].

TEEİ yöntemi, Elektro Erozyonla İşlemede (EEİ) olduğu gibi elektrik boşalımları ile işleme alanının ergime ve buharlaşması ile aşındırılmasına dayanan ısı enerjisinin kullanıldığı bir alıştırılmış imalat yöntemidir. Ayrıca TEEİ'nin temassız bir imalat usulü olmasından dolayı, işparçası malzemesinin tokluk, sertlik gibi metalürjik özelliklerinin işlemeye etkisi göz ardı edilebilmektedir [2]. TEEİ'de geleneksel ticari cihazların birçoğunun işleme hızının yüksek olduğu görülmekte ancak daha düşük kalınlıkta ısı etkilenmiş bölge, daha düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü gibi yüzey tamlığı beklentilerini karşılayamadığı bilinmektedir. Yeni nesil TEEİ tezgâhlarında işlenen yüzeye minimum hasar veren jeneratör teknolojileri sayesinde daha kaliteli yüzeyler elde edilmektedir. Kesim yüzeyleri üzerindeki etkileri yüzey tamlığı açısından değerlendirildiğinde ise daha az ısı etkilenmiş bölge, daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha az yüzey korozyonu gözlenmektedir [9].

Konstrüksiyon ve imalat alanında, işlenmiş bölge ile çevresi arasındaki sınır bölge yüzey olarak tanımlanmaktadır. Yüzey tamlığı ise işlenmiş yüzeylerin, mekanik, kimyasal ve metalürjik özelliklerin, işparçasının fonksiyonel performansına etkisini incelemektedir. İki kademedeki incelenen yüzey tamlığı, işlenmiş yüzey topografyası ve işlenmiş yüzeyin hemen altında bulunan mikro yapı, mekanik özellikler ve yüzey altı kalıntı gerilmelerden oluşmaktadır [10].

İşlenmiş yüzeylerde, kullanılan işleme mekanizmalarına bağlı olarak, yüzey ve yüzeyin hemen altında, ısı etkilenmiş bölge, kalıntı beyaz tabaka, kalıntı çekme gerilmesi, mikro

çatlaklar, yüksek yüzey pürüzlülüğü, dalgalı yüzey, çapak oluşumu vb. yüzey kusurları olduğu bilinmektedir. Bu yüzey kusurlarının giderilmesi ve işparçasının fonksiyonel ömrünün artırılması amacıyla işparçası ikincil işlemlere tabi tutulmaktadır. Bilyalı Dövme (BD) bu ikincil işlemlerde en yaygın kullanılan yöntem olarak uygulama alanı bulmuştur.

Soğuk işleme yöntemlerinden olan BD'nin uygulama amaçları arasında, işleme sonucunda yüzeyde meydana gelen çekme gerilmesinin basma gerilmesine dönüştürülmesi, yüzeyin sertleştirilmesi ve yüzey topografyasını değiştirerek işparçasının yorulma performansının iyileştirilmesi yer almaktadır. BD uygulanacak yüzeye, küçük küresel çelik bilyalar kontrollü olarak bombardıman edilir. Bombardıman sonucu yüksek kinetik enerjili bilyalar yüzey topografyasında ve yüzey altında mikro yapı değişimine yol açmaktadır. Kullanılan bilyaların yüzey sertliğinin işlenecek malzeme sertliğinden yüksek olması gerekmekte, bu nedenle bilyalar demir, çelik, seramik ve cam malzemesinden seçilmektedir. BD sonrası mekanik deformasyon etkisi ile yüzeyin hemen altında kalıcı basma gerilmesi, malzemenin iç kısmında ise kalıcı çekme gerilmesi oluşmaktadır [11].

Araştırmanın amacı

Çalışma kapsamında, imalat sektöründe geniş uygulama alanı bulunan alışılmamış imal usullerinden ASJİ, Lİİ ve TEEİ yöntemi, geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak kullanılabilmesi araştırma konusu olmuştur. Bu yöntemlerin birbirlerine ve geleneksel imalat yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Dezavantajların azaltılması için işleme sonrası, kesilmiş yüzeyler BD ile ikincil işleme tabi tutulmuştur.

Tez çalışmasında Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde,

- Alışılmamış imal usullerinden ASJİ, Lİİ ve TEEİ yöntemleri için en uygun işleme parametreleri seçilerek geleneksel imalat yöntemlerinden freze yöntemi ile kıyaslanması,
- TEEİ yönteminin, gelişen jeneratör teknolojileri ile azaltılan kalıntı tabaka kalınlığının bilyalı dövme ile giderilerek havacılık ve uzay sanayisinde kullanım imkanının araştırılması,
- Uzay ve havacılıkta kullanım alanı bulan ASJİ ile işlenmiş yüzeylerin ikincil işleme yöntemi BD ile daha da iyileştirilebilirliğinin araştırılması,

- Uygulaması diğer yöntemlere kıyasla daha kolay ancak yüzey tamlığına etkileri olumsuz olan Lİİ yönteminin, yüzey tamlığına olumsuz etkilerinin azaltılabilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada işlenen yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü, mikro yapısı ve mikro sertlik değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar frezelenmiş yüzey ile kıyaslanmıştır. Böylelikle Ti6Al4V alaşımının alışılmamış imal usulleri ile işlenmesinin yüzey tamlığına etkileri incelenmiştir.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Ramulu, Kunaporn, Arola, Hashish ve Hopkins yüksek basınçlı ASJİ ve su jeti ile dövme yöntemlerinin yüzey tamlığına etkilerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında havacılık ve uzay sanayisinde sıklıkla kullanılan Al7075-T6, AISI4340, AISI304, Monel400 ve Ti6Al4V alaşımından işparçalarını işlemişlerdir. Yöntemlerin uygulanması sonrasında mikro yapı incelemesi yapılarak mikro sertlik ölçümü, ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümü, yüzey altı plastik deformasyon bölgesi ölçümü ve kalıntı gerilme ölçümü yapmışlardır. Su jeti ile dövmenin yüzey ve altında plastik deformasyon sonucu oluşturduğu kalıntı bası gerilmesinin, BD yöntemi kadar iyi sonuçları olduğu vurgulanmıştır. ASJİ yöntemi ile kesilmiş yüzeylerde işleme yüzeyine dik kesitten (kesim kenarından) alınan ölçümler sonucu tüm numunelerde uzama sertleşmesi meydana geldiği ve uzama sertleşmesinin (strain hardening) yüzeyden 70 μm kalınlıkta ölçülmüş olduğu belirtilmiştir [12].

Seo, Ramulu ve Kim ASJİ ile Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliği üzerine yaptıkları araştırmada, işleme kanalı, yüzey kalitesi ve mikro yapı değişimleri irdelenmiştir. Çalışmada, ortalama yüzey pürüzlülüğü ile Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) mikro-fotoğrafları ve Enerji Dağılımı Spektrometresi (EDS) analizleri ile işlenmiş yüzeyler incelenmiştir. Böylelikle uygun işleme parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Sonuçta 15,6 mm kalınlıklı işparçası için belirlenen işleme parametreleri olarak, 207 MPa su jeti basıncı, 150 μm ortalama tanecik boyutlu garnet aşındırıcı, 4 mm işparçası nozul arası mesafe, 0,7 mm/s ilerleme hızı, 10 g/s aşındırıcı debisi değerlerinin seçilmesiyle, ortalama yüzey pürüzlülüğünü 5 μm 'nin altında elde etmişlerdir [13].

Fowler, Pashby ve Shipway Ti6Al4V alaşımının derinlik kontrollü frezeleme ile işlenmesine alternatif bir yöntem olarak ASJİ'nin uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada ilerleme hızı, paso sayısı ve aşındırıcı boyutu parametrelerinin, İİH, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığına etkisini incelemişlerdir. İlerleme hızının artırılmasının yüzey dalgalarını ve İİH'yi artırmasından ötürü en etkin işleme girdisi olduğunu belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün, ilerleme hızı ile doğrudan bir ilişkisi olmadığını ancak daha küçük aşındırıcı tanecikler ile İİH, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığının azaldığını raporlamışlardır [14].

Hasçalık, Çaydaş ve Gürün çalışmalarında ASJİ yönteminde işleme hızının yüzey tamlığına etkilerini incelenmiştir. İşlemede altı farklı nozul ilerleme hızı ile 4,87 mm kalınlıklı Ti6Al4V işparçalarının kesilerek, kesim yüzeylerinin mikro yapı ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. İlerleme hızının artmasıyla işleme kanalı genişliğinin azalmakta, daha az miktarda aşındırıcının işlemeye katılmasıyla konikliğin azalmakta olduğu ancak yüzey pürüzlülüğünün artış gösterdiği vurgulanmıştır. Ayrıca nozul ilerleme hızının yüzey morforlojisi için en etkili parametre olduğu, kesim kenarlarında SEM mikro-fotoğraflarının incelenmesi ile farklı bölgelerin elde edildiği belirtilmiştir [15].

Fowler, Pashby ve Shipway Ti6Al4V işparçalarına, ASJİ ile derinlik kontrollü frezeleme uygulamışlardır. Farklı şekillerde ve sertlikteki aşındırıcıların, yüzey tamlığına etkilerini incelemişlerdir. İşparçası ve aşındırıcı sertliğinin, aşındırıcı şekline kıyasla daha önemli olduğunu belirtmişlerdir. Aşındırıcı sertliğinin artışı, yüzey pürüzlülüğü ve İİH'yi artırırken, aşındırıcı şekil faktörü ve sertliğinin yüzey dalgalanmasına önemli bir etkisinin olmadığı vurgulanmıştır. Ayrıca nozul ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğünde tek başına önemli bir etkisinin olmadığı ancak ilerleme hızının artırılmasıyla yüzey dalgalanmasının azalacağı ifade edilmiştir [5].

Boud, Carpenter, Folkes ve Shipway yaptıkları çalışmada ASJİ yöntemi ile 14 mm kalınlıklı Ti6Al4V işparçalarının, kesme yüzeylerinde, aşındırıcı batma seviyelerini, yüzey dalgalanması ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Bu hususta SEM fotoğrafları, EDS element analizi ve profilometre ölçümlerini kullanmışlardır. Aşındırıcı boyutu 80 meş (mesh) olan garnet tanecikler, farklı geometrik şekillerde ve beş farklı üreticiden temin edilmiştir. Aşındırıcı tanecikler, su jetinin yüksek momentum enerjisi ile işparçasına çarparak parçalanmaktadır. SEM fotoğrafları ve EDS analizleri sonucunda aşındırıcının parçalanma karakteristiğinin, işleme kalitesini etkilediği belirtilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü tüm işlenmiş yüzeylerde 3-5 μm aralığında ölçülmüş olup aşındırıcı şeklinin kesme yüzeyi kalitesinde önemli bir etkisinin olmadığı vurgulanmıştır. Batma karakteristiği daha yüksek aşındırıcıların kullanılması ile daha kaliteli yüzeylerin elde edileceği önerilmiştir [16].

Coşansu, çalışmasında garnet ve kolemanit aşındırıcılarının 10 mm kalınlıklı Ti6Al4V, Al7075, mermer, cam ve kompozit işparçalarının ASJİ ile kesiminde aşındırıcı performansını araştırmıştır. Çalışmada, ilerleme hızı ve aşındırıcı debisinin, farklı oranlarda

aşındırıcı karışımları kullanarak, işlemenin yüzey tamlığına etkileri incelenmiştir. ASJİ’de % 100 garnet, % 70 garnet ve % 30 kolemanit, % 50’şer oranlarda garnet ve kolemanit ve % 100 kolemanit aşındırıcı karışımlar ile deneyler gerçekleştirilmiştir. ASJİ ile işparçalarının kesiminde, kolemanit tozunun tek başına olumlu sonuçlar alamamış olduğu belirtilmiştir. Aşındırıcı taneciklerin karışım olarak kullanılması ile işparçaları kesilebilmiş ancak koniklik açısı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgaları açısından değerlendirilen yüzeylerde kötü yüzey tamlığı sonuçları elde edilmiş olduğu belirtilmiştir [17].

Zhang, Wu ve Wang yaptıkları çalışmada ASJİ’de yüzey dalgalarının oluşum sistematliğini incelemişlerdir. Aşındırıcılı su jetinin nozuldan çıktıktan sonra oluşturduğu titreşimin görüntülenebilmesi için yüksek hızlı kameralar ile bir titreşim test düzeneğinde cam malzemenin kesimi incelenmiştir. ASJİ ile işlenmiş 7,0 mm, 13,2 mm, 20,32 mm kalınlığındaki Ti6Al4V alaşımından işparçalarının farklı parametre setleri ile işlenmesi sonrasında oluşan BHB, PK ve KK yüzeylerindeki ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmış ve ampirik bir matematik model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model, işleme hızının ortalama yüzey pürüzlülüğü ile doğrusal bir ilişkisinin olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak PK ile KK yüzey bölgelerinin arasındaki ortalama yüzey pürüzlülüğü farkının tamamıyla giderilemeyeceği ancak işleme hızının düşürülmesi bu farkın minimum seviyelerde olabileceği açıklanmıştır [18].

Vasanth, Muthuramalingam, Vinothkumar Vinothkumar, Geethapriyan ve Murali ASJİ’de proses parametrelerinin, yüzey topografyasına ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V işparçaları, 2 mm kalınlığında her bir kenarı 3 mm uzunluğunda üçgenlerden oluşmaktadır. Çalışmanın sonucunda aşındırıcı debisinin ve nozul-işparçası arası mesafesinin yüzey kalitesini etkileyen önemli parametreler olduğunu belirtilmişlerdir. Ayrıca aşındırıcı debisi ve nozul-işparçası mesafesinin birlikte arttırılması ile aşındırıcılı su jetinin enerjisinin azaltılması sonucu ortalama yüzey pürüzlülüğünün arttırıldığı ileri sürülmüştür [1].

Almeida, de Rossi, Lima, Berretta, Nogueira, Wetter ve Vieira Jr. LIİ ile Ti6Al4V alaşımının 0,5 mm ve 1,0 mm kalınlıklı Ti6Al4V plakaların kesiminde uygun parametrelerin belirlenmesini araştırmışlardır. Yardımcı gaz olarak helyum ve azot kullanılmasıyla kesim parametrelerinin, yüzey kalitesine, faz değişimine ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini, deneysel kesim sonuçlarından elde edilen veriler ışığında istatistiksel analizler ile destekleyerek

incelemişlerdir. İşlenmesi zor malzemeler arasında yer alan Ti6Al4V alaşımının, Lİİ ile işlenebilirliği uygun parametre seçimi ile mümkün olabileceği bildirilmiştir. Kesim yüzeylerinin X-ışını kırınımı (X-RD) analizleri, azot ortamında işlemede oluşan TiN çökeltisinin yüzeyde mikro sertliği arttırdığı belirtmiştir. Helyum ve Argon ortamlarında Lİİ ile kesmede çökeltme oluşmadığı ve yüzey kesitinde mikro sertliğin etkilenmediği belirtilmiştir [3].

Chien ve Hung Ti6Al4V alaşımından 1,0 mm kalınlıklı işparçalarının Lİİ yöntemi ile kesilmesinde optimum parametrelerin belirlenmesi için Taguchi metodu kullanarak matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirilen matematik modelde çapak yüksekliğinin belirlenmesi için Lİİ parametrelerinden gaz basıncı, nozul işparçası mesafesi ve lazer vurum frekansı, çalışmada incelenen değişkenler olarak belirlenmiştir. Geliştirdikleri matematiksel modelin işleme sonuçları ile kıyaslanmasıyla tahmin edilen çapak yüksekliğinde % 5,52 hata tespiti yapılmış olup geliştirilen matematik modelin başarısını vurgulamışlardır [19].

Scintilla, Sorgente ve Tricarico çalışmalarında 1,0 mm kalınlıklı Ti6Al4V levhaların, 2 kW gücünde fiber lazer ve argon gazı ortamında kesilmiş yüzeyleri yüzey tamlığı açısından incelemişlerdir. Kesilmiş yüzeylerin kenarından alınan ölçümler ile ısı etkilenmiş bölge ve kalıntı tabaka kalınlığı optik mikroskop ile incelenmiştir. En iyi kesme performansının 6 J/mm² enerji yoğunluğunda elde edildiği belirtilmiştir. İşleme hızının artması durumunda yüzeye daha fazla enerji aktarılacağından ısı etkilenmiş bölge kalınlığı ve kalıntı tabaka kalınlığının artacağı ifade edilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda ısı etkilenmiş bölge kalınlığının 117 µm olarak ölçüldüğü açıklanmıştır. Ayrıca Lİİ’de yardımcı gaz kullanımı ile işlenmiş yüzeyin daha hızlı soğutulması ve havada bulunan serbest oksijenin ergiyen metal ile oksit oluşturulmasının önüne geçilerek, daha düşük ısı etkilenmiş bölge ve kalıntı tabaka elde edilebileceği belirtilmiştir [20].

Pandey ve Dubey 1,4 mm kalınlıktaki Ti6Al4V alaşımının kesiminde yardımcı gaz olarak azot gazının kullanıldığı Lİİ yönteminde, genetik algoritma ile yüzey pürüzlülüğü ve yüzey konikliğinin matematik fonksiyonunu elde etmişlerdir. Deneysel çalışmalarında kesme hızı, gaz basıncı, lazer vurum süresi ve vurum frekansının 3 farklı seviyede farklı kombinasyonları ile çeşitlendirilen parametre seti ile 27 kesim gerçekleştirmişlerdir. Her bir işparçasından ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğünü, 6,95-13,64 µm aralığında, konikliği ise 1,1465°-6,0191° aralığında elde etmişlerdir. Geliştirilen matematiksel model ile

konikliğin ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün sırasıyla % 19,16 ve % 17,32 oranında iyileştirildiği bildirilmiştir. Teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda yüzey pürüzlülüğüne lazer vurum frekansının ve kesme hızının, koniklik oluşumuna ise vurum süresinin ve gaz basıncının en çok etki eden parametreler olduğu belirtilmiştir [21].

Astarita, Genna, Leone, Minutolo, Paradiso ve Squillace 1,0 mm kalınlıklı Ti6Al4V iş parçalarının 100 W gücünde fiber lazer ile kesilmesinin yüzey tamlığına etkilerini incelemişlerdir. Lazer ışınının sürekli ve vurumlu uygulanması sonrası işleme yüzeylerini inceleyerek, işleme boşluğunda koniklik, çapak oluşumu ve ısı etkilenmiş bölge kalınlığını incelemişlerdir. Çalışmada sürekli ve vurumlu lazer ile maksimum işleme hızı, maksimum işleme hızının % 90'ı ve % 80'inin kullanıldığı parametre setleri oluşturulmuştur. Oluşturulan parametre setleri sonucu ANOVA analizi ile işleme hızının, konikliğe ve çapak yüksekliğine etkisini incelemişlerdir. Çapak yüksekliğine sadece lazer gücünün etkidiğini, sürekli rejimde lazerle işlemede daha düşük kalınlıkta ısı etkilenmiş bölge oluştuğunu açıklamışlardır [22].

Scintilla, Palumbo, Sorgente ve Tricarico Ti6Al4V alaşımının kesme ve kaynaklamasında, kullanılan parametrelerinin iyileştirilmesi ve optimum parametrelerin tespiti için üç aşamalı deneyler gerçekleştirmişlerdir. İlk aşamada 1 mm kalınlıklı Ti6Al4V levhalara lazer ışını kullanılarak alın kaynağı yapmış ve çekme dayanımlarını incelemişlerdir. İkinci aşamada 1 mm kalınlıklı farklı levhalar LIİ ile keserek yüzey pürüzlülüğüne etki eden kesme hızı ve yardımcı gaz basıncının etkisini incelemişlerdir. Üçüncü aşamada ise kesme ve kaynaklamada elde edilen en iyi parametre setlerini birleştirerek en uygun kesme ve kaynaklama parametrelerini incelemişlerdir. Kesme ve kaynaklama uygulamalarının bir arada yapılabilmesinin ekonomik işleme ve Ti6Al4V alaşımının kullanımının yaygınlaşması için önemli olduğu vurgulanmıştır. En uygun kesme parametreleri olarak 0,6 MPa gaz basıncı ve 20 m/d kesim hızı önerilmiştir [23].

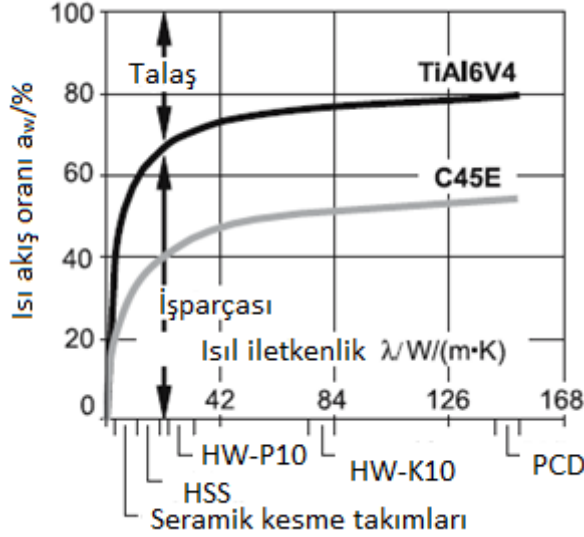
Scintilla ve Tricarico 1,0 mm kalınlıklı Al1050, AZ31 ve Ti6Al4V plaka şeklindeki iş parçalarının, karbondioksit ve Nd:YAG lazer kaynaklarının kullanıldığı LIİ yöntemi ile kesilmesi sonrası oluşan yüzeyleri incelemişlerdir. İşlemlerde yardımcı gaz olarak Al1050 iş parçaları için azot, AZ31 ve Ti6Al4V iş parçaları için argon gazı kullanmışlardır. Çalışma kapsamında Nd:YAG fiber lazer kullanılmış olup kaynağı karbondioksit olan LIİ kesim sonuçları literatürden edinilerek kıyaslanmıştır. İşleme sonrası Ti6Al4V iş parçalarının

kesiminde, 10 m/d işleme hızı ve 0,3 MPa gaz basıncı ile 200 µm uzunluğunda çapak yüksekliği ve 0,3 µm ortalama yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir. Tüm işparçalarının işlenmesinde karbondioksit veya Nd:YAG lazer kaynakları ile en iyi yüzey tamlığı sonuçlarının yüksek işleme hızı ve yüksek yardımcı gaz basıncı kullanılmasıyla elde edilebileceği önerilmiştir. Çalışma kapsamında kesim yüzeylerine uygulanan kesme enerji yoğunlukları, 5,2 J/mm² (Al 1050), 4 J/mm² (AZ31), ve 6 J/mm² (Ti6Al4V), 2 kW güç kapasiteli lazer kaynağından üretilmiş olup literatürde yer alan karbondioksit kaynaklı lazerler ile kıyaslandığında, fiber lazerlerin, daha az güç harcayarak işparçası yüzeyinde daha fazla enerji yoğunluğu elde etmesinden ötürü daha kalın işparçalarının işlenmesinde daha uygun olacağı belirtilmiştir [24].

Yan ve Lai TEEİ tezgahları için yeni bir elektroliz önleyici jeneratör devresi geliştirmişlerdir. Yeni geliştirilen devre sisteminde belirtildiği üzere, transistor kontrollü jeneratörün tam kapalı bir devrede, baskılayıcı (snubber) devre elemanları ile kontrolünün sağlanmasıyla elektroliz oluşumu önlenmektedir. Böylelikle yüksek frekansta düşük enerjili vurumlar elde edilebilmiştir. Test sonuçları, işleme kanalına paralel bağlanarak kontrol edilen bu sistemin, boşalım akımının azaltılmasını ve böylelikle daha uzun boşalım süresi sağlamış olduğunu göstermiştir. Ancak yüksek akım direnci kullanılan sistemde tezgah akımının artmasıyla ısı etkilenmiş bölge kalınlığı da artmaktadır. Deneysel çalışmalarında çoklu paso işleme de gerçekleştirmişler ve titanyum üzerinde oluşan mavi renklenmenin ve tungsten karbür malzemesi üzerinde oluşan mikro çatlak ve oksitlenmenin önüne geçildiği belirtilmiştir. Ayrıca geliştirilen yeni jeneratör devre kontrolü ile bitirme kesiminde, ortalama yüzey pürüzlülüğünü en düşük 0,22 µm ölçmüşlerdir [25].

Klocke ve König geleneksel imal usullerinden tornalama kullanarak, Ti6Al4V alaşımı ile C45 standart temperleme çeliğinin işlenmesinde ısı akışını ve işparçası ile kesici takım arasındaki ısı dağılımını incelemişlerdir. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde oluşan ısının, % 70'i takım üzerinde, kalan enerjinin ise talaş üzerinde yoğunlaştığını hesaplamışlardır (Şekil 2.1). Çalışmanın sonucunda, Ti6Al4V alaşımının geleneksel imal usulleri ile kesiminde, işleme mekanizmasının doğası gereği sürtünmeden kaynaklı oluşan ısının, Ti6Al4V'un düşük ısı iletkenliğinden ötürü işparçasına aktarılamadığı ve böylelikle kesici takım üzerinde birikmiş olan ısının kesici takım aşınmasını hızlandırarak, hem takım ömrünü hem de işleme kalitesini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca kesilen yüzeyin yüzey

tamlığının kalitesinin de mekanik ve ısı etkilerden dolayı olumsuz etkilendiği vurgulanmıştır [26].



Şekil 2.1. Ti6Al4V ve C45E'nin işlenmesinde talaş ve kesici takımdaki ısı dağılımı [26]

Aspinwall, Soo, Berrisford ve Walder Ti6Al4V ve Inconel718 alaşımlarını iki farklı temiz kesim jeneratör teknolojisine sahip TEEİ tezgâhı ile kesilmesinde elde edilen yüzey tamlığı açısından incelemişlerdir. İki tezgâhın da jeneratör teknolojisinin yüzey tamlığına en az hasarı veren temiz kesim teknolojisine sahip olduğu özellikle belirtilmiştir. Her iki tezgâh için tek ve çoklu pasolarda kesimler gerçekleştirmişlerdir. İşlenen yüzeylerin mikro sertliği, mikro yapısı ve yüzey topografyası incelenerek, ortalama 11 μm kalınlığında kalıntı tabaka ölçülmüş ve çoklu paso ile işlenmiş yüzeylerde hemen hemen hiç görünür yüzey hasarına rastlamadıklarını belirtmişlerdir [27].

Klocke, Welling ve Dieckmann Ti6Al4V alaşımının işlenmesi ile elde edilen yüzey tamlığının yorulma performansı üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında taşlama ve TEEİ yöntemleri kullanarak yorulma test numuneleri hazırlamışlardır. İşleme sonrası yüzey pürüzlülüğü açısından taşlama numunelerinin daha iyi sonuç vermelerine karşın TEEİ numunelerinin yorulma performansı açısından daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Böylelikle TEEİ'nin Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde, geleneksel imal usullerine alternatif bir yöntem olabileceği sonucuna varmışlardır [9].

Alias, Abdullah ve Abbas TEEİ yöntemi ile Ti6Al4V işparçalarını, kesme hızının 2 mm/d, 4 mm/d ve 6 mm/d olduğu, diğer parametrelerin sabit tutulduğu üç parametre seti kullanarak işlemişlerdir. İşlenen yüzeylerde, işleme kanalı genişliği, İİH, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topografyasını incelenmiştir. 1,60 μm ortalama yüzey pürüzlülüğü ve 7,96 mm^3/d İİH olan en iyi sonuçların, kesme hızının 4 mm/d, tel hızının 8 m/d, tel gerginliğinin 1,4 kg ve işleme aralığı geriliminin 60 V olarak kullanıldığı parametre seti ile elde edildiği belirtilmiştir [28].

Ghodsieh, Golshan, Hosseininezhad, Hashemzadeh ve Ghodsieh, TEEİ ile Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde etki eden vurum süresi, vurum ara süresi ve tezgah ana akımı değişkenleri ile kullanarak deneysel olarak ve ANOVA analizleri ile ortalama yüzey pürüzlülüğü, işleme boşluğu ve İİH'nin yer aldığı matematik model vasıtasıyla optimum proses parametrelerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Ortalama yüzey pürüzlülüğünü 1,38 μm , tel-işparçası arası mesafesini 0,007 mm, İİH'yi ise 0,0206 mm^3/s elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlar ile geliştirilen matematiksel model sonuçları kıyaslandığında, ortalama yüzey pürüzlülüğünde % 3,737, işleme boşluğunda % 4,379, İİH'de ise % 2,675 sapma olduğu görülmüştür [29].

Nourbakhsh, Rajurkar, Malshe ve Cao yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının TEEİ yöntemi ile işlenebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmalarında vurum süresi, boşalım akımı, aralık voltajı ve tel gerginliğinin de bulunduğu yedi işleme parametresinin işlemeye olan etkilerini Taguchi metodu kullanarak araştırmışlardır. İşparçaları 5x10x15 mm boyutlarında kesilmesi sonrası ANOVA analizi gerçekleştirilmiş ve yüzey tamlığı açısından değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Çalışma sonucunda ana güç kaynağı voltajı, su basıncı, tel sarım hızı ve tel gerginliğinin işleme hızında önemli bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Yüksek hız pirinç telin çekme dayanımının, çinko kaplı tele kıyasla % 10 daha yüksek olmasından ötürü, işleme sırasında tel kırılmalarının daha az gerçekleştiği ancak yüzey tamlığına etkilerinin daha kötü sonuçlandığı belirtilmiştir. SEM mikro-fotoğrafları üzerinden yapılan yorumda, çinko kaplamalı tel ile işlemede daha yüksek işleme hızı sayesinde, daha az çatlak, krater ve damlacık formunda yüzey kusurları olduğu belirtilmiştir [30].

Prasad, Ramji ve Datta Ti6Al4V işparçaları ile yaptıkları çalışmada TEEİ'de kullanılan işleme parametrelerinin, İİH ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemişlerdir.

Kullanılan değişkenler, tezgah ana akımı, vurum süresi, vurum ara süresi ve aralık voltajı olarak seçilmiştir. Belirlenen veri setleri ile işparçaları kesilmiş ve ortalama yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. ANOVA ve Taguchi analizleri gerçekleştirilerek, İİH ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne tezgah ana akımı ve puls süresinin diğer parametrelere kıyasla daha çok etkilediği belirtilmiştir [31].

Nandakumar, Vickram ve Mohan TEEİ yönteminde 3,0 mm kalınlıklı Ti6Al4V işparçalarının kesilmesiyle, ortalama yüzey pürüzlülüğüne etki eden işleme parametrelerini deneysel ve teorik analizler gerçekleştirerek çalışmışlardır. Taguchi metodu ile yüzey pürüzlülüğüne etki eden işleme parametrelerinden vurum süresi, vurum ara süresi ve tel gerginliğini değişken olarak kullanıldığı teorik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar ile desteklenen çalışmada vurum ara süresinin yüzey pürüzlülüğüne etki etmediğini belirtmişlerdir. Diğer iki parametrenin ise ortalama yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkilediğini belirterek ortalama yüzey pürüzlülüğünü 0,280 μm olarak elde etmişlerdir [32].

Gong, Sun, Wen, Wang ve Gao düşük hızlı TEEİ ile Ti6Al4V alaşımının tek ve çoklu pasalarda işlenmesi sonrası yüzey tamlığını incelemişlerdir. Çoklu kesimlerde ofset mesafesi azaltılarak toplam 4 paso işleme gerçekleştirmişlerdir. Çoklu paso işleme sonucu ortalama yüzey pürüzlülüğünü 0,67 μm elde etmişlerdir. SEM mikro fotoğrafları ile kesim yüzeylerinin mikro yapısı incelenmiş ve küresel katılaşmış metal damlacık formunda yüzey kusurları, krater, çatlak ve mikro gözenek oluşumları gözlenmiştir. Yüzey çatlaklarının genellikle mikro gözeneklerden ya da katılaşmış damlacık şekilli metallerin sınırından başladığı belirtilmiştir. Yüzeyde oluşan beyaz tabakanın elementel analizleri sonucunda, krater merkezlerinde krater kenarına kıyasla daha fazla bakır ve çinkonun tespit edildiğini bildirmişlerdir. Çoklu paso ile işleme sonucunda yüzeyde oluşan beyaz tabakanın 2,7 μm kalınlıkta olduğu ölçülmüş ve işleme yüzey kenarından alınan mikro sertlik ölçümlerinin hemen hemen malzeme sertliği ile aynı sonuçları verdiği vurgulanmıştır. Yüzeyden alınan XRD (X ışını kırınımı, X-ray diffraction) analizi ile yüzeyde TiO_2 , Ti_2O_3 ve TiO bulunduğu tespit edilmiş olup, dördüncü paso sonrası yüzeyde oksitlenmenin bir göstergesi olarak mavi-mor renklenme olduğu gözlemlenmiştir [33].

Ahmed, Mhaede, Wollmann ve Wagner Ti6Al4V alaşımlı üç farklı mikro yapıya sahip işparçası yüzeylerine, sabit yoğunlukta BD uygulayarak bilya boyutunun, korozyon

davranışı, yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik profili ve kalıntı gerilmeye etkisini incelemişlerdir. İncelenen üç farklı mikro yapı; dupleks yapı, globular yapı ve dönel tokaçlama (rotary swaging,) ile üretilmiş ultra ince tane boyutlu yapılardır. Çalışmalarında, Almen yoğunluğu 0,22 mm olacak şekilde, bilya boyutları 850 μm , 450 μm , 125 μm -250 μm olarak değiştirilerek, bilya boyutunun etkisi araştırılmıştır. BD’de bilya boyutunun artışının, yüzey pürüzlülüğünde düşüşe neden olduğu belirtilmiştir. BD uygulanan yüzeylerin korozyon direncinin düşmesi beklenirken, ısıtıl işlem sonrası BD ile korozyon direncinde artış olduğunu belirtmişlerdir. Plastik deformasyon gerçekleşen bant kalınlığının yüzeyden itibaren en fazla 850 μm olduğunu ölçümlemişlerdir. dupleks mikro yapıli işparçaları daha yüksek dayanıma ve sertliğe sahipken, BD sonrası globular mikro yapıya sahip işparçalarında daha kalın plastik deformasyon bant kalınlığı ölçümlenmiştir. Ayrıca globular yapıya sahip işparçalarının korozyon direncinin diğer iki mikro yapıya kıyasla daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [34].

Jiang, Man, Shepard ve Zhai çalışmalarında Ti6Al4V işparçalarına ardışık olarak iki defa BD işleminin etkilerini incelemişlerdir. İşparçalarının oda sıcaklığında ve 150 °C sıcaklıkta dört nokta eğme testine tabi tutulmasıyla ilk BD ve ikinci BD’nin işparçasının yorulma dayanımına etkilerini kıyaslamalı olarak test etmişlerdir. İlk BD ile işparçalarının yorulma dayanımı, oda sıcaklığında akma dayanımının % 65’inden, % 71’ine, 150 °C sıcaklıkta ise % 72’sine yükseltmiştir. İlk BD sonrası oda sıcaklığında, yüzeyin 25 μm altında maksimum bası gerilmesi -800 MPa’ya ulaşmış olup yüzeyden ~250 μm kalınlığında plastik deformasyon bandı ölçülürken, 150 °C sıcaklıkta -750 MPa bası gerilmesi ölçülmüştür. Sıcaklığın etkisi ile bası gerilmesinin bir miktar düşüş gösterdiğini raporlamışlardır. İkinci sefer BD uygulanan işparçasına oda sıcaklığında ve 150 °C sıcaklıkta eğme testi yapılması sonucunda yorulma dayanımı, akma dayanımının en fazla % 75’i olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, ikincil BD’nin yorulma dayanımının arttırılmasında önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir [35].

Liu ve Li Ti6Al4V alaşımının malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi için mikro yapıda ikiz nano-kristalli hegzagonal sıkı paket yapısının oluşturulmasında deformasyon mekanizmasını incelemişlerdir. Nano-kristal yapı oluşumu malzemenin sünekliğinde düşüşe sebep olmaktadır, ikiz nano-kristal yapı oluşumu süneklik ve mukavemet artışı sağladığı belirtilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında 70x19x4 mm ebatlı plakalardan ısıtıl işlem ile 40 mm çapında, 1 mm yüksekliğinde silindirik numuneler üretilmiş ve 0,25 MPa hava basıncı

ile 0,6 mm çaplı dökme çelik bilyelerin kullanılmasıyla 1 saat yüksek enerjili BD'ye tabi tutulmuştur. Numunelerin transmisyon elektron mikroskopu ile incelenmesi sonucu ikiz nano-kristalli yapı elde edildiği görülmüştür. Tanecik yapısında elde edilen bu özel yapı ile daha yüksek şekil değiştirme hızı elde ettiklerini belirtmişlerdir [36].

Pant, Pavan, Prakash ve Kamaraj çalışmalarında, üretiminde Ti6Al4V alaşımının kullanıldığı türbin kanatçıklarının bağlantı kısmının (fir tree blade root) yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, BD ve lazerli dövmenin, yorulma çatlakları ilerlemesinde mikro yapıya etkisini incelemişlerdir. Çalışma özelinde yorulma kopması meydana gelen yüzeyde, çatlak ilerlemesi sırasında dalgalı bir yüzey oluşmaktadır. Oluşan dalgalı arası mesafenin ise çatlak başlangıcı gerilim şiddetini yansıttığını vurgulamışlardır. Uygulanan testlerde minimum yorulma geriliminin, maksimum yorulma gerilimine oranı (R), $R=0,7$ ve $R=0,1$ ile yorulma testleri yapılmış ve lazerli dövme, BD ve yüzey işlemi görmemiş numuneler ile kıyaslanmıştır. Lazerli dövme ile BD'ye oranla daha derin kalıntı bası gerilmesi elde edilmesinden ötürü lazerli dövmede oluşan yorulma çatlakları ilerlemiş yüzeyleri göreceli olarak daha düz elde etmişlerdir [37].

Literatürde ASJİ ile Ti6Al4V'un işlenmesinin, LIİ ve TEEİ yöntemlerine göre daha yaygın olduğu anlaşılmıştır. ASJİ'de yüksek su basıncı, LIİ'de fiber lazer ve yüksek basınçlı yardımcı gaz, TEEİ'de ise çoklu paso kullanımının işleme kalitesi ve yüzey tamlığı açısından önemli olduğu yorumlanmıştır. Ayrıca LIİ ile genelde bu yöntemle işleme zorluğundan ötürü düşük kalınlıklı işparçalarının işlendiği görülmüştür. Ti6Al4V işparçalarına ikincil işlem olarak BD uygulamasını içeren sınırlı sayıda çalışmaya erişilmiştir.

Bu sınırlı çalışma göstermiştir ki BD uygulamasının sadece geleneksel yöntemlerden sonra uygulanması üzerine yapılan çalışmalardır. Alışılmamış imalat yöntemlerinden sonra BD işleminin gerçekleştirildiği çalışmalara rastlanmamıştır. Özellikle ısı işleme mekanizmasına sahip TEEİ ve LIİ yöntemleri ile işleme sonucunda yüzeyde oluşan ısı gerilmelerin ve yüzey kusurlarının BD işleme etkisi önemli bir araştırma konusu olarak değerlendirilmiştir.



3. Ti6Al4V ALAŞIMI

Titanyum alaşımları, üstün malzeme özellikleri sebebiyle birçok sektörde kullanılmakta olan önemli alaşımlardır. Özellikle Ti6Al4V alaşımının, yüksek özgül dayanımı sebebiyle havacılık ve uzay sanayisinde önemli bir kullanım alanı mevcuttur. Bu alaşım, uçak motorlarının kompresör diski ve bıçaklarında, uçak gövdelerinde, uyduların yapısal elemanlarında tercih edilmektedir. Ti6Al4V alaşımı, yüksek korozyon direncine sahip olmasından ötürü kimya, petro-kimya ve gemi endüstrisinde kullanılmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, biyouyumlu bir malzeme olan Ti6Al4V, ortopedik (diz, kalça, vb.) veya dental implant üretiminde önemli bir ticari pazara sahiptir. Tüketim malzemelerinde de kullanım alanı bulabilen Ti6Al4V alaşımı saat, mücevher, aksesuar ürünleri ve spor malzemelerin üretiminde de kullanıldığı görülmektedir [8, 38].

Ti6Al4V alaşımının mikro yapısı incelendiğinde iki farklı faz yapısı bulunmaktadır. Saf titanyumun alaşımlandırılması sonucunda, α - β faz dönüşümleri gerçekleşmektedir. Kullanılan faz dengeleyici elementlerin etkisine göre, mikro yapıda çeşitlilik sağlanmaktadır. Çizelge 3.1’de saf titanyumun alaşımlanması ile elde edilebilen faz yapıları gösterilmektedir. Faz dönüşümlerinin gerçekleşmesi ile metalürjik özellikler farklılaşmaktadır. [38, 39]

Çizelge 3. 1. Saf titanyumun alaşımlandırılmasında kullanılan elementler [38]

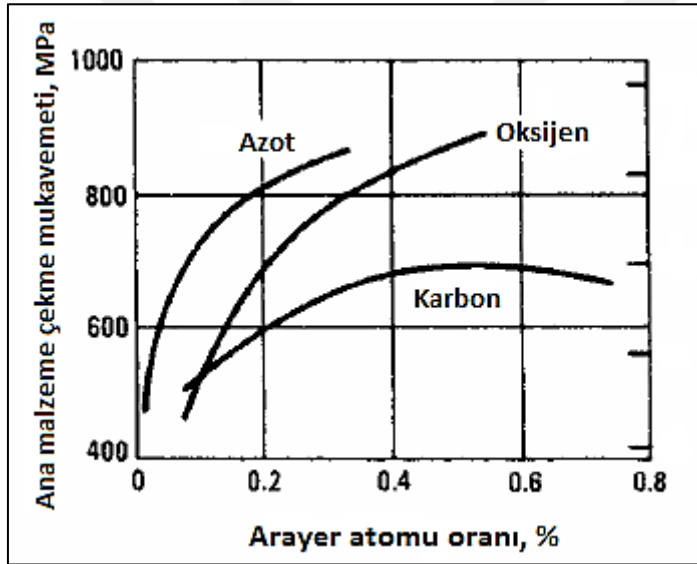
Alaşım Elementi	Ağırlıkça Katkı Oranı (%)	Mikro Yapıya Etkileri
Alüminyum (Al)	2-7	α dengeleyicisi
Kalay (Sn)	2-6	α dengeleyicisi
Vanadyum (V)	2-20	β dengeleyicisi
Molibdenyum (Mo)	2-20	β dengeleyicisi
Krom (Cr)	2-12	β dengeleyicisi
Bakır (Cu)	2-6	β dengeleyicisi
Zirkonyum (Zr)	2-8	α ve β dengeleyicisi
Silisyum (Si)	0,2-1	Sürünme direnci artırıcı

Saf titanyumun alaşımlanmasında kullanılan elementlerin mikro yapıya etkisi incelendiğinde [40];

- α fazı dengeleyicilerinin (saf metaller ve/veya arayer atomları), α - β dönüşüm sıcaklığını arttıran,

- ii) β fazı dengeleyicilerinin (saf metaller ve/veya arayer atomları), α - β dönüşüm sıcaklığını azaltan,
- iii) sadece katı çözelti olarak yer alan, α - β dönüşümü sıcaklığına etki etmeyen, metallerin bulunduğu görülmektedir.

Titanyum alaşımlarında bulunan arayer atomları, N (azot), O (oksijen), C (karbon), ve H (hidrojen) elementleridir. N, O, ve C, α fazı dengeleyici ve H, β fazı dengeleyici elementlerdir [38]. Arayer atomlarının alaşım yapısındaki mevcudiyeti faz dengelenmesinde etkili olabilmekte, ayrıca alaşımın mekanik mukavemetinde ve kırılgenliğinde önemli bir artış sağlamaktadır [38]. Şekil 3.1’de arayer atomlarının Ti6Al4V alaşımı içerisinde ağırlıkça bulunma oranına karşılık çekme dayanımında yaptığı değişimi gösterilmektedir.

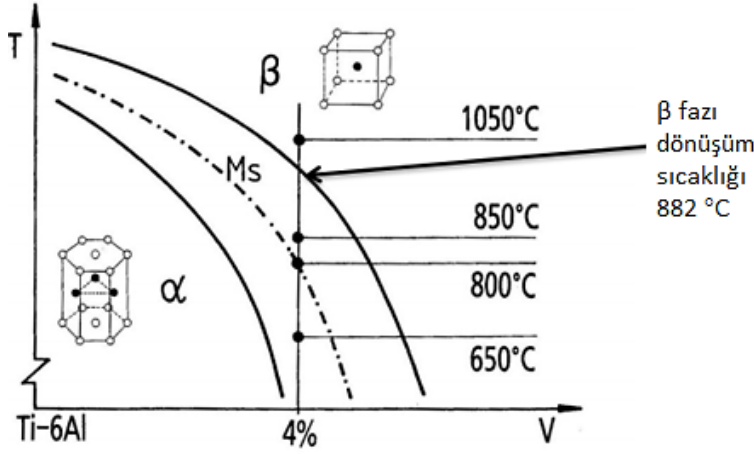


Şekil 3.1. Arayer atomlarının Ti6Al4V'nin çekme dayanımına etkisi [38]

α -alaşımları, saf titanyumun, genellikle Al veya Sn ile alaşımlandırılması sonucu elde edilir. Bu alaşım türü, işletme şartlarının yüksek dayanım, yüksek tokluk, yüksek akma direnci gerektirdiği durumlarda ve kriyojenik uygulamalarda kullanılabilmektedir. Ayrıca iyi kaynaklanabilme kabiliyetine sahiptirler [38].

α + β -alaşımları, saf titanyumun içerisine bir veya birden fazla α ve β dengeleyici katılmasıyla elde edilmektedir. Bu alaşım türünde mekanik özellikler ısıtım işlemi ile kontrol edilmektedir. Diğer α ve β fazlarına kıyasla mikro yapıda bulunan β fazının çökelti durumunda bulunmasından ötürü işlenebilirliği daha iyidir. Yüksek sıcaklık gerektiren çalışma şartlarında kullanımı uygundur. Şekil 3.2’de Ti6Al4V alaşımının faz diyagramı

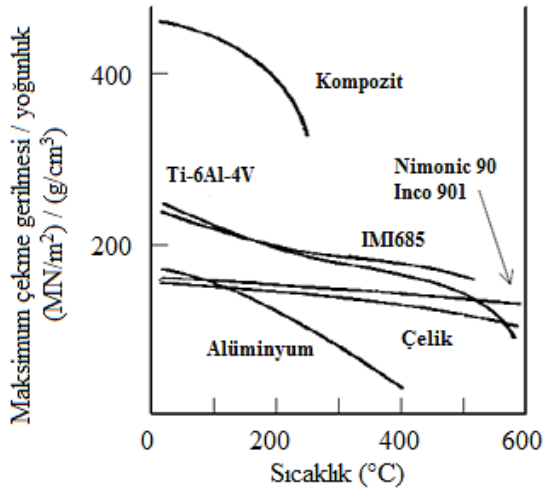
gösterilmekte olup, β dönüşüm sıcaklığının 882 °C olduğu grafik üzerinde belirtilmiştir [38, 41].



Şekil 3.2. Ti6Al4V alaşımına ait faz diagramı [41]

β -alaşımları, genellikle V, Mo, Cr elementlerinin titanyum ile alaşımlandırılmasıyla elde edilmektedir. β -alaşımları, yüksek işlenebilirlik ve tokluğa sahipken, düşük dayanımlı alaşımlardır. Ayrıca kolaylıkla soğuk şekillendirilmekte ve ısıtılma ile α fazına dönüşüm sağlanabilmektedir [38].

Önemli bir malzeme özelliği olan özgül dayanım, malzemenin akma gerilmesinin, yoğunluğuna oranı olarak bilinmektedir [39]. Yüksek sıcaklık gerektiren işletme şartları altında fonksiyonel performansını koruyabilen malzemelerin varlığı sınırlıdır. Şekil 3.3'te kompozit ve bazı özel metaller için özgül dayanımın sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Sunulan grafikte, kompozit malzemelerin diğer metallerden (Ti6Al4V, IMI685, Alüminyum, Nimonic90, Inco901, Çelik) daha yüksek spesifik dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda fonksiyonel olarak kullanılabilirken, yüksek sıcaklıklarda kullanılamadığı Şekil 3.2'den anlaşılmaktadır. Ayrıca, Ti6Al4V alaşımının diğer metalik malzemelerden daha yüksek ve kararlı bir özgül dayanıma sahip olması, 600 °C sıcaklıklarına kadar mekanik mukavemetini koruyabilmesini sağlamaktadır. Özgül dayanıma ek olarak, Ti6Al4V, düşük elastik modülü, düşük tokluk, düşük ısıtılma kapasite özelliklerine sahip olması ve yüksek sıcaklıklarda fonksiyonel olarak kullanılabilmesi nedenleriyle jet motor parçalarında tercih edilmektedir [38, 40].



Şekil 3.3. Spesifik dayanımın sıcaklığa bağlı değişim grafiği (Oda sıcaklığında spesifik dayanımın yüksekten düşüğe doğru: Kompozit, Ti6Al4V, IMI685, Alüminyum, Nimonic90, Inco901, Çelik) [42]

Titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde, benzer sertlikteki çeliklerle kıyaslandığında daha yüksek kesme kuvvetleri gerekmektedir. Alaşımın metalürjik özellikleri, işlenmesini hem daha maliyetli hem de daha zor hale getirmektedir. Ti6Al4V alaşımının geleneksel imal usulleri kullanılarak işleme zorluklarının metalürjik özellikler kaynaklı nedenleri maddeler halinde sunulmuştur [38, 39]:

- i) *Düşük ısı iletkenliği*: İşleme sırasında, ısı iletkenliğinin düşük olması nedeniyle takım-işparçası teması sonucu sürtünmeden kaynaklı oluşan ısının işleme ortamından uzaklaştırılması diğer metallere kıyasla zordur. Uzaklaştırılamayan ısı, kesme yüzeyinde ve kesici takım üzerinde birikir. Böylelikle işleme kalitesi ve takım ömrü olumsuz etkilenir.
- ii) *Yüksek kimyasal reaktivite (alaşımlanma eğilimi)*: Ti6Al4V alaşımının, işleme sıcaklığında kesici takım malzemesi ile alaşımlanma eğilimi yüksektir. Kesici takım ile işparçası arasında, sürtünme yapışması, sıvanma ve kaynaklanma gözlenmektedir.
- iii) *Düşük elastik modülü*: Ti6Al4V alaşımı, çelik ve süper-alaşımlara kıyasla yaylanabilirliği daha yüksek, esnek bir alaşımdır. Bu esneklik işleme sırasında işparçasının sabit tutulmasını zorlaştırmaktadır. İşlemede yaylanmanın önlenmesi amacıyla işparçasının sabitlenmesi, yaylanmanın azaltılabilmesi için destek elemanları kullanılması gerekebilmektedir. İşleme sırasında tüm sistemin rijitliği, kesici takım ve kaliteli bir işleme sonucu için önemlidir. Takım basıncı nedeniyle ince parçalar sehim

oluşumu eğilimindedirler. Bu durum tırlama, takım aşınması ve tolerans problemlerine yol açmaktadır.

- iv) *Yüzey hasarı hassasiyeti:* Titanyum ve alaşımları, özellikle taşlama operasyonları olmak üzere işleme esnasında yüzey hasarına duyarlıdır. Titanyum alaşımları, yorulma davranışı bakımından bazı metallere kıyasla yüzey kusurlarına daha az toleranslıdır. Yorulma ömrü bakımından taşlama sırasında, yüzey bütünlüğünün korunması için dikkatli olunması gerekmektedir. Keskin bir takım seçimi yorulma ömrünün optimize edilmesi açısından önem arz etmektedir.
- v) *Deformasyon pekleşmesi karakteristiği:* Titanyumun deformasyon pekleşmesi karakteristiği sebebiyle kesici takım üzerinde yığıntı talaş oluşumu gözlenmektedir. Böylelikle kesme sırasında daha yüksek kayma açısına sahip kesici takımlar kullanılmaktadır. Bu durum ince formulu talaş oluşturmaktadır. Talaşın takım yüzeyinde daha küçük bir alana temas etmesi ile birim alanda daha fazla yataklama kuvvetleri oluşmaktadır. Yatak kuvvetleri ile birlikte talaşın oluşturduğu sürtünme kuvveti ile takım kesme yüzeyinde ısı oluşmakta bununla birlikte takımda hızlıca krater oluşumu ve/veya takım kırılması meydana gelmektedir.



4. YÜZEY TAMLIĞI

Yüzey bilimine göre, nesnenin en dış kısmındaki oluşum yüzey olarak tanımlanmaktadır. Yüzey mühendisliği, yüzey bilimi ile fizik, kimya, tasarım, imalat, malzeme, metroloji ve triboloji gibi birbirinden farklı disiplinleri birleştirmektedir [10].

Yüzey mühendisliği, mühendislik ürünlerinin kalite, performans ve ömür maliyetleri alanında faaliyetler yürütmektedir. Bu faaliyetler, işletme şartlarına göre en iyi performansı sağlayabilecek yüzeyin elde edilmesi amacıyla;

- korozyon direncinin artırılması,
- oksidasyon/sülfidasyon direncinin artırılması,
- aşınma kaynaklı enerji kaybının azaltılması,
- yorulma ömrünün, sertliğin, tokluğun artırılması gibi mekanik iyileştirmelerin yapılması,
- elektrik ve/veya elektronik özelliklerin geliştirilmesi,
- ısı yalıtkanlık özelliklerin iyileştirilmesi,
- biyolojik özelliklerin iyileştirilmesi,
- estetik özelliklerinin artırılması vb.

çalışmalarını kapsamaktadır [10, 43].

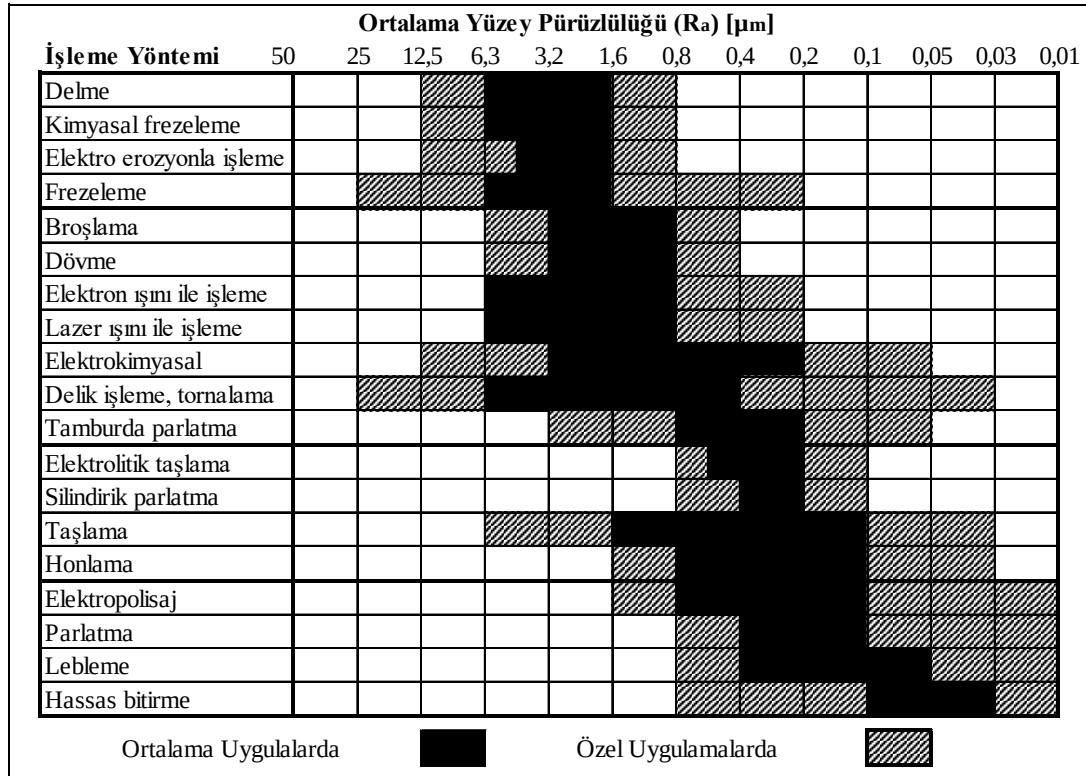
Yüzey tamlığının, işleme sonrası elde edilen yüzeyin fonksiyonel performansına ve güvenilirliğine önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Kullanılan yöntemin işleme mekanizmasına bağlı olarak işleme sonrası yüzeyde mekanik, metalürjik veya kimyasal etkiler olabilmektedir. Bu etkilerin ikincil bir işlemle iyileştirilmesi, parçanın çalışma şartlarına göre zorunluluk haline gelebilmektedir. Bilinen ikincil işlemlerle, yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme oluşumu, faz dönüşümü gibi etkilerin birinin veya birkaçının iyileştirilmesiyle işparçasının çalışma ömrü artırılmaktadır.

Field, ve Kahles, yüzey tamlığından literatürde ilk bahseden araştırmacılarıdır [44]. Çizelge 4.1’de, minimum, standart ve genişletilmiş olmak üzere üç seviyede sunulan veri setleri ile yüzey tamlığı özelliklerinin incelenebileceğini belirtmişlerdir [10].

Çizelge 4.1. Yüzey tamlığı veri setleri [10]

Minimum yüzey tamlığı veri seti	Standart yüzey tamlığı veri seti	Genişletilmiş yüzey tamlığı veri seti
- Yüzey pürüzlülüğü - Mikro yapı (10X veya daha yüksek büyütme) - Mikro çatlaklar - Makro çatlak belirtileri - Mikro yapı - Plastik deformasyon - Faz dönüşümleri - Taneler arası korozyon - Çukur, yırtık, katlanma, çıkıntı - Yığıntı talaş - Ergimiş ve çökelti katmanları - Dağlama - Mikro sertlik	- Minimum yüzey tamlığı veri seti - Yorulma - Gerilme korozyonu - Kalıntı gerilme - Çarpılma	- Standart yüzey tamlığı veri seti - Yorulma testi (tasarım kriterleri elde edilmesi için) - Mekanik testler - Çekme - Kopma - Akma - Diğer özel testler (yataklama performansı, kayma sürtünmesi, yüzeyin sızdırmazlık özellikleri vb.)

Her bir işleme yöntemi, kendine özgü işleme mekanizmasına bağlı olarak yüzeye etki etmektedir. Yüzey topografyası, işlemenin kaba, orta veya hassas işleme durumuna göre değişiklik göstermektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 4.1'teki grafikte görülmektedir.



Şekil 4.1. İşleme sonrası elde edilen ortalama yüzey pürüzlülükleri [10]

5. ÇALIŞMADA KULLANILAN ALIŞILMAMIŞ İMAL USULLERİ

Geleneksel imal usullerinde işleme mekanizması, işparçasından daha sert bir kesici takımın işparçasında belirli bir derinliğe batırılacak şekilde, işparçası ve takım arasında göreceli bir hareket ile işparçasından malzeme eksiltilmesine dayanmaktadır. Yüksek nitelikli yeni malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri, geleneksel yöntemlerle işlenebilirliği kısıtlamaktadır. Yüksek kesici takım maliyetleri ve işleme sonrası kötü yüzey tamlığı, geleneksel imal usullerinin kullanılabilirliğini kısıtlayan başlıca sebeplerdendir. Ayrıca daha karmaşık geometriler, rijitliği düşük parçalar, dar toleranslı mikro işlemler ve iyi yüzey kalitesi gereksinimlerini geleneksel imalat yöntemleri karşılayamamaktadır. Bu nedenle alışılmamış imal usulleri, geleneksel imal usulleri ile işlenmesi zor olan malzemelerin işlenmesinde, beklentilerin daha iyi karşılanabilmesi amacıyla geliştirilmiş ve gelişimine halen devam etmektedir [8].

Alışılmamış imal usulleri işleme mekanizmalarında kullanılan enerji türüne bağlı olarak mekanik, ısı, kimyasal ve elektrokimyasal olmak üzere dört farklı sınıfta incelenmektedir. Tez çalışması kapsamında mekanik alışılmamış imal usullerinden ASJİ, ısı enerjisinin kullanıldığı Lİİ ve TEEİ yöntemleri kullanılmıştır.

5.1. Aşındırıcılı Su Jeti ile İşleme

ASJİ, mekanik enerji ile işleme yapılan alışılmamış imal usulüdür. Bakır ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları, kurşun, çelik, tungsten karbür, titanyum ve alaşımları, mühendislik seramikleri, kompozit malzemeler, tekstil ürünleri, beton, kaya, grafit, kuvars camı, petekli sandviç yapı vb. hemen hemen tüm mühendislik malzemelerinin kesiminde ASJİ yöntemi kullanılabilir. Su jeti içerisine katılan aşındırıcılar yoluyla hem talaş kaldırma oranı hem de işleme hızı (51-460 mm/d) artmaktadır. Ayrıca ASJİ yöntemi kompozit malzemelerin kesiminde geleneksel yöntemlere göre 10 kata kadar daha hızlı bir yöntemdir [8].

ASJİ yönteminde, düşük basınçlı suyun (~4,2 bar) yüksek basınçlı su jetine (~3800 bar) dönüştürülmesinden sonra, su jeti nozul kanalına girmeden hemen önce aşındırıcı tanecikler ile karıştırılır. Nozuldan geçen su jetinin hacimce yaklaşık olarak % 70'i su, % 30'u

aşındırıcıdır. ASJİ’de üretilen su jetinin hızı, 30 m/s hızlara erişebilmektedir. Aşındırıcı tanecik boyutu 10-150 μm olan silisyum karbür, cam ya da garnet malzemeleri yaygın kullanılan aşındırıcılardır [8, 45-47].

ASJİ yönteminde, işparçasından mekanik aşındırma yoluyla işleme yapılabilmesi için su basınçlandırılır, aşındırıcı parçacıklar ise bu basınç artışı etkisiyle hızlanmaktadır. Hızlandırılan parçacıklar belirli bir mesafe ve açı ile işparçası üzerine yönlendirilerek noktasal bir bölgede kinetik enerji yoğunlaştırılır. Yüksek momentum enerjisi ile hızlandırılmış aşındırıcılı su jeti, işparçasından aşınma yoluyla malzeme kaldırılmasına sebep olmaktadır.

Temel olarak ASJİ tezgah üniteleri;

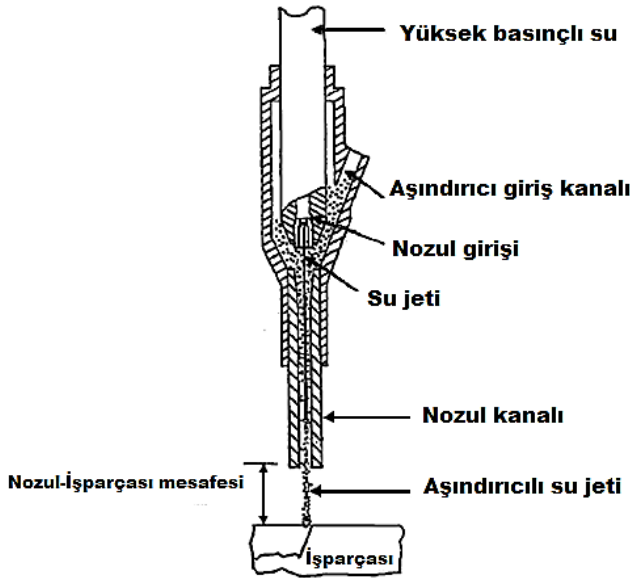
- Su dağıtıcı sistem,
- Aşındırıcı besleme sistemi,
- Basınç yükseltici intensifier,
- Filtre sistemi,
- Su-aşındırıcı karışımı ve talaş toplama haznesi,
- Kesici nozul,
- Karışım haznesidir.

ASJİ tezgâhının en önemli bileşenlerinden birisi, su jetinin enerjisini üreten basınç yükseltici (intensifier) ünitesidir. Basınç yükseltici, düşük basınçlı suyun, yüksek basınçlara ulaşmasını sağlayan, çift yönlü hidrolik bir sistemdir. Basınç yükselticide hidrodinamik olarak basınçlandırılan su, akümülatör ve su dağıtım ünitelerine sürülmektedir. Akümülatör, intensifierin yön değişiminde su akışının devamlılığını sağlamaktadır ve bu aşamada su basıncında $\sim\%$ 12 basınç kaybı olmaktadır [8].

Yüksek basınçlı su dağıtıcı sistemin taşıdığı basınçlı suyun, jet nozuluna gelerek burada aşındırıcı parçacıkları ile karışması sağlanmaktadır. Aşındırıcı su karışımının nozul kanalı boyunca ilerleyerek işparçası üzerine belirli bir mesafeden uygulanarak işleme başlatılmaktadır (Şekil 5.1).

ASJİ yönteminde işleme parametreleri, su basıncı, nozul çapı, takım-işparçası mesafesi, aşındırıcı tipi, tanecik boyutu, aşındırıcı debisi ve ilerleme hızıdır. ASJİ yönteminde

kullanılan aşındırıcının talaş kaldırılmasında önemli bir rolü olduğundan, aşındırıcının seçimi de önem kazanmaktadır. Önemli aşındırıcı parametreleri, aşındırıcı malzeme yapısı ve sertliği, aşındırıcının mekanik davranışı, tanecik şekli, tanecik boyutu ve tanecik dağılımıdır [8, 46].



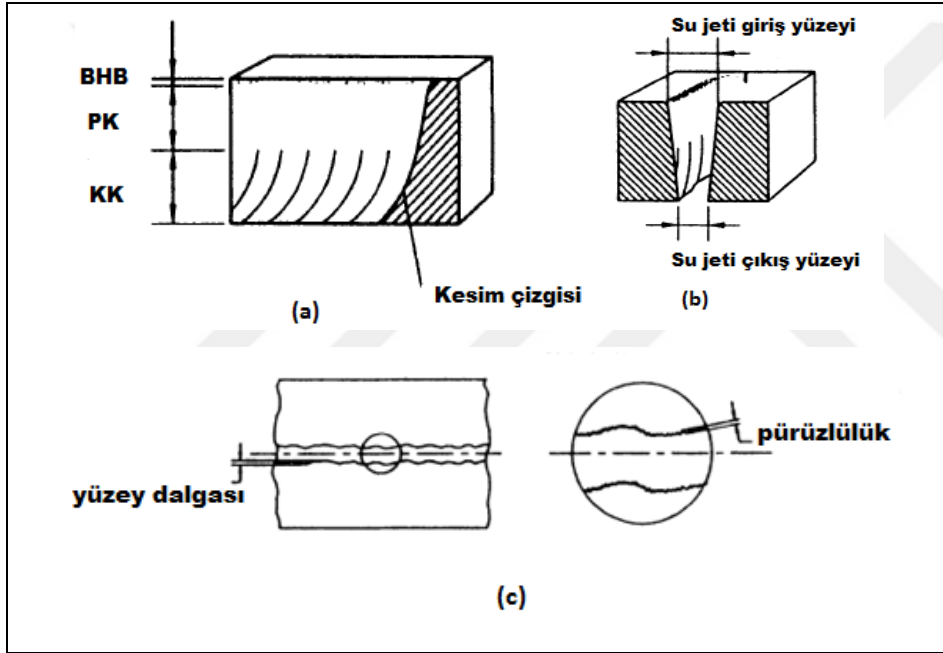
Şekil 5.1. ASJİ tezgahlarında kullanılan nozul ve işlemenin şematik gösterimi [46]

ASJİ'nin aşındırıcı etkisi ile işleme, hemen hemen tüm sertlikteki malzemelere uygulanabilmektedir. Aşındırıcılı su jeti işlenecek yüzeye temas ettiğinde, yüzey öncelikle kesme aşınmasına uğratılır. Su jetinin sürekliliği ile deformasyon aşınması gerçekleşerek işleme boşluğu (kerf) oluşarak işleme gerçekleştirilmektedir [46].

ASJİ'de işleme sonucu ortalama yüzey pürüzlülüğü, işparçası malzemesi, işleme hızı, aşındırıcı tipi ve boyutuna bağlıdır. İşleme hızının yükselmesi ile doğru orantılı olarak İİH artmaktadır. Yüksek İİH'ye sahip işlemlerde ortalama yüzey pürüzlülüğünün yüksek olduğu görülmektedir. Daha küçük boyutlu aşındırıcı kullanılması daha az batma derinliğine sebep olacağından, yüzey pürüzlülüğünün azaltılabileceği belirtilmektedir [8].

ASJİ ile işlenmiş yüzeyler, gözle muayene edildiğinde de görülebilen başlangıç hasar bölgesi (BHB) pürüzsüz kesim yüzeyi (PK) ve kaba kesim yüzeyi (KK) oluşmaktadır. Aşındırıcılı su jetinin, kesme deformasyonu ile giriş yaptığı BHB hemen yüzeyin altında bulunmaktadır (Şekil 5.2.a). PK yüzeyi BHB'nin altında deformasyon aşınması ile daha az

pürüzlü bir yüzeydir (Şekil 5.2.a). KK yüzeyi yüzey dalgalanmalarının başladığı yerden aşındırıcılı su jetinin işparçasından çıkış yaptığı alt yüzeye kadar olan bölgedir (Şekil 5.2.a). Aşındırıcılı su jetinin çıkış yaptığı işparçasının alt yüzeyinde, yüzey dalgalanmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü daha yüksek elde edilmektedir (Şekil 5.2.c). Ayrıca su jeti nozuldan çıkış yaptıktan sonra, açık hava basıncının etkisi ile genişlemeye başlamaktadır. KK yüzeyinde aşındırıcılı su jetinin hem etkisinin azalmasıyla hem de ilerleme yönüne bağlı olarak yüzeyde dalgalanma oluşmaktadır. İşparçasında işleme yüzeyinin girişinde su jeti, çıkış yüzeyine kıyasla daha uzun süre etkileşimde bulunmaktadır. Bu durumun sonucu olarak işleme kanalında koniklik meydana gelmektedir (Şekil 5.2.b) [47, 48].



Şekil 5.2. ASJİ ile işleme sonrası yüzeyin şematik gösterimi, a) kesim yüzeyi, b) su jetinin çıkış yüzeyi, c) işleme bölgesi enine kesiti

ASJİ yönteminin avantajları:

- Çok yönlü kesim yapılabilen esnek bir imalat yöntemidir,
- Otomasyona uygundur,
- İşleme yüzeylerinde ısı etkisi bırakmamaktadır,
- Yüksek ve etkili kesim hızlarına ulaşılabilmektedir,
- Çapaksız işleme sağlanmaktadır (İhmal edilebilir boyutlarda),
- İşleme sonrası katman ayrılması gözlenmemektedir,
- İşlemede su kullanımı nedeni ile ucuz olmakta, toksik etkileri olmamaktadır,

- Kontur kesimi sağlanabilmekte, keskin köşeler elde edilebilmektedir,
- İşlemeye başlamak için özel bir yardımcı deliğe veya köşeden başlanmasına gerek yoktur. Malzeme yüzeyinden herhangi bir yerden kesim yapılabilir, yapılabilmektedir,
- İşlemede yangın tehlikesi olmaması nedeniyle patlayıcı ihtiva eden çalışma ortamında kullanılabilir.

ASJİ yönteminin kısıtları [46, 47],

- Bazı malzemenin kesiminde ekonomiktir.
- Çok kalın işparçaları kesilememektedir. Kesilmesi durumunda boyutsal tamlik sağlanamamakta ve derin dalgalı bir yüzey elde edilmektedir.
- Kalın işparçalarında koniklik oluşmaktadır.

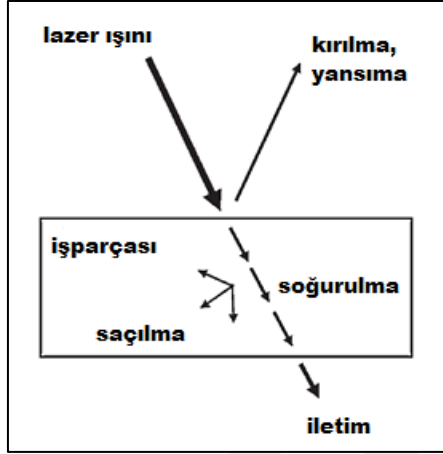
5.2. Lazer Işını ile İşleme

Lazerler, sac kaplama, ısıtma işlemi, yüzey kaplama, alaşımlama, kaynaklama, kesme ve delme gibi birçok endüstri uygulamasında tek başına veya geleneksel imal usulleri ile hibridleştirilerek kullanılmaktadır [8, 49].

Lazer ışınları, üretildiği aktif malzeme türüne göre dört sınıfta incelenmektedir. Bunlar katı hal, gaz, yarı iletken ve sıvı boya lazerleridir. Katı hal lazerleri, ana bir malzeme içerisinde safsızlık iyonlarının gömülmesiyle elde edilmektedir. Ticari kullanıma uygun lazerler için kullanılan aktif malzemeler halen kısıtlı olmakla beraber, Nd:YAG tipi lazer, YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) kristali ile katılandırılmış en yaygın katı hal lazerlerindendir [49].

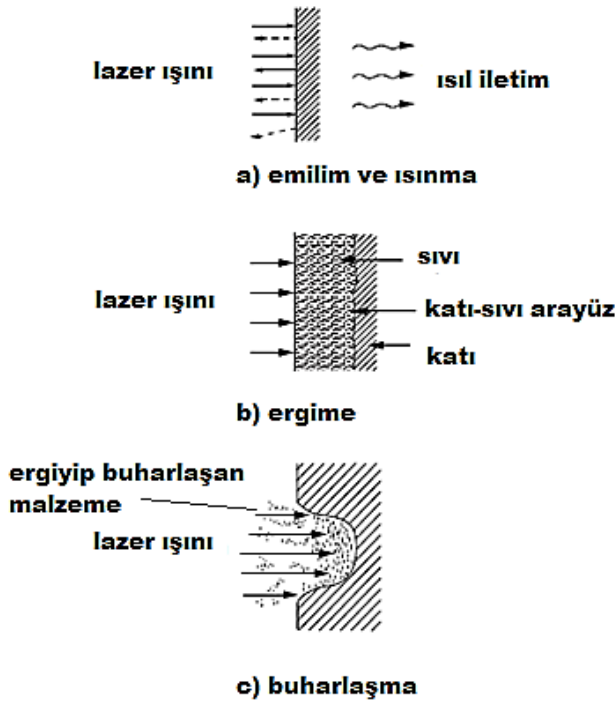
Karbondioksit lazerlerinin sac metal kesiminde hızlı, kaliteli yüzey tamlığı elde edilebilmesi uygulama esnekliğine sahip olması gibi özellikleri sanayide kullanım alanını yaygınlaştırmıştır. Ancak Nd:YAG lazerlerinin karbondioksit lazerlerine göre daha iyi odaklanma, yüksek güç üretimi, fiber optik kablo ile taşınma esnekliği, kısa dalga boyu ($1,06\mu m$) ile işparçası tarafından daha iyi soğurulması ve yansıtıcılığı yüksek malzemelerin (alüminyum, bakır, vb.) işlenebilmesi, daha kalın malzemelerin kesilebilmesi, daha dar işleme kanalı oluşturması gibi üstünlükleri bulunmaktadır [49].

Lİİ yönteminde, lazer ışınının bir rezonatör vasıtasıyla üretilip ışın demeti çapı kadar bir alana odaklanmasıyla, yüksek yoğunluklu enerjinin işparçasına teması ile işleme başlamaktadır. İşparçasının, Lİİ ile işlenebilmesi için ısı iletkenliği, özgül ısısı, ergime ve kaynama sıcaklıkları, gerekli olan önemli malzeme özellikleridir.



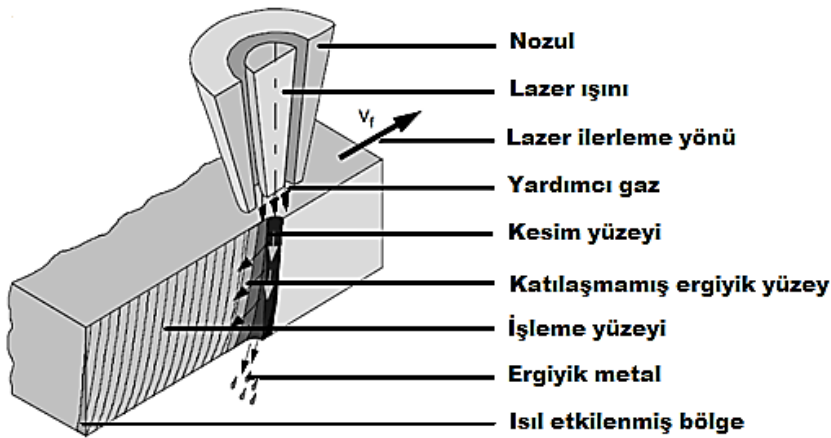
Şekil 5.3. Lazer-işparçası etkileşiminde meydana gelen fiziksel olayların şematik gösterimi

Lazer ışını, işparçası yüzeyi ile temas ettiğinde, kırılma, yansıma, soğurulma, saçılma ve iletim gibi fiziksel olaylar gerçekleşmektedir (Şekil 5.3). Lazer ışınının optik enerjisi, işparçasına teması sonrasında ısı enerjisine dönüşmektedir. Yüksek yoğunluklu lazer ışınına maruz kalan yüzeylerde anlık olarak, metallerde serbest elektronların uyarılması, yalıtkan malzemelerde titreşim, yarı iletken malzemelerde de hem uyarım hem de titreşim bir arada meydana gelmektedir. Lazer ışınının işparçasını uyarımı sonucu ısı dönüşümü, metal malzemeler için $\sim 10^{-13}$ saniye, metal olmayan malzemeler için ise $\sim 10^{-12}$ - $\sim 10^{-6}$ saniye sürmektedir. İşparçasının yüzeyinde anlık oluşan ısı enerjisi, malzeme içinde iletilmekte ve yüzeyin sıcaklık dağılımını etkilemektedir. Yüzeydeki enerji yoğunluğu 10^8 - 10^{14} W/cm² değerlerine erişebilmektedir. İşleme mekanizmasının doğası gereği, sıcaklık artışının büyüklüğüne göre yüzeyde ısınma, ergime ve buharlaşma gibi fiziksel etkiler oluşmaktadır (Şekil 5.4). Ancak en önemli ısı transferi, iletim yoluyla yüzey altında, malzemenin içinde gerçekleşerek faz dönüşümüne sebep olmaktadır. Yüzeyde üretilen ve yüzey altına iletilen ısı, lazer ışını ve işparçasının termo-fiziksel özelliklerine bağlıdır [8, 49].



Şekil 5.4. Lİİ yöntemi ile işleme mekanizmasının şematik gösterimi, a) emilim ve ısınma, b) ergime, c) buharlaşma [8]

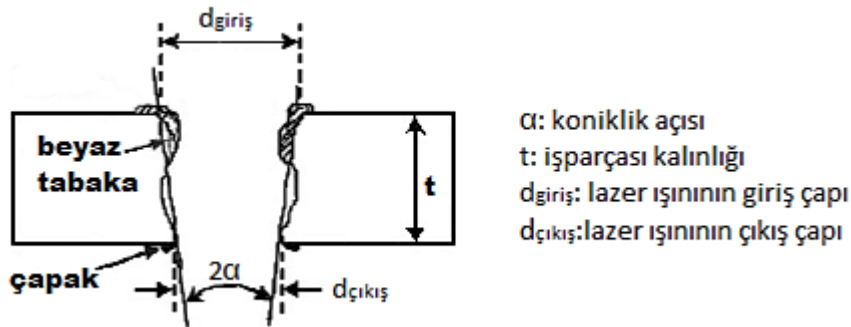
Geleneksel imal usulleri kullanılarak, Ti6Al4V alaşımı gibi yüksek dayanım ve yüksek ısı dirence sahip alaşımlar, karbürler, fiber destekli kompozitler, kobalt-krom alaşımları ve mühendislik seramiklerinin işlenmesinde yüksek kesim kuvvetleri gerekmekte iken Lİİ ile işparçasının temassız olarak işlenmesi gerçekleştirilebilmektedir [8, 49]. Şekil 5.5'te Lİİ yönteminin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 5.5. Lİİ yönteminin şematik gösterimi [50]

Lİİ ile işlemede hava, oksijen, azot ve argon gibi yardımcı gazlar da kullanılmaktadır. Kullanılan yardımcı gazların yüzeye etkileri de farklılık göstermektedir. Lİİ ile kesilmiş yüzeylerin morfolojik yapısına göre, giriş orta ve çıkış bölgeleri olmak üzere üç farklı yüzey oluşmaktadır. Giriş yüzeyi lazer ile işparçasının etkileşiminin başladığı diğer yüzeylere göre daha düz olan, birkaç mikrometre kalınlığında çok ince bir yüzeydir. Orta bölgede lazer vurumunun frekansı ile aynı frekansa sahip dalgalı yüzey profili, çıkış yüzeyinde ise lazerin etkinliğinin diğer bölgelere kıyasla daha da azalması ve gaz basıncının da etkisi ile düzgün olmayan dalgalı ve çapaklı yüzey oluşmaktadır. [49, 51].

Lazer ışını ile birlikte uygulanan yüksek basınçlı yardımcı gazın ergiyik haldeki metali püskürtmesiyle, lazer çıkış yüzeyinde çapak oluşmaktadır (Şekil 5.6). Lazer ışının optik yapısı, işleme sonrası yüzeyde koniklik meydana getirmektedir (Şekil 5.6). Ayrıca lazer ışınının temas ettiği yüzeylerde ısıl etkilenmiş bölge ortaya çıkarmaktadır. Isıl etkilenmiş bölge, çarpılma, yüzey çatlakları, kırılgenlik, kaynaklanabilirlikte düşüş, korozyon ve yorulma direncinde düşüklük gibi istenmeyen etkilerle ilişkilidir [8, 49].



Şekil 5.6. Lİİ’de koniklik oluşumunun şematik gösterimi

Avantajlar [8, 49]:

- Takım aşınması ve kırılması gözlenmemesi,
- Temassız bir yöntem olması,
- Optik olarak yüksek konumlama hassasiyeti sağlanabilinmesi,
- Derinlik/çap (L/D) oranı yüksek, küçük çaplı derin delikler işlenebilmesi,
- Yüksek sertliğe sahip işparçalarının işlenebilmesi,
- Yüksek işleme hızlarına sahip olması,
- İşleme kurulumunun diğer yöntemlere göre daha kolay ve kısa zaman alması,

- Deliklerin çok küçük açılarda (yüzey ile delik eksenini arası açı 10°) delinebilmesi,
- İşleme esnekliğinden ötürü otomasyona uygun olmasıdır.

Kısıtlar [8]

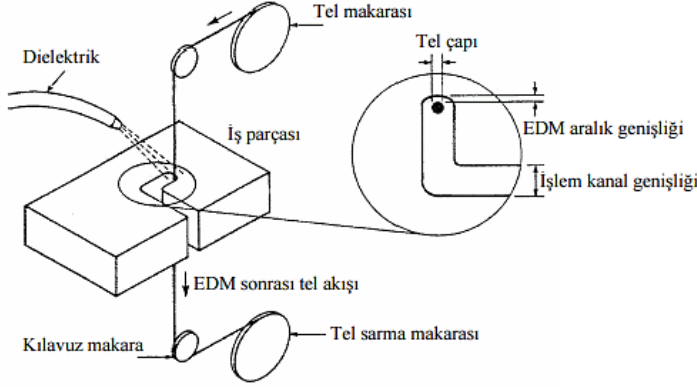
- Tezgâh ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması,
- İşlenmiş yüzeylerde koniklik oluşması,
- Kör delik delinmesinin zor olması,
- 50 mm üzeri kalınlıklı malzemelerin işlenmesinin zor olması,
- Lazer çıkışında oluşan çapak için ikincil bir operasyona ihtiyaç duyulması,
- Isıl etkilenmiş bölgenin oluşmasıdır.

5.3. Telli Elektro Erozyon ile İşleme

TEEİ, dalma tip Elektro Erozyonla İşlemede olduğu gibi elektrik enerjisinin, ısı enerjisine dönüştürülmesiyle işparçası üzerinden malzeme aşındırılması prensibi ile çalışan olan bir alışılmamış imalat yöntemidir [52]. TEEİ'nin işleme mekanizması, dalma tip Elektro Erozyonla İşlemeye benzemesine karşın fonksiyonel karakteristikleri farklıdır. Elektro erozyonla işlemede önceden hazırlanmış bir kalıp elektrot zorunluluk iken TEEİ'de sadece tel elektrot kullanılmaktadır. TEEİ'de dalma tip EEİ'nin aksine dielektrik sıvı olarak, hidrokarbon esaslı yağlar yerine su kullanılmakta ve su kullanımı ile daha hızlı işleme sağlanmaktadır. Yöntemde, özel bir makara sistemi ile sürekli ilerletilen tel elektrot bulunmaktadır. Elektrot malzemesi olarak bakır, pirinç veya tungsten yaygınlıkla tercih edilmektedir. İş parçası ile elektrot birbiri ile temas etmemekte olup, bu işleme boşluğunda dielektrik sıvı yer almaktadır (Şekil 5.7). İşparçası ve elektrot arasında uygun elektrik gerilimi sağlandığında devamlı elektrik boşalmaları oluşarak işparçasından ergime ve buharlaşma yoluyla talaş kaldırılmaktadır. Tel, makara sistemi ile belirli bir gerginlikte tutularak hem telin işparçasına teması hem de işleme hassasiyetinin olumsuz etkilenmesi önlenmektedir [8, 46].

TEEİ'de 100 mm kalınlıklı işparçasında 15° , 400 mm kalınlıklı işparçasında ise 30° 'ye kadar konik yüzeyler oluşturulabilmektedir. Tel ilerlemesi, tezgah tarafından bilgisayar kontrollü olmasından ötürü işparçası ile tel arası işleme boşluğu 0,025 mm ile 0,050 mm mesafe arasında kontrol edilebilmektedir. Böylelikle, hem yüzey kalitesinin artırılması hem de

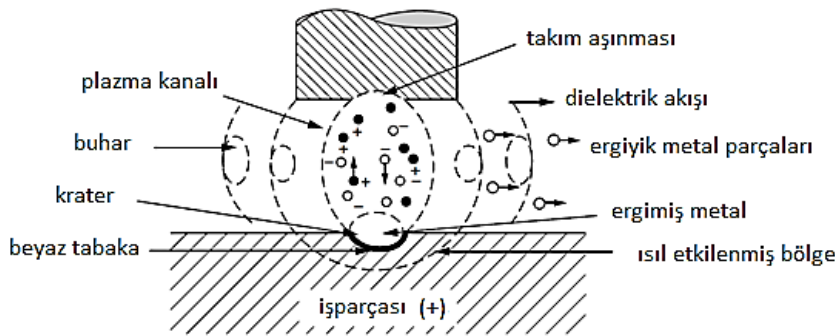
boyutsal tamlığı sağlamak amacıyla, aynı yüzeyden birden fazla pasoda talaş kaldırılabilmektedir [46].



Şekil 5.7. TEEİ işleme mekanizması gösterimi [53]

İşleme sırasında gerçekleşen boşalımların teorik sıcaklığı, anlık ve noktasal olarak 8 000 - 12 000°C'ye ulaşabilmektedir. Bu sıcaklığın etkisi ile işleme boşluğundaki yüzeylerde metalürjik değişimler gözlenmektedir. Ayrıca yüzeyde ince bir kalıntı tabaka oluşmaktadır. Kalınlığı 1 μm kalıntı tabaka, 5 μJ güç ile oluşmaktayken, kullanılan tezgahın jeneratör kabiliyetine göre 25 μm kalınlıklarda kalıntı tabaka görülebilmektedir [8].

EEİ'de işparçası, tel elektrot ve dielektrik sıvıdan oluşan üç bileşenin bulunduğu işleme boşluğuna gerilim uygulanması ile oluşan boşalım anı Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Elektro erozyon ile işlemede boşalım anı gösterimi [50]

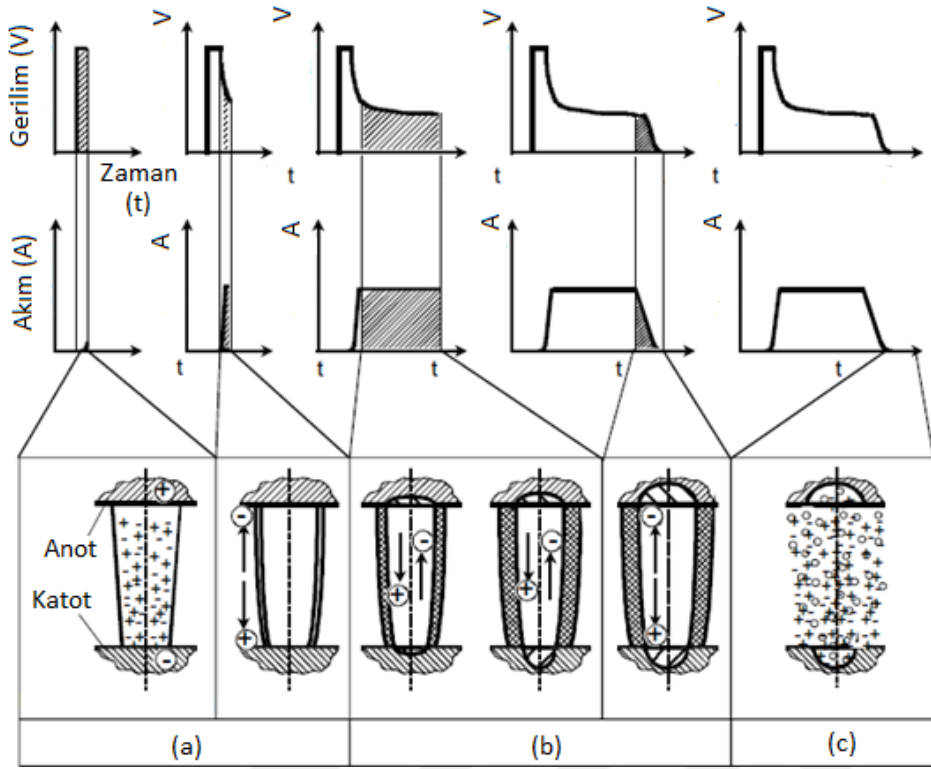
Dielektrik sıvının seçiminde, düşük viskozite, yüksek parlama sıcaklığı, iyi oksidasyon kararlılığı, kokusuz olması ve düşük maliyetli olması ve elektrik boşalmasına müsaade etmesi önemli kriterlerdir. Dielektrik sıvının görevleri:

- İşleme boşluğundan talaşın uzaklaştırılması,
- İşparçası ile elektrot arasında yalıtkan bir alan oluşturulması,
- Boşalımın yüksek enerjisinden dolayı ısınan işparçasının işleme bölgesinin soğutulmasıdır [8, 46].

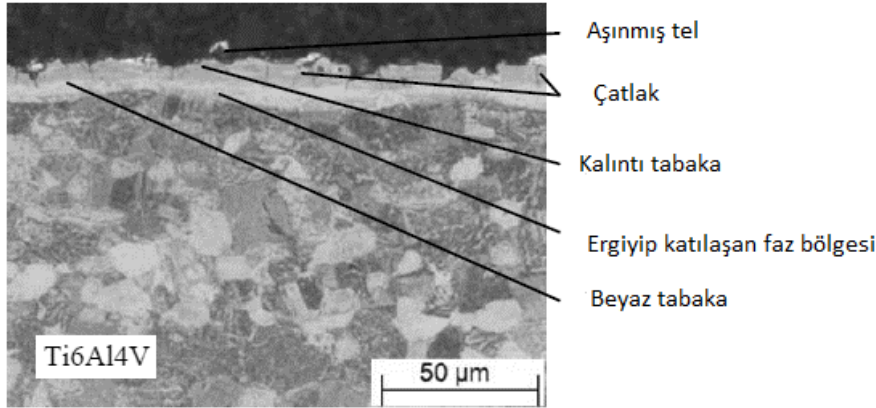
Başlangıçta işparçası ve elektrot yalıtılmış durumdadır. İşleme boşluğuna yüksek bir gerilim uygulandığında anot (işparçası) ve katot (tel) arasında bir elektrik alanı oluşur ve dielektrik sıvı içinde bulunan parçacıklar bir köprü oluşturmaya başlar. Bu parçacıkların yüksek elektromanyetik noktalarda yoğunlaşmasıyla oluşum fazı başlar ve sonucunda plazma kanalı oluşmaktadır (Şekil 5.9.a). Oluşum fazı sırasında uygulanan yüksek gerilim ile dielektrik sıvı bozunarak deiyonize olmaktadır. Bozunan dielektrik sıvı işleme boşluğunda uygulanan gerilimi düşürerek, akım seviyesini tezgâh akım değerine yükseltir. Plazma kanalı boyunca ısı ve kabarcıklar oluşmasıyla plazmanın genişlemesi önlenmektedir. Sabit akımın uygulandığı plazma kanalında, enerji genişleyemeden dar bir alanda yoğunlaşmaktadır. Enerji yoğunluklarının 3 J/mm^2 'ye kadar ulaşmasıyla plazma $8\ 000\text{-}12\ 000^\circ\text{C}$ sıcaklığa ve 3 kbar basınca yükselebilmektedir. Akım durdurulduğunda plazma kanalı hızla deiyonize hale gelmekte ve boşalım fazı gerçekleştirilmiş olmaktadır (Şekil 5.9.b). Boşalım sonrası (Şekil 5.9.c) plazma kanalında basınç ve sıcaklık hızlıca düşmektedir. Oluşan yüksek ısı ve basınç ile aşırı ısınmış ve ergimiş malzeme dielektrik sıvıda tekrar katılaşarak ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Bu döngü işleme sonuna kadar tekrar edilmektedir [54].

TEEİ ile işleme girdilerinin (parametre seti, işparçası, dielektrik sıvı) etkili olduğu elektrik boşalımlarının enerjisine bağlı olarak, işlenmiş yüzey ve alt katmanların metalürjik özellikleri değişmektedir. TEEİ'de standart kaba işlenmiş yüzey metalografik olarak incelendiğinde, çatlak, gözenek, kalıntı tabaka ve ergiyip katılaşan faz bölgesi ile tel parçacıkları gözlemlenebilmektedir (Resim 5.1).

TEEİ endüstride bilinen bir alışılmamış imal usulüdür. Uygulama alanları incelendiğinde, TEEİ'nin elektronik ve yarı iletken malzemelerin işlenmesinde, takım ve kalıp endüstrisinde yüksek sertlikteki ekstrüzyon kalıplarının imalatında, kalibrasyon blokları, kam mekanizmaları ve yüksek sertlikteki elektrotların üretiminde kullanıldığı görülmektedir [8, 46].



Şekil 5.9. EEİ yönteminin fiziksel prensibi [26]



Resim 5.1. TEEİ ile kaba işlenmiş yüzey kenarının optik mikroskop görüntüsü [9]

TEEİ yönteminin avantajları [8, 46, 53]:

- Kaviterler, ince cidarlı yapıların kolaylıkla üretilebilmesi,
- Karmaşık geometrilerin işlenmesi,
- İşlemede işparçasının sertliğinin göz ardı edilebilmesi,
- Çapak oluşumu gözlenmemesi,

- Tel çapının 0,05-0,30 mm gibi küçük çaplarda olmasından dolayı çok küçük yarıçaplı köşelerin elde edilebilmesi,
- Temassız bir yöntem olmasından dolayı işparçasında, işlemeden kaynaklı mekanik kuvvetlerin oluşmaması,
- Yüksek sertlik ve ısıl dayanıma sahip, elektrik iletken malzemelerin işlenebilmesi,
- Isıl işlem kaynaklı boyutsal değişimlerin giderilebilmesi,
- Yüksek hızlarda geleneksel imal usullerinde meydana gelebilen ayna ve işparçasının dönmesi ve keskin talaşların oluşması gibi sorunların ortaya çıkmaması nedeniyle güvenli işleme yöntemlerinden biri olmasıdır.

TEEİ yönteminin kısıtları [8, 46, 53]:

- Tel erozyon çok sayıda parametre tarafından kontrol edilen bir yöntemdir. Tel gerginliği, boşalım enerjisi, boşalım akımı, aralık voltajı, vurum ara süresi ve elektrot karakteristikleri işlemenin birer fonksiyonudur. Bu parametrelerden herhangi biri veya birkaçının bağımsız bir şekilde değiştirilmesi işlemeyi beklenen performansın elde edilememesi ile sonuçlanabilmektedir. İşlemenin bu karmaşık doğası sebebiyle optimum parametrelerin tayininin zorluk taşıması,
- Yöntem doğası gereği bir çok parametre tarafından kontrol edilmesinden ötürü tezgahın kalifiye personel tarafından kullanılma gereksinimi,
- Geleneksel tezgahlara kıyasla daha düşük işleme hızına sahip olması,
- Yalıtkan malzemelerin işlenememesi,
- Yöntemin doğası gereği telin sürekli beslenmesi gerektiğinden kör delik ve çok büyük parçaların işlenememesidir.



6. BİLYALI DÖVME

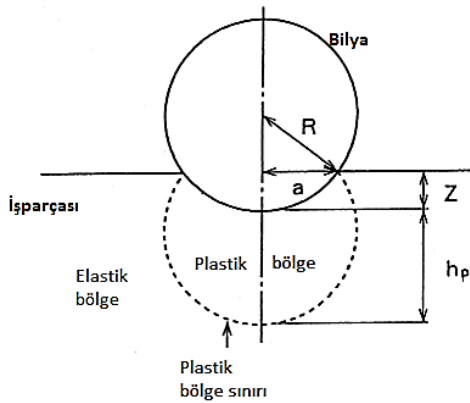
BD'nin özellikle havacılık ve uzay sanayi ile otomotiv sektöründe kullanımı diğer sektörlerle kıyasla daha yaygındır. Günümüzde birçok yüzey iyileştirme yöntemi kullanılmaktadır. Su jeti ile dövme, yağlı dövme ve lazerli dövme yüzey iyileştirmesinde yeni kullanılmaya başlanan ikincil işlemlerdir. BD, işparçası yüzeyinde kalıntı bası gerilmesi oluşturulmasıyla, yorulma performansının iyileştirildiği ikincil işleme yöntemidir. BD'nin temel amacı, işparçasının yüzeyinde ve yüzeyin hemen altında kalıntı bası gerilmesi oluşturularak, yorulma ömrünün artırılması, aşınma ve stres korozyonuna bağlı çatlak oluşumunun önüne geçilmesidir [55-57]. Yöntemin uygulanması sonrasında, malzemenin yüzeyinde çukurlar oluşmakta, yüzey ve altında ise radyal olarak plastik deformasyon ile pekleşmiş kalıntı gerilme katmanı uzanmaktadır. Böylelikle, yorulma çatlak oluşumu geciktirilmekte, yorulma çatlak ilerlemesi ise yavaşlatılmaktadır [56]. Yüksek hızlı bilyalar, yüzeyde dairesel çukurlar oluşturarak yüzey ve altında sertleşme, kristal yapıda kırılma ve bozulmalar meydana getirmektedir. BD, işparçalarının yüzey tamlığında kalıntı gerilmeleri, mikro yapıyı ve yüzey topografyasını etkilemektedir. Yüzey sertliği ve kalıntı bası gerilmesinin artışı, yorulma ömrünü artırırken yüzey pürüzlülüğünün artışı ise yorulma ömrünü kısaltmaktadır [55].

BD'yi en iyi tanımlayabilecek işlem parametreleri, bilya türü ve boyutu, dövme açısı, yoğunluk, doyguluk, yüzey kapama oranı ve bilya hızıdır. Bu parametrelerden, bilya türü ve boyutu ile dövme açısı doğrudan değiştirilebilir parametrelerdir. Kullanılan tezgaha göre hava iletim borusu çapı, hava basıncı, bilya akış hızı, nozul tipi, nozul ilerleme hızı, nozul-ışparçası mesafesi parametreleri farklılık gösterebilmektedir. Tüm bu parametrelerin bir arada uygulanmasıyla, BD işleminin yoğunluk, doyguluk ve yüzey kaplama oranı kontrol edilmektedir. Yüzeye, yüksek kinetik enerjiyle bombardıman edilen bilyalar, çekiçleme etkisi ile plastik deformasyona neden olmaktadır. İşleme parametrelerinden, bilya boyutu, bilya sertliği, bilya hızı, uygulama açısı ve yüzey kaplama oranı Almen yoğunluğunu belirlemektedir [56, 58].

Yöntemde cam, seramik, dökme demir, dökme çelik veya paslanmaz çelik telden kesilme sonrası küresel forma dönüştürülen bilyalar kullanılmaktadır. Dökme demir bilyaların üretimi daha düşük ergime sıcaklığına sahip olmasından dolayı ucuzdur. Çelik telden

kesilmiş bilyaların mekanik olarak küresel formda üretilmesinden dolayı dökme demir veya dökme çelik bilyalardan daha hassas boyut dağılımına sahiptirler. Cam bilyalar başlangıçta en iyi yüzey bitirme sonuçlarını vermekte ancak kırılğan yapıları sebebiyle işlem sonunda yüzeye batmış kırık cam parçacıkları gözlenmektedir. Seramik bilyalar ise üretim zorluğuna karşın yüksek dayanıma sahiptirler [55-57].

Tek bir bilyanın yüzeyi dövme durumu incelendiğinde, BD sonrası yüzeyin alt bölgelerinde plastik deforme olmuş bölge, elastik bölge tarafından çevrelenmektedir (Şekil 6.1). Tüm yüzeyin BD'ye tabi tutulması ile işparçasının yüzeyi ve altında, bant şeklinde uzanan kalıntı bası gerilmesi katmanı oluşmaktadır. Bu katmanın oluşturulmasında, tezgaha bağlı ve bağlı olmayan parametreler etkili olmakla beraber işparçasının kalınlığı da önem kazanmaktadır [56, 57, 59].



Şekil 6.1. BD'de tek bir bilyanın işparçası yüzeyine etkisinin şematik gösterimi [59]

Bilya hızı, BD'de önemli parametrelerden biridir. Bilya hızı yüzeye aktarılan enerji yoğunluğunu etkilemektedir. Enerji yoğunluğu, işparçası yüzeyine bilyanın kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşerek oluşturduğu gerinim ile ölçülmektedir. Bilya hızı yükseldikçe dövme şiddeti de artmaktadır. Bilya hızı proses sırasında güvenilir bir şekilde ölçülememekte, hava basıncı ile kontrol edilmektedir [39, 43].

Yoğunluk ölçümü standart Almen plakaları ile yapılmaktadır. Yoğunluk, proses parametrelerinin bütünleşik olarak üretmiş olduğu kinetik enerjinin, Almen plakalarına aktarılan enerji sonucu meydana gelen sehimin sayısal bir ifadesidir. Almen plakaları, SAE 1070 çeliğinden, standart boyutlarda üretilmektedir. Plakalar üç farklı kalınlıkta üretilmekte ve A, C ve N olmak üzere kalınlık değerlerine göre kodlanmaktadır (Çizelge 6.1). Her bir

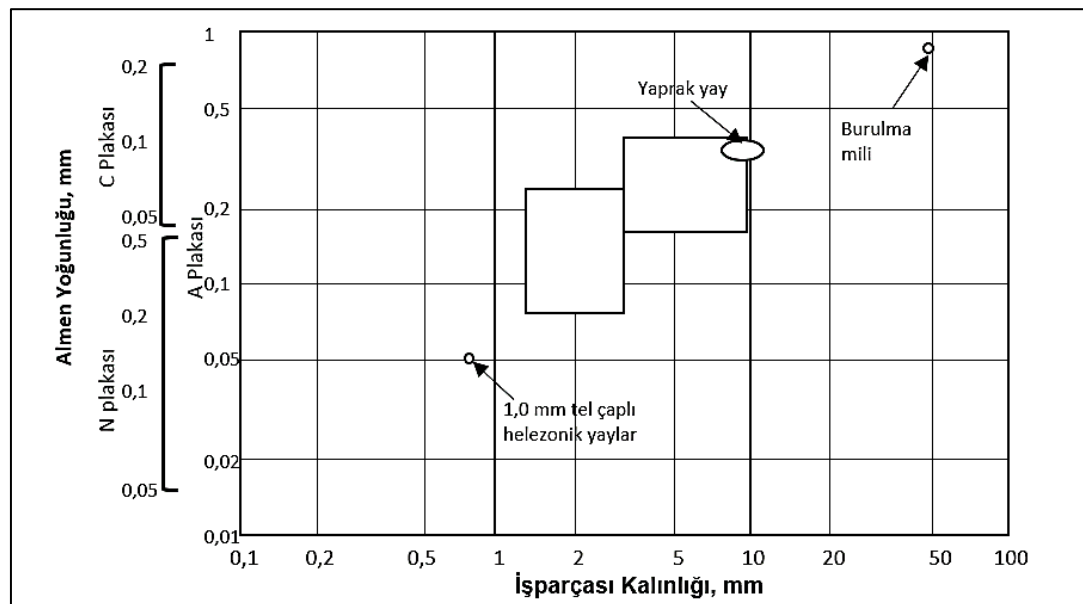
ölçümde bir Almen plakası, işparçasının BD uygulanması öncesinde belirlenmiş parametreler ile deneme işlemesine tabi tutularak yoğunluk tespiti yapılmaktadır [39, 43].

Çizelge 6.1. Standart Almen Plakaları türü ve boyutları

Almen plakası tipi	Düzlemsellik	Sertlik	Kalınlık
C	+/- 0,038 mm	40-50 HRC	2,39 mm
A	+/- 0,025 mm	44-50 HRC	1,29 mm
N	+/- 0,013 mm	45-48 HRC	0,76 mm

BD parametrelerinden yüzey kaplama oranı, yüzey altında oluşturulan kalıntı bası gerilme tabakasının homojen biçimde oluşturulması ve yüzey altında meydana gelen dislokasyon yoğunluğunun maksimum seviyede elde edilmesi açısından önem taşımaktadır. Titanyum alaşımları için % 100'ün üzerindeki kaplama oranlarının yorulma ömrünü olumsuz etkilediği bilinmektedir [39, 43]. Kullanılan parametrelerin enerji yoğunluğunun beklenenin üzerinde olması durumunda yöntemin doğal sonucu olarak beklenen yorulma ömründe iyileştirme sağlanamayıp yorulma ömrünü kısalttığı da bilinmektedir [55].

Yukarıda anılan nedenlerden dolayı BD yoğunluğunun tayininde işparçasının kalınlığı doğrultusunda minimum bilya boyutu ve minimum uygulama süresi hedeflenmektedir. Şekil 6.2'deki grafikte, işparçası kalınlığına göre seçimi yapılabilecek Almen plaka türü ve yoğunluk değerleri gösterilmektedir [43].



Şekil 6.2. İşparçası kalınlığına göre Almen plakası ve Almen yoğunluğu grafiği [43]



7. DENEYSEL ÇALIŞMA

7.1. Malzeme

Ti6Al4V alaşımının yüksek nitelikli malzeme özellikleri, tez çalışmasında alaşımın seçilmesinde tercih sebebi olmuştur. Ti6Al4V'ün kimyasal özellikleri Çizelge 7.1'de ve malzeme özellikleri ve Çizelge 7.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %) [39]

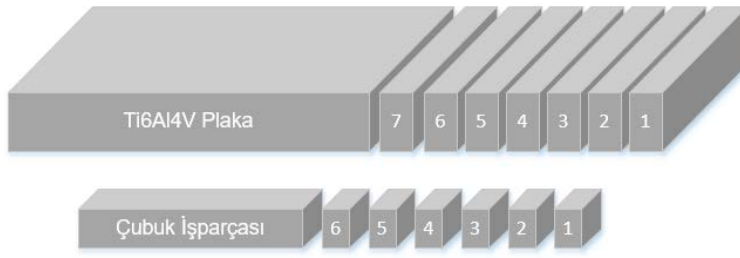
Ti	89,464	O	0,18
Al	6,08	C	0,02
V	4,02	N	0,01
Fe	0,22	H	0,0053

Çizelge 7.2. Ti6Al4V alaşımının malzeme özellikleri [39]

Yoğunluk	4,43 g/cm ³
Elastik modül	113,8 GPa
Akma gerilimi	880 MPa
Yorulma gerilmesi	240 MPa
Yorulma gerilmesi (çentiksiz)	510 MPa
Isıl iletkenlik	6,7 W/m·K
Elektrik iletkenliği	0,000178 $\Omega \cdot \text{cm}$
Ergime sıcaklığı	1604 - 1660 °C
β fazı dönüşüm sıcaklığı	980 °C
Sertlik	HV 349

7.2. İşparçalarının Hazırlanması

Çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşımından işparçaları, 10x200x6 mm dikdörtgen kesitli çubuklardan 10x6x6 mm boyutlarında frezeleme yöntemi ile kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 7.1). İşparçalarının hazırlanmasında 3 farklı alışılmamış imal usulü ile iki farklı parametre seti kullanılmıştır. Kullanılan alışılmamış imal usulleri ASJİ, LIİ ve TEEİ yöntemleridir. Her bir işleme parametresinde 6'şar işparçası kesildikten sonra bunlardan 3 tanesine BD uygulanmıştır. Toplamda 42 adet işparçası hazırlanmıştır. Alışılmamış imal usulleri ile kesilmiş yüzeylerin yüzey tamlığı incelemeleri sonuçlarının kıyaslanması amacıyla frezeleme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 7.1. Hazırlanan çubuk işparçası ve kesilmiş işparçalarının şematik görünümü

Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere Ti6Al4V alaşımının kesiminde LIİ ve TEEİ yöntemlerinin kullanımının kısıtlı olduğu görülmektedir. ASJİ yönteminin ise LIİ ve TEEİ'ye kıyasla daha fazla kullanım alanı bulmasına karşın, havacılık ve uzay sanayisindeki standartların sınırlayıcılığı nedeniyle, geleneksel imal usullerinin kullanımını maliyet unsurlarına rağmen tercih edilmesi sonucunu doğurmaktadır.

7.2.1. Frezeleme

Çizelge 7.3'te diğer işlemlere referans olacak frezeleme parametreleri gösterilmiştir. Ti6Al4V için en iyi işleme parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. TAI (Ankara/Türkiye) altyapısında bulunan Cincinnati marka universal freze tezgahı kullanılmıştır.

Çizelge 7.3. Frezeleme yönteminde kullanılan işleme parametreleri

FREZELEME	
İlerleme hızı	56 mm/d
Kesme derinliği	1.5 mm
Takım değerleri	D= 125 mm; z=8

7.2.2. Aşındırıcılı su jeti ile işleme

Çizelge 7.4'te ASJİ yöntemi ile işparçalarının kesiminde kullanılan parametre setleri gösterilmektedir. Çalışmada TUSAŞ (Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş) altyapısında bulunan TCI Cutting Water Jet and Laser Systems firmasının üç eksenli SM-M 4020 model ASJİ tezgahı kullanılmıştır. Aşındırıcı Su Jeti ile İşleme Parametre 1 (ASJİ_P1) ve Aşındırıcı Su Jeti ile İşleme Parametre 2 (ASJİ_P2) setleri arasında sadece ilerleme hızında farklılık bulunmaktadır. Ayrıca işleme sırasında çekilen bir fotoğraf Resim 7.1 ile gösterilmiştir.

Çizelge 7.4. ASJİ yönteminde kullanılan kesme parametreleri

ASJİ		
	ASJİ_P1	ASJİ_P2
Nozul çıkış çapı	1 mm	1 mm
Su basıncı	4 000 bar	4 000 bar
İlerleme hızı	30 mm/d	15 mm/d
Aşındırıcı boyutu ve türü	80 meş-garnet	80 meş-garnet
Nozul işparçası arası mesafesi	1,5 mm	1,5 mm
Aşındırıcı debisi	450 g/d	450 g/d



Resim 7.1. ASJİ ile Ti6Al4V çubuklarının kesimi sırasında çekilmiş bir fotoğraf

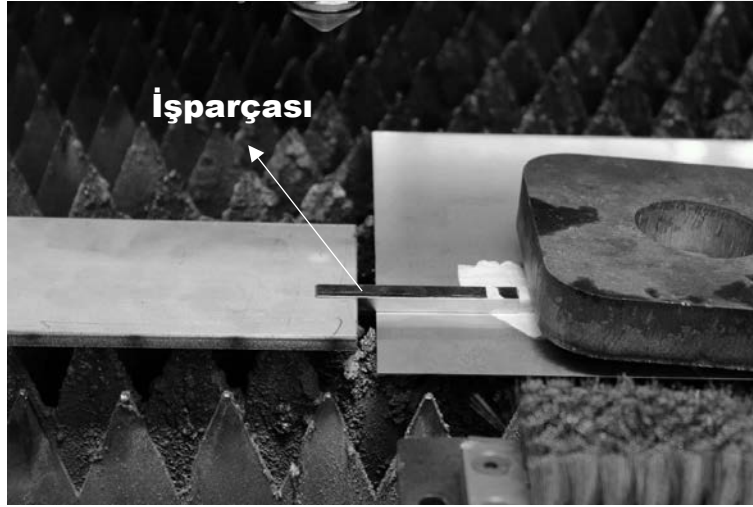
7.2.3. Lazer ışınıyla işleme

Çizelge 7.5'te Lİİ yöntemi ile Ti6Al4V çubuklarının kesiminde kullanılan parametre setleri gösterilmektedir. İki farklı parametre set kullanılmıştır. Lazer Işınıyla İşleme azot (Lİİ_N2) ve Lazer Işınıyla İşleme argon (Lİİ_AR) parametre setlerinde kullanılan yardımcı gaz farklıdır. Saf azot ve saf argon gazları ile kesimler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan lazer kesim tezgahı ERMAKSAN (Bursa/Türkiye) firması altyapısında bulunan FİBERMAK Momentum Gen-3 tezgahıdır. Ayrıca firmada kendi üretimleri olan bu tezgâh Ti6Al4V

alaşımının kesiminde ilk defa kullanılmıştır. İşleme sırasında çekilen bir fotoğraf Resim 7.2 ile gösterilmektedir.

Çizelge 7.5. LIİ yönteminde kullanılan kesme parametreleri

LIİ		
	LIİ_N2	LIİ_AR
Lazer türü	Nd:YAG	Nd:YAG
Lazer gücü	4 000 W	4 000 W
Nozul-işparçası mesafesi	1 mm	1 mm
İlerleme hızı	2900 mm/min	2900 mm/min
Yardımcı gaz	N ₂ (% 99,99)	Ar (% 99,995)
Yardımcı gaz basıncı	24 bar	24 bar
Lens çapı	150 mm	150 mm
Nozul çapı	3,5 mm	3,5 mm
Odak mesafesi	-4,5 mm	-4,5 mm



Resim 7.2. LIİ ile Ti6Al4V alaşımından çubuk malzemenin kesiminden bir fotoğraf

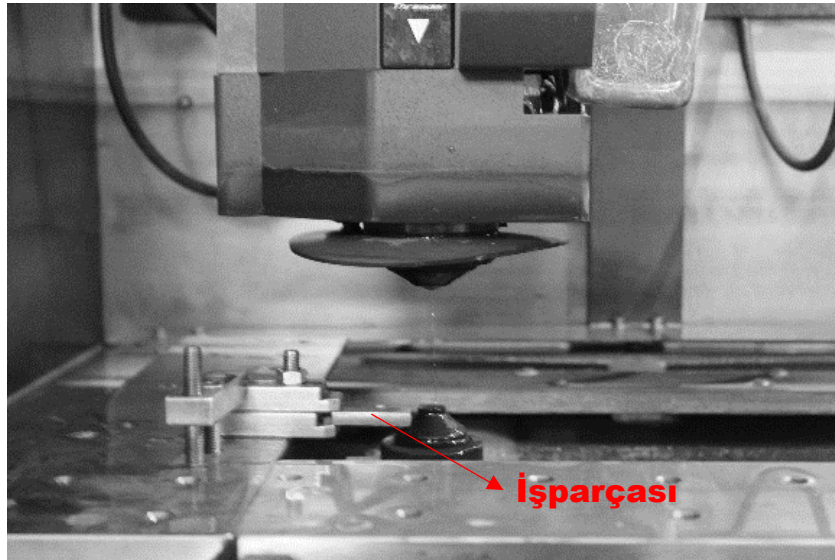
7.2.4. Telli elektro erozyon ile işleme

Çizelge 7.6'da, TEEİ yöntemi ile Ti6Al4V çubuklarının kesiminde kullanılan parametre setleri gösterilmektedir. İki farklı parametre seti, kaba ve hassas kesim sonucu verecek şekilde seçilmiştir. Telli Elektro Erozyon 1 paso (TEEİ_1P) ve Telli Elektro Erozyon 1 paso (TEEİ_5P) parametre setleriyle farklı pasolarda işleme gerçekleştirilmiştir. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü İmalat Laboratuvarından, Torna Uygulama Laboratuvarında yer alan MITSUBISHI MV1200S model CNC TEEİ

tezgahı kullanılmıştır. Ayrıca işleme sırasında çekilen bir fotoğraf Resim 7.3'te gösterilmektedir.

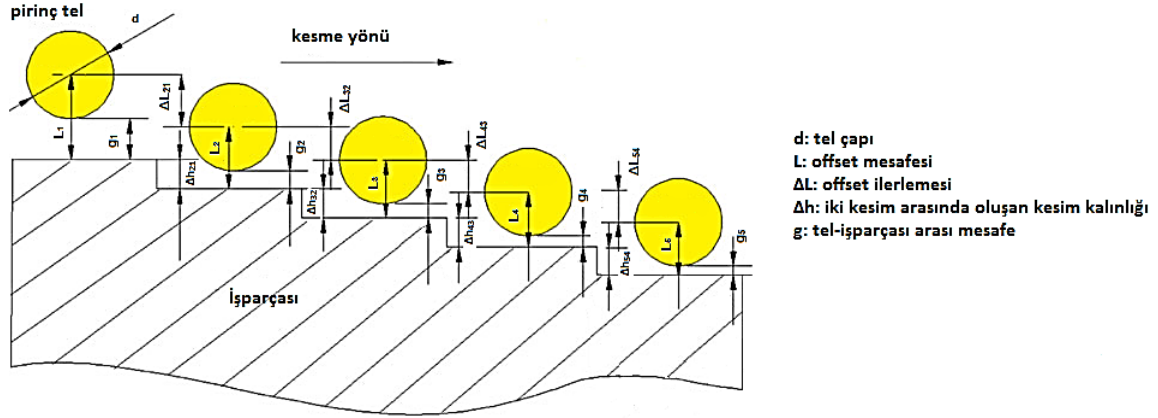
Çizelge 7.6. TEEİ yönteminde kullanılan kesme parametreleri

TEEİ						
	TEEİ_1P	TEEİ_5P				
	Tek Paso	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5
Açık devre gerilimi (V)	4	4	8	10	12	14
Kesme akımı (A)	12	12	7	2,5	2	2
Vurum ara süresi (µs)	1	1	1	10	6	1
İşleme aralığı gerilimi (V)	70	70	110	105	100	90
Tel hızı (m/d)	9	9	12	10	10	10
Tel gerginliği (kg)	10	10	13	13	13	13
İlerleme hızı (mm/d)	6	6	5	8	8	7
Ofset ilerlemesi (µm)	--	--	55	12	6	3



Resim 7.3. TEEİ ile Ti6Al4V alaşımından çubuk malzemenin kesiminden bir fotoğraf

TEEİ_5P parametre setinde, TEEİ_1P ile kesilmiş yüzeye ilaveten ofset ilerlemesi miktarının değişimi ile 4 paso kesim olmak üzere toplamda 5 paso kesim yapılmıştır. Ofset ilerlemesinin şematik gösterimi Şekil 7.2 ile sunulmuştur.



Şekil 7.2. TEEİ ile çoklu paso ile işlemenin şematik gösterimi

7.2.5. Bilyalı dövme

Çalışmada, kesilmiş yüzeyler BD ile ikincil işleme tabi tutulmuştur. BD yöntemi yüzeyde kalıntı bası gerilmesi oluşturulmasında kullanılan önemli bir yöntemdir. Kullanılan parametreler Çizelge 7.7’de gösterilmektedir. Bu işlem için TUSAŞ altyapısında hâlihazırda kullanılan Schlick marka BD tezgâhı kullanılmıştır. Firmada ilk defa Ti6AL4V işparçalarına BD uygulanması gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.7. BD uygulama parametreleri

BD	
Nozul sayısı	4
Bilya çapı	0,60 mm
Almen yoğunluğu	0,216 mm
Yüzey kaplama oranı	% 100
Hava basıncı	2300 bar
Bilya akış oranı	7 000 gr/d
Nozul ilerleme hızı	270 mm/d
Nozul tipi	venturi
Nozul-işparçası mesafesi	65 cm
Bilya uygulama açısı	45°
BD süresi	18x5=90 d

Tez çalışmasında kullanılan Ti6Al4V işparçaları için en yaygın kullanılan A tipi Almen plakası ve Almen yoğunluğu 0,22 mm'yi sağlayacak proses parametreleri seçilmiştir (Şekil 6.2) [43].

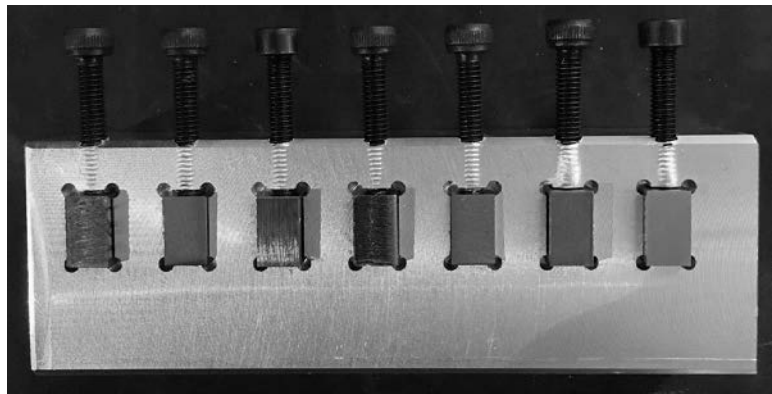
Standart Almen plakası özellikleri Çizelge 7.8'de, kullanılan bilya özellikleri ise Çizelge 7.9'da gösterilmektedir. İşlemin tek seferde gerçekleşmesi amacıyla tüm numunelerin yerleştirildiği tutucu bir kalıp hazırlanmıştır. Tutucu kalıba yerleştirilmiş işparçaları Resim 7.4'te, işleme ait bir fotoğraf ise Resim 7.5'te görülmektedir.

Çizelge 7.8. Almen plakası özellikleri

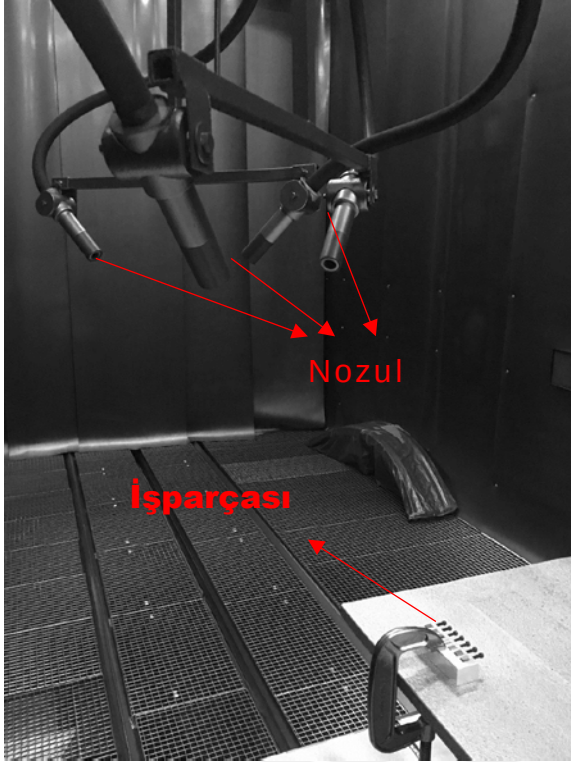
Almen Plakası		
Plaka malzemesi	SAE 1070 yay çeliği	
Malzeme kompozisyonu (ağırlıkça %)	C: 73, Mn: 0,65, P: 0,011, S: 0,002, Si: 0,18	
Plaka boyutları ve sınıfı	L=76, W=19,957, T=1,288	A TİPİ

Çizelge 7.9. Bilya özellikleri

Bilya	
Malzeme türü	S230 çelik bilya
Bilya çapı	0,60 mm
Kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %)	maks.0,8-1,2 C; 0,05 S; 0,05 P
Mikro yapısı	Martenzit
Sertlik	HV 474 (HV 450-535)



Resim 7.4. İşparçalarına BD uygulanabilmesi için hazırlanan bağlama kalıbı



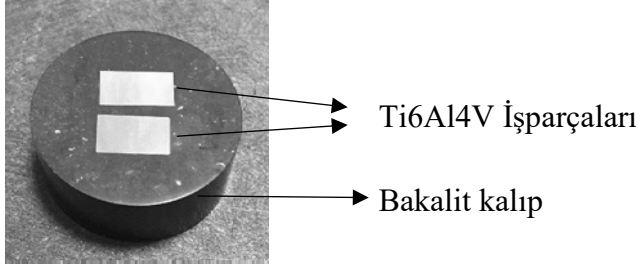
Resim 7.5. BD işleminden bir fotoğraf

7.3. Ölçümler

Metalografik inceleme için işparçaları bakalit kalıplama, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden geçmiştir. Ana işleme ve işleme sonrası ikincil işleme tabi tutulmuş işparçalarının, yüzey kenarından mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca kesim kenarının mikro fotoğrafları optik mikroskop ile farklı büyütmelerde (50X, 100X, 500X) çekilmiştir. İşleme yüzeylerinden ise ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümü ve SEM ile mikro fotoğrafları çekilmiştir. EDS ile sadece birincil işlenmiş yüzeylerin element analizi yapılmıştır.

7.3.1. Metalografik hazırlık

İşlenmiş yüzey kesitine dik kesme yüzeyi, bakalit kalıbın incelenebilir üst yüzeyine gelecek şekilde yerleştirilerek, bakalit tozunun makine haznesine yerleştirilmesi sonrası 180°C’de 3 dakika ısıtma ve 3 dakika soğutma ile kalıplanan işparçaları, metalografik incelemeye hazır hale getirilmiştir (Resim 7.6). Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Toz Metalürjisi Laboratuvarında bulunan Streuers marka bakalit kalıplama cihazı kullanılmıştır.

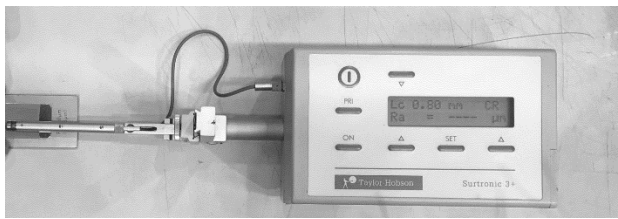


Resim 7.6. Bakalit kalıplanmış işparçası

Struers marka parlatma cihazında numuneler sırayla 240, 400, 600, 800, 1 000, 1 200, 2 400 numaralı zımpara ile her birinde 5'er dakika zımparalanmıştır. Zımparalama sırasında yüzeyin parlaması için Dia Pro elmas solüsyon kullanılmıştır. Dağlama işlemi numunelerin % 10 nitrik asit (HNO_3), % 2 hidroflorik asit (HF), % 88 saf sudan (H_2O) oluşan kimyasal bir çözelti içerisinde 80 s bekletilmesi ile gerçekleştirilmiştir

7.3.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için her bir işparçasının işlenmiş yüzeyinden, işleme yönünde 3 ölçüm, işleme yönüne dik doğrultuda 3 ölçüm olmak üzere toplamda 6 ölçüm alınarak ortalaması alınmıştır. Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Takım Tezgaahları Laboratuvarında bulunan Taylor Hubson Surtronic 3+ markalı profilometre kullanılmıştır (Resim 7.7).



Resim 7.7. Taylor Hubson Surtronic 3+ markalı profilometre

7.3.3. Mikro sertlik ölçümü

Mikro sertlik ölçümleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Toz Metalürjisi Laboratuvarında bulunan HIGHWOOD HWMMT-X3 manuel mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır (Resim 7.8). Ölçümler, kesilmiş yüzeye dik kesme kenarının 10 μm altından başlanarak, 25 g yükün 15 s uygulamasıyla

oluşturulmuştur. Yüzeyin 10 µm altından ölçümler başlatılmıştır. Ardışık iki mikro sertlik izi arası mesafe 15 µm olup toplam iz mesafesi 595 µm'dir.



Resim 7.8. Mikro sertlik ölçüm cihazı

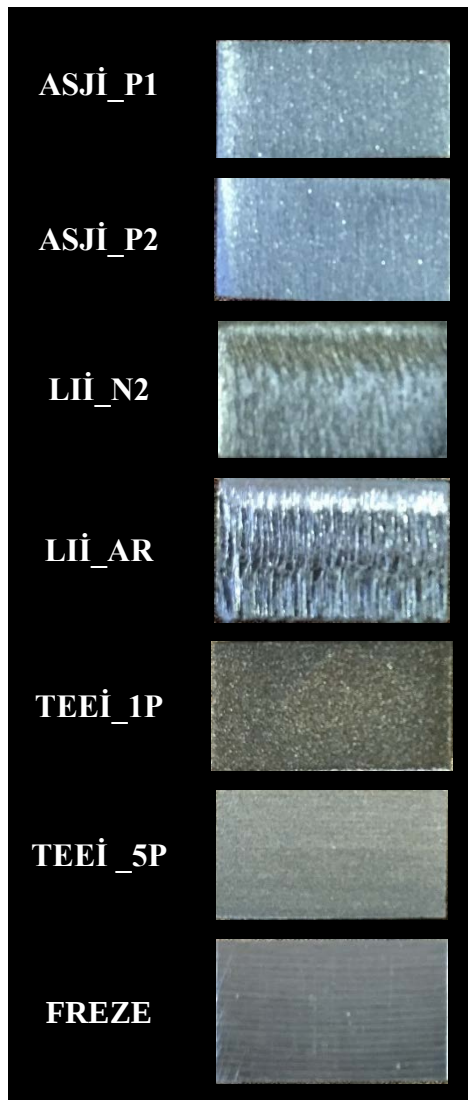
7.3.4. Mikro yapı incelemesi

Optik mikroskop fotoğrafları 50X, 100X ve 500X büyötmelerde elde edilmiştir. Optik mikroskop ile çalışma öncesi işparçaları mikro yapının görüntölenebilmesi için dağlamaya tabi tutulmuştur.. Kullanılan optik mikroskop Gazi Üniversitesi Mühendislik Faköltesi Makine Mühendisliğı Bölümü Toz Metalürjisi Laboratuvarında bulunan LEICA marka DMI5000M modelidir. EDS ve SEM incelemeleri için ERMAKSAN firmasının OPTOELEKTRONİK Ar-Ge laboratuvarı altyapısında bulunan, sırasıyla TEAM EDS Analysis System ve FEI Nova NanoSEM 450 cihazları kullanılmıştır.

8. DENEY SONUÇLARI

8.1. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

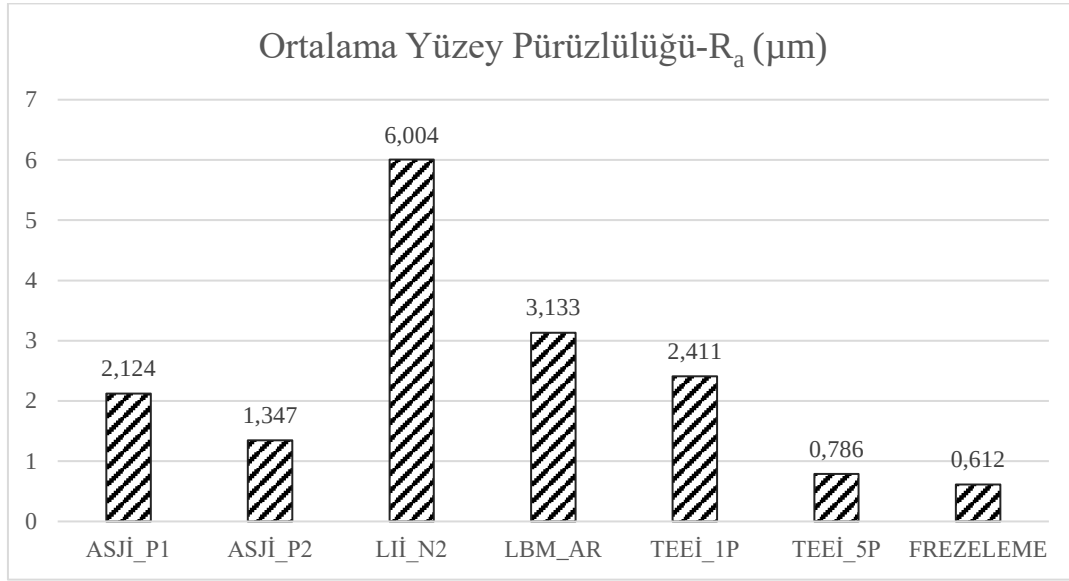
ASJİ, Lİİ, TEEİ ve frezeleme yöntemleri kullanılarak işparçaları kesilmiştir. Her bir alışılmamış imal usulü ile iki farklı parametre ve tek farklı freze parametresi ile işleme yüzeyleri elde edilmiştir. Elde edilen yedi kesim yüzeyi fotoğraflanarak Resim 8.1’de sunulmuştur.



Resim 8.1. Ana işleme sonrası yüzeyler

Kesilmiş yüzeylerden ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları Şekil 8.1’de bir grafik ile gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, ortalama yüzey pürüzlülükleri sırasıyla en düşükten

en yükseğe frezeleme, TEEİ_5P, ASJİ_P2, ASJİ_P1, TEEİ_1P, LIİ_AR, LIİ_N2 işparçalarından ölçülmüş olduğu görülmektedir. Frezeleme yöntemi sonuçlar arasında kıyaslama yapılabilmesi amacıyla seçilmiştir. Frezelemeden sonraki en iyi yüzey pürüzlülüğü beş paso işlemenin yapıldığı TEEİ_5P işparçalarında görülmüştür. En kötü ortalama yüzey pürüzlülüğü ise azot gazının yardımcı gaz olarak kullanıldığı LIİ_N2 işparçalarından ölçülmüştür.



Şekil 8.1. Birincil işlem sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği

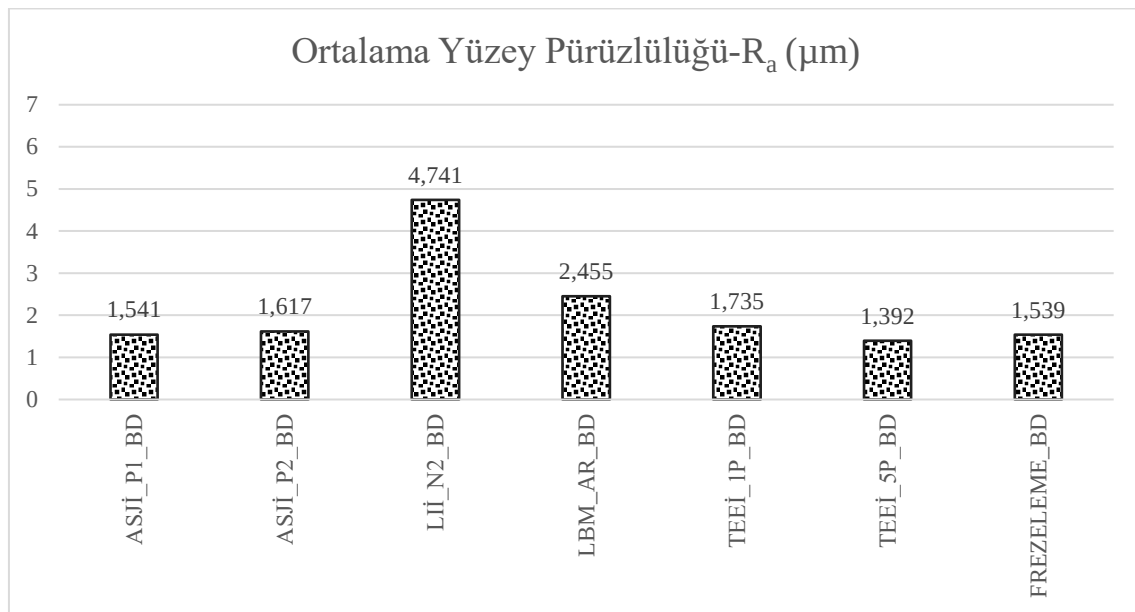
ASJİ yöntemi ile kesilmiş yüzeylerden, ASJİ_P1 işparçalarında, ASJİ_P2 işparçalarına kıyasla daha yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü elde edildiği görülmektedir. ASJİ_P2 işparçalarında, ASJİ_P1 işparçalarına göre işleme sırasında kullanılan ilerleme hızının daha düşük olduğu Çizelge 7.4'te görülmektedir. Anlaşılacağı üzere, ASJİ yönteminde göreceli olarak daha yavaş olan kesme ilerlemesi hızı ile yüzeyin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri % 36 oranında daha iyi elde edilmiştir. Ayrıca kesilmiş yüzeylerin gözle muayenesi yapıldığında hızlı kesim parametreleri ile kesilen yüzeylerde yüzey bozuklukları daha belirgin biçimde görülebilmektedir (Resim 8.1).

LIİ ile kesimde yardımcı gaz olarak kullanılan azot ve argon gazlarının kesim yüzeylerine farklı etkilerin olduğu görülmektedir. Azot gazı LIİ_N2 işparçalarının yüzeyinde sarı renklenme oluştururken, argon gazının LIİ_AR işparçalarının yüzeyinde renk değişimine yol açmadığı görülmüştür (Resim 8.1). Yüzeyde meydana gelen bu sararmanın, ergiyen metalin azot ile TiN çökeltisi [3] oluşturması ile olduğu düşünülmektedir. Bu durumun mikro sertlik

sonuçlarına da yansıdığı ilerleyen bölümlerde gösterilecektir. LIİ_AR işparçalarında ise ortalama yüzey pürüzlülüğü hemen hemen LIİ_N2 işparçalarının % 50'si civarındadır. LIİ ile kesimi yapılan iki işparçası arasında meydana gelen bu farklılığın kullanılan yardımcı gazın etkisi nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

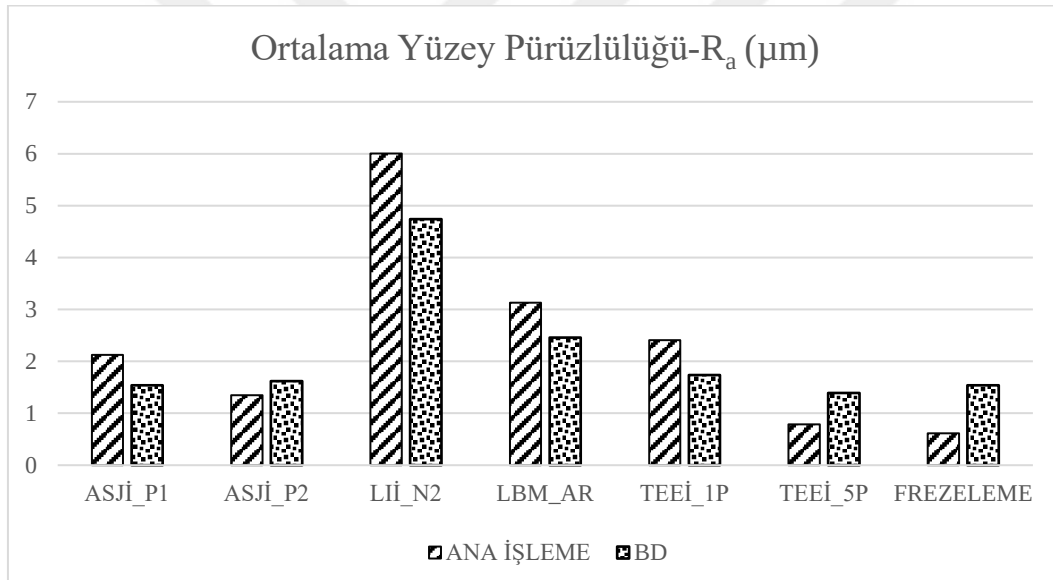
TEEİ yönteminde tek ve beş paso olmak üzere işparçaları kesilerek iki farklı işlenmiş yüzey elde edilmiştir. TEEİ'de çoklu pasonun etkisi yüzey pürüzlülüğünde önemli bir farklılık oluşturarak tek paso işlemeye kıyasla 3 kat daha iyi sonuç vermiştir. TEEİ_5P işparçalarından ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ise hemen hemen frezeleme ile işlenmiş işparçasının yüzey pürüzlülüğü ile yaklaşık değerlerde olduğu görülmektedir. Gözle muayenede TEEİ işparçalarında sarı-mavi renkli yüzey oluşumu gözlenmektedir. TEEİ_1P işparçalarında daha fazla, TEEİ_5P işparçalarında daha az renk değişimi görülmüştür. Renk değişiminin işleme kanalında meydana gelen oksitlenmenin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. TEEİ yönteminde işleme yüzeyinde oksitlenme genellikle görülebilen bir durumdur [61].

Şekil 8.2'de ikincil işlem olarak BD uygulanmış yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği görülmektedir. BD sonrası en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğü TEEİ_5P işparçalarında elde edilmiştir. En iyi yüzey pürüzlülüğü sonucu ise TEEİ_5P işparçalarında ölçülmüştür.



Şekil 8.2. İkincil işleme sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği

BD'nin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin, karşılaştırmalı olarak incelendiği grafik Şekil 8.3'te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde BD'nin bazı işparçalarının yüzey pürüzlülüğünde iyileştirme etkisi gösterdiği, bazılarında ise yüzey pürüzlülüğünü artırdığı görülmektedir. ASJİ_P1, LIİ_N2, LIİ_AR, TEEİ_1P işparçalarının ortalama yüzey pürüzlülüğünde düşüş gerçekleşirken, diğer 3 işparçasında yüzey pürüzlülüğünde artış gerçekleşmiştir. Artış gösteren işparçaları (ASJİ_P2, TEEİ_5P, frezeleme) incelendiğinde bu üç işparçasının yüzey pürüzlülükleri $1,35 \mu\text{m}$ 'nin altında olduğu görülmektedir. BD sonrası bu üç işparçası yüzeyinde yaklaşık $1,5 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülükleri görülmektedir. Bu üç işparçasında da elde edilen değerlerle BD sonrası elde edilen değerlerden daha düşük olduğundan artış söz konusu olmuştur. Ayrıca BD sonrası, kullanılan işleme yöntemine bağlı karakteristik yüzey özellikleri genelde kaybolmuştur (Resim 8.2).

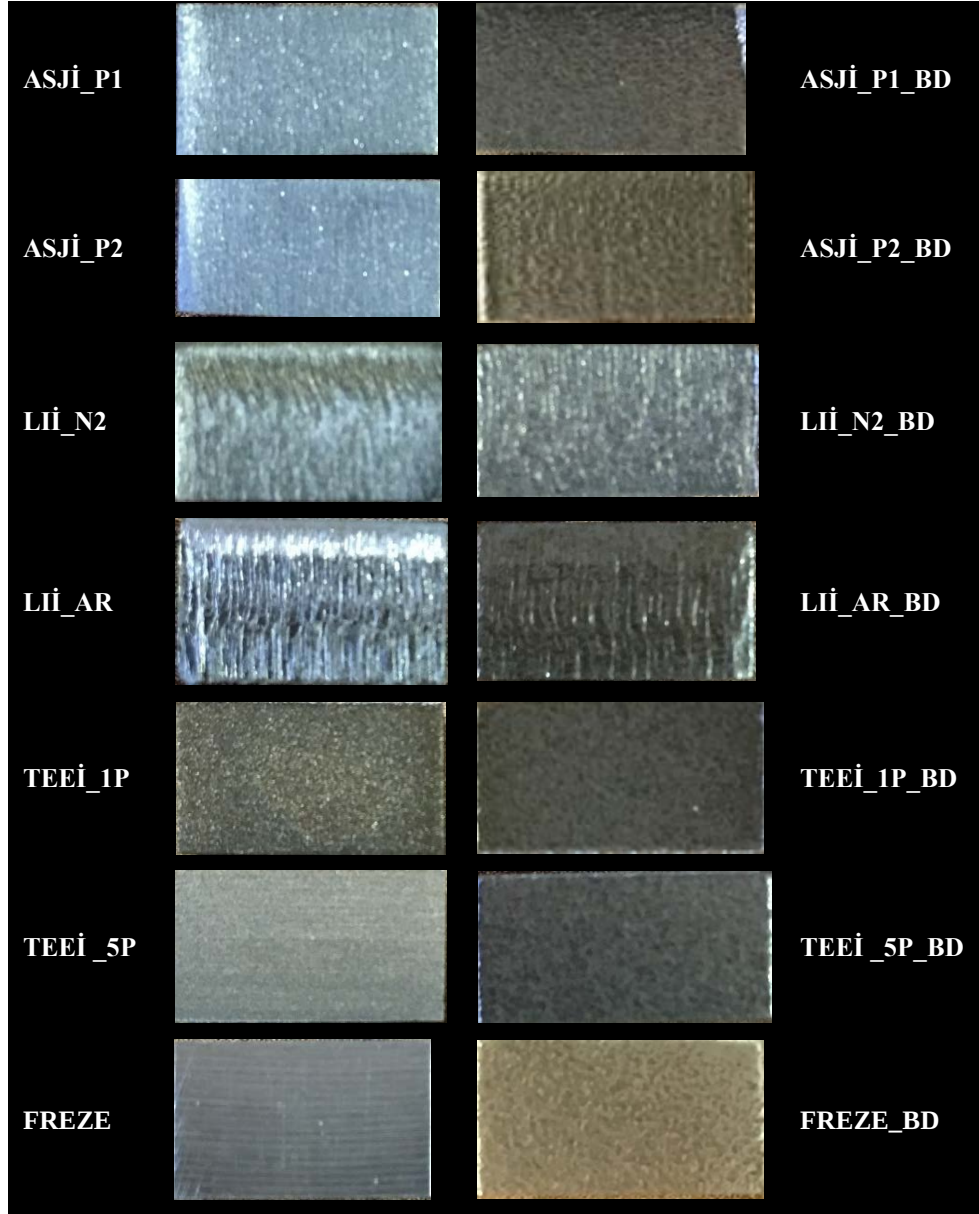


Şekil 8.3. Birincil ve ikincil işleme sonrası işparçalarının yüzey pürüzlülüğü

Resim 8.2'de BD öncesi ve sonrası kesilmiş yüzeyler görülmektedir. Frezelenmiş işparçalarının ortalama yüzey pürüzlülüğü ise % 151 oranında artış gösterdiği hesaplanmıştır. BD sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğü ASJİ_P1 işparçalarında % 27 oranında iyileşmiş, ASJİ_P2 ile kesim sonrası % 20 oranında kötüleşmiştir.

LIİ_N2 işparçaları yüzeylerinin, BD'de kullanılan bilyaların sertliğinden (~474 HV) daha yüksek olması nedeniyle (~700 HV), yüzeyde işleme çizgilerinin tamamen yok edilememiştir. BD sonrası işleme çizgileri seçilebilmektedir. Ancak ortalama yüzey pürüzlülüğünde LIİ_N2 işparçalarında % 21 iyileşme sağlanmış olsa bile en kötü yüzey

pürüzlülüğü bu işparçalarından ölçülmüştür. LIİ_AR işparçalarında ise ortalama yüzey pürüzlülüğünde % 28 oranında azalma gerçekleşmiştir. Yüzeydeki işleme çizgileri kaybolmuştur.



Resim 8.2. Birinci ve ikinci işlem görmüş işparçası yüzeyleri

TEEİ_1P işparçalarında ortalama yüzey pürüzlülüğü % 28 oranında azalmıştır. Bu durumun aksine TEEİ_5P işparçalarında ise % 77 oranında ortalama yüzey pürüzlülüğü artış göstermiştir. Ana işleme sonrasında yüzeydeki renklenme BD sonrasında görülememektedir.

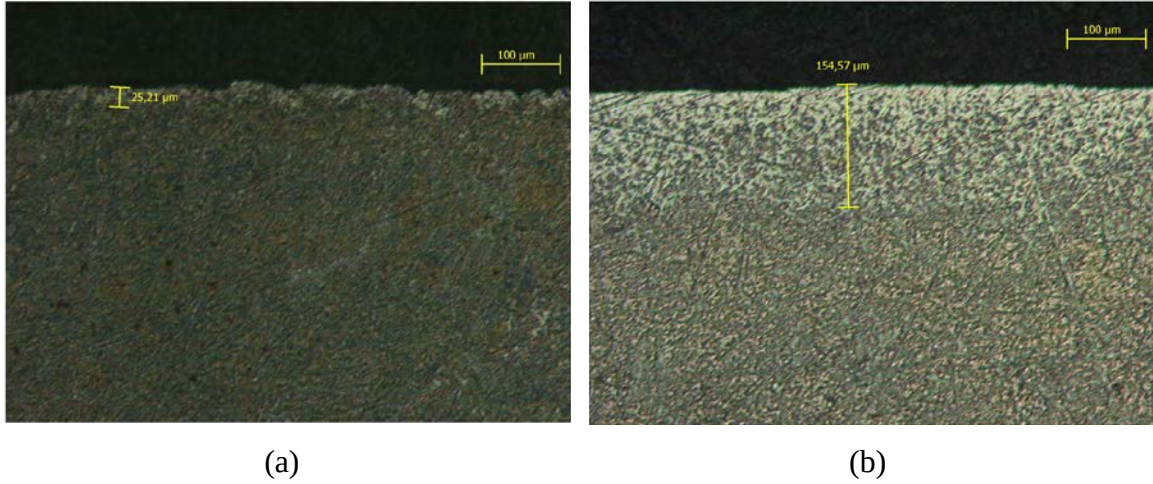
8.2. Optik Mikroskop ile Mikro Yapı İnceleme Sonuçları

Ana işleme ve ikincil işlem yapılmış yüzeylerde meydana gelen mikro yapı değişimlerinin incelenmesi amacıyla optik mikroskop fotoğraflarından faydalanılmıştır. Kesim yüzeyinin kenar kesitinden alınan mikro fotoğraflarda plastik deformasyon gerçekleşmiş bölge, ısı etkilenmiş bölge ve beyaz tabaka görülmektedir.

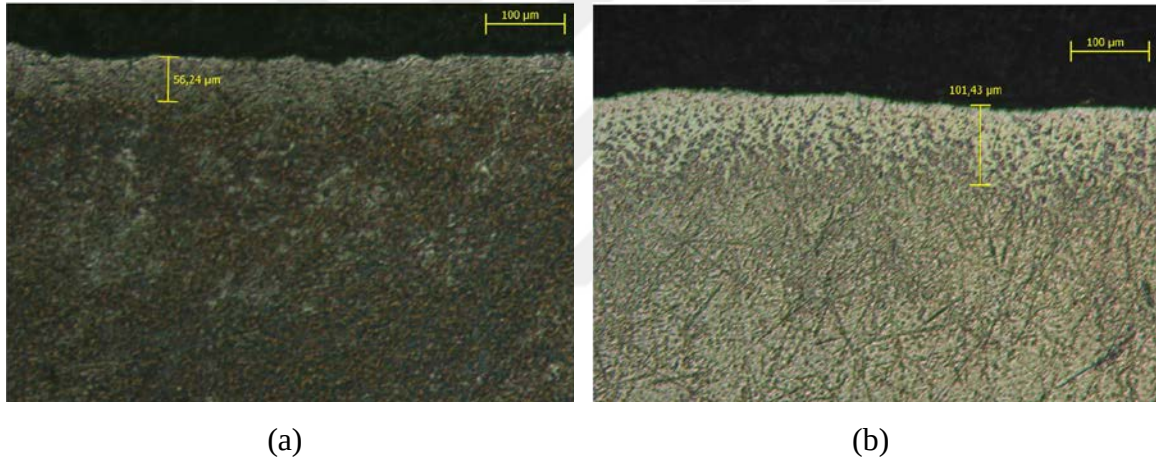
Resim 8.3.a - 8.4.a'daki mikro fotoğraflarda ASJİ yöntemi kullanılarak kesilmiş işparçalarının yüzey katmanlarına ait mikro fotoğraflar yer almaktadır. ASJİ_P1 işparçasında, kesilmiş yüzeyde 25,21 μm kalınlığında plastik deformasyon katmanı oluşmuştur. ASJİ_P2 işparçalarında ise 56,24 μm kalınlığında, ASJİ_P1'e kıyasla daha geniş plastik deformasyon gerçekleşmiş yüzey katmanı görülmektedir. İşleme hızının daha yavaş olması nedeniyle, ASJİ_P2 işparçalarının yüzey katmanlarında plastik deformasyon daha fazla gerçekleşmiştir. ASJİ'de ilerleme hızının artışı ile yüzey katmanlarında meydana gelen mikro yapı değişiminin daha az olduğu da görülmektedir.

Resim 8.3.b - 8.4.b'deki ASJİ işparçalarının, BD sonrası yüzey katmanlarının mikro fotoğrafları görülmektedir. ASJİ_P1_BD işparçasında 154,57 μm , ASJİ_P2_BD işparçasından ise 101,43 μm kalınlığında plastik deformasyon katmanı ölçülmüştür. BD öncesi ASJİ_P1 işparçasında 25,21 μm kalınlıklı plastik deformasyon bölgesi, BD sonrasında 154,57 μm kalınlığa erişmiştir. ASJİ_P1 işparçasında yaklaşık 6 kat daha derine nüfuz eden bir plastik deformasyon bölgesi gözlemlenmiştir. ASJ_P1'e kıyasla BD öncesinde 56,24 μm olarak ölçülen ve daha kalın bir plastik deformasyon bandına sahip olan ASJİ_P2 işparçasında ise BD sonrasında plastik deformasyon yaklaşık 2 kat artarak 101,43 μm ölçülmüştür.

Plastik deformasyon oluşan bölgede deformasyon sertleşmesi gerçekleşerek bölgede bulunan dislokasyon miktarında artış gözlenmektedir. Bu durum, literatürde de belirtilmiştir [61]. Dislokasyon miktarı arttıkça malzeme pekleşerek dislokasyonlar birbirlerini kilitlemekte ve mekanik etkilere daha kapalı olmaktadır. Bu durum, plastik deformasyonun daha düşük olduğu ASJİ_P1 işparçasında, ASJİ_P2 işparçasına göre BD sonrası daha fazla plastik deformasyon gerçekleşmesi ile açıklanabilmektedir.



Resim 8.3. a) ASJİ_P1 işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) ASJİ_P1_BD işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı

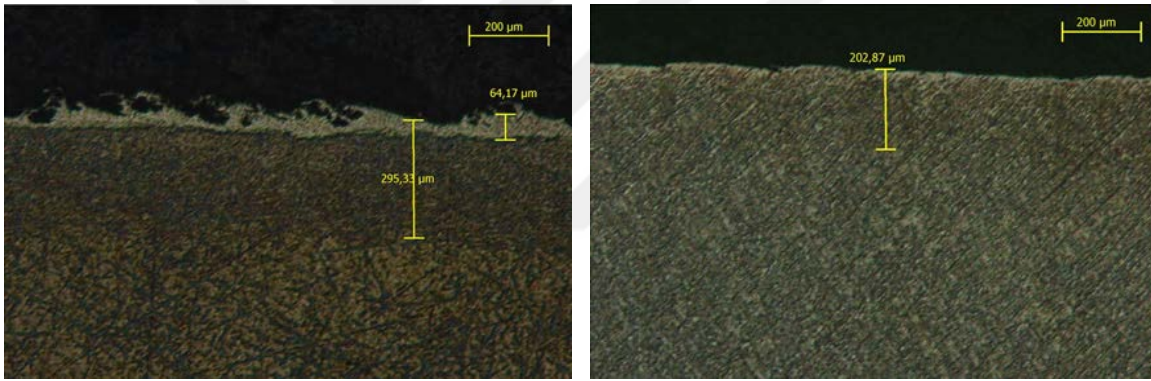


Resim 8.4. a) ASJİ_P2 işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) ASJİ_P2_BD işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı

Resim 8.5.a -8.6.a ile LIİ yöntemi kullanılarak kesilmiş işparçalarının yüzey kenarından alınan mikro fotoğraflar sunulmuştur. Mikro fotoğraflarda yüzey katmanlarında farklılaşmış bölgeler görülmektedir. LIİ_N2 işparçasında 295,33 μm kalınlığında ısı etkilenmiş bölge, 64,17 μm kalınlıklı beyaz tabaka ölçülmüştür. LIİ_AR işparçalarında ise 164,92 μm kalınlıklı ısı etkilenmiş bölge ölçülmüş olup beyaz tabakaya rastlanmamıştır. Beyaz tabaka oluşumunda azot gazının reaktif özelliğinin etkili olduğu düşünülmektedir. Literatür çalışmalarında da benzer sonuçlara rastlanılmıştır [12]. Ayrıca mikro fotoğraflarda, bir önceki bölümde belirtilen yüksek yüzey pürüzlülüğü de belirgin biçimde görülmektedir.

Resim 8.5.b - 8.6.b'deki mikro fotoğraflarda, LIİ yöntemi ile üretilmiş yüzeylerin BD uygulanması sonrası yüzey katmanları görülmektedir. LIİ ile üretilen yüzeylerdeki plastik deformasyon bandı, ASJİ yöntemi ile üretilen yüzeylerden daha kalın elde edilmiştir.

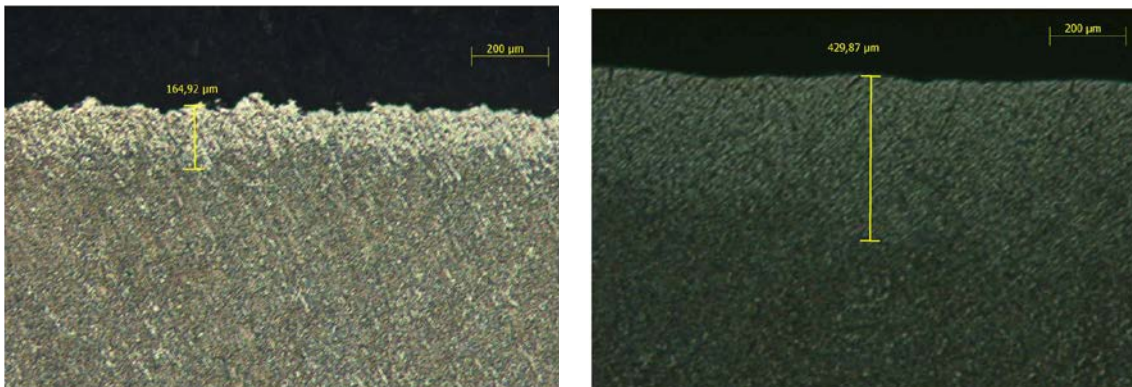
Azot gazının yardımcı gaz olarak kullanıldığı LIİ_N2_BD işparçalarında 202,87 μm kalınlığında plastik deformasyon bandı elde edilirken, LIİ_AR_BD işparçalarında 429,87 μm kalınlığında plastik deformasyon bandı ölçülmüştür. LIİ'de kullanılan işleme parametrelerinde sadece yardımcı gaz farklılık göstermiştir. Ti6Al4V'nin yardımcı gaz olarak N₂ kullanılması sonucunda yüzeyde TiN tabakasının oluştuğu literatürde yer verilmektedir [3]. Azotun yardımcı gaz olarak kullanıldığı işparçalarında yüzeyde sert beyaz tabaka (TiN tabakası) oluşmasından ötürü BD'nin mekanik enerjisinin malzeme yüzeyi altına daha az iletildiği düşünülmektedir



(a)

(b)

Resim 8.5. a) LIİ_N2 işparçasının 50X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) LIİ_N2_BD işparçasının 50X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı



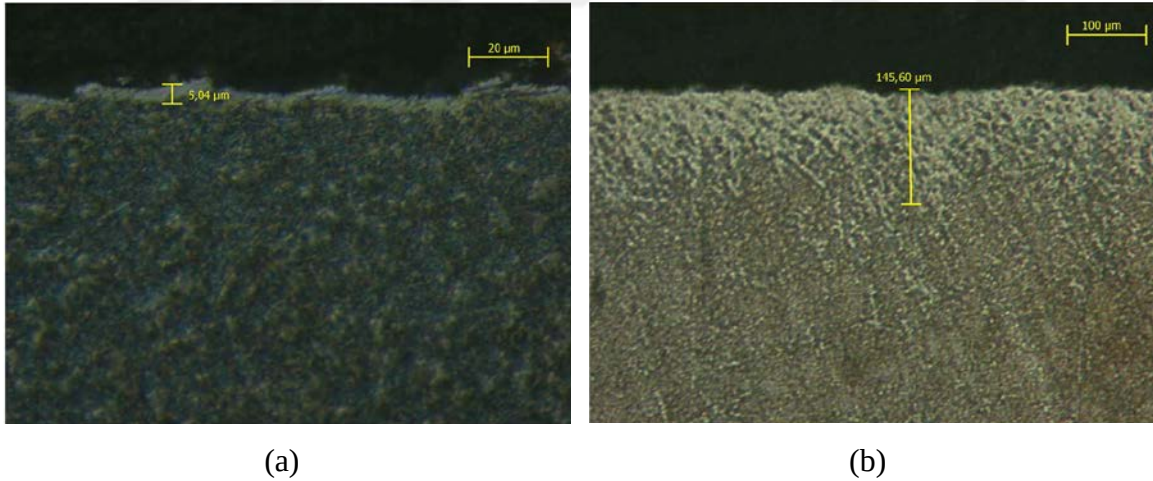
(a)

(b)

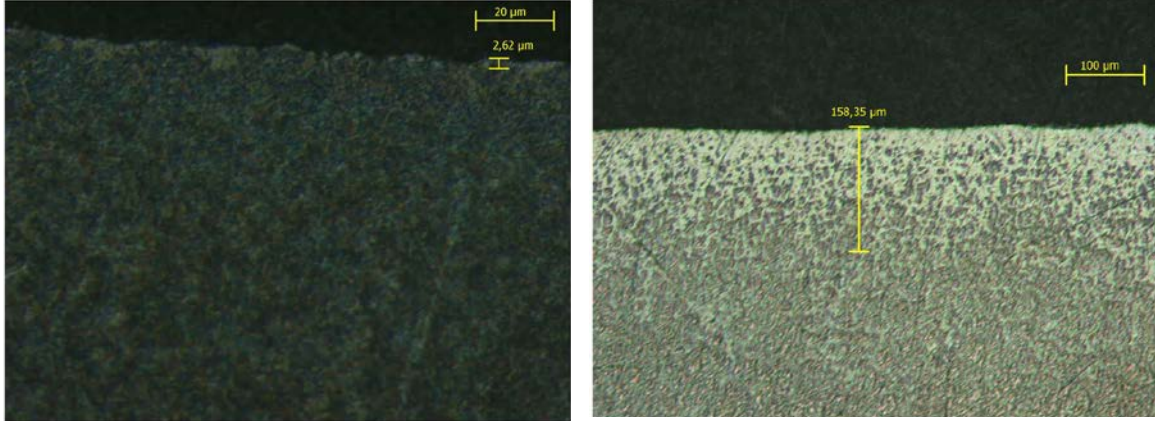
Resim 8.6. a) LIİ_AR işparçasının 50X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) LIİ_AR_BD işparçasının 50X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı

Resim 8.7.a - 8.8.a'daki yer alan mikro fotoğraflarda TEEİ yöntemi kullanılarak kesilmiş işparçalarının yüzey katmanları görülmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün $2,42 \mu\text{m}$ olduğu TEEİ_1P işparçası yüzeyinde $5,04 \mu\text{m}$ kalınlığında, ortalama yüzey pürüzlülüğünün $0,79 \mu\text{m}$ olduğu TEEİ_5P işparçası yüzeyinde ise en fazla $2,62 \mu\text{m}$ kalınlıklı beyaz tabaka ölçülmüştür. Ayrıca gözle görülür bulunmadığı tespit edilmiştir. Literatürde EEİ sonrası $6,3-10 \mu\text{m}$ ortalama yüzey pürüzlülüğüne sahip işlenmiş yüzeyde $25-130 \mu\text{m}$ kalınlığında beyaz tabaka elde edilmektedir [8]. Yeni nesil TEEİ tezgahlarında kullanılan elektroliz önleyici jeneratör teknolojisi sayesinde daha iyi yüzey tamlığı sağladığı elde edilen deneysel çalışma sonuçlarından anlaşılmaktadır.

Resim 8.7.b - 8.8.b TEEİ ile üretilmiş yüzeylerin kesim kenarının BD uygulanması sonrası optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Bir paso ile işlenmiş yüzey altında $145,60 \mu\text{m}$ kalınlığında, beş paso ile işlenmiş yüzey altında ise $158,35 \mu\text{m}$ kalınlığında plastik deformasyon bandı ölçülmüştür. Ölçülen bu kalınlıkların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ancak beyaz tabakanın daha kalın olduğu TEEİ_1P işparçalarında kısmen daha ince plastik deformasyon bandı elde edilmiştir.



Resim 8.7. a) TEEİ_1P işparçasının 500X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) TEEİ_1P_BD işparçasının 100X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı



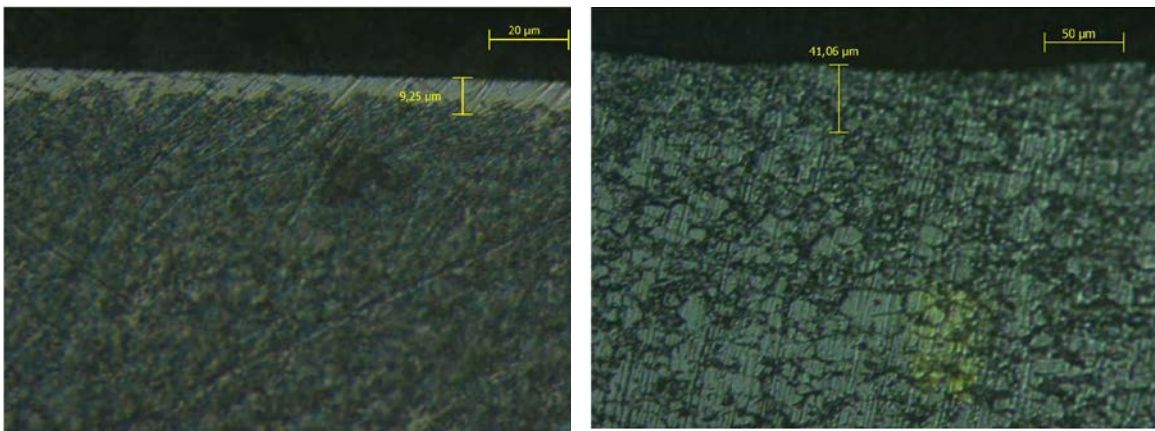
(a)

(b)

Resim 8.8. a) TEEİ_5P işparçasının 500X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) TEEİ_5P_BD işparçasının 500X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı

Resim 8.9.a'daki mikro fotoğrafta freze ile elde edilmiş yüzey katmanları görülmektedir. Yüzey ve altında ana malzemeden daha açık bir renkte görülen plastik deformasyona uğramış katman, bant şeklinde uzanmaktadır. Plastik deformasyon bölgesinin katman kalınlığı $9,25 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Frezeleme sonuçları yüzey pürüzlülüğü, deformasyon kalınlığı ile birlikte değerlendirildiğinde, diğer işparçalarına kıyasla en iyi yüzey tamlığı sonuçlarına sahip olduğu anlaşılmıştır.

Resim 8.9.b'deki mikro fotoğraflarda frezeleme sonrası BD uygulanan yüzeyin optik mikroskop ile çekilmiş kesim kenarı görülmektedir. $9,25 \mu\text{m}$ olan plastik deformasyon bölgesi BD sonrası $41,06 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.

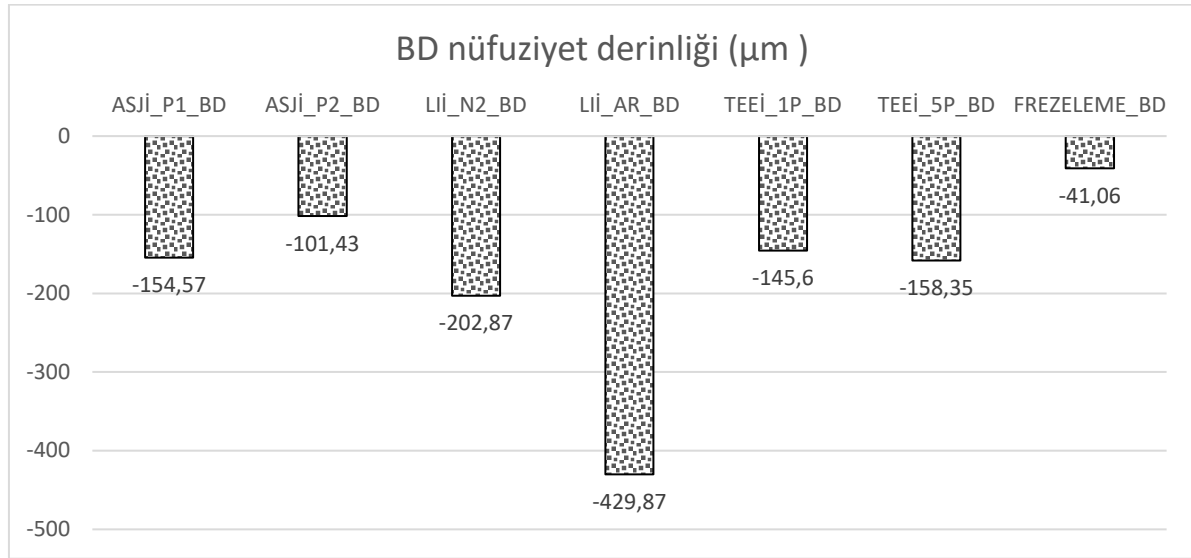


(a)

(b)

Resim 8.9. a) FREZE işparçasının 500X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı, b) FREZE_BD işparçasının 200X büyütmede yüzey kesitinin mikro fotoğrafı

İşparçaları mekanik ve ısıl enerjinin kullanıldığı alışılmamış ve geleneksel imal usullerinden frezeleme yöntemi ile işleme ve BD ile ikincil işleme tabi tutulduktan sonra ölçülen plastik deformasyon katman kalınlıkları Şekil 8.4'teki grafik ile gösterilmiştir. Mekanik olarak dövülme sonucunda yüzey altında bulunan dislokasyonlar yeniden düzenlenmektedir. BD'nin, işparçalarında nüfuziyet derinlikleri incelendiğinde, gerçekleşen plastik deformasyonun en fazla ana işleme yönteminin ısıl enerjinin kullanıldığı işleme yöntemi olan Lİİ işparçalarında gerçekleşmiş olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 8.4. BD sonrası nüfuziyet derinlikleri

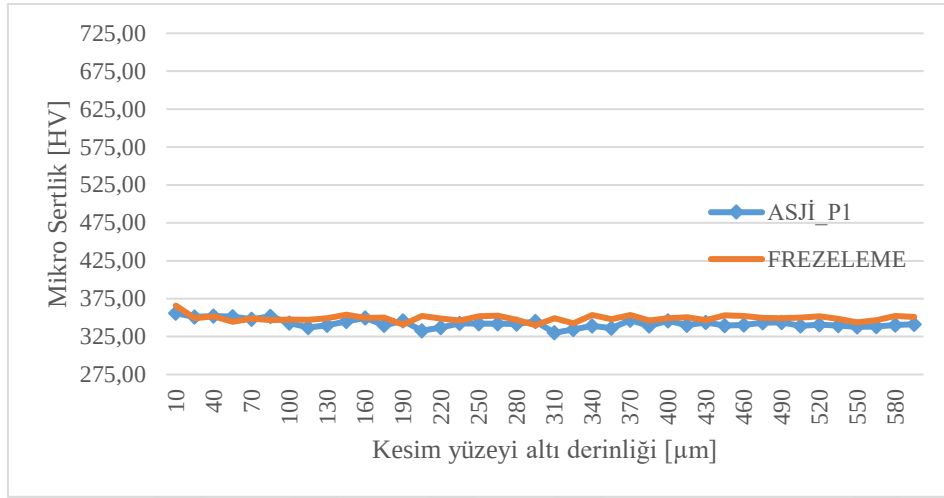
Mekanik enerjinin kullanıldığı işlemlerde işparçası merkezine doğru bası kuvvetleri uygulanarak malzeme kaldırıldığından, işparçası yüzeyindeki dislokasyon yoğunluğu artış göstermektedir. İşlenmiş yüzeyin bası yönünde ikincil işleme tabi tutulmasıyla, dislokasyon artışı bir yerden sonra durmaktadır. Bu durum mevcut dislokasyonların yeniden düzenlenmesi sırasında birbirini kilitlemesiyle mekanik enerjinin plastik deformasyon nüfuziyetini kısıtlamasıyla açıklanmaktadır.

Isıl enerji kullanılarak işlenen işparçalarında malzeme kaldırılması, işparçasının dışına doğru, ergime ve buharlaşma şeklindedir. Yüzeye uygulanan yüksek enerjili lazer ışını, işleme alanını yeniden kristalleşme sıcaklığı üzerinde bir sıcaklığa erdirmektedir. Lİİ'de kullanılan yardımcı gazın yüksek basınçlarda uygulanmasıyla, hızlıca soğuyan işleme bölgesi yüzeyinde ve altındaki taneler yeniden kristalleşerek daha ince taneli ısıl etkilenmiş bölgeyi oluşturmaktadır. İnce taneli mikro yapının yanı sıra içyapıda çeki gerilmesi oluşmakta ve böylelikle BD ile işleme daha elverişli olmaktadır. Lİİ işparçalarında BD

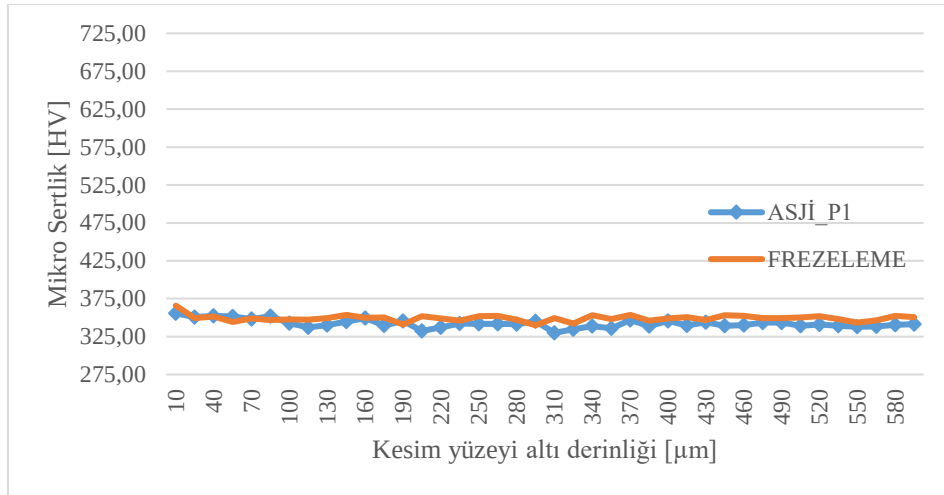
sonrası yüzeyden ölçülen plastik deformasyon bandı kalınlığının daha yüksek olma durumu açıklanabilmektedir.

8.3. Mikro Sertlik Sonuçları

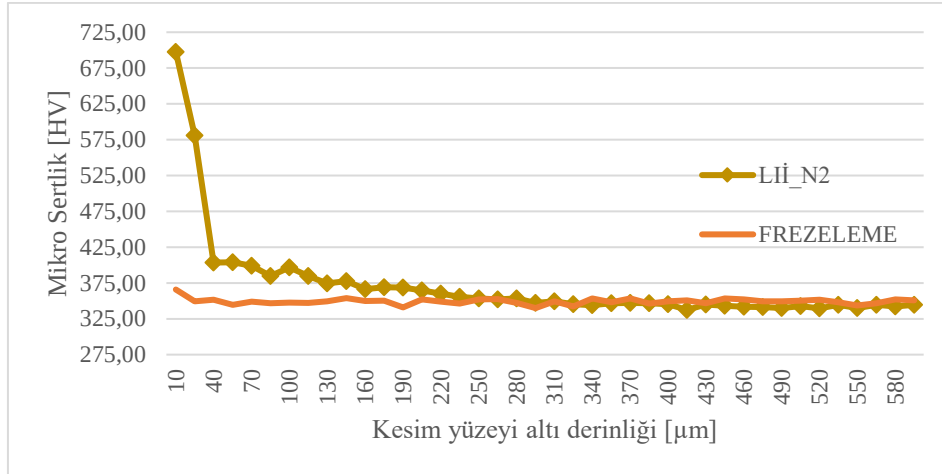
Alışılmamış imal usulleri ile işleme sonrası kesim yüzeyi kenarından ölçülerek ortalama değerleri hesaplanan mikro sertlik değerleri Şekil 8.5-10'da gösterilmektedir.



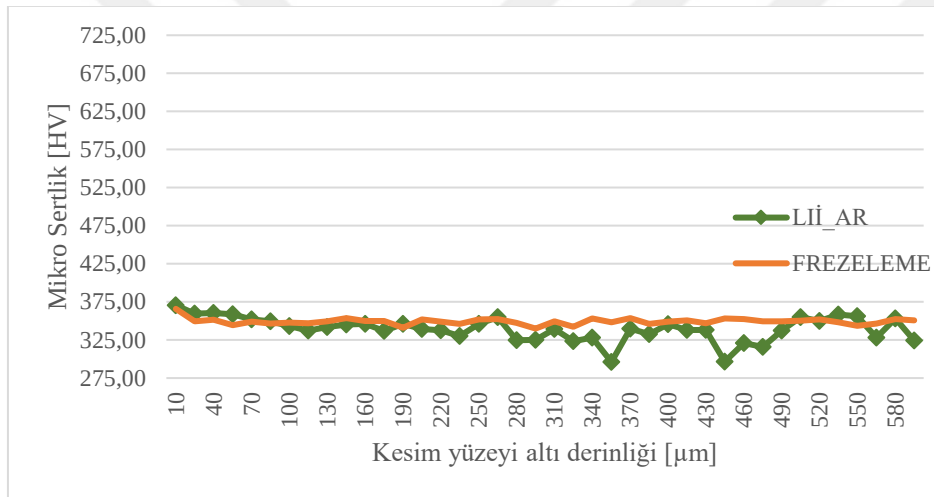
Şekil 8.5. Frezeleme ve ASJİ_P1 işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları



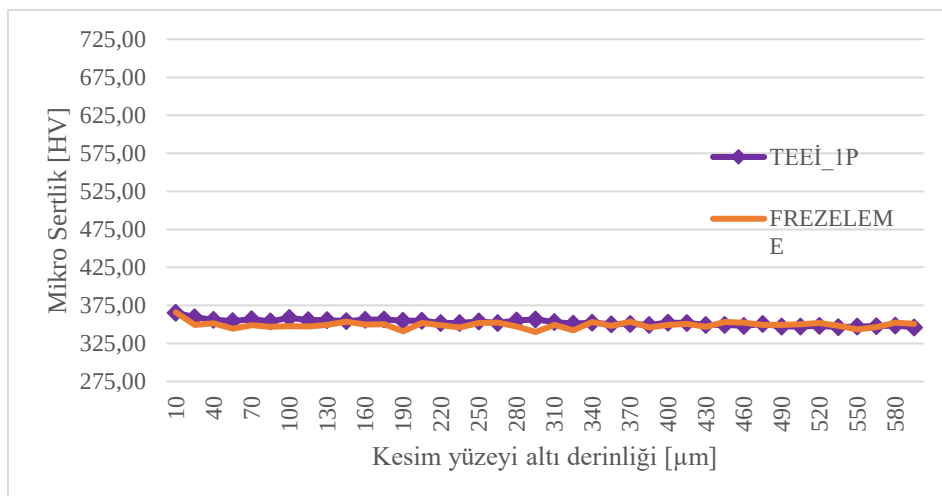
Şekil 8.6. Frezeleme ve ASJİ_P2 işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları



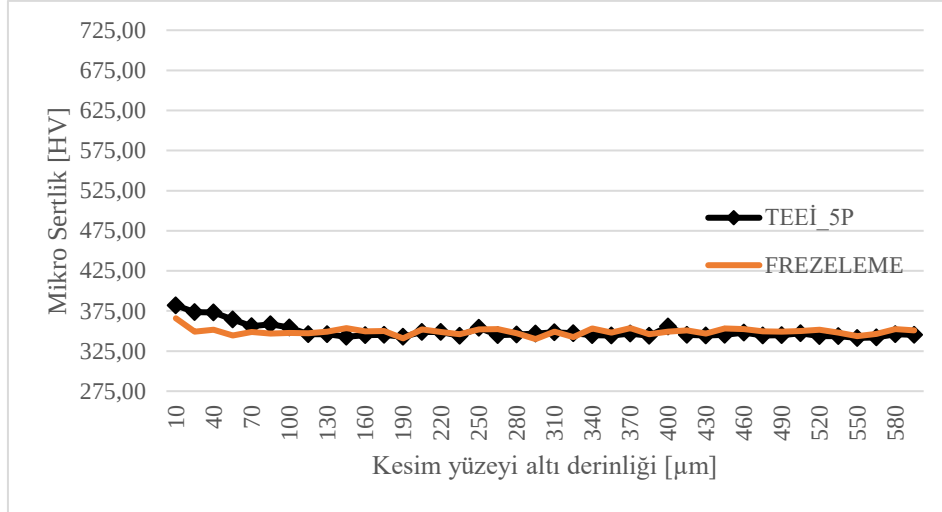
Şekil 8.7. Frezeleme ve LIİ_N2 işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları



Şekil 8.8. Frezeleme ve LIİ_AR işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları



Şekil 8.9. Frezeleme ve TEEİ_1P işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları



Şekil 8.10. Frezeleme ve TEEİ_5P işparçasının mikro sertlik ölçüm sonuçları

Grafikler incelendiğinde kesim yüzeyine en yakın kesitlerin mikro sertlik sonuçlarının, işlemeden önceki işparçası sertliğine (HV 349) kıyasla artış gösterdiği görülmektedir. Önemli ilk 5 mikro sertlik sonucu Çizelge 8.1’de yer almaktadır.

Çizelge 8.1. Kesim yüzeyine en yakın ilk 5 mikro sertlik ölçüm sonuçları.

Mikro Sertlik [HV _{0,025}] Sonuçları								
	μm	ASJİ_P1	ASJİ_P2	LIİ_N2	LIİ_AR	TEEİ_1P	TEEİ_5P	FREZELEME
1	10	355,80	359,97	697,63	370,67	365,50	382,07	365,87
2	25	350,73	355,03	580,80	359,60	359,33	373,43	349,33
3	40	352,40	353,03	403,30	360,43	355,93	372,97	351,63
4	55	351,43	352,43	403,87	358,67	354,30	364,20	344,47
5	70	348,07	346,70	399,10	351,80	357,13	355,87	348,93

ASJİ yöntemi ile kesilmiş işparçalarında, önceki bölümlerde açıklanmış olan plastik deformasyon bandından ötürü sertleşme gerçekleşmiştir. Bu sertlik ana işparçası malzemesi mikro sertliğinden ASJİ_P1 işparçalarında % 2, ASJİ_P2 işparçalarında ise % 3 oranında bir artış göstermiştir. ASJİ_P2 işparçalarının kesiminde ilerleme hızının daha yavaş olması

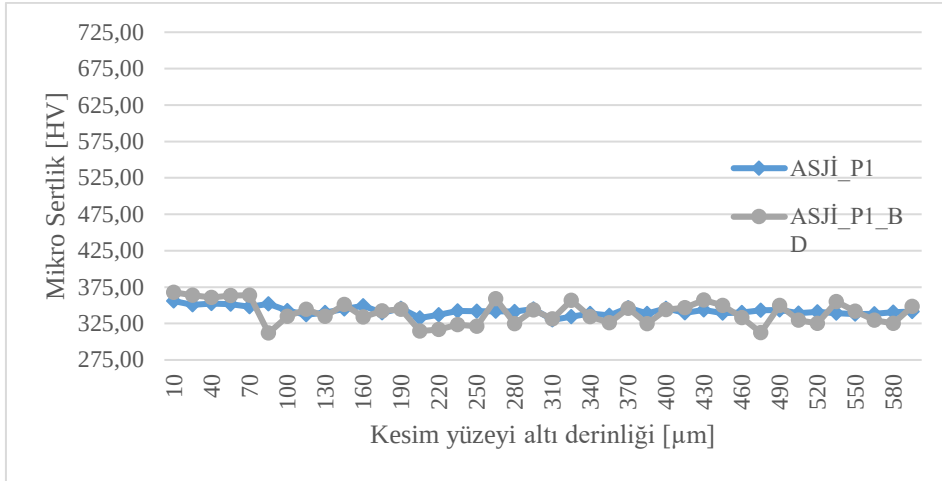
nedeniyle, işleme kanalı aşındırıcı su jeti ile daha fazla temas halinde olmaktadır. Böylelikle yüzey katmanlarında gerçekleşen plastik deformasyon daha fazla olmuştur.

LIİ ile kesilen işparçalarında, kullanılan yardımcı gazın etkisi önemli ölçüde belirgindir. Azot gazının yardımcı gaz olarak kullanıldığı işparçalarında (LIİ_N2), beyaz tabaka (TiN çökeltisi) oluşan yüzey kenarının mikro sertlik ölçümleri ortalaması yaklaşık olarak HV 700 olarak hesaplanmıştır [3]. Bu yöntemin işlenen işparçası yüzeyinin mikro sertliğini % 100'üne kadar arttırdığı görülmektedir. Önceki bölümlerde incelenen 64,17 µm kalınlığındaki beyaz tabaka ve 295,33 µm toplam kalınlıklı ısıt etkileneş bölge mikro sertlik sonuçlarına belirgin biçimde yansımıştır. Argon gazının yardımcı gaz olarak kullanıldığı LIİ ile kesilmiş işparçalarında (LIİ_AR) ise beyaz tabaka oluşmamış, sadece 164,92 µm kalınlığında ısıt etkileneş bölge görülmüştür. Yüzey katmanlarının mikro sertliğinde en fazla % 6 oranında bir artış gerçekleşmiştir.

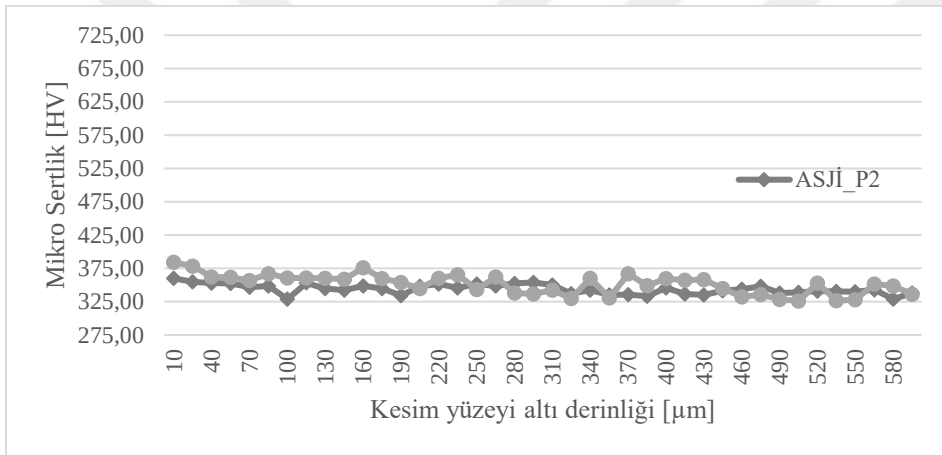
TEEİ ile kesilen işparçalarına ait yüzey katmanlarının mikro sertliklerinde tek paso işleme sonrasında % 4,7, beş paso işleme sonrasında ise % 9,5 oranında artış hesaplanmıştır. İşparçalarının kesim kenarlarında beyaz tabaka ölçülmüş ancak belirgin bir ısıt etkileneş bölge görülememiştir. Bu durumun, kullanılan tezgahın jeneratör teknolojisinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

Frezelenmiş işparçalarında ise yüzeydeki plastik deformasyon bandının etkisi yüzeyde sığ bir bölgede mikro sertliği arttırmış olmasıdır. İşparçasının yüzeyinden iç kısımlarına ilerledikçe mikro sertlik değerleri hızlıca normalleşerek işparçasının mikro sertlik değerine erişmektedir.

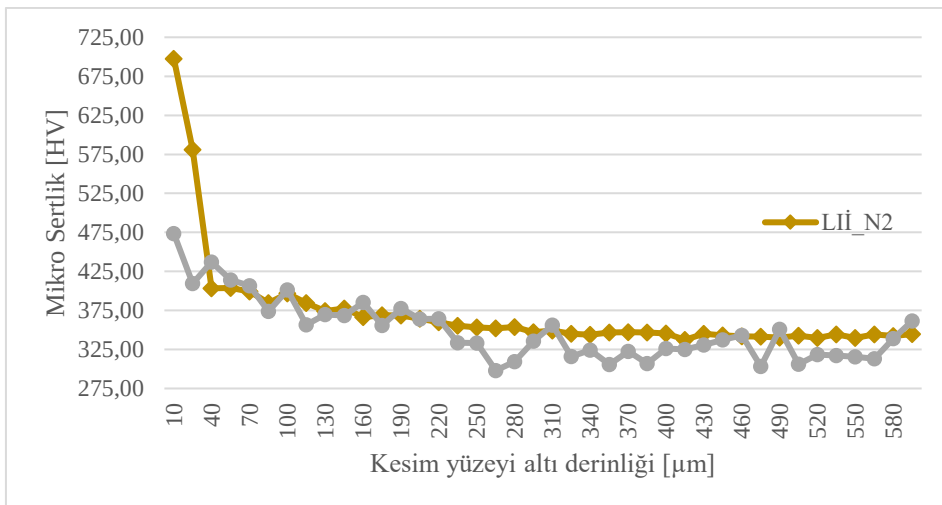
Şekil 8.11-17'daki ile sunulan grafiklerde BD sonrası işparçalarının kesim kenarından ölçülen mikro sertlik sonuçları BD uygulanmamış işparçalarının mikro sertlik sonuçları ile birlikte gösterilmektedir.



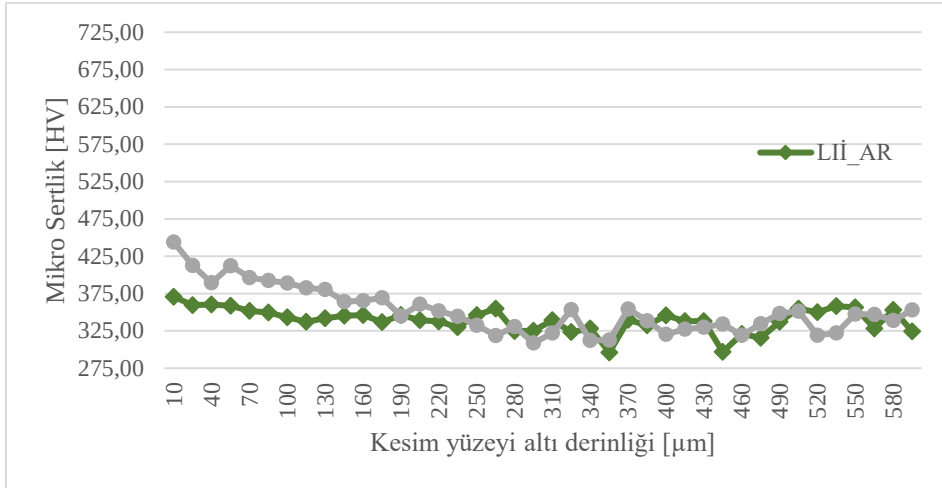
Şekil 8.11. ASJİ_P1 ve ASJİ_P1_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri



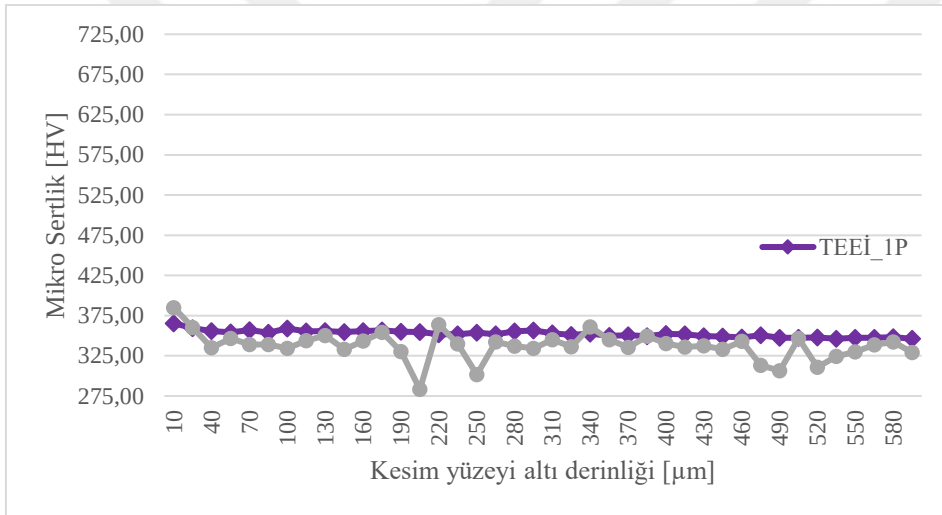
Şekil 8.12. ASJİ_P2 ve ASJİ_P2_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri



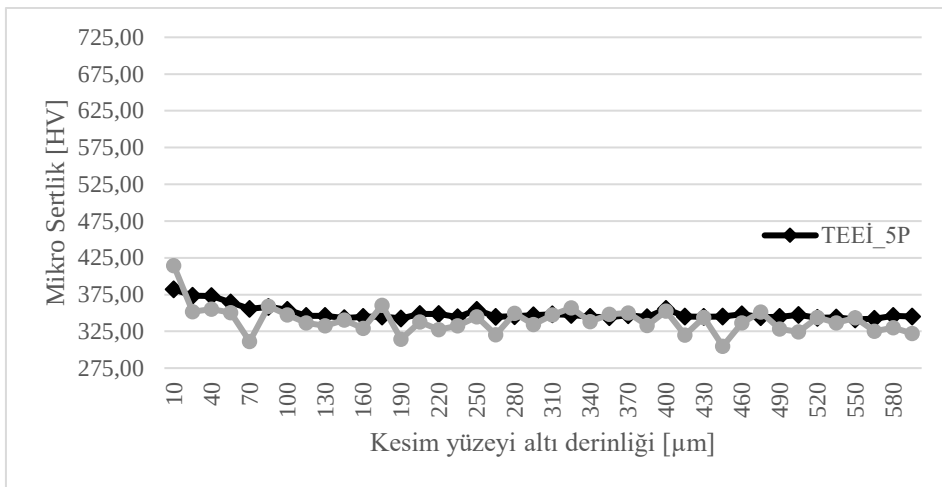
Şekil 8.13. LIİ_N2 ve LIİ_N2_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri



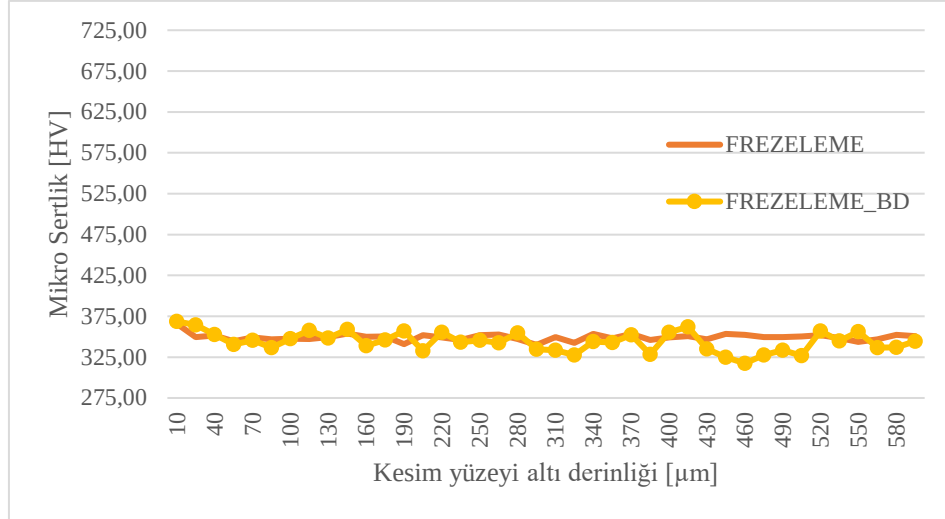
Şekil 8.14. LIİ_AR ve LIİ_AR_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri



Şekil 8.15. TEEİ_1P ve TEEİ_1P_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri



Şekil 8.16. TEEİ_5P ve TEEİ_5P_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri



Şekil 8.17. FREZE ve FREZE_BD işparçasının mikro sertlik ölçümleri

BD uygulandıktan sonra ilk beş mikro sertlik sonuçları Çizelge 8.2’de görülmektedir.

Grafikler incelendiğinde, yüzey katmanlarında sertlik artışı gerçekleşerek ana işlemeden daha sert yüzey katmanları olduğu görülmektedir. Yüzeyden malzemenin iç kısımlarına doğru ilerledikçe sertliğin azalarak malzemenin normal sertlik değerlerinde seyretmekte olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.2. BD sonrası kesim yüzeyine en yakın ilk 5 mikro sertlik ölçüm sonuçları

Mikro Sertlik [HV _{0,025}]								
	μm	ASJİ_P1_BD	ASJİ_P2_BD	LIİ_N2_BD	LIİ_AR_BD	TEEİ_1P_BD	TEEİ_5P_BD	FREZELEME_BD
1	10	367,87	384,07	473,47	443,77	385,07	414,37	368,60
2	25	363,90	378,27	409,37	412,43	360,10	351,57	364,30
3	40	360,80	361,93	436,83	389,40	334,93	355,30	352,67
4	55	363,27	361,73	414,23	412,13	346,80	350,57	340,60
5	70	363,67	356,90	406,70	396,23	339,03	311,23	345,67

ASJİ yöntemi ile kesilmiş işparçalarında, yüzeye en yakın kesim kenarından hesaplanan mikro sertlik sonuçları, ASJİ_P1 ile işleme sonrası % 3 oranında artış göstermiştir. Ayrıca BD sonrasında mikro sertlik, malzemenin ham sertliğine kıyasla (HV 349) % 5 oranında artış göstermiştir. Böylelikle BD, ASJİ_P1 işparçasında % 2 oranında yüzey ve altında sertleşme sağlamıştır. Optik mikroskop incelemelerinde görülen plastik deformasyon bandı kalınlıkları, ASJİ_P1 işparçalarında 25,21 μm , ASJİ_P1_BD işparçalarında ise 154,57 μm ölçülmüş olup bu mikro yapı değişiminin, mikro sertlik sonuçlarına da yansıdığı görülmektedir. ASJİ_P2 işparçalarında % 7 oranında mikro sertlik artmıştır. Ayrıca BD sonrasında işparçasının mikro sertliği, ham malzemeye göre % 10 oranında artmıştır. ASJİ_P2 işparçasında 56,25 μm kalınlığında ölçülen plastik deformasyon bandı, BD sonrasında 101,43 μm olarak ölçülmüştür. Mikro sertlik sonuçlarının optik mikroskop ile ölçülen mikro yapı değişimine uygun şekilde değişim gösterdiği görülmektedir (Resim 8.3-4).

BD öncesinde LIİ_N2 işparçaları yüzeyinde aşırı bir sertlik meydana geldiği görülmektedir (Şekil 8.6). LIİ_N2_BD işparçalarının mikro sertlik değeri ise % 32 oranında düşüş göstermektedir. BD öncesinde, LIİ_N2 işparçalarındaki 64,17 μm kalınlığa erişebilen beyaz tabakanın (Resim 8.5), BD sonrasında kaybolduğu görülmektedir. Yüksek sertlikteki beyaz tabaka BD'nin nüfuziyet derinliğini de etkilemiştir (Şekil 8.17). LIİ_AR işparçasında, argon gazının yardımcı gaz olarak kullanılmasının yüzeyde beyaz tabaka oluşumuna sebebiyet vermediği, sadece ısıl etkilenmiş bölge oluşumuna sebep olduğu görülmüştür. LIİ_AR işparçasında, LIİ_N2 işparçasına kıyasla % 112 oranında daha derine inen plastik deformasyon bandı görülmüştür. LIİ_AR_BD işparçalarında ise LIİ_N2_BD işparçalarındaki durumun aksine yüzeyde deformasyon sertleşmesine bağlı mikro sertlik artışı daha fazla görülmüştür. LIİ_AR_BD işparçalarında mikro sertlik yüzey katmanlarında en fazla % 20 oranında artış göstermişken ham malzeme sertliğine kıyasla toplamda % 27 oranında yükselmiştir.

Şekil 8.17'de sunulan BD nüfuziyet derinlikleri de incelendiğinde yüzey altında gerçekleşen en fazla plastik deformasyonun LIİ_AR işparçalarında olduğu görülmektedir. Ayrıca Resim 8.6.b incelendiğinde bu derin plastik deformasyon bandının etkilerinin de mikro sertlikle eşgüdümlü olarak seyrettiği görülmektedir.

TEEİ işparçalarında tek ve beş paso ile kesimi yapılan işparçalarının yüzeyinde BD sonrası sırasıyla % 5 ve % 8 oranında sertlik artışı gözlenerek, ham malzeme sertliğinden toplamda % 10 ve % 19 oranında ortalama mikro sertlik artışı hesaplanmıştır. BD öncesi, beş paso kesim yapılan TEEİ_5P işparçalarının yüzeyinde oluşan beyaz tabakanın (2,62 μm , kesikli), TEEİ_1P işparçalarındaki beyaz tabakaya (5,04 μm , sürekli) kıyasla daha ince ve süreksiz olması TEEİ işparçalarının sertliklerindeki % 9 oranındaki farkı açıklamaktadır. BD'nin nüfuziyet derinliği, TEEİ_5P işparçasında (158,35 μm), TEEİ_1P işparçasına (145,6 μm) göre daha büyük ölçülmüş olup işparçası yüzeyinde oluşan beyaz tabakanın bu farkı oluşturduğu düşünülmektedir.

Frezelenmiş işparçasına BD uygulanması sonrasında sadece % 1 oranında yüzey sertliği artış gözlenmiştir. Bu durumun nedeni, frezeleme sonrası plastik deformasyon ile artış gösteren dislokasyonların bir seviyeden sonra birbirini kitlemesi ve pekleşmenin daha fazla artmaması olarak açıklanabilir.

BD uygulanması sonucu meydana gelen yüzey katmanlarındaki mikro yapı değişimi mikro sertliği de etkilemiştir. Mikro sertlik değişimi, optik mikroskop ile incelenen mikro yapı sonuçlarıyla uyumlu bir şekilde değişim göstermektedir. Isıl enerjinin kullanıldığı yöntemler sonrası BD'nin daha derine nüfuz ettiği Çizelge 8.1-2 incelendiğinde ayrıca görülebilmektedir. BD sonrası frezeleme ile elde edilen sertlik değerlerinden daha yüksek değerlere ulaşıldığı görülmektedir.

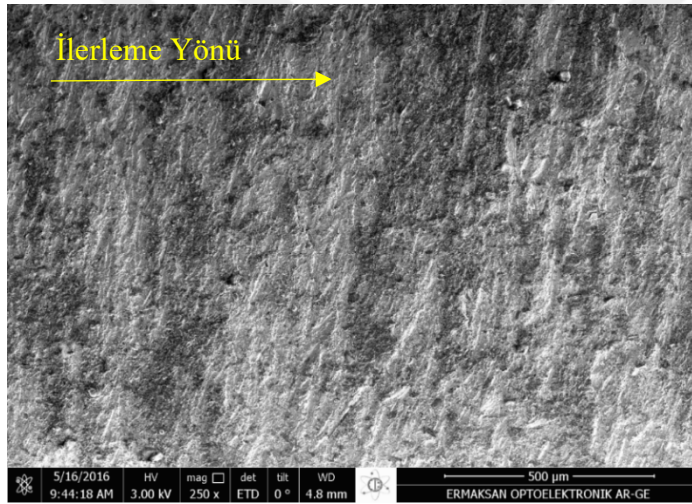
8.4. Taramalı Elektron Mikroskopi ile Yüzey İnceleme Sonuçları

Yüzeylerde işleme sonrası oluşan mikro yapının daha iyi anlaşılabilmesi için farklı büyütmelerde SEM fotoğraflarına yer verilmiştir. Resim 8.10-11'de sunulan SEM fotoğraflarında ASJİ_P1 işparçalarının kesim yüzeylerinin sırasıyla 250X ve 8 000X büyütmede kesim yüzeyleri görülmektedir. Resim 8.10'te ilerleme yönüne bağlı olarak işleme çizgileri seçilebilmektedir. Resim 8.11'de sunulan görselde daha yüksek büyütme kullanılmış olup aşındırıcı tanecikler ve deforme olmuş yüzey görülmektedir. Plastik deformasyona bağlı olarak oluşan kraterler görselde seçilebilmektedir. Ayrıca bazı aşındırıcı parçacıklar, aşındırma yoluyla beraber işaretlenmiştir.

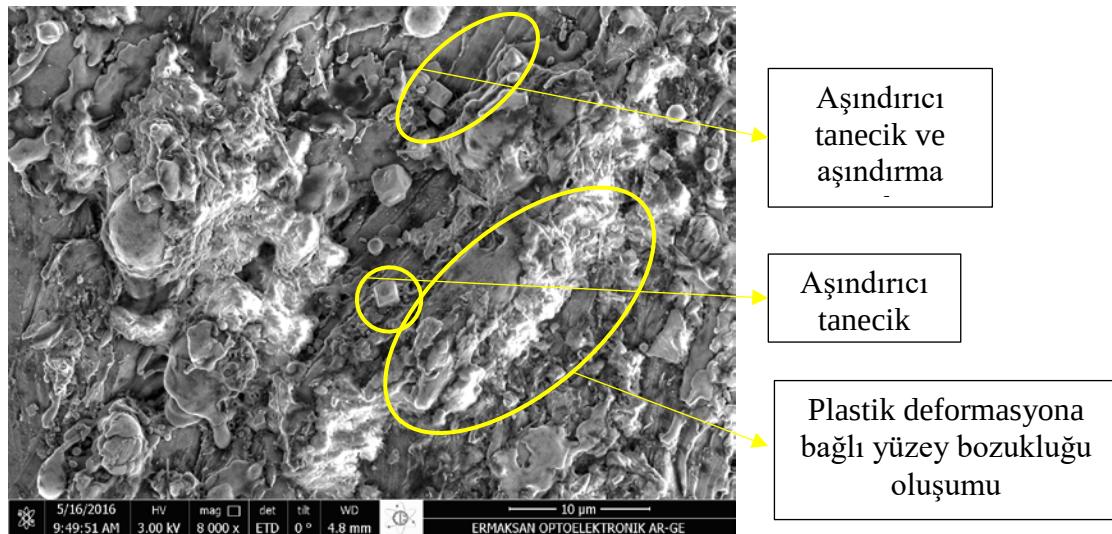
Resim 8.12-13'te ise ASJİ_P2 işparçalarının 650X ve 20 000X büyütmede SEM fotoğrafları görülmektedir. Resim 8.12'deki SEM fotoğrafında kümelenmiş olarak yüzeye gömülü ve

parçalanmış aşındırıcı tanecikler görülmektedir. İşleme çizgileri belirgin biçimde Resim 8.12’da gösterilmiştir.

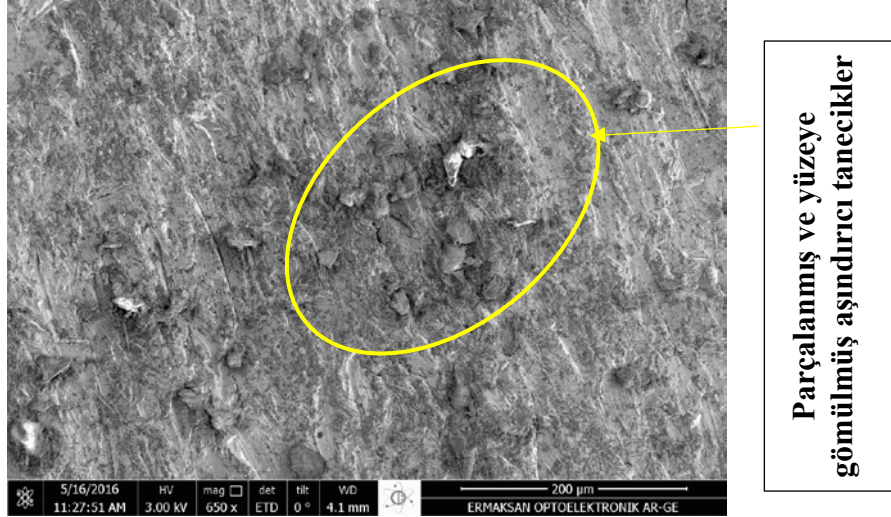
Resim 8.14’te ASJİ_P1_BD işparçası yüzeyinin 124X büyütmede, Resim 8.15’te ise ASJİ_P2_BD işparçası yüzeyinin 157X büyütmede SEM fotoğrafları görülmektedir. Yüzeyler incelendiğinde, BD ile yüzeye uygulanan küresel bilyaların, yüzeyin tamamını örtecek şekilde bombardıman etmesi nedeniyle dalgalı ve girinti çıkıntılı yapıda yüzey elde edildiği görülmektedir. BD ile ASJİ yönteminden kaynaklı olan plastik deformasyona bağlı şekil bozuklukları ve işleme çizgilerinin kaybolarak yeni bir yüzey elde edildiği anlaşılmaktadır. Yüzeyde yer yer katlanma ve mikro kraterler de görülmektedir.



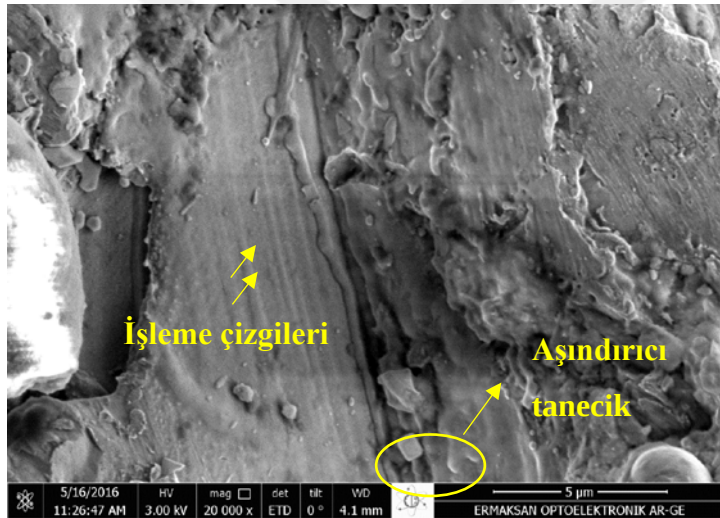
Resim 8.10. ASJİ_P1 işparçasının 250X büyütmede SEM fotoğrafı



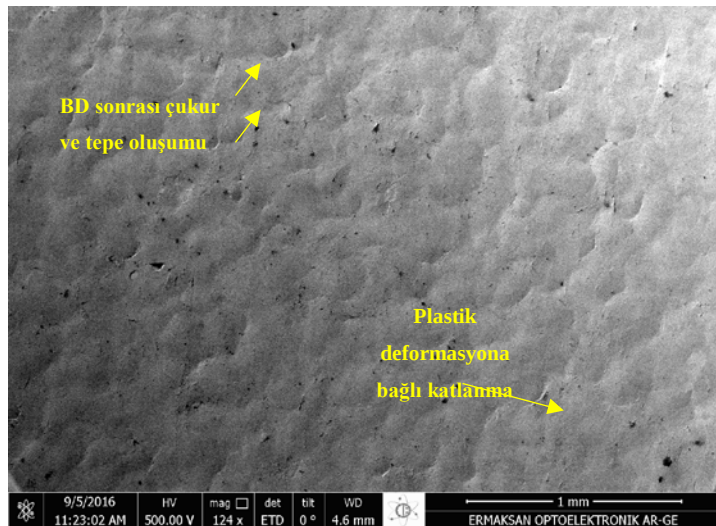
Resim 8.11. ASJİ_P1 işparçasının 8 000X büyütmede SEM fotoğrafı



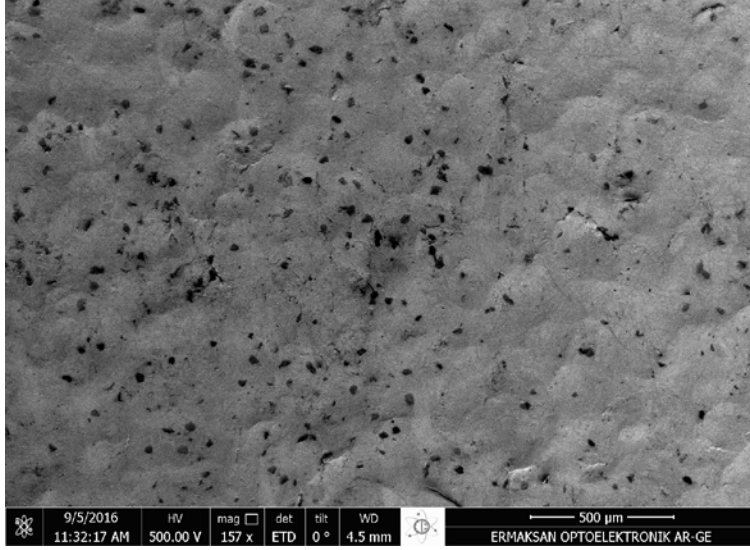
Resim 8.12. ASJİ_P2 işparçasının 650X büyütmede SEM fotoğrafı



Resim 8.13. ASJİ_P2 işparçasının 20 000X büyütmede SEM fotoğrafı



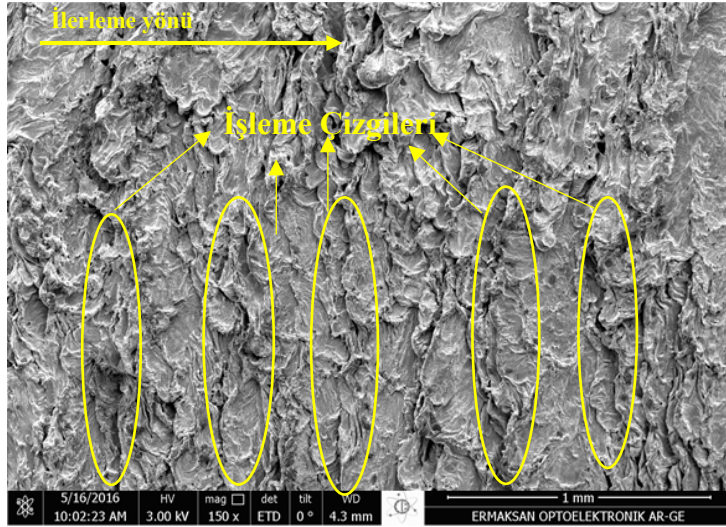
Resim 8.14. ASJİ_P1_BD işparçasının 124X büyütmede SEM fotoğrafı



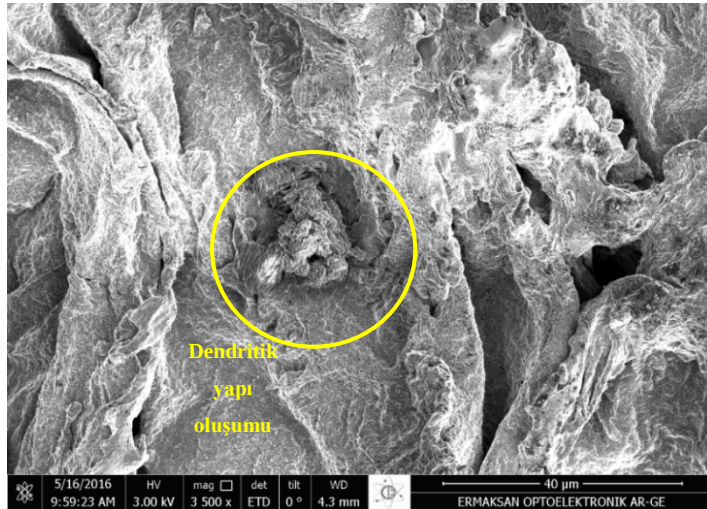
Resim 8.15. ASJİ_P2_BD işparçasının 157X büyütmede SEM fotoğrafı

Resim 8.16-17'deki SEM fotoğraflarında LIİ_N2 işparçalarının sırasıyla 150X ve 3 500X büyütmede kesim yüzeyleri görülmektedir. Resim 8.16'teki mikro fotoğrafta, lazer ışını ve yüksek basınçlı azot gazının etkisi ile ergiyik haldeki metalin damla formunda katılaşması sonucu oluşan işleme çizgilerinin bir hat boyunca sıralandığı görülmektedir. Yüksek basınçlı yardımcı gaz, ergiyik metal parçacıklarını dağıtarak hem işleme bölgesinden uzaklaştırmakta hem de birbirinden bağımsız ve düzensiz katılaşmaya neden olarak yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip kötü bir yüzey oluşturmuştur. Ayrıca bu düzensizliğin birçok kraterin oluşumuna da sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır. Resim 8.17'teki yüzey incelendiğinde yüzeyde dendritik yapıların varlığı göze çarpmaktadır. Bu yapıların kullanılan azot gazının etkileri sonucu olduğu düşünülmektedir [62].

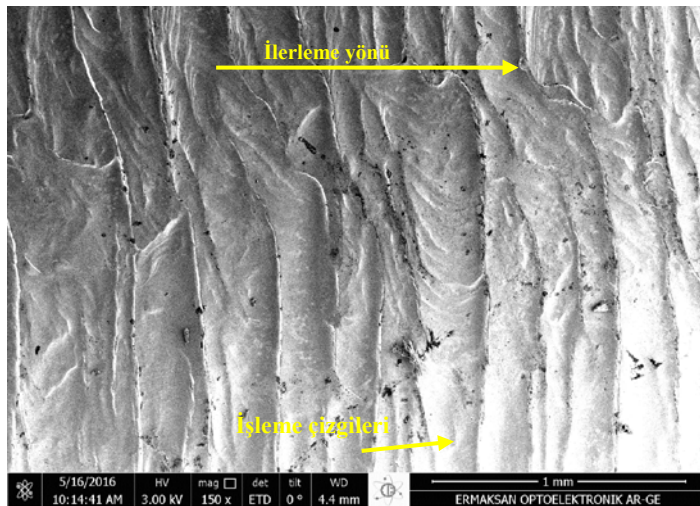
Resim 8.18-19'da SEM fotoğraflarında 150X ve 1500X büyütme ile LIİ_AR işparçalarının kesim yüzeyleri görüntülenmiştir. Resim 8.18'teki mikro fotoğrafta işleme çizgileri belirgin olarak görülmektedir. LIİ_AR işparçası yüzeyinde ergiyip damla şeklinde katılaşan metal parçacıkları bulunmakta olup bu durumu LIİ_N2 işparçasında olduğu kadar yoğun değildir. Lazer ışınının yüksek enerjisi ile hızlıca ergiyen işparçası, yüksek basınçlı argon gazı ile hem açık havanın korozyon etkilerinden korunmuş hem de işleme bölgesinde hızlıca bir soğuma sağlamıştır. Bu bölgede hızlıca ısınıp soğuyan işparçasında mikro çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Resim 8.19'daki SEM fotoğrafında, kesim yüzeyinin argon gazı sayesinde korozyona uğramaması ve bölgesel olarak pürüzsüz bir yüzey elde edilmesinden ötürü, α -Ti fazı görülmektedir.



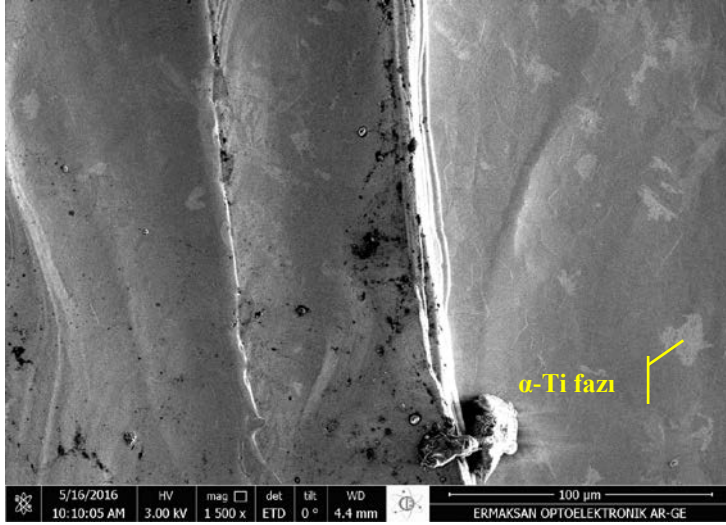
Resim 8.16. LIİ_N2 işparçasının 150X büyütmede SEM fotoğrafı



Resim 8.17. LIİ_N2 işparçasının 3 500X büyütmede SEM fotoğrafı



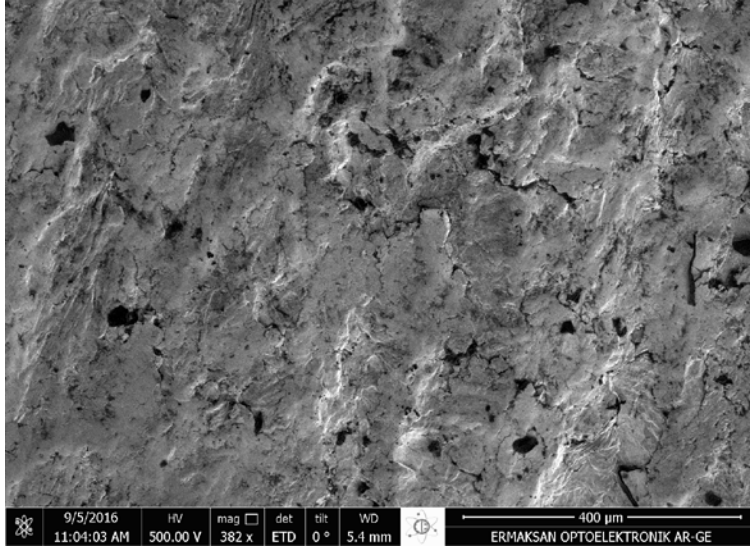
Resim 8.18. LIİ_AR işparçasının 150X büyütmede SEM fotoğrafı



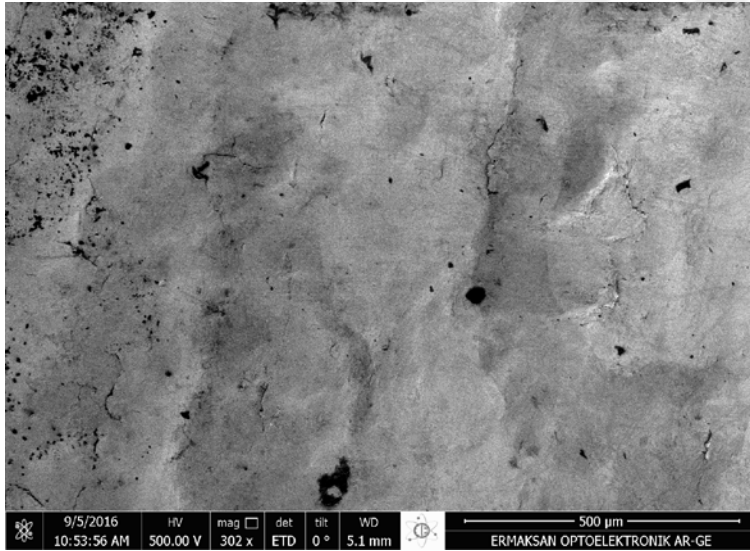
Resim 8.19. LIİ_AR işparçasının 1 500X büyütmede SEM fotoğrafı

Resim 8.20-21’de sırasıyla LIİ_N2_BD ve LIİ_AR_BD işparçalarının yüzeyine ait SEM fotoğrafları sunulmuştur. Resim 8.20 incelendiğinde yüzeyde BD uygulanmasıyla yüksek yüzey pürüzlülüğü azalmış olduğu ancak halen pürüzlü bir yüzeyin bulunduğu görülmektedir. Yüzeyde tam belirgin olmasa da gözle muayene edildiğinde işleme çizgileri seçilebilmektedir. Resim 8.20’de görülen yüzeyde çok sayıda krater ve çatlak bulunmaktadır. Bu yüzey, ortalama yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde BD sonrası en kötü yüzeydir. SEM fotoğrafları kıyaslandığında LIİ_AR_BD yüzeyinin, mikro çatlak ve yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi yüzey tamlığına sahip olduğu görülmektedir.

EK 1’de işparçalarının ana işleme sonrası EDS analizi sonuçları görülmektedir. Her bir tabloda analizin alındığı yüzey fotoğrafı, EDS sonuç grafiği ve rastlanılan elementlerin ağırlıkça atomik yüzde bilgileri gösterilmektedir. Tablolar incelendiğinde, titanyum elementinin tamamında en yüksek oranda bulunduğu görülmektedir. Titanyumdan sonra sırasıyla alüminyum ve vanadyum elementleri beklendiği şekilde bulunmuştur. LIİ_N2 işparçalarında oluşan beyaz tabaka yapısında azot elementine rastlanması beklenirken bu durumun EDS analizi sonuçlarına yansımadağı görülmüştür.



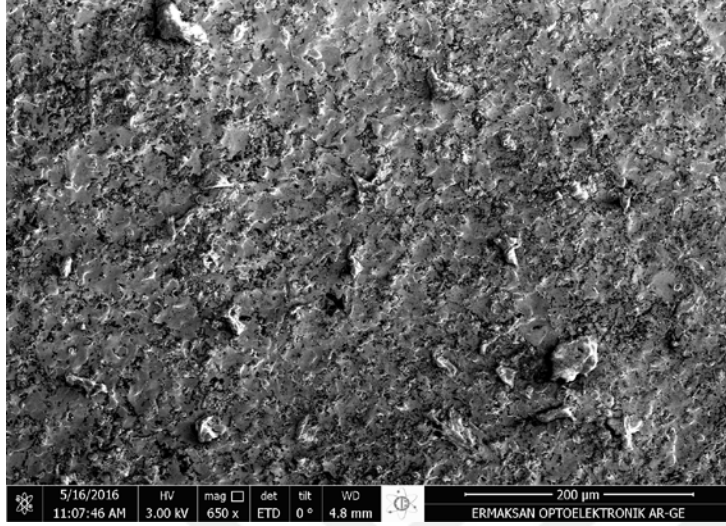
Resim 8.20. LIİ_N2_BD işparçasının 382X büyütmede SEM fotoğrafı



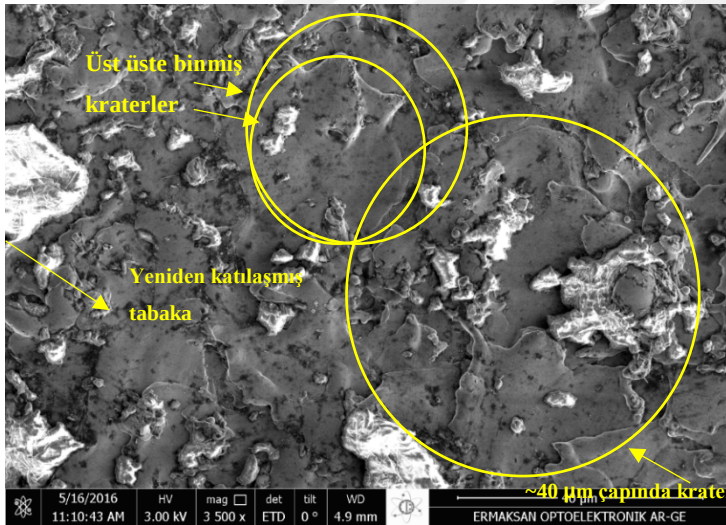
Resim 8.21. LIİ_AR_BD işparçasının 302X büyütmede SEM fotoğrafı

Resim 8.22-25'deki SEM fotoğraflarında, TEEİ ile kesilmiş yüzeylerin 650X, 3 500X ve 20 000X büyütmede mikro fotoğrafları görülmektedir. Resim 8.22 incelendiğinde yüzeyde ergiyip katılaşıp oluşmuş birçok yüzey kusuru bulunmaktadır. Resim 8.23'da sunulan SEM fotoğrafında tek paso TEEİ sonrası yüzeyde ergiyip damla formunda katılaşıp metal parçacıkları, çok sayıda mikro çatlak ve krater görülmektedir. Benzer kusurlar Resim 8.24-25 ile sunulan SEM fotoğraflarında da görülmekte ancak daha az olduğu dikkat çekmektedir. TEEİ_1P işparçası yüzeyinde üst üste binmiş kraterler görülmektedir. Ayrıca TEEİ_1P işparçası yüzeyinde yaklaşık 40 µm, TEEİ_5P işparçası yüzeyinde ise ortalama yaklaşık 12

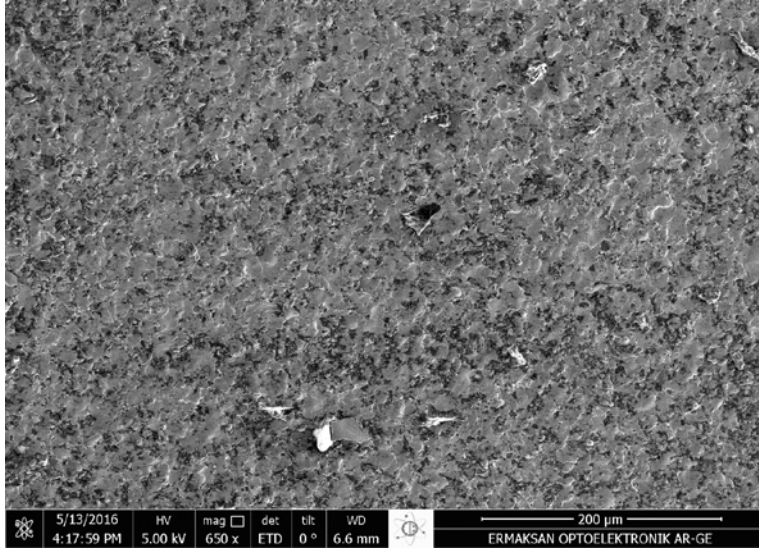
μm çapında kraterler görülmüştür. Bu durumun, kullanılan işleme akımının 2 A değerine kadar düşebildiği çoklu paso ile işlemenin sonucu elde edildiği düşünülmektedir.



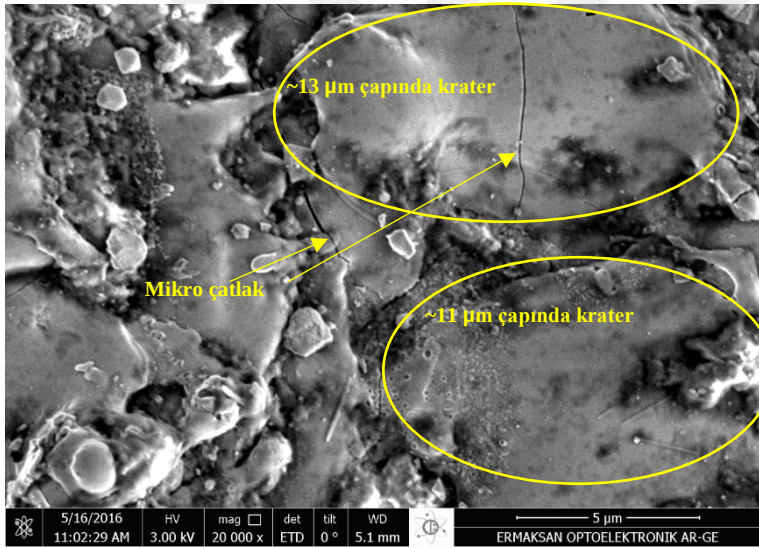
Resim 8.22. TEEİ_1P işparçasının 650X büyütmede SEM fotoğrafı



Resim 8.23. TEEİ_1P işparçasının 3 500X büyütmede SEM fotoğrafı

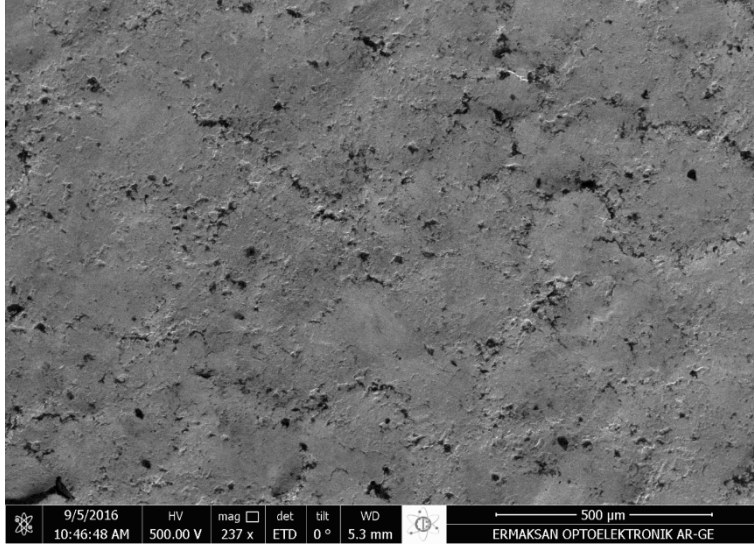


Resim 8.24. TEEİ_5P işparçasının 650X büyütmede SEM fotoğrafı

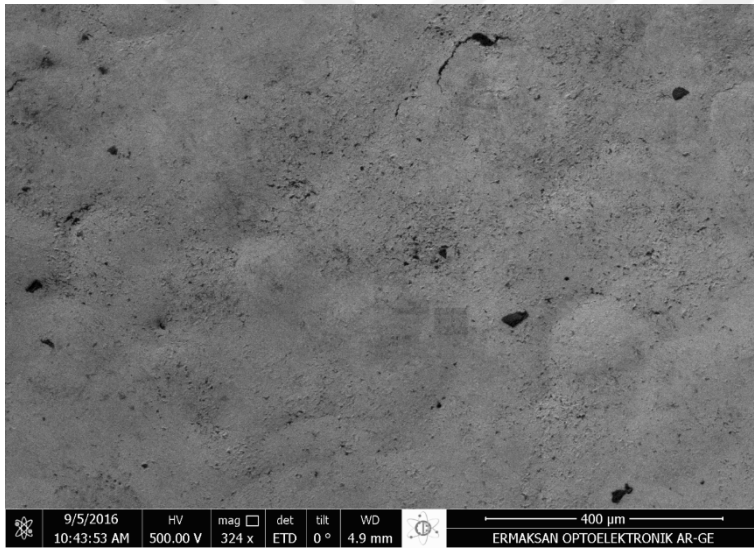


Resim 8.25. TEEİ_5P işparçasının 20 000X büyütmede SEM fotoğrafı

Resim 8.26-27’de sırasıyla TEEİ_1P_BD ve TEEİ_5P_BD işparçalarına ait SEM fotoğrafları görülmektedir. Görseller incelendiğinde BD sonrasında daha düz bir yüzey topografyası sağladığı görülmektedir. Her iki görselde de bilyaların etkisi ile oluşan çukur ve tepeler bulunmaktadır. Yüzey pürüzlülükleri açısından değerlendirildiğinde TEEİ_5P_BD işparçasının yüzey pürüzlülüğü TEEİ_1P_BD’ye kıyasla daha düşüktür. Ancak TEEİ_5P_BD işparçasında yüzey pürüzlülüğü ana işleme sonrasına göre artmıştır.



Resim 8.26. TEEİ_1P_BD işparçasının 237X büyütmede SEM fotoğrafı



Resim 8.27. TEEİ_5P_BD işparçasının 324X büyütmede SEM fotoğrafı

EK 1’de görülen altı EDS analizinde, işparçası yapısında bulunmayan Cu ve Zn elementlerine rastlanmıştır. Cu ve Zn elementleri TEEİ işparçalarının yüzeyinde bulunmuştur. TEEİ’de gerçekleşen boşalımın sonucu işparçasının yanı sıra tel elektrotta da ergime ve buharlaşma yoluyla aşınma gerçekleşmektedir. Böylelikle tel elektrotta ait elementlerin yüzeyde bulunması işleme mekanizmasının doğal bir sonucudur. Beş paso ile işlemede toplamda ağırlıkça % 1,86 oranında, tek paso ile işlemede ise ağırlıkça % 5,2 oranında tel elektrotta ait elementler bulunmuştur. Beş paso işlemede, kullanılan tel elektrot elementlerinin yüzeyde bulunmasının oranı tek paso işlemeye kıyasla daha düşüktür. Bu durumun nedeninin hem daha düşük işleme akımlarının kullanılmasının hem de her çoklu

paso işleminde bir önceki işlemede meydana gelen yüzey kusurlarının giderilmesinin sonucu olduğu düşünülmektedir.



9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Tez çalışmasında, alışılmamış imal usulleri kullanılarak Ti6Al4V işparçaları işlenmiştir. İşlenmiş yüzeylerde yüzey tamlığı incelenmiştir. ASJİ, LIİ ve TEEİ yöntemleri seçilen alışılmamış imal usulleridir. Bu yöntemlerle elde edilen yüzeyler ayrıca frezeleme yöntemi ile işlenmiş işparçaları yüzeyleri ile kıyaslanmıştır. ASJİ yönteminde yüksek su basıncı, LIİ yönteminde yüksek lazer gücü ile birlikte yüksek basınçlı yardımcı gazlar, TEEİ yönteminde ise minimum hasar jeneratörüne ve çoklu paso kabiliyetine sahip tezgah kullanılmıştır. Ana işleme sonrası işparçaları yüzeylerine ikincil işlem olarak BD uygulanmıştır. Ana işleme ve ikincil işlem yapılmış yüzeylerde, yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve mikro yapı sonuçları incelenerek sonuçlar ve öneriler listelenmiştir.

Ana işleme sonrası, kullanılan işleme yöntemine bağlı olarak yüzeylerde karakteristik özellikler oluşmaktadır. ASJİ ve LIİ işparçalarında benzer şekilde, işlenmiş yüzeylerde işleme çizgileri ve yüzey dalgaları görülmüştür. ASJİ yönteminde göreceli olarak daha yavaş olan kesme ilerlemesi hızı ile yüzeyin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri % 36 oranında daha iyi elde edilmiştir. Ayrıca kesilmiş yüzeylerin gözle muayenesi yapıldığında hızlı kesim parametreleri ile kesilen yüzeylerde yüzey bozuklukları daha belirgin biçimde görülebilmektedir. Ayrıca LIİ’de yardımcı gaz olarak azot kullanıldığında yüzeyde sararma meydana gelmiştir. LIİ_AR işparçalarında ortalama yüzey pürüzlülüğü hemen hemen LIİ_N2 işparçalarının % 50’si civarındadır. LIİ ile kesimi yapılan iki işparçası arasında meydana gelen bu farklılığın kullanılan yardımcı gazın etkisi nedeniyle olduğu düşünölmektedir. TEEİ işparçalarında ise oksitlenmeye bağlı mavi renklenme oluştuğu görülmüştür. TEEİ yönteminde işleme yüzeyinde oksitlenme genellikle görülebilen bir durumdur [61]. TEEİ işparçalarında meydana gelen renk değişiminin işleme kanalında meydana gelen oksitlenmenin bir sonucu olduğu düşünölmektedir. Frezelenmiş işparçalarında ise diğer işparçalarına kıyasla daha parlak ve pürüzsüz yüzeyler elde edilmiştir. İşleme yöntemine özgü yüzey karakteristiklerinin ikincil işlemden sonra büyük ölçüde kaybolduğu görülmüştür. BD’nin etkisi ile yeni bir yüzey oluşmaktadır.

İşparçaları ana işlem sonrasında yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde en iyi yüzeyler, frezeleme ve çoklu paso uygulanan TEEİ işparçalarından ölçülmüştür. TEEİ’de çoklu pasonun etkisi yüzey pürüzlülüğünde önemli bir farklılık oluşturarak tek paso işlemeye kıyasla 3 kat daha iyi sonuç vermiştir. TEEİ_5P işparçalarından ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ise hemen hemen frezeleme ile işlenmiş işparçasının yüzey pürüzlülüğü ile yaklaşık değerlerde olduğu görülmektedir. Ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüklerinin ($R_{a,FREZELEME}=0,612 \mu m$, $R_{a,TEEİ_5P}=0,786 \mu m$) Şekil 4.1’de gösterilen özel uygulamalarda elde edilen yüzey pürüzlülüğü aralığında olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca bu iki yüzey pürüzlülük değerlerinin, Şekil 4.1’de hassas bitirme için verilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri arasında olduğu da görülmüştür. ASJİ yüzeylerinin pürüzlülük değerlerinin ise standart frezelenmiş yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülüğü aralık değerlerinde olduğu yine Şekil 4.1’den anlaşılmaktadır.

Frezeleme yöntemi ile elde edilmiş yüzeyler en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğüne sahipken, BD sonrasında frezelenmiş işparçalarının ortalama yüzey pürüzlülüğünün % 151 oranında artış gösterdiği hesaplanmıştır.

BD sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğü ASJİ_P1 işparçalarında % 27 oranında iyileşmiş, ASJİ_P2 ile kesim sonrası % 20 oranında kötüleşmiştir. LIİ_N2 ve LIİ_AR işparçalarının yüzey pürüzlülüğünde % 21 oranında iyileşme gerçekleşmiştir. TEEİ_1P işparçalarında ortalama yüzey pürüzlülüğü % 28 oranında azalırken, TEEİ_5P işparçalarında ise % 77 oranında ortalama yüzey pürüzlülüğü artış göstermiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, BD uygulanan işparçaları yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülüğünün, BD öncesi $1,35 \mu m$ ve altında yüzey pürüzlülüğüne sahip işparçalarında arttığı, $1,35 \mu m$ üzerindeki yüzeylerde işparçalarında ise azaldığı görülmüştür. BD’nin asıl fonksiyonunun yüzey ve altında bası gerilmesi oluşturarak mekanik özellikleri iyileştirmek olmasının yanında çok kötü yüzeylerin de pürüzlülüklerini azaltma yönünde pozitif bir etkisinin olduğu sonuçlardan anlaşılmıştır.

Ana işleme sonrası kesim yüzeyi kenarından alınan mikro fotoğraflar incelendiğinde yüzeyde birbirinden farklı yüzey tamlığı değişimleri gözlenmiştir. ASJİ yönteminin mekanik bir işleme yöntemi olmasından ötürü, yüzey ve altında mikro yapıda plastik deformasyon bölgesi oluşmuştur. LIİ, yoğun ısı enerjisi ile ısıtılmış bir bölge oluşturmuştur. Ayrıca azotun yüksek sıcaklıklarda işparçası ile reaksiyona girmesinden ötürü beyaz tabaka (TiN)

görülmüştür. TEEİ yöntemi ile işleme sonrası optik mikroskop fotoğraflarında yüzey kenarında belirgin bir ısıl etkilenmiş bölge katmanı görülmezken sadece beyaz tabaka görülmüştür. Ölçülen beyaz tabaka kalınlığı açısından geleneksel tezgahlarla yapılan işlemlerden daha iyi sonuçlar alınmıştır. BD sonucu yüzey kenarlarında farklı kalınlıklarda BD'nin nüfuziyet etkisinin farklı olduğu görülmüştür. BD nüfuziyet etkisinin temelde ısıl ve mekanik işlemeye göre farklılık olduğu net biçimde görülmüştür. Isıl işlemeye elde edilen nüfuziyet derinliğinin mekanik işlemeye elde edilenlere göre daha yüksek olarak ölçülmüştür. Plastik deformasyon oluşan bölgede deformasyon sertleşmesi gerçekleşerek bölgede bulunan dislokasyon miktarında artış beklendiğinden, dislokasyon miktarı arttıkça malzeme pekleşerek dislokasyonlar birbirlerini kilitlemekte ve mekanik etkilere daha kapalı olmaktadır.

Mikro sertlikler incelendiğinde ana işparçası malzemesi mikro sertliğine kıyasla ASJİ_P1 işparçalarında % 2, ASJİ_P2 işparçalarında ise % 3 oranında bir artış görülmektedir. BD sonrası sırasıyla % 3 ve % 7 oranında fazladan arttığı tespit edilmiştir. ASJİ_P2 işparçalarının kesiminde ilerleme hızının daha yavaş olması nedeniyle, işleme kanalı aşındırıcı su jeti ile daha fazla temas halinde olmaktadır. Böylelikle yüzey katmanlarında gerçekleşen plastik deformasyon daha fazla olmuştur. BD nüfuziyet derinliği ASJ_P2' de daha düşük elde edilmesi daha dar alanda plastik deformasyonu yoğunlaştırarak sertlikteki bu artışı açıklamaktadır. Bu sonuçlar frezeleme sonuçları ile benzerlik göstermektedir. LIİ_N2 işparçası yüzey kenarlarının ana malzemenin mikro sertliğine göre kullanılan azot gazının etkisiyle % 100'üne kadar arttığı görülmektedir. BD sonrası ise bu sertlik değerinde % 32 oranında düşüş görülmüştür. TEEİ işparçalarının mikro sertliğinde ana işparçası sertliğine göre, tek paso işlemede % 4,7, beş paso işlemede ise % 9,5 oranında artış olur iken BD sonrası sırasıyla % 5 ve % 8 oranında ekstra bir artış olmuştur. Azot yardımıyla LIİ'de BD'nin beyaz tabakayı uzaklaştırmada etkisi sınırlı kalırken argon gazı yardımıyla işleme ve TEEİ işlemlerde BD'nin etkin olduğu görülmüştür.

İşparçası yüzeylerinin SEM fotoğrafları ile ana işleme ve BD'nin yüzeylere etkisi incelenmiştir. ASJİ işparçalarında yüzeyde plastik deformasyona bağlı şekil değişimleri, aşındırıcı tanecikler, aşınma izleri görülmüştür. LIİ ve TEEİ işparçalarının ergiyip katılaştıran yüzeyleri SEM ile görüntülenmiştir. Bu işparçalarında işleme kanalının anlık olarak ergiyip katılaşmasıyla yüzeyde mikro çatlaklar, kraterler, damla şeklinde katılaştıran metal parçacıklar görülmüştür. Ayrıca LIİ_N2 işparçası yüzeyinde iğnemsî dendritik yapıların varlığı

fotoğraflanmıştır. BD sonrasında tüm yüzeylerin plastik deformasyona uğrayarak tepe ve çukurlardan oluşan pürüzlü bir topografyaya sahip olduğu görülmüştür.

İşparçaları yüzeyleri ayrıca EDS ile analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda Ti, Al, V elementleri beklendiği şekilde malzeme yapısında görülmektedir. TEEİ işparçaları yüzeylerinde Cu ve Zn elementlerine rastlanmıştır. LIİ işparçalarında oluşan beyaz tabakanın yapısında TiN çökeltisi nedeniyle azot elementine rastlanması beklenirken, bu durumun EDS analizine yansımadağı görülmüştür.

Yukarıdaki bilgiler ışığında ASJİ işparçalarının yüzey tamlığının LIİ işparçalarına göre daha iyi olduğu anlaşılmıştır. BD sonrasında bile LIİ işparçalarının yüzeylerinde işleme çizgilerinin kaybolmadığı, ısı etkilenmiş tabakanın tamamıyla giderilemediği tespit edilmiştir. TEEİ işleminde ise işparçalarının kesim kenarlarında beyaz tabaka oluşmuş ancak belirgin bir ısı etkilenmiş bölge görülememiştir. Bu durumun, kullanılan tezgâhın jeneratör teknolojisinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. TEEİ ile beş pasoda kesilmiş işparçasında kabul edilir seviyede mikro sertlikte artış olmuş ve BD ile istenmeyen düşük kalınlıklı beyaz tabaka giderilmiştir. Bununla birlikte ısı işleme sonrası yüzey ve altında oluşan çeki gerilmelerinin BD ile daha düşük kuvvetlerle bası gerilmelerine dönüştürülmesi sayesinde daha derin bir nüfuziyet derinliği elde edilmiştir. Bu sonuçlar alışılmamış imalat yöntemleri arasında çoklu paso ile TEEİ yönteminin en iyi yüzey tamlığı sonuçlarına sahip olduğunu göstermiştir. TEEİ yönteminin Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde geleneksel imal usullerine alternatif olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

9.2. Öneriler

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda:

- Tez çalışmasında işparçalarının yorulma davranışı incelenmediğinden, devam çalışması olarak yorulma testlerinin yapılması yüzey tamlığının tam anlamıyla değerlendirilmesi,
- Lazer Işını ile Dövme ve Su Jeti ile Dövme gibi farklı ikincil işlemler gerçekleştirildikten sonra çalışma sonuçları ile karşılaştırılması,
- Çalışmanın, yüzey tamlığı sonuçları diğer alışılmamış imal usullerine göre daha iyi olan Elektro Kimyasal İşleme ile tekrarlanarak sonuçların kıyaslanması,

- Çalışma kapsamının parametre çalışması planlanarak genişletilmesiyle, Ti6Al4V alaşımının alışılmamış imal usulleri ile işlenmesinde yaygınlığının artırılabilmesi,
- LIİ yönteminde kullanılan yardımcı gazların helyum gazı ile denenmesi,
- Çalışmada düz yüzeyler ile çalışılmış olup karmaşık geometrilerde BD'nin etkilerinin araştırılması,
- BD parametreleri ve işparçası yüzey özelliklerine göre BD sonrasında elde edilebilecek en iyi yüzey tamlığı sonuçlarının elde edilebileceği bir matematik model oluşturulması, önerilmektedir.





KAYNAKLAR

1. Vasanth, S., Muthuramalingam, T., Vinothkumar, P., Geethapriyan, T. and Murali, G. (2016). Performance Analysis of Process Parameters on Machining Titanium (Ti-6Al-4V) Alloy Using Abrasive Water Jet Machining Process. *Procedia CIRP*, 46, 139-142.
2. Sivaprakasam, P., Hariharan, P. and Gowri, S. (2014). Modeling and Analysis of Micro-WEDM Process of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Using Response Surface Approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 17(4), 227-235.
3. Almeida, I. A., de Rossi, W, Lima, M. S. F., Berretta, J. R., Nogueira, G. E. C., Wetter, N. U., and Vieira Jr., N. D. (2006). Optimization of Titanium Cutting by Factorial Analysis of the Pulsed Nd:YAG Laser Parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3), 105-110.
4. Yang, X., and Richard, L. C. (1999). Machining Titanium and Its Alloys. *Machining Science and Technology*, 3(1), 107-139.
5. Fowler, G., Pashby, I. R. and Shipway, P. H. (2009) The Effect of Particle Hardness and Shape When Abrasive Water Jet Milling Titanium Alloy Ti6Al4V. *Wear*, 266(7-8) 613-620.
6. Maros, Z. (2013). Energy Approach of the Taper at Abrasive Waterjet Cutting. *Production Processes and Systems*, 6(1) 89-96.
7. Axinte, D. A., Karpuschewski, B., Kong, M. C., Beaucamp, A. T., Anwar, S., Miller, D. and Petzel, M. (2014). High Energy Fluid Jet Machining (HEFJet-Mach): From scientific and technological advances to niche industrial applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(2) 751-771.
8. El-Hofy, H. (2005). *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes* (First edition). United States of America: McGraw-Hill, 15-156.
9. Klocke, F., Welling, D. and Dieckmann, J. (2011). Comparison of Grinding and Wire EDM Concerning Fatigue Strength and Surface Integrity of Machined Ti6Al4V Components. *Procedia Engineering*, 19, 184-189.
10. Astakhov, V. P., Davim J. P. (Editor). (2010). *Surface Integrity in Machining*, London:, Springer, 1-35.
11. Miao, H. Y., Demers, D., Larose, S., Perron, C. and Lévesque, M. (2010). Experimental Study of Shot Peening and Stress Peen Forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 210(15), 2089-2102.
12. Ramulu, M., Kunaporn, S., Arola, D., Hashish, M. and Hopkins, J. (1999). Waterjet Machining and Peening of Metals. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 122(1), 90-95.

13. Seo, Y. W., Ramulu, M. and Kim, D., (2003). Machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by abrasive waterjets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*,. 217(12), 1709-1721.
14. Fowler, G., Shipway, P. H. and Pashby, I. R. (2005). Abrasive Water-Jet Controlled Depth Milling of Ti6Al4V Alloy – an Investigation of the Role of Jet-Workpiece Traverse Speed and Abrasive Grit Size on the Characteristics of the Milled Material. *Journal of Materials Processing Technology*, 161(3), 407-414.
15. Hascalik, A., Çaydaş, U. and Gürün, H. (2007). Effect of Traverse Speed on Abrasive Waterjet Machining of Ti-6Al-4V Alloy. *Materials & Design*,. 28(6), 1953-1957.
16. Boud, F., Carpenter, C., Folkes, J. and Shipway, P. H. (2010) Abrasive Waterjet Cutting of a Titanium Alloy: The Influence of Abrasive Morphology and Mechanical Properties on Workpiece Grit Embedment and Cut Quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2197-2205.
17. Coşansu, G. (2010), *Aşındırıcı Su Jeti İle Kesmede Kolemanit Tozunun Aşındırıcı Olarak Kullanılmasının Deneysel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 56-87.
18. Zhang, S., Wu, Y. and Wang, Y. (2011). An Investigation of Surface Quality Cut by Abrasive Water Jet. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 5, 166-177.
19. Chien, W. T. and Hung, W.C. (2006). Investigation on the Predictive Model for Burr in Laser Cutting Titanium Alloy. *Materials Science Forum*, 526, 133-138.
20. Scintilla L. D., Sorgente, D. and Tricarico L. (2011). Experimental Investigation on Fiber Laser Cutting of Ti6Al4V Thin Sheet. *Advanced Materials Research*, 264-265, 1281-1286.
21. Pandey, A. K. and Dubey, A. K. (2012). Simultaneous Optimization of Multiple Quality Characteristics in Laser Cutting of Titanium Alloy Sheet. *Optics & Laser Technology*, 44(6), 1858-1865.
22. Astarita A., Genna, S., Leone, C., Minutolo, F. M. C., Paradiso, V. and Squillace A. (2013). Ti-6Al-4V Cutting by 100W Fibre Laser in Both CW and Modulated Regime. *Key Engineering Materials*,. 554-557, 1835-1844.
23. Scintilla, L. D., Palumbo G., Sorgente, D. and Tricarico, L. (2013). Fiber Laser Cutting of Ti6Al4V Sheets for Subsequent Welding Operations: Effect of Cutting Parameters on Butt Joints Mechanical Properties and Strain Behaviour. *Materials & Design*, 47, 300-308.
24. Scintilla, L.D. and Tricarico L. (2013). Fusion Cutting of Aluminum, Magnesium, and Titanium Alloys Using High-Power Fiber Laser. *Optical Engineering*, 52(7), 076115-1, 076115-7.

25. Yan, M. T. and Lai, Y. P. (2007). Surface Quality Improvement of Wire-EDM Using a Fine-Finish Power Supply. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(11), 1686-1694.
26. Klocke, F. and König, W. (2008), *Fertigungsverfahren 1.*(Achte Auflage). Heidelberg: Springer-Verlag, 329-330.
27. Aspinwall, D. K., Soo, S. L., Berrisford, A. E. and Walder, G. (2008). Workpiece Surface Roughness and Integrity After WEDM of Ti-6Al-4V and Inconel 718 Using Minimum Damage Generator Technology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 187-190.
28. Alias, A., Abdullah B. and Abbas, N. M. (2012). Influence of Machine Feed Rate in WEDM of Titanium Ti-6Al-4V with Constant Current (6A) Using Brass Wire. *Procedia Engineering*, 41, 1806-1811.
29. Ghodsiyeh, D., Davoudinejad, A., Hashemzadeh, M., Hosseinienezhad, N. and Golshan, A. (2012). Optimizing Finishing Process in Wedming of Titanium Alloy (Ti6Al4V) by Zinc Coated Brass Wire Based on Response Surface Methodology. *Indian Journal of Science and Technology*, 5(10), 3365-3377.
30. Nourbakhsh, F., Nourbakhsha, F., Rajurkarb, K. P., Malshec, A. P. and Cao, J. (2013). Wire Electro-Discharge Machining of Titanium Alloy. *Procedia CIRP*, 5, 13-18.
31. Prasad, A. V. S. R., Ramji, K. and Datta, G. L. (2014). An Experimental Study of Wire EDM on Ti-6Al-4V Alloy. *Procedia Materials Science*, 5, 2567-2576.
32. Nandakumar, C., Vickram, K. and Mohan, B. (2015). Effect of Surface Roughness on Titanium Alloy in CNC-WEDM Using RSM. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 7, 101-105.
33. Gong, Y., Sun, Y., Wen, X., Wang, C. and Gao, Q. (2017). Experimental Study on Surface Integrity of Ti-6Al-4V Machined by LS-WEDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1), 197-207.
34. Ahmed, A.A., Mhaede, M., Wollmann, M. and Wagner L. (2016). Effect of Micro Shot Peening on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Two Microstructure Ti-6Al-4V Alloy. *Applied Surface Science*, 363, 50-58.
35. Jiang, X.P., Man C. S., Shepard, M. J. and Zhai, T. (2007). Effects of Shot-Peening and Re-Shot-Peening on Four-Point Bend Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 468-470, 137-143.
36. Liu, Y.G. and Li, M.Q. (2016) Stress-Induced Twinning of Nanocrystalline Hexagonal Close-Packed Titanium in Ti-6Al-4V. *Materials Letters*, 180, 47-50.
37. Pant, B. K., Pavan A. H. V., Prakash R. V. and Kamaraj M. (2016). Effect of Laser Peening and Shot Peening on Fatigue Striations During FCGR Study of Ti6Al4V. *International Journal of Fatigue*, 93, 38-50.

38. ASM International. (2000). *Titanium: A Technical Guide*, (Second Edition). ASM International: Matthew J. D., United States: Ohio, 79-85.
39. ASM International. (1994). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. Ohio ASM International: Boyer, R. G., United States: Ohio, 483-633.
40. Pederson, R. (2002). *Microstructure and Phase Transformation of Ti-6Al-4V*, Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Engineering Materials, Sweden: Luleå, 4-6.
41. Corona, A. (2011). *Characterization of the Relationship Between the Microstructure and Tensile Strength of Annealed Ti-6Al-4V*, Senior Project Report, Material Engineering Department California Polytechnic State University, United States: California, 1-3.
42. Meetham, G. W. (Editor). (1981). *The Development of Gas Turbine Materials*, London: Applied Science Publishers Ltd, 16-19.
43. ASM International. (1994). *ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering*, ASM International, Reidenbach. F., United States: Ohio, 278-301.
44. Field, M. and Kahles, J.F. (1964). *The Surface Integrity of Machined and Ground High Strength Steels*, DMIC, Report 210, India: Delhi 54-77.
45. Zheng, X., Chen, L., Siores, E., Steele, P. and Crothers, P. (2002). Shape-Machining of Aerospace Composite Components Using Non-Traditional Abrasive Waterjet Cutting Process. *International Centre for Mechanical Sciences*, 437, 507-514.
46. Rao, R.V. (2011). *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes*. London: Springer-Verlag London, 178-191.
47. Momber, A.W. and Kovacevic, R. (1998). *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. (First Edition), London: Springer-Verlag London, 20-281.
48. Lemma, E., Deam, R. and Chen, L. (2005). *Maximum Depth of Cut and Mechanics of Erosion in AWJ Oscillation Cutting of Ductile Materials*. *Journal of Materials Processing Technology*, 160(2), 188-197.
49. Dahotre, N. B. and Harimkar, S. P. (2008). *Laser Fabrication and Machining of Materials*. (First Edition), United States of America: Springer US, 34-65.
50. König, W. (2007). *Fertigungsverfahren 3*. (First Edition). Heidelberg: Springer-Verlag, 3-304.
51. Shanjin, L. and Yang, W. (2006). *An Investigation of Pulsed Laser Cutting of Titanium Alloy Sheet*. *Optics and Lasers in Engineering*, 44(10), 1067-1077.
52. Tosun, N. and Çogun, C. (2003) *An Investigation on Wire Wear in WEDM*. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(3), 273-278.

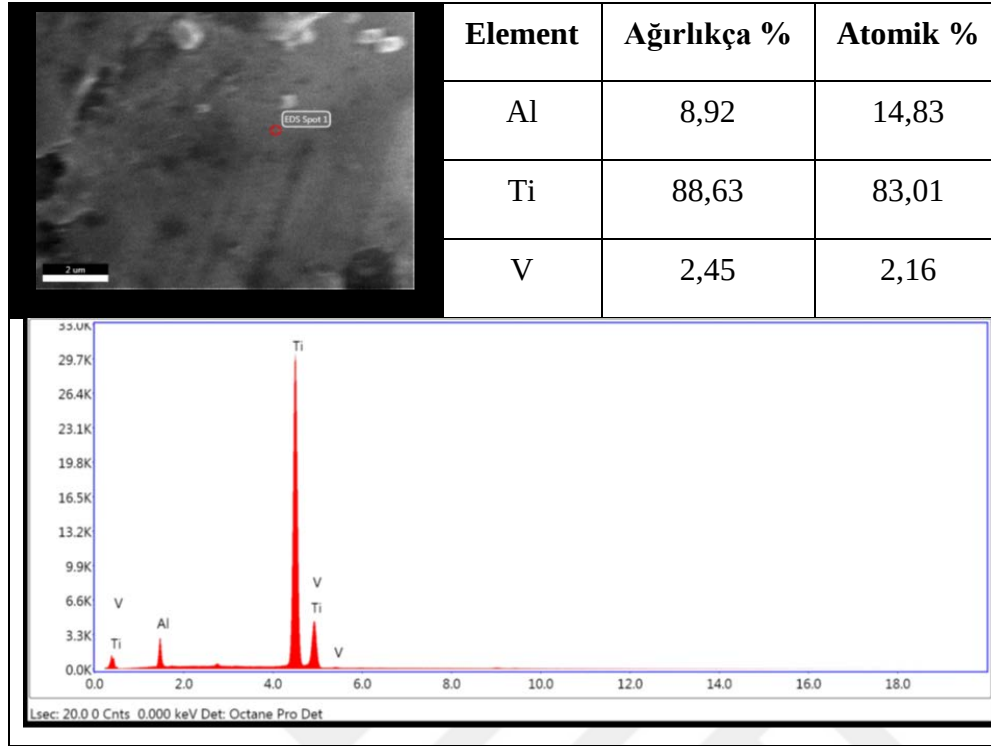
53. Doğan, M., (2010). *Inconel 718 Malzemesinin Tel Erozyon Tezgâhında İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Performansına Etkisinin DeneySEL Analizi ve Optimum Parametrelerinin Tayini*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6.
54. Küçüktürk, G., (2008). *Elektro erozyon ile iletken olmayan seramiklerin işlenmesi için yöntem geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi.Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 26-30.
55. Carek, G.A., (1987). Shot Peening for Ti- 6Al-4V Alloy Compressor Blades; NASA, NASA TP-2711. *United States: Ohio*, 1-7.
56. Bae, H. (2011). *Experimental Study of Shot Peening Process and its Effects on High Cycle Fatigue Aero Space Materials* (Doctoral dissertation, University of Washington, 2011). Dissertation Abstracts International, 279, 3452680.
57. Başaran, A. (2007). *Toz Metal Parçalara Isıl ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 40-71.
58. Hetram, M., Singh L. and Om, H. (2015). Shot Peening Effects on Material Properties: A Review. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(12), 480-484.
59. Kobayashi, M., Matsui T. and Murakami Y. (1998). Mechanism of Creation of Compressive Residual Stress by Shot Peening. *International Journal of Fatigue*, 20(5), 351-357.
60. Mouralova, K., Matousek, R., Kovar, J., Mach, J., Klakurkova, L. and Bednar J. (2016). Analyzing the Surface Layer After WEDM Depending on the Parameters of a Machine for the 16MnCr5 Steel. *Measurement*, 94, 771-779.
61. Ludian, T. and Wagner, L. (2008). Mechanical Surface Treatments for Improving Fatigue Behavior in Titanium Alloys. *Advances in Materials Science*, 8(2), 44-52.
62. Jianglong, L., Qiquan, L. and Zhirong, Z. (1993). Laser Gas Alloying of Titanium Alloy with Nitrogen. *Surface and Coatings Technology*, 57(2), 191-195.



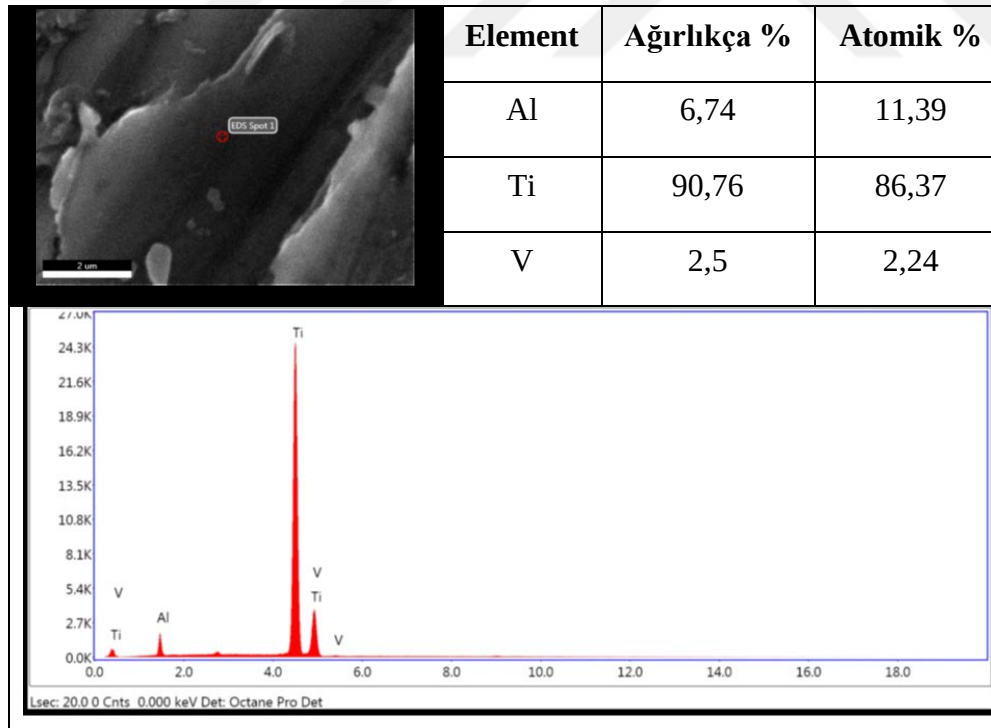


EKLER

EK-1. EDS analiz sonuçları

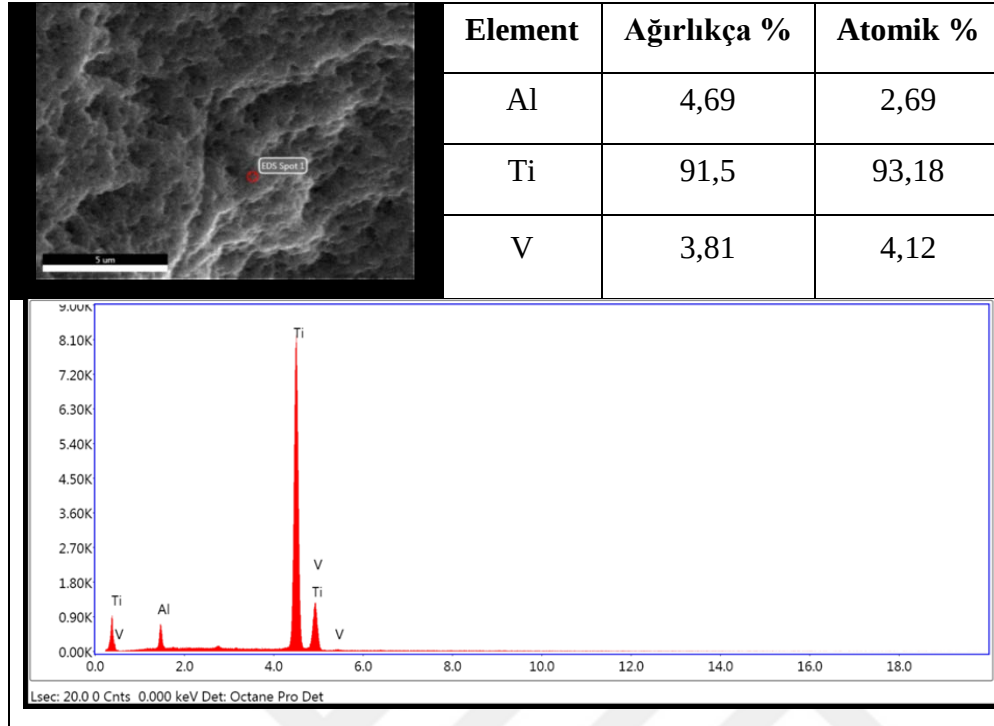


Şekil 1.1. ASJİ_P1 işparçasının EDS analiz sonucu

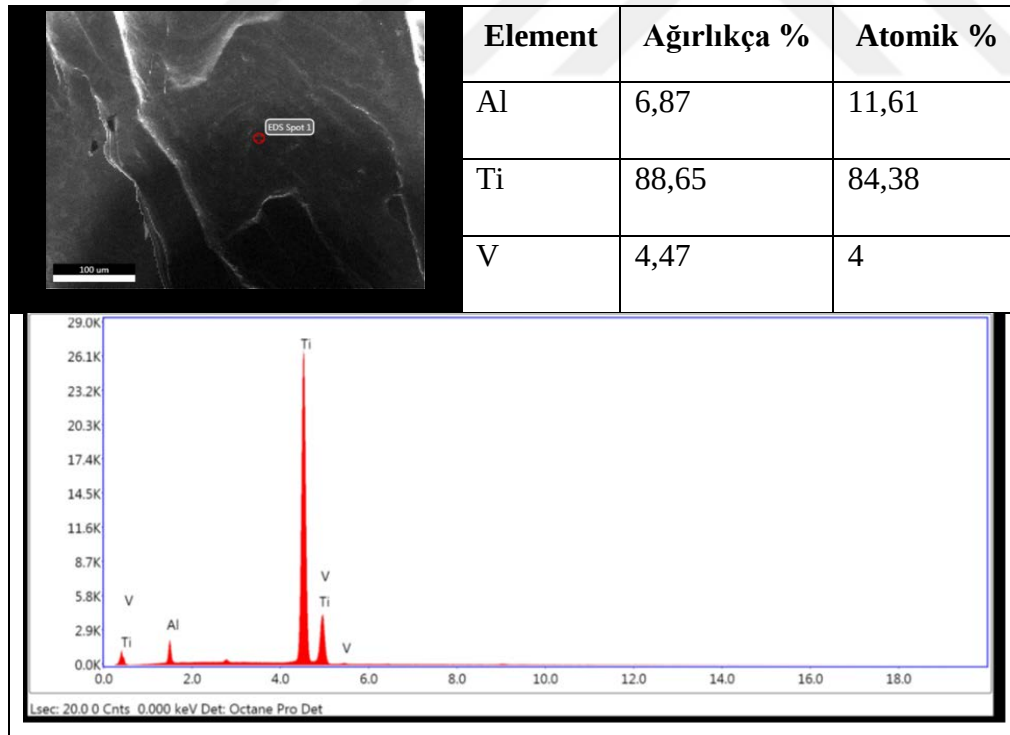


Şekil 1.2. ASJİ_P2 işparçasının EDS analiz sonucu

EK-1. (devam) EDS analiz sonuçları

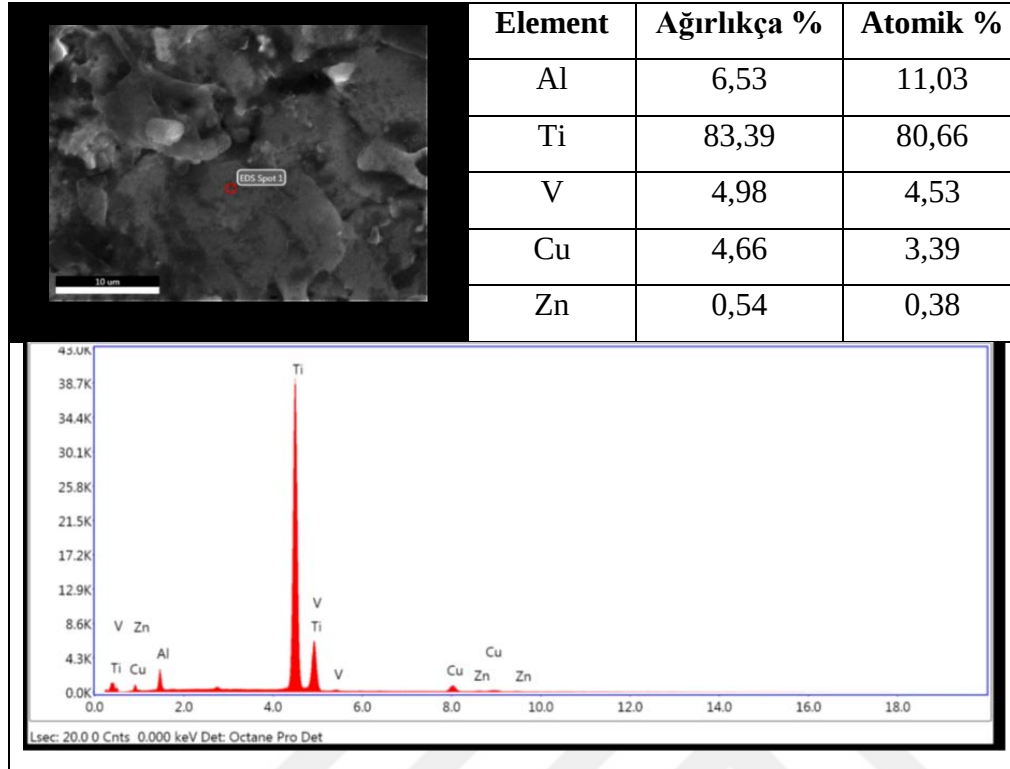


Şekil 1.3. LIİ_N2 işparçasının EDS analiz sonucu

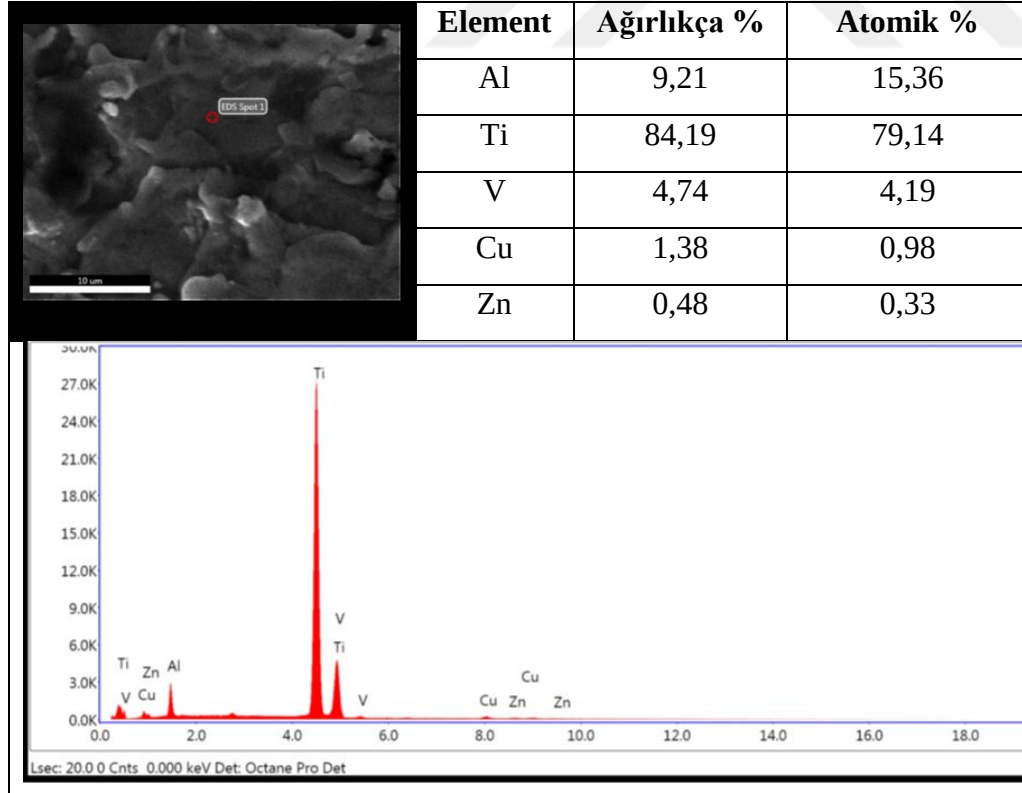


Şekil 1.4 LIİ_AR işparçasının EDS analiz sonucu

EK-1. (devam) EDS analiz sonuçları



Şekil 1.5. TEEİ_1P işparçasının EDS analiz sonucu



Şekil 1.6. TEEİ_5P işparçasının EDS analiz sonucu

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAYA, Duran
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.01.1988, Çorum
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (537) 670 95 69
 e-mail : durankaya12@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Makine Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi /Makine Mühendisliği	2012
Lise	Çorum Eti Lisesi (Y.D.A.)	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	Gazi Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi	TTO Uzmanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Kaya, D., Küçüktürk, G., Özerkan, H. B., (2016). An experimental study of the effect of abrasive water jet and laser beam on the surface integrity, Machine Design, 8(4), 155-158.

Hobiler

Fotoğrafçılık, bilardo, sinema, doğa yürüyüşü



GAZİ GELECEKTİR..