MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Tİ-6AL-4V ALAŞIM TOZLARINDAN ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALAR İÇİN VİBRASYONLU YÜZEY İŞLEM SÜREÇLERİ GELİŞTİRME

NİHAL YAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2023

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Tİ-6AL-4V ALAŞIM TOZLARINDAN ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALAR İÇİN VİBRASYONLU YÜZEY İŞLEM SÜREÇLERİ GELİŞTİRME

NİHAL YAMAN

(523220015)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2023

ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitim sürecimde Marmara Üniversitesi İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarı'nda TÜBİTAK projesi ve akademik çalışmalarda bana çalışma imkânı sunan, hem akademik hem de mesleki tecrübelerinden yararlandığım tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yusuf KAYNAK'a çok teşekkür ederim.

Lisansüstü tez çalışmam süresince İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarı'nda birlikte çalıştığım, her konuda yardımını ve desteğini esirgemeyen Kübra YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman arkamda olan ve bu yolda bana tüm desteklerini veren, bu noktaya gelmemde önemli derecede pay sahibi olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için sağladığı desteklerden dolayı ASELSAN firmasına teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışma, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAPKO) tarafından FYL-2022-10627 proje numarası ile desteklenmiştir. Desteğinden dolayı Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Ağustos, 2023 **Nihal YAMAN**

İÇİNDEKİLER

ÖZET iii

ABSTRACT v

1. GİRİŞ 1

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi ve Sınıflandırılması 3

2.2. Ti-6Al-4V Alaşımı ve Eklemeli İmalat İle Üretilmesi 11

2.3. Eklemeli İmalat Sonrası Kullanılan İkincil İşlemler 22

2.3.1. Mekanik İkincil İşlemler 23

2.3.2. Kimyasal İkincil İşlemler 34

2.3.3. Termal İkincil İşlemler 38

2.4. Vibrasyonlu Yüzey İşlem 41

3. GEREÇ VE YÖNTEM 47

3.1. Deneysel Çalışma ve Düzenekler 47

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 51

4.1. Yüzey Topografyası ve Pürüzlülük 51

4.2. Mikroyapı 56

4.3. Mikrosertlik 61

4.4. XRD Analizi 64

4.5. Aşınma Analizi 65

5. SONUÇLAR 70

ÖZET

Tİ-6Al-4V ALAŞIM TOZLARINDAN ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALAR İÇİN VİBRASYONLU YÜZEY İŞLEM SÜREÇLERİ GELİŞTİRME

Ti-6Al-4V malzemesi, korozyona dayanıklılık, yüksek erime başlangıç noktası, daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı, süneklik ve temel faydalar arasında biyolojik uyumluluk gibi olağanüstü özellikleri sayesinde biyomedikal, havacılık, uzay ve savunma endüstrilerinde yaygın bir şekilde kullanılan bir hafif metaldir. Diğer bir yandan Ti-6Al-4V işlenmesi zor malzemeler sınıfına girmektedir. Bunun sebepleri; yüksek kimyasal reaktivite, düşük termal iletkenlik, yüksek sıcaklıktaki yüksek mukavemet özellikleri, düşük elastikiyet modülüdür. Yüksek kimyasal reaktivitesi, işleme sırasında kesici takıma kaynak yapma eğilimine neden olur. Düşük termal iletkenlik, takım ile iş parçası arasındaki ısı transferini önler ve buna bağlı olarak aşırı ısınan takım olumsuz etkilenir. Yüksek sıcaklıkta mukavemetini koruması ve düşük elastikiyet modülü işlenebilirliğini zorlaştırır. Bu sebeplerle Ti-6Al-4V'nin eklemeli imalat ile üretimi, geleneksel yöntemlere göre avantaj sağlamaktadır. Eklemeli imalatın genel avantajı olan hedeflenen ürünün temel geometrik şekli ve temel malzeme özelliklerinin aynı anda tek bir işlemle elde edilebilen ve düşük kalıntı gerilimi, hızlı üretim hızı ve yüksek enerji verimliliği nedeniyle Ti-6Al-4V malzemesinin eklemeli imalat çeşitlerinden biri olan elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilmesi yaygındır. Ancak elektron ışını ile ergitme yöntemi ile metalik parçaların imalatında karşılaşılan birtakım sorunlar vardır. Bunların başında yüksek yüzey pürüzlülükleri ve porozite yoğunluğu gelmektedir. Bu sorunlar literatürdeki birçok çalışmada ifade edilmiş ve ortaya konulmuş olmasına rağmen bu sorunların çözümüne katkı sunacak çalışmalar sınırlıdır. Bu sorunlar parçaların yüzey ve yüzey altı özellikleri (yüzey bütünlüğü) açısından önem arz etmekte, parçaların mekanik performanslarını önemli derecede etkilemektedirler. Üretilen parçalarda meydana gelen, kabul edilemeyecek ve doğrudan kullanılamayacak derecede kararsız ve kötü yüzey topografisi ile oldukça yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerleri malzemenin doğrudan kullanılmasını sınırlayıcı etkide bulunmaktadır. Bu sebeple EBM yöntemiyle

üretilen Ti-6Al-4V parçalara kazandırılmak istenen özelliklere göre ikincil işlemlerin uygulanmasını gerekir.

Bu tez kapsamında eklemeli imalat çeşitlerinden biri olan elektron ışını ile ergitme yöntemi kullanılarak üretilmiş Tİ-6Al-4V numunelerine, ikincil işlem uygulamalarından biri olan vibrasyon ile yüzey iyileştirme işlemi uygulanacaktır. Vibrasyonlu yüzey işlemi özellikle havacılık endüstrisinde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Ancak eklemeli imalat ile üretilen parçalar üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmalar sınırlı sayıdadır. Vibrasyonlu yüzey işlemin etkisini belirleyen temel parametrelerden biri aşındırıcı medyadır. Aşındırıcı medyanın geometrisi ve boyutlarının değişmesi, medyanın reolojik davranışının değişmesine ve buna bağlı olarak aşındırıcı medyanın iş parçasına uyguladığı kuvvetlerin değişmesine sebep olmaktadır. Bu kapsamda vibrasyon ile yüzey iyileştirme işlemi yapılırken kullanılan aşındırıcıların, farklı geometriler ve boyutlarda olmasının elektron ışını ile ergitme yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarının yüzey bütünlüğüne etkisinin deneysel ve ampirik yaklaşımlarla incelenip, sonuçlarının ortaya konması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektron Demeti İle Ergitme, Ti-6Al-4V, Vibrasyonlu Yüzey İşlem, Yüzey Bütünlüğü

ABSTRACT

DEVELOPİNG VİBRATORY SURFACE FİNİSHİNG PROCESSES TREATMENT FOR ELECTRON BEAM MELTED Tİ-6AL-4V ALLOY POWDERS

Ti-6Al-4V material is a light metal widely used in the biomedical, aerospace, and defense industries due to its outstanding properties such as corrosion resistance, high melting starting point, higher strength-to-weight ratio, ductility and biocompatibility among key benefits. On the other hand, Ti-6Al-4V is in the class of materials that are difficult to process because of the high chemical reactivity, low thermal conductivity, high strength properties at high temperature, low modulus of elasticity. Its high chemical reactivity causes a tendency to weld to the cutting tool during machining. Low thermal conductivity prevents heat transfer between the tool and the work piece, and consequently the overheated tool is adversely affected. Its high-temperature strength and low modulus of elasticity make traceability difficult. For these reasons, the production of Ti-6Al-4V by additive manufacturing provides an advantage over traditional methods. It is common to produce Ti-6Al-4V material by electron beam melting method, which is one of the most preferred additive manufacturing types. Additive manufacturing offers the advantages of obtaining the targeted geometric shape and basic material properties with a single operation at the same time, low residual stress, high production speed and high energy efficiency. However, there are some problems encountered in the manufacture of metallic parts by the electron beam melting method. These include high surface roughness and porosity density. Although these problems have been expressed and put forward in many studies in the literature, studies that will contribute to the solution of these problems are limited. These problems are important in terms of the surface and subsurface properties (surface integrity) of the parts, and they significantly affect the mechanical performance of the parts. The unstable and poor surface topography, which is unacceptable and cannot be used directly, and very high average surface roughness values, which occur in the produced parts, limit the direct use of the material. For this reason, secondary processes should be applied according to the properties desired to be gained to the Ti-6Al-4V parts produced by the EBM method.

Within the scope of this thesis, one of the secondary processing applications, vibration surface treatment, will be applied to TI-6Al-4V samples produced by using electron beam melting method, which is one of the additive manufacturing types. Surface treatment with vibration is a method frequently used especially in the aviation industry. However, studies examining the effects on the parts produced by additive manufacturing are limited. One of the main parameters determining the effect of vibratory surface treatment is the abrasive media. Changing the geometry and dimensions of the abrasive media causes the rheological behavior of the media to change and accordingly the forces applied by the abrasive media to the work piece change. In this context, it is aimed to examine the effect of the different geometries and sizes of the abrasives used in the surface improvement process with vibration on the surface integrity of the Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting method, with experimental and empirical approaches, and to reveal the results.

Keywords: Electron Beam Melting, Ti-6Al-4V, Vibratory Surface Finishing, Surface Integrity

SEMBOLLER

E: Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)

Ra: Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (µm)

Sa: Alansal Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (µm)

µm: Mikrometre

N: Newton

P: Lazer Gücü (W)

V: Lazer Tarama Hızı (mm/sn)

h: Tarama Aralığı (µm)

t: Katman Kalınlığı (µm)

°C: Santigrat Derece

nm: Nanometre

K: Kelvin

W: Watt

J: Joule

Kg: Kilogram

%: Yüzde

GPa: Gigapascal

MPa: Megapascal

s: Saniye

mm: Milimetre

KISALTMALAR

Eİ: Eklemeli İmalat

EBM: Elektron Işını ile Ergitme

ASTM: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

XRD: X-Işını Kristalografisi

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Eklemeli imalat teknolojilerinin ASTM F42 standartlarına göre sınıflandırılması. 4

Şekil 2.2. "Sac Laminasyon Eklemeli İmalat Yöntemi" şematik gösterimi [5]. 11

Şekil 2.3.(a)Bazı seçilmiş metallerin yoğunluğu ve (b) bazı malzemelerin kullanım sıcaklığına karşı özgül mukavemeti [10]. 11

Şekil 2.4.EBM prosesinin işlevsel ilkesi [31] ve ARCAM makinesinin komponentleri [28] 14

Şekil 2.5. a.) (i) Çok noktalı olmayan ve (ii) çok noktalı tarama stratejisiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin topoloji görüntüleri, b.) (i) Çok noktalı olmayan ve (ii) çok noktalı tarama stratejisiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin optik mikroskop görüntüleri [41] 16

Şekil 2.6. a) Farklı odak uzaklıkları ve hız faktörleriyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların optik mikroskop görüntüleri [16], b) (i) Gaz gözenek (küresel morfoloji) ve (ii) ergimemiş alan morfolojik görüntüleri [42]. 18

Şekil 2.7. Çizgi ofsetinin Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapı morfolojisi üzerindeki etkisinin morfolojik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gösterimi, (çizgi ofsetleri : (a,c) 0.16 mm; (b,d) 0,28 mm.) [16]. 19

Şekil 2.8. a.) EBM yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerinin deney tasarımında kullanılan faktörler ve farklı seviyeleri, b.) EBM yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerinin akma dayanımı üzerine çeşitli proses parametrelerinin etkisi [16] 21

Şekil 2.9. İkincil işlemlerin sınıflandırılması 23

Şekil 2.10. Toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçalarının a) işlem görmemiş ve b) son paso talaş kaldırma uygulandıktan sonraki yüzey görüntüleri [75]. 24

Şekil 2.11. Manyetik aşındırıcı ile yüzey işlem süresinin toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçalarının yüzey topolojisine etkisi [87]. 25

Şekil 2.12. Toz yatağında seçici lazer ergitme prosesiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik kanalların aşındırıcı akışkan işleminde önce a)alt yüzey, b)üst yüzey ve sonra c)alt yüzey, d)üst yüzey topografileri [93]. 27

Şekil 2.13. Direkt metal lazer sinterleme yöntemiyle üretilmiş Inconel 625 parçasının a) işlem görmemiş halinin tipik yan yüzey özellikleri ve b) 30 dakikalık UCAF işleminden sonra yüzey topografisi [95]. 27

Şekil 2.14. Doğrudan enerji depolama yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçasının a1,a2) işlem görmemiş halinin ve b1,b2) ultrasonik nanokristal yüzey iyileştirme uygulandıktan sonraki yüzey görüntüleri [101]. 29

Şekil 2.15. L-PBF ile üretilen Inconel 718 süper-alaşım parçalarının işlem görmemiş ve sürüklemeli yüzey işlem uygulanmış topografileri [111]. 31

Şekil 2.16. Soğuk sprey yöntemi ile üretilmiş 17-4 PH paslanmaz çeliğin a)işlem görmemiş, b)tornalanmış ve ezerek parlatma uygulanmış yüzeyinin görüntüleri [119]. 32

Şekil 2.17. Yüzeyin hücre yapısı ve iskelesinin kimyasal parlatmadan önce (A) ve sonra (B) yüksek büyütmeli görüntüleri [150]. 36

Şekil 2.18. Toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş In718 parçalarına elektrokimyasal parlatma işlemi a) uygulanmadan önceki hali b)1 dk, c)2 dk, d)3 dk, e)4 dk, f)5 dk süreyle uygulandıktan sonraki yüzey görüntüleri [153]. 37

Şekil 2.19. İşlem görmemiş, iki farklı odak mesafesinde (Fd) ve üç farklı lazer hızında (Ss) gerçekleştirilen lazerle parlatma sonrası yüzey pürüzlüğü topografileri [163]..... 39

Şekil 2.20. Vibrasyonlu yüzey işlem düzeneğinin şematik gösterimi, aşındırıcı medyanın toroidal sarmal şeklindeki yolu ve farklı geometrilerdeki seramik aşındırıcılar [180]. . 42

Şekil 2.21. Kuru, sulu ve deterjanlı sulu ortamda yapılan (a) 7mm çaplı küresel seramik aşındırıcı kullanıldığında (a) sertlik (b) pürüzlülük değerindeki değişim ve 9mm çaplı küresel seramik aşındırıcı kullanıldığında (c) sertlik (d) pürüzlülük sertlik değerindeki değişim [183]. 43

Şekil 2.22. (a)Proses girdi parametrelerinin iki farklı kombinasyonu (PK 1 ve PK2) için ortalama bağıl hız karşılaştırması ve (b) dönme hızına ve plastik medyanın boyutuna bağlı olarak birim alanda kaldırılan hacim değerleri [184]. 44

Şekil 2.23. SLM ile üretilen Inconel 718 süper-alaşım parçalarının işlem görmemiş ve vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış topografileri [187]..... 45

Şekil 3.1. Ti-6Al-4V alaşım tozu morfolojisini gösteren SEM görüntüleri (100x, 250x,1000x)..... 47

Şekil 3.2. Numunelerin üretim, ikincil işlem, test ve karakterizasyon sürecinde kullanılan ekipmanlar. 49

Şekil 4.1. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların a)iki boyutlu ve b) üç boyutlu görüntüleri. 51

Şekil 4.2. Silindirik numuneye 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile a) 3 saat ve b) 60 saat vibrasyonlu yüzey işlem uyguladıktan sonra köşelerin görüntüleri. 53

Şekil 4.3. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarına kumlama işlemi uygulandıktan sonraki a)iki boyutlu ve b) üç boyutlu görüntüleri. 54

Şekil 4.4. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının işlem görmemiş SEM görüntüleri. 57

Şekil 4.5. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri. 57

Şekil 4.6. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının kumlama işlemi sonrası SEM görüntüleri. 58

Şekil 4.7. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 19x19 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri. 58

Şekil 4.8. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri. 59

Şekil 4.9. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 15x15 Açılı Kesim Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri..... 59

Şekil 4.10. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 15x15x06 Elips aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri. 60

Şekil 4.11. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 06x06 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri. 60

Şekil 4.12. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 4 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası mikrosertlik değerleri. 61

Şekil 4.13. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 8 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası mikrosertlik değerleri. 62

Şekil 4.14. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası mikrosertlik değerleri. 63

Şekil 4.15. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen işlem görmemiş, kumlama yapılmış ve 12 saat 16x16 Yıldız Üçgen seramik medya ile vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V parçalarının XRD sonuçları. 64

Şekil 4.16. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen işlem görmemiş, kumlama yapılmış ve 12 saat 16x16 Yıldız Üçgen seramik medya ile vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V parçalarının XRD sonuçları. 65

Şekil 4.17. İşlem görmemiş, kumlama işlemine tabii tutulmuş, kumlama işlemi sonrası 19x19 Yıldız Üçgen seramik medya ile vibrayonlu yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V alaşım malzemesinin aşınma mekanizmaları 66

Şekil 4.18. İşlem görmemiş (a) ve kumlama işlemi yapılmış (b) numunenin topografi ve aşınma izi görüntüleri 67

Şekil 4.19. İşlem görmemiş ve 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem yapılmış numunelerin aşınma profilleri. 69

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Vat fotopolimerizasyon yöntemleri [4]. 5

Tablo 2.2. Malzeme ekstrüzyonu yöntemleri [4]. 6

Tablo 2.3. Malzeme püskürtme yöntemleri [4]. 7

Tablo 2.4. Bağlayıcı püskürtme yöntemleri [4]. 8

Tablo 2.5. Toz Yatağında Ergitme yöntemleri [4]. 9

Tablo 2.6. Yönlendirilmiş enerji yığma yöntemleri [4] 10

Tablo 2.7. Ti-6Al-4V'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri [19]. 12

Tablo 2.8. SLM ve EBM yöntemiyle üretilmiş işlem görmemiş Ti-6Al-4V parçalarının morfolojisi [33]. 14

Tablo 2.9. EBM yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçaları için yapılan literatür analizi. 22

Tablo 3.1. Ti-6Al-4V parçalarının üretim parametreleri. 47

Tablo 3.2. Vibrasyonlu yüzey işlemde kullanılan seramik aşındırıcılar. 48

Tablo 4.1. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri. 51

Tablo 4.2. Ti-6Al-4V parçalara 16x16 Yılsız üçgen aşındırıcı medya ile farklı işlem sürelerinde uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem sonrası yüzeylerin iki boyutu görüntüleri. 52

Tablo 4.3. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile farklı sürelerde uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri. 53

Tablo 4.4. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının kumlama işlemi sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri. 54

Tablo 4.5. Pürüzlülük değerleri 55

Tablo 4.6. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ø19x30 mm boyutundaki Ti-6Al-4V parçalara kumlama işlemi uygulanıp yüzey pürüzlülükleri belirli

bir noktaya (~Ra=10 µm) indirildikten sonra uygulanan vibrasyonlu yüzey işlemleri sonrasında yapılan lineer aşındırma testleri sonucu elde edilen aşınma izleri. 68

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat teknolojisinin ve özellikle de EBM yönteminin şekillendirilmesi zor malzemelerin imalatında oldukça ciddi kazanımlar sağlayacak önemli bir alternatif olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, EBM üretim süreçlerinin iyileştirilmesi için optimum parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ancak her ne kadar optimum parametreler seçilerek parçaların yüzey kaliteleri ve mekanik özellikleri iyileşse de Ti-6Al-4V parçalarının yaygın olarak kullanıldığı havacılık endüstrisi için istenilen seviyeye erişilememiştir. Bu yüzden EBM ile üretilen parçalara ikincil işlemlerin yapılmasına gerek duyulmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında ikincil işlem olarak vibrasyonlu yüzey işlem uygulanması ve EBM ile Ti-6Al-4V parçaları için en uygun vibrasyonlu yüzey işlem parametresinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Vibrasyonlu yüzey işlemin en önemli parametresi olan aşındırıcı medya geometrisidir. Ancak parça üzerinde nasıl bir etkisinin olduğu literatürde açıklanamamıştır. Deneysel olarak hem aşındırıcı geometrisinin parça üzerindeki etkisi elde edilecek hem de elde edilen bu sonuçlar ampirik yaklaşımlarla ilişkilendirilerek daha sonra farklı malzemeler için de tahmin yapabilmeyi kolaylaştıracaktır. Bununla birlikte, vibrasyonlu yüzey işlemi hibrit ikincil işlem olarak kullanmanın getirilerini tespit edilebilmek için, literatürde EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarına uygulanan HIP ikincil işleminden sonra da vibrasyonlu yüzey işlem yapılarak parçaya olan etkileri mikro ve makro boyutta incelenecektir. Bu sayede vibrasyonlu yüzey işleminin EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V için en iyi sonuçlar veren parametreleri belirlenecektir.

Vibrasyonlu yüzey işlem, geleneksel yöntemlerle üretilen parçalar için özellikle havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan bir toplu finisaj işlemidir. Birçok endüstride kritik parçaların üretiminde geleneksel yöntemin yerini almaya hazırlanan eklemeli imalat ile üretilen parçalar genellikle geleneksel imalata göre sağladığı avantajların yanı sıra kötü yüzey pürüzlülüğü ve porozite gibi sorunları beraberinde getirmektedir. Vibrasyonlu yüzey işlemin yüzey pürüzlülüğü açısından eklemeli imalat ile üretilen parçalar üzerinde önemli etkisi olduğu düşünülmektedir. Literatürde sınırlı sayıda bulunan vibrasyonlu yüzey işlem ile ilgili çalışmalar, aşındırıcı medya geometrisi ve boyutunun parça üzerindeki talaş kaldırma oranını ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmede farklı etkilerinin olduğunu göstermektedir. Ancak literatürde EBM ile üretilmiş Ti-6Al-

4V parçaları için spesifik olarak kullanılması önerilen bir vibrasyonlu yüzey işlem parametresi bulunmamaktadır. Önerilen tezde literatürden farklı olarak EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçaları için en etkili vibrasyonlu yüzey işlem parametreleri belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V parçalarının yüzey kalitelerini artırmaya yönelik doğrudan endüstride kullanılabilir çıktılar elde edilecektir.

Bu konuda yapılacak sistematik çalışma ile elde edilecek olan faydalı bilgi ve bunun endüstriyel uygulaması ve yayılımı önerilen tezin hedefidir. Önerilen tezin amaçları ve hedeflenen çıktılar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

-EBM yöntemiyle Ti-6Al-4V tozlarından farklı geometrilerde parça imalatı gerçekleştirilecek ve işlem görmemiş parçanın özellikleri test edilerek ortaya konacaktır.

-EBM yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarına farklı parametrelerde vibrasyonlu yüzey işlemi uygulanacak ve yüzey kalitelerindeki iyileşmeye katkısı ortaya konacaktır.

-Vibrasyonlu yüzey işlem operasyonunda kullanılan parametreler en iyi yüzey kalitesi için en iyilenecektir.

-Vibrasyonlu yüzey işlem operasyonlarında kullanılan parametreler ile yüzey ve yüzey altı kalıcı deformasyon, tane küçülmesi ve mikrosertliği tahmin edebilmek için Zener-Hollomon ve Hall-Patch modelleri kullanılacak ve farklı parametreler için deformasyon ve tane küçülmesi tahmin edilecektir.

-Yüzey iyileştirme operasyonu ile elde edilen yüzeyin, herhangi bir işlem görmemiş EBM ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarının yüzeylerine göre aşınma dirençleri iyileşme katkısı ilaveten kalıntı gerilmelere, çekme ve yorulma davranışına katkısı ortaya konacaktır.

-Çalışma kapsamında EBM ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarının yüzey ve yüzey altı özellikleri ile mikroyapı ve yüzey iyileştirme süreci-performans arasındaki ilişki kapsamlı olarak araştırılmış olacak ve dünya literatüründe bu konuda çok önemli boşlukları doldurulmasına katkı sağlayacaktır.

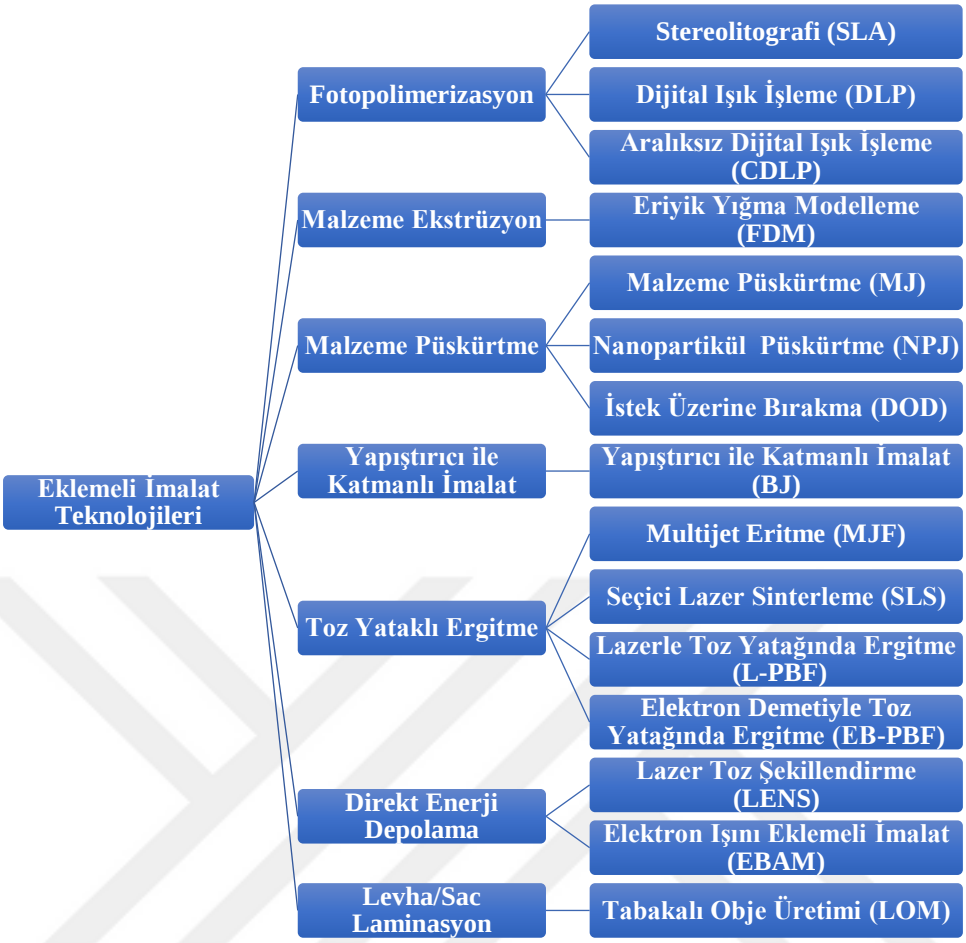
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojisi, günümüzde başta havacılık, biyomedikal ve otomotiv olmak üzere birçok alanda kullanılmakta olup her geçen gün kullanım alanı artmaktadır. Bu durum Eİ teknolojisine ait bilgi ihtiyacı doğurmaktadır. Bu bölümde Eİ yöntemleri, Eİ yöntemlerinden olan LTYF yöntemi, LTYF yöntemi ile üretilen Inconel 718 malzemesi ve üretilen Inconel 718 malzemesine uygulanan ikincil işlem olan ezerek parlatma operasyonu ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır.

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi ve Sınıflandırılması

Eklemeli imalat; bilgisayar modellerini kullanarak bazı malzemelerin, son şekle çok yakın olarak, üç boyutlu olarak ve çoğunlukla katman katman üretim yöntemidir. Yenilikçi bir üretim yöntemi olan eklemeli imalat, popüler olarak "3D Printing" olarak anılır [1]. Eklemeli imalat fikri eskilere dayanmakla birlikte sistemin 1987 yılı itibariyle stereolitografi plastik işleme yönteminin ticarileşmesiyle başladı. Stereolitografi bu konuda ilk üç boyutlu yazıcı ticari sistemi olmuştur. Bununla birlikte 1990'lı yıllar bu üretim teknolojisinde önemli bir yıl oldu. Eriyik Yığma Modelleme gibi yöntemlerde bu yıllarda ticarileşti. Bu süreçlerden bir süre sonra toz yatağında ergitme yöntemi geliştirilmiştir. Yıl 1994 olduğunda ise EOS firması Direkt Metal Lazer Sinterleme makinasının M160 olarak tanımlanan ilk versiyonunun çıkarmıştır. [2].

Eklemeli imalat, ASTM F42 standardına 7 başlık altında sınıflandırılmıştır [3]. Şekil 2.1.'de bu sınıflandırma gösterilmiştir. Aşağıdaki bölümde fotopolimerizasyon, malzeme ektrüzyon, malzeme püskürtme, yapıştırıcı ile katmanlı imalat, direkt enerji depolama ve levha/sac laminasyon yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir. Toz yataklı ergitme çeşitlerinden biri olan lazerle toz yatağında ergitme yöntemi ise daha ayrıntılı incelenmiştir.



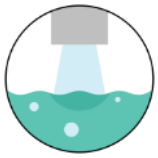
Şekil 2.1. Eklemeli imalat teknolojilerinin ASTM F42 standartlarına göre sınıflandırılması.

Eklemeli imalatta karşılaşılan kusurlar tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleriyle tespit ve analiz edilebilmektedir. Tahribatsız muayene (Non-destructive testing, kısaca: NDT), inceleme yapılacak olan malzeme ya da parçanın bütünlüğüne zarar vermeden yapılan muayene çeşidi iken, tahribatlı muayene ise inceleme yapılan parçanın çekme, basma, eğilme vb. kalıcı şekil değişikliklerine karşı göstereceği direnci ve dayanımı belirlemek için uygulanan muayene yöntemleridir.

Fotopolimerizasyon (Vat Photopolymerization): Bir kap içindeki sıvı fotopolimerin, ışıkla aktifleştirilen polimerizasyon ile seçici bir şekilde kürlendiği eklemeli imalat işlemleridir. Vat polimerizasyon yöntemleri (Tablo 2.1.) ince detaylara sahip parçalar üretmek için mükemmeldir ve pürüzsüz bir yüzey kalitesi sağlar. Bu, takı, kısa vadeli

enjeksiyonlu kalıplama ve birçok diş ve tıbbi uygulama için idealdir. Vat polimerizasyonunun esas sınırlaması ise üretilen parçaların kırılganlığıdır.

Tablo 2.1. Vat fotopolimerizasyon yöntemleri [4].

Yöntem	Tanım	Yaygın Üreticiler	Kullanılan Malzemeler
Stereolitografi (SLA) 	Stereolitografi'de bir nesne, UV teknolojisi ile bir polimer reçinenin tabaka tabaka seçici olarak sertleştirilmesidir.	Formlabs 3D Systems DWS	Standart Güçlü Esnek Şeffaf Dökülebilir Reçine vb.
Doğrudan Işık ile İşlem (DLP) 	Tıpkı SLA gibi, DLP 3B yazıcılar da şeffaf tabanlı bir reçine tankı ve parçaları baş aşağı, katman katman oluşturmak için reçine tankına inen bir yapı platformu etrafında inşa edilmiştir. Aradaki fark ışık kaynağıdır. DLP 3D yazıcılar, bir katmanın görüntüsünü tüm platform boyunca flaş etmek için dijital bir projektör ekranı kullanır ve tüm noktaları aynı anda kürler.	B9 Creator MoonRay	Standart & Dökülebilir Reçine vb.
Sürekli DLP (CDLP) 	Parçaları tam olarak DLP ile aynı şekilde üretir. Ancak, baskı tablasının Z yönünde (yukarı doğru) sürekli hareketine dayanır. Bu, her katman üretildikten sonra yazıcının parçayı baskı tablasından durdurması ve ayırması gerekmediğinden daha hızlı yapım sürelerine olanak tanır.	Carbon3D EnvisionTEC	Standart Güçlü Esnek Şeffaf Dökülebilir Reçine vb.

Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion): Diş macununun bir tüpten sıkılmasına benzer şekilde, malzeme ekstrüzyon teknolojileri bir malzemeyi bir nozuldan ve bir yapı plakası üzerine geçirir. Nozul, katman katman önceden belirlenmiş bir yol inşa eder. Tablo 2.2'de eriyik yığarak modelleme yönteminin başlıca özellikleri verilmiştir.

Eriyik yığarak modelleme en yaygın kullanılan 3 boyutlu baskı teknolojisidir. FDM, filaman biçiminde gelen katı termoplastik malzeme şeritlerini kullanarak parçalar

oluşturur. Filaman, aynı zamanda eritilme işleminin de gerçekleştirildiği ve ısıtılan bir nozuldan itilir. Yazıcı, önceden belirlenmiş bir yolu izleyerek erimiş materyali kesin konumlara yayarak nozulu sürekli olarak hareket ettirir. Malzeme soğuduğunda katılaşır, bu şekilde parçayı katman katman oluşturmuş olur.

Tablo 2.2. Malzeme ekstrüzyonu yöntemleri [4].

Yöntem	Tanım	Yaygın Üreticiler	Kullanılan Malzemeler
Eriyik Yığarak Modelleme (FDM) 	Sıcak bir başlık vasıtasıyla eritilen termoplastik malzemenin baskı tablası üzerine, katman katman akıtılıp eklenmesiyle üretim yapılan 3D baskı teknolojisidir.	Stratasys Ultimaker MakerBot Markforged	ABS PLA Nylon PC Fiber-güçlendirilmiş Nylon ULTEM Egzotik filamentler (ahşap-katkılı, metal-katkılı vb.)

Malzeme Püskürtme (Material Jetting): Malzeme püskürtme yönteminin başlıca özellikleri ve çeşitleri Tablo 2.3.'te UV ışığına veya yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kürlenen veya sertleşen fotopolimerler, metaller veya balmumu, parçaları bir seferde bir katman oluşturmak için kullanılabilir. Malzeme püskürtme işleminin doğası, çok malzemeli baskıya izin verir. Bu yetenek, yapım aşamasında genellikle farklı (çözünür) malzemelerden destek yazdırmak için kullanılır.

Tablo 2.3. Malzeme püskürtme yöntemleri [4].

Yöntem	Tanım	Yaygın Üreticiler	Kullanılan Malzemeler
Malzeme Püskürtme 	Material Jetting (MJ), 2D yazıcılara benzer şekilde çalışan ek bir üretim sürecidir. Malzeme püskürtmede, bir baskı kafası (standart mürekkep püskürtmeli baskı için kullanılan baskı kafalarına benzer), ultraviyole (UV) ışık altında katılaşan ışığa duyarlı malzeme damlacıklarını dağıtır ve katman katman bir parça oluşturur. MJ'de kullanılan malzemeler, sıvı halde gelen termoset fotopolimerlerdir (akrilikler).	Stratasys (Polyjet) 3D Systems (MultiJet)	Sert Şeffaf Çok renkli kauçuk benzeri ABS benzeri Çok malzemeli ve çok renkli vb.
Nano Parçacık Püskürtme 	Tıpkı SLA gibi, DLP 3B yazıcılar da şeffaf tabanlı bir reçine tankı ve parçaları baş aşağı, katman katman oluşturmak için reçine tankına inen bir yapı platformu etrafında inşa edilmiştir. Aradaki fark ışık kaynağıdır. DLP 3B yazıcılar, bir katmanın görüntüsünü tüm platform boyunca flaş etmek için dijital bir projektör ekranı kullanır ve tüm noktaları aynı anda kürler.	Xjet	Paslanmaz Çelik Seramikler vb.
İsteğe Bağlı Püskürtme 	Malzeme damlacıklarının seçici olarak biriktirildiği ve bir baskı tablasında sertleştirildiği bir 3D baskı işlemidir. Işığa maruz kaldığında iyileşen fotopolimerler veya balmumu damlacıkları kullanılarak, nesneler her seferinde bir katman oluşturur.	Soldiscape	Reçine vb.

Yapıştırıcı İle Katmanlı İmalat (Binder Jetting): Bir seferde bir kısım bir katman oluşturmak için bir bağlayıcı katkı maddesini bir toz yatağı üzerine dağıtma işlemidir. Bu katmanlar, katı bir bileşen oluşturmak için birbirine bağlanır. Tablo 2.4.'te bu yöntemle ilgili genel bilgiler verilmiştir.

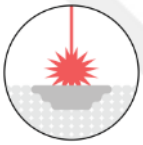
Tablo 2.4. Bağlayıcı püskürtme yöntemleri [4].

Yöntem	Tanım	Yaygın Üreticiler	Kullanılan Malzemeler
Bağlayıcı Püskürtme 	İnce toz malzeme katmanları üzerine bir bağlayıcı yapışkan madde bırakır. Toz malzemeler ya seramik (örneğin cam ya da alçıtaşı) ya da metal (örneğin paslanmaz çelik) esaslıdır. Baskı kafası, her katmanı benzer bir şekilde 2B yazıcılar kâğıda yazdırarak, bağlayıcı damlacıkları biriktirerek yapı platformu üzerinde hareket eder. Bir katman tamamlandığında, pudra yatağı aşağı doğru hareket eder ve yapı alanına yeni bir pudra katmanı yayılır. İşlem, tüm parçalar tamamlanana kadar tekrar eder.	ExOne 3D Systems Voxeljet	Silika kumu, PMMA parçacık malzemesi, alçıtaşı vb. Paslanmaz çelik, seramik, kobalt-krom, tungsten-karbür vb.

Toz Yatağında Ergitme (Powder Bed Fusion - PBF): Bir plastik veya metal tozunun parçacıkları arasında her seferinde bir kat halinde füzyon (sinterleme veya erime) sağlayan bir termal kaynak kullanarak katı bir parça üretir. Çoğu PBF teknolojisi, bir parça üretimi sırasında ince toz tabakalarını yaymak ve yumuşatmak için mekanizmalar kullanır, bu da nihai bileşenin, yapı tamamlandıktan sonra toz içinde kapsüllenmesine neden olur. PBF teknolojilerindeki ana varyasyonlar, farklı enerji kaynaklarından (örneğin lazerler veya elektron ışınları) ve işlemde kullanılan tozlardan (plastik veya metaller) kaynaklanmaktadır.

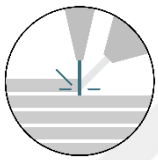
Polimer tabanlı PBF teknolojileri, desteğe gerek olmadığından, karmaşık geometrilerin üretilmesine izin verdiği için çok fazla tasarım özgürlüğü sunar. Hem metal hem de plastik PBF parçaları tipik olarak dökme malzemeden çok daha yüksek mukavemet ve sertliğe ve mekanik özelliklere sahiptir. PBF parçalarının çok düzgün bir finişe sahip olabileceği ve bu nedenle çoğunlukla nihai ürünlerin imalatında kullanıldığı için çok çeşitli post-proses yöntemleri mevcuttur. PBF'nin sınırlılıkları genellikle yüzey pürüzlülüğü ve yazdırılan parçaların iç gözenekliliği, işleme sırasında büzülme veya bozulma ve toz işleme ve atık ile ilgili zorluklar etrafında odaklanır. Tablo 2.5.'te toz yatağında ergitme yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.5. Toz Yatağında Ergitme yöntemleri [4].

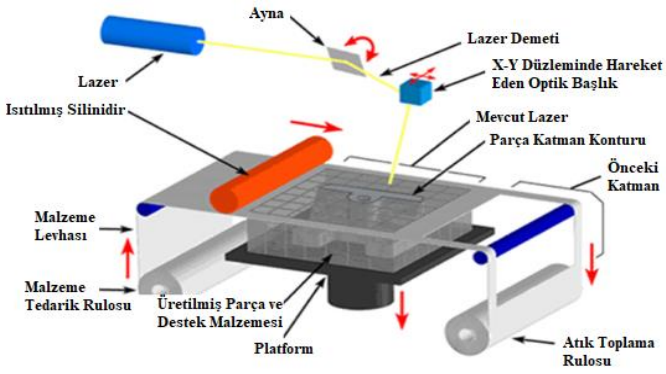
Yöntem	Tanım	Yaygın Üreticiler	Kullanılan Malzemeler
Seçici Lazer Sinterleme (SLS) 	Toz halindeki malzemeyi (tipik olarak naylon veya poliamid) sinterlemek için güç kaynağı olarak bir lazer kullanan ve böylece malzemeyi birbirne bağlayarak sağlam bir yapı oluşturan tekniktir.	EOS Stratasys	Naylon Alumide Carbon-Fiber Doldurulmuş Naylon PEKK TPU vb.
Seçici Lazer Ergitme (L-PBF) 	Metalik tozları eritmek ve kaynaştırmak için yüksek güç yoğunluklu lazer kullanmak üzere tasarlanmış özel bir hızlı prototipleme, 3D baskı veya eklemeli imalat (Eİ) tekniğidir.	EOS 3D Systems Sinterit	Alüminyum Titanyum Paslanmaz Çelik Nikel Alaşımlar Co-Cr Alaşımlar vb.
Elektron Demeti ile Ergitme (EB-PBF) 	Hammadde (metal tozu) bir vakum altına yerleştirilir ve bir elektron ışınıyla eritilmek suretiyle birbirine kaynaştırılır.	Arcam	Titanyum Alaşımları Nikel Alaşımları Co-Cr Alaşımları vb.
Multi Jet Füzyonu (MJF) 	Toz halde bulunan hammaddenin katman olarak tablaya serilmesi ve ardından agent damlatılarak ısıya maruz bırakılması prensibine dayalı bir üretim yöntemidir. Agent damlatılan bölgedeki toz ısı altında bağlanır ve katılaşır. Bu döngü model ortaya çıkıncaya kadar tekrarlanır.	HP	Naylon (PA 11, PA 12, PA 46, PA6 vb.) vb. Termoplastikler

Yönlendirilmiş Enerji Yığma (Direct Energy Deposition): Doğrudan Enerji Biriktirme (DED), biriktirilirken toz malzemeyi eriterek parçalar oluşturur. Ağırlıklı olarak metal tozları veya tel ile kullanılır ve genellikle metal biriktirme olarak adlandırılır. Tablo 2.6.'da yönlendirilmiş enerji yığma yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.6. Yönlendirilmiş enerji yığma yöntemleri [4].

Yöntem	Tanım	Yaygın Üreticiler	Kullanılan Malzemeler
Lazerle Tsarlanmış Ağ Şekillendirme (LENS) 	LENS, katı bir parçayı katman katman oluşturmak için toz dağıtma nozullarından çıkarılırken tozu eritmek için bir lazer kafası, toz dağıtma nozulları ve inert gaz borusundan oluşan bir biriktirme başlığı kullanır. Lazer, yapı alanında bir eriyik havuzu oluşturur ve toz, eritildiği ve daha sonra katılaştığı havuza püskürtülür. Substrat tipik olarak düz bir metal plaka veya malzemenin eklendiği mevcut bir parçadır (örneğin onarım için).	Optomec	Titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır, takım çeliği vb.
Elektron Demeti ile Ergitme Eklemeli İmalat (EBAM) 	EBAM, ısı kaynağı olarak bir elektron ışını kullanılarak birbirine kaynaklanmış metal tozu veya tel kullanarak metal parçalar oluşturmak için kullanılır. Parçaları LENS'e benzer şekilde üreten elektron ışınları, lazerlere göre daha verimlidir ve orijinal olarak uzayda kullanılmak üzere tasarlanan teknoloji ile bir vakum altında çalışır.	Sciaky INC	Titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır nikel, 4340 çelik vb.

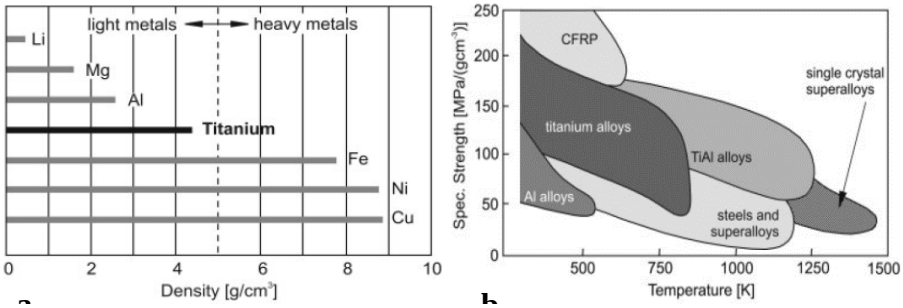
Sac Laminasyon (Laminated Object Manufacturing): Tasarımın enine kesitinin ince bir malzeme halinde kesildiği ve daha sonra bir önceki tabakaya art arda yapıştırıldığı katmanlı üretim yöntemidir. Tasarım, bir malzeme tedarik rulosundan sağlanan ince yapı malzemesi ile bir platformdan oluşturulur (Şekil 2.2.). Genellikle kullanılan malzeme kâğıt, plastik veya metal folyodur. Her katmandan sonra, platform alçaltılır ve yeni malzeme katmanı ile beslenir. Yapı malzemesi genellikle ısıyla harekete geçen yapıştırıcı ile sağlanır ve her yeni katmanı birleştirmek için platformun üzerinden ısıtılmış bir laminasyon silindir geçirilir. Bir lazer demeti veya bıçak modelin bir kesitini ve ayrıca fazla malzemede bir ızgara desenini keserek, sonradan işlem olarak çıkarılmasını kolaylaştırır. Bazı makinelerde, tam renkli modellerin yazdırılmasına izin veren entegre bir renkli yazıcı bulunur.



Şekil 2.2. "Sac Laminasyon Eklemeli İmalat Yöntemi" şematik gösterimi [5].

2.2. Ti-6Al-4V Alaşımı ve Eklemeli İmalat İle Üretilmesi

Titanyum; sahip olduğu yüksek dayanıklılık-ağırlık oranı, düşük yoğunluğu, yüksek korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde biyomedikal [6], havacılık [7], uzay[8] ve savunma[9] endüstrilerinde yaygın bir şekilde kullanılan bir hafif metaldir. Hafif ve ağır metaller arasındaki ayrım noktası 5 $g.cm^{-3}$'tür. Bu nedenle 4.42 $g.cm^{-3}$ yoğunluğa sahip titanyum en ağır hafif metaldir (Şekil 2.3.a). Titanyum alaşımlarının özgül mukavemeti yüksektir. Bununla birlikte yüksek sıcaklık titanyum alaşımları yalnızca 500 °C'nin biraz üzerindeki sıcaklıklara kadar kullanılırken, TiAl bazlı alaşımlar, iyi bilinen yüksek sıcaklık çelikleri ve nikel bazlı süper alaşımlarla doğrudan rekabet edecek kadar yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir (Şekil 2.3.b) [10].



Şekil 2.3.(a)Bazı seçilmiş metallerin yoğunluğu ve (b) bazı malzemelerin kullanım sıcaklığına karşı özgül mukavemeti [10].

En popüler titanyum alaşımı olarak tanınan Ti-6Al-4V, bugün dünyada kullanılan titanyum ürünlerin pazar payının neredeyse yarısını oluşturmaktadır [11]. Alaşım sınıflarına göre kategorize edilen ve halihazırda kullanılan titanyum alaşımları ise α, α-

yakın, α+β, ve β alaşımlarıdır. Ti-6Al-4V; %90 titanyum, %6 alüminyum ve %4 vanadyum içerir, ancak malzeme az miktarda oksijen, hidrojen, nitrojen ve demir gibi başka bileşenler içerebilir [12]. Bu malzeme, korozyona dayanıklılık, daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve temel faydalar arasında biyolojik uyumluluk gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [13, 14]. Son derece iyi bir mukavemet, süneklik, yorgunluk ve kırılma özellikleri dengesine sahiptir. Ancak bu alaşım, düşük sürünme performansı nedeniyle yalnızca yaklaşık 300 °C'ye kadar kullanılabilir [15]. Düşük yoğunluğu ve yüksek EB noktası (yaklaşık 1650 ºC) sayesinde havacılık ve uzay, yüksek biyouyumluluğu, yüksek özgül mukavemet ve yüksek korozyon direnci sayesinde biyomedikal alanlarında kullanılır [16, 17]. Bu alaşımın mikroyapısı, uygun ısıl işlemlerin kullanılmasıyla kolaylıkla değiştirilebilir. Ti-6Al-4V, yaklaşık 800 °C'lik bir denge sıcaklığında yaklaşık %15 β fazlı bir hacimsel oran içerir [15]. Oda sıcaklığında α-hcp (hegzagonal sıkı paket, ing. hexagonal close packed) fazı baskındır, ancak β transusun (β dönüşüm sıcaklığı) üzerine ısıtıldığında, yaklaşık 995 ˚C'de yalnızca β-bcc (hacim merkezli kübik yapı, ing. body centered cubic) fazı olarak var olur [11, 17, 18]. Tablo 2.7.'de Ti-6Al-4V'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri yer almaktadır.

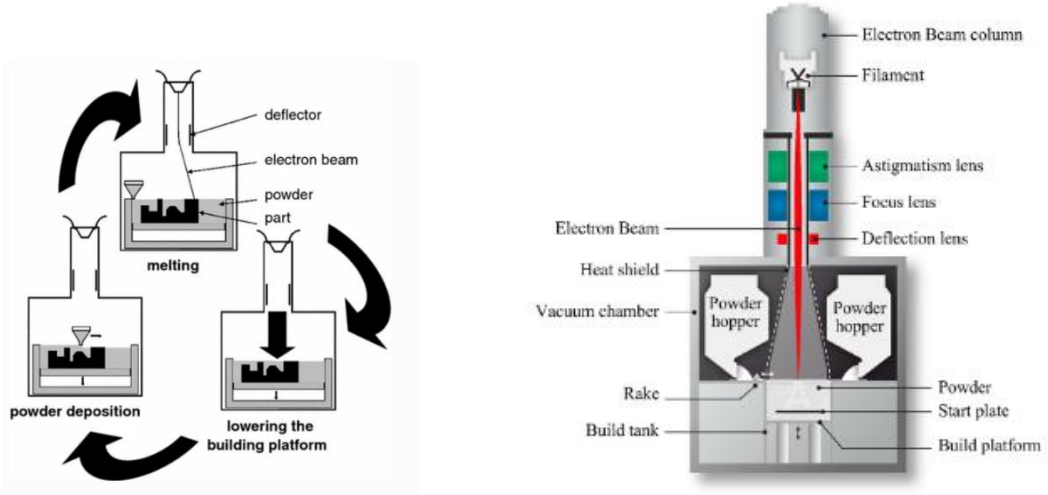
Tablo 2.7. Ti-6Al-4V'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri [19].

Özellik	**Değeri**
Yoğunluk (g/cm^3)	4.42
Erime aralığı (˚C±15˚C)	1649
Özgül ısı (J/kg.˚C)	560
Hacim elektrik direnci (ohm.cm)	170
Termal iletkenlik (W/m.K)	7.2
Çekme mukavemeti (MPa)	1000
Elastikiyet modülü (GPa)	114
Sertlik (Rockwell C)	36

Diğer bir yandan Ti-6Al-4V işlenmesi zor malzemeler sınıfına girmektedir. Bunun sebepleri; yüksek kimyasal reaktivite, düşük termal iletkenlik, yüksek sıcaklıktaki yüksek mukavemet özellikleri, düşük elastikiyet modülüdür. Yüksek kimyasal reaktivitesi, işleme sırasında kesici takıma kaynak yapma eğilimine neden olur. Düşük termal iletkenlik, takım ile iş parçası arasındaki ısı transferini önler ve buna bağlı olarak aşırı

ısınan takım olumsuz etkilenir. Yüksek sıcaklıkta mukavemetini koruması ve düşük elastikiyet modülü izlenebilirliğini zorlaştırır [20, 21]. Bu sebeple Ti-6Al-4V'nin eklemeli imalat ile üretimi söz konusudur. EBM Ti-6Al-4V parçalarının üretimi için kullanılan yöntemlerden biridir [22]. Bu yöntem eklemeli imalatın toz yataklı ergitme proseslerinden biridir ve lazer ışını tabanlı teknolojileriyle (örneğin seçici lazer ergitme, SLM) hemen hemen aynı temel prosedür ilkelerine sahiptir [4]. Elektron Işını Eritme (EBM) işleminde, metal tozunu 3 boyutlu CAD verilerinden alınan talimatlara göre katmanlar halinde hızlı ve seçici bir şekilde eritmek için yüksek enerjili bir elektron ışını kullanılır[23]. Elektron demetinin gaz molekülleri tarafından saçılmasını önlemek için EBM işleminde bir vakum ortamı kullanılır [24]. Bir elektron ışını tabancası, nispeten düşük ışın akımı ve nispeten yüksek bir tarama hızı kullanarak toz tabakasını önceden ısıtır. Bu iki etkiyle sonuçlanır. Bunlardan ilki, sonraki eritme sırasında onu yerinde tutan tozun kısmi sinterlenmesi; dahası, ön ısıtma henüz erimiş katman ile parçanın henüz oluşturulmuş gövdesi arasındaki termal gradyanı azaltır [25]. Bir katmanın ergitilmesinden sonra, baskı plakası bir katman kalınlığına eşit bir kademe indirilir ve başka bir toz katman yayılır ve eritilir ve üç boyutlu parçayı elde etmek için işlem tekrarlanır. Oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra, kısmen sinterlenmiş parçacıkları yüzeyden çıkarmak için parça aynı işlenmiş tozla püskürtülür[26].

Şekil 2.4.'te EBM prosesinin işlevsel ilkesi ve EBM yöntemini uygulayan makinelerin ilk üreticisi olan ARCAM'ın makinesinin temel kompenentleri yer almaktadır [27, 28]. EBM ile üretimde diğer toz yataklı ergitme proseslerinden farklı olarak ergitme lazer yerine elektron ışını enerjisi ile sağlanır ve elektron ışını saçılmasını en aza indirgemek için ayrıca reaktivite kontrolünü sağlamak için kontrollü bir vakum atmosferi kullanır [29]. Eklemeli imalatın genel avantajı olan hedeflenen ürünün temel geometrik şekli ve temel malzeme özelliklerinin aynı anda tek bir işlemle elde edilebilmenin yanında EBM yöntemi düşük kalıntı gerilimi, hızlı üretim hızı ve yüksek enerji verimliliği nedeniyle diğer metal eklemeli üretim tekniklerine göre avantajlar sergiler [30].



(a) (b)

Şekil 2.4.EBM prosesinin işlevsel ilkesi [31] ve ARCAM makinesinin komponentleri [28] .

EBM yönteminde, geleneksel yöntemlerde olduğu gibi birçok işlem parametresi bulunmaktadır. Üretim parametreleri dizayn edilen komponentin istenilen özelliklerde oluşmasını sağlarken, aynı zamanda tedarik süresi, malzeme tüketimi vb. diğer ticari parametrelerin de korunmasına yardımcı olmaktadır. Bu parametreler aynı zamanda kullanılan malzemeye uygun şekilde seçilerek, üretilen komponentte kimyasal, mikroyapısal, elektriksel, termal, mekanik ve tribolojik özelliklerin, aynı zamanda estetiklik, boyutsal doğruluk ve pürüzlülük gibi yüzey unsurlarının da istenilen seviyede ortaya çıkmasına yardımcı olarak istenilen yüksek kalitede komponentlerin üretilebilmesi sağlanmaktadır [32]. Tablo 2.8.'de SLM ve EBM ile üretilen işlem görmemiş Ti-6Al-4V parçalarının genel özelliklerinin literatürdeki değerleri gösterilmiştir.

Tablo 2.8. SLM ve EBM yöntemiyle üretilmiş işlem görmemiş Ti-6Al-4V parçalarının morfolojisi [33].

	Mikroyapı	Gözeneklilik	Pürüzlülük	Kalıntı Gerilme
SLM	Martenzitik[34, 35]	0.1%-0.5%[24, 36]	5 μm ≤Ra ≤40 μm[37]	100≤σ≤500 MPa
EBM	İnce Lamelli[34, 38]	0.1%-0.3% [24, 39]	25 μm≤Ra≤130 μm[40]	Çok düşük

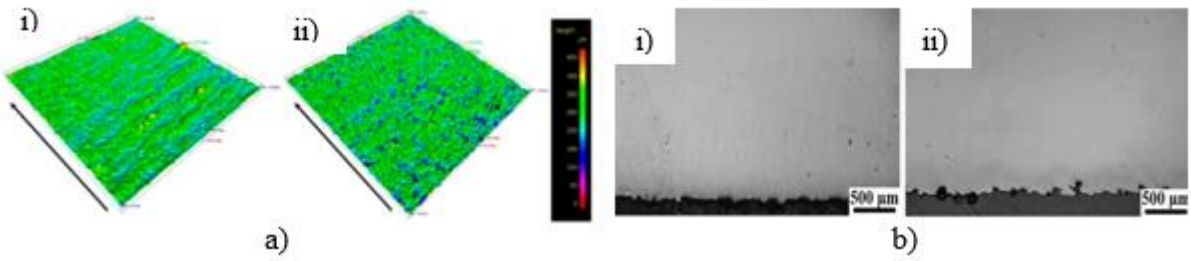
Elektron demeti ile ergitme yöntemi ile metalik parçaların imalatında karşılaşılan en önemli sorunların başında yüksek yüzey pürüzlülükleri [41]ve porozite yoğunluğu [42] gelmektedir. Bu sorunlar literatürdeki birçok çalışmada ifade edilmiş ve ortaya konulmuş

olmasına rağmen bu sorunların çözümüne katkı sunacak çalışmalar sınırlıdır. Bu sorunlar parçaların yüzey ve yüzey altı özellikleri (yüzey bütünlüğü) açısından önem arz etmekte, parçaların mekanik performanslarını önemli derecede etkilemektedirler [40, 43]. Üretilen parçalarda meydana gelen, kabul edilemeyecek ve doğrudan kullanılamayacak derecede kararsız ve kötü yüzey topografisi ile oldukça yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerleri malzemenin doğrudan kullanılmasını sınırlayıcı etkide bulunmaktadır.

Üretim parametreleri dizayn edilen komponentin istenilen özelliklerde oluşmasını sağlarken, aynı zamanda tedarik süresi, malzeme tüketimi vb. diğer ticari parametrelerin de korunmasına yardımcı olmaktadır. Bu parametreler aynı zamanda kullanılan malzemeye uygun şekilde seçilerek, üretilen komponentte kimyasal, mikroyapısal, elektriksel, termal, mekanik ve tribolojik özelliklerin, aynı zamanda estetiklik, boyutsal doğruluk ve pürüzlülük gibi yüzey unsurlarının da istenilen seviyede ortaya çıkmasına yardımcı olarak istenilen yüksek kalitede komponentlerin üretilebilmesi sağlanmaktadır. EBM'de kullanılan bazı üretim parametreleri aşağıda sıralanmaktadır [44]. EBM yöntemi kullanılarak Ti-6Al-4V parça üretiminde özellikle; ışın akımı [45], hız fonksiyonu [46], nokta sayısı [41], odak ofseti [47], katman kalınlığı [48], ön ısıtma sıcaklığı [49], tarama stratejisi [50], toz boyutu [51] gibi farklı parametrelerin ürün özelliklerine etkisi konusunda literatürde çalışmalar bulunmaktadır.

EBM yöntemiyle Ti-6Al-4V parçaların üretim sürecinde, özellikle ışın akımı ve hız fonksiyonu parametreleri parçalar üzerinde kayda değer farklılıklar oluşturmaktadır. Literatürde yapılan çalışmada bu parametrelerden özellikle ışın akımının farklı proses parametreleri altında EBM makinesinde Ti-6Al-4V parçalar üretilmiştir. Bu çalışmada; ışın akımı 5-10 mA, ışın hızı 3000-6000 mm/s, odak ofseti 0-25 mA değerleri arasında üretilen parçalarda oluşan yüzey pürüzlülükleri incelenmiştir. Seçilen en uygun parametreler (5 mA ışın akımı, 6000 mm/s ışın hızı, 0 mA odak ofseti) ile yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalama 15,4 μm olduğu görülmüştür. Ayrıca odak ofsetinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde ışın akımı ve ışın hızından daha fazla ana etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [52]. Yüzey pürüzlülük değerleri ışın akımı ile artarken, odak ofseti ve ışın hızındaki artış ile azalır. Ayrıca bu önemli parametrelerin yanında üretilecek parçanın geometrisinin de önemli olduğu, parçanın kalınlığının artmasıyla yüzey pürüzlülüklerinin arttığı literatürdeki çalışmalarda ortaya konmuştur [45].

Yüzey pürüzlülük değerlerine etki eden diğer bir parametre olan kontur tarama stratejisinin diğer parametrelere bağlı olarak incelendiği çalışmalar mevcuttur. Çok noktalı olmayan kontur tarama stratejisi için, daha düşük ışın akımı ve hız işlevi, daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesini sağlamıştır. Bu çalışmada; ışın akımı 2, 4, 6 mA, hız fonksiyonu 2, 4, 6, odak ofseti 0-3 mA değerleri arasında üretilen parçaların yüzey kaliteleri incelenmiştir. Optimize edilmiş parametreler (4 mA ışın akımı, 4 hız fonksiyonu, 0 mA odak ofseti) sonucu dikey ve yatay yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 24 µm ve 20 µm olarak ölçülmüştür. Çok noktalı kontur tarama stratejisi için çalışılan parametreler; nokta sayısı 10,40,55,70,80, nokta süresi 04, 0,6, 0,8 (ms), nokta örtüşmesi 0,2, 0,4, 0,6 (mm), odak ofseti 1, 3 (mA), ışın akımı 4, 6 (mA) değerleri arasında yüzey pürüzlülükleri incelenmiştir. En düşük dikey ve yatay yüzey pürüzlülük değerinin nokta sayısı 80, nokta süresi 0,4 (ms), nokta örtüşmesi 0,4 (mm), odak ofseti 3 (mA), ışın akımı 4 (mA) parametrelerinde her ikisinin de yaklaşık 27 µm olarak elde edildiği görülmüştür. Çok noktalı tarama işleminde kontur tarama işlemi sırasında, ışından gelen bütün ısı tek bir noktada yoğunlaşmış ve bu, tozun bölge çevresinde, kontur hattının ötesine uzanarak erimesine neden olmuştur. Ana hatların sürekli erimesi ve erimiş bölgelerin hızlı soğuması nedeniyle, ana hatların dışındaki erimiş bölgelerin çok noktalı olmayan numunelere göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Böylece daha iyi bir boyutsal doğruluk sağlanmış olurken çok noktalı olmayan tarama stratejisine göre daha yüksek pürüzlülük değerleri ortaya çıkmıştır. Ayrıca test edilen tüm işlem parametreleri arasında, nokta sayısı baskın faktördür. Optimum parametrelerde çok noktalı olmayan ve çok noktalı kontur tarama stratejileriyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerin topoloji görüntüleri ve optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 2.5.a. ve Şekil 2.5.b.'de verilmiştir [41].

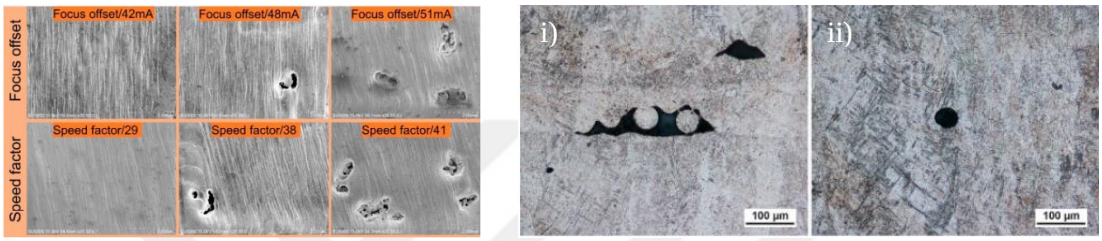


Şekil 2.5. a.) (i) Çok noktalı olmayan ve (ii) çok noktalı tarama stratejisiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin topoloji görüntüleri, b.) (i) Çok noktalı olmayan ve (ii) çok

noktalı tarama stratejisiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin optik mikroskop görüntüleri [41]

Uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V parçalarının yüzey kalitelerinin önemli olmasının yanında yüksek sıcaklıklara ve yüklere maruz kalacağından dolayı mekanik özelliklerinin de geliştirilmiş olması önemlidir. İşlem parametrelerinin Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısı ve ortaya çıkan mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada, EBM ile üretilen nispeten yoğun Ti-6Al-4V parçaları elde etmek için 40'tan daha düşük bir hız faktörünün kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Metalografik gözlem yöntemi kullanılarak yoğunluk ölçümü yapılan parçalarda odak uzaklığının ve hız faktörünün gözeneklilik üzerindeki etkisi Şekil 2.6.a.'da açık olarak görülmektedir. Odak uzaklığının (42 mA) ve hız fonksiyonunun daha düşük (29) olduğu parametrelerde maksimum bağıl yoğunluk % 99'dan azdır, ancak odak uzaklığı (51 mA) ve hız fonksiyonunun daha yüksek (41) olduğu parametrelerde çok daha yüksek (%99.87'lik) bağıl yoğunluk elde edilmiştir [16]. Oluşan bu gözenekler malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Bu gözeneklerin oluşmasının nedeni, numuneyi oluşturmak için aşırı yüksek bir odak ofseti veya hız fonksiyonunun benimsenmiş olmasıdır. Daha yüksek bir hız fonksiyonu, daha yüksek tarama hızı ile sonuçlanır ve daha büyük bir odak ofseti, daha düşük enerji girişi sağlar. Bu durumda, metal tozlarına etki eden elektron ışınının veya enerjinin süresi metal tozlarını tamamen eritmek için çok kısadır. Bu nedenle bu metal tozları tamamen erimemekte ve bu da gözenek oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca yüksek çizgi ofseti ve küçük bir odak ofseti benimsendiğinde, iki tarama çizgisi arasındaki bazı alanlardaki tozlar elektron ışını tarafından eritilemez. Bu toz parçacıkları yalnızca sinterleme boyunları ile birbirine bağlanarak katman katman birikir ve sonucunda gözenek kusurlarına dönüşür [16]. Literatürde yapılan çalışmalarda zayıf yorulma direncinin nedeninin, genellikle eklemeli imalat üretilmiş bileşenlerde gözlenen yüksek gözeneklilik seviyelerinden kaynaklandığını belirlenmiştir [53]. Üretim parametresi parametrelerinin gaz gözeneklerinin boyutu ve uzamsal dağılımlarının daha ayrıntılı incelendiği çalışmada, hız fonksiyonu değişkeni aracılığıyla erime havuzu alanının artmasının parçadaki gözenekliliği önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir [54]. Diğer bir çalışmada, farklı konumlarda, yönlerde ve mesafelerde üretilen Ti-6Al-4V parçalarının özellikleri (yüzey topografyası, mikro yapı, gözeneklilik, mikro sertlik) incelenmiştir. Bu çalışma,

incelenen diğer değişkenlere göre mekanik özellikleri kontrol eden ana faktörün gözeneklilik olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen ortalama değerlere göre platformun kenarında üretilen parçaların gözenekliliği %0.09 ve merkez bölgede üretilen parçaların ise % 0.25' tir [42]. Morfolojik açıdan, tespit edilen gözeneklilik iki tipte görülmüştür; küresel gözenekler (Şekil 2.6.b.i) ve tarama katmanlarına paralel düzensiz şekilli alanlar (Şekil 2.6.b.ii). Küresel veya yuvarlak şekilli boşluklar, gaz atomize toz partikülleri içinde hapsolmuş gazdan kaynaklanır [55]. Gözlenen düzensiz gözenekler ise erimemiş alanları temsil etmektedir.

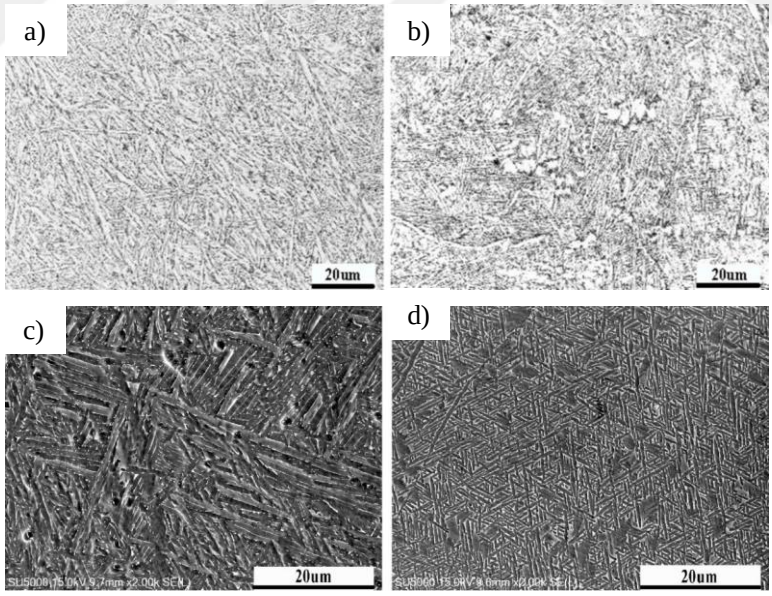


a) b)

Şekil 2.6. a) Farklı odak uzaklıkları ve hız faktörleriyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların optik mikroskop görüntüleri [16], b) (i) Gaz gözenek (küresel morfoloji) ve (ii) ergimemiş alan morfolojik görüntüleri [42].

Parçaların gözeneklilik özelliklerine ek olarak malzemede farklı termal döngüler nedeniyle oluşan farklı mikroyapılar da parçaların mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Literatürde farklı üretim parametrelerinin EBM ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların mikroyapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üretim parametrelerinin (odak ofseti, çizgi ofseti ve ısı girdi oranı) Ti-6Al-4V parçaların mikro yapısı üzerindeki etkisini incelemek için tam faktöriyel bir deney uygulanmıştır. Ti-6Al-4V parçalar X-düzlemi (yan yüzey)'nde, 40-100 µm aralığında sütun şeklinde β taneciklerini gösterir. Z-düzlemi (tarama yüzeyi), boyutu 40 ile 110 µm arasında değişen eş eksenli taneler sunar. Eş eksenli taneler, 1–2 µm aralığında α lamel kalınlığına sahip bir Widmanstätten (α + β) mikro yapı gösterir. Isı giriş hızının arttırılması ve çizgi ofsetin azaltılması, mikro yapıda daha kaba yapı elde edilmesine sebep olmuştur. Ayrıca parçaların sertlik değerleri mikroyapı kabalığı arttıkça azalmaktadır. Odak ofsetinin ise mikro yapının inceliğinde herhangi bir rol oynamadığı görülmüştür [56]. Bir diğer çalışmada Ti–6Al–4V kafes yapılı parçaların mikro yapıları incelenmiştir. Kafes yapılı parçalar için, daha yüksek soğutma hızı nedeniyle yarı kararlı faz α ve geleneksel yöntemlerle üretilen parçalarda

oluşan mikroyapıya göre daha ince bir mikro yapı oluştuğu belirtilmiştir [57]. Çizgi ofsetin 0,16 mm ve 0,28 mm olarak ayarlanarak mikroyapıya olan etkilerinin incelendiği çalışmada, 0,16 mm çizgi ofsetiyle üretilen parçaların mikroyapısında uzun ve iğne benzeri α fazlı tipik bir sepet örgü yapısı ve az miktarda β fazı olduğu görülmektedir (Şekil 2.7.a.). 0,16 mm çizgi ofsetiyle üretilen parçaların mikroyapısında ise beyaz parlak blok alanı eş eksenli birincil α fazıdır ve uzun iğne benzeri α fazı ikincil α fazıdır (Şekil 2.7.b.). Literatürdeki çalışmalarda eş eksenli birincil α fazı ve β dönüştürülmüş mikro yapıdan oluşan dubleks mikro yapıya sahip titanyum alaşımları, sepet örgüsü mikro yapıya sahip olanlardan daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu belirtilmektedir [58]. Ayrıca 0,28 mm'lik çizgi ofsetine sahip numunelerin ortam sıcaklığındaki akma mukavemeti, 0,16 mm'lik olanlardan çok daha yüksektir, bu da mikroyapı gözlem sonuçlarıyla desteklenmiştir [16]. Ayrıca Parçaların elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı incelenmesi yapılmıştır (Şekil 2.7.c,d). 0.16 mm'lik bir çizgi ofseti olan numunelerin ortalama α lamel kalınlığı 1.24 µm iken, 0.28 mm'lik bir çizgi ofseti olanınki 0.53 µm olduğu tespit edilmiştir. Literatürde, daha küçük α lamel kalınlığına sahip malzemelerin daha yüksek mukavemete sahip olduğunu gösterilmiştir [59].



Şekil 2.7. Çizgi ofsetinin Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapı morfolojisi üzerindeki etkisinin morfolojik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gösterimi, (çizgi ofsetleri : (a,c) 0.16 mm; (b,d) 0,28 mm.) [16].

EBM Ti-6Al-4V'nin mekanik özellikleri çok sayıda faktörden güçlü bir şekilde etkilenir. Gözeneklilik ve füzyon eksikliği gibi proses kaynaklı kusurların, diğer mekanik özellikler arasında gerilme mukavemetini ve sünekliliği etkilediği birçok çalışmada gösterilmiştir[39, 54, 60]. [61].

EBM tarafından üretilen numuneler için yapım yönünün etkisi; karmaşık özelliklerin, geometrilerin mekanik özellikleri nasıl etkilediğini daha iyi anlamak için bir çok yazar tarafından araştırılmıştır [62-64]. EBM işlemi sırasında farklı ısıtma ve soğutma oranı, lamel yapısı gibi mikro yapı tanecik inceltme oluşumunu etkiler.

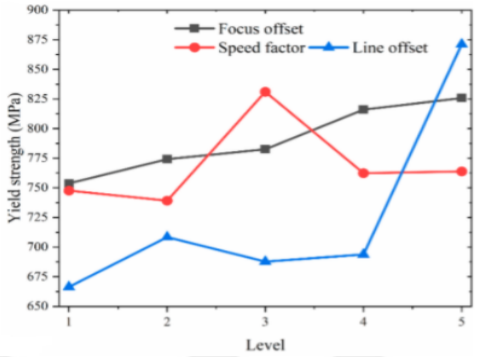
Bruno J, Rochman, Cassar, 2017 tarafından kanıtlandığı gibi, EBM işlem görmemiş yatay (XY) yönelimli numunelerin, dikey olarak yönlendirilmiş parçalara kıyasla daha yüksek katılaşma oranının bir sonucu olarak daha ince katmanlı mikro yapılara sahip olduğu bulunmuştur, ancak mekanik sonuçlar karşılaştırılabilir mukavemete ve nispeten daha düşük sünekliğe sahiptir[63]

Düşük bir çizgi ofseti veya hız faktörü, çok daha yüksek enerji girdisine yol açar. Bu koşullar altında, metal elementler bir dereceye kadar buharlaşabilir ve buharlaşma tarafından üretilen geri tepme basıncı, erimiş havuz içinde katılaşmadan sonra kusurlara dönüşen gözeneklerin oluşmasına yol açar. Çok daha yüksek bir çizgi ofseti veya hız faktörü benimsendiğinde ise, enerji girişi metal tozlarını tamamen eritmek için çok düşük olabilir, bu da gözenek oluşumuna neden olur. Gözenekliliğin varlığı malzemelerin akma mukavemetini azaltmaktadır[16]. Dolayısıyla çizgi ofseti ve hız faktörü gibi gözenekliliğe etki eden parametrelerin doğru seçimi akma mukavemeti üzerinde etkilidir.

Çizgi ofseti, hız faktörü ve odak ofseti varyasyonunun çekme mukavemeti üzerinde çok az etkisi olduğu ve gerilme mukavemetindeki değişimin 30 MPa'dan az olduğu literatürde yapılan çalışmalarda görülmektedir [16, 60].Üç faktör arasında çizgi ofseti, akma mukavemeti üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Çizgi ofseti 0,16'dan 0,28 mm'ye yükseltildiğinde, numunenin akma dayanımı 200 MPa artar. Akma dayanımı, sırasıyla 0,28 ve 0,16 mm'lik bir çizgi ofsetinde maksimum ve minimum değerini alır. EBM yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerinin deney tasarımında kullanılan faktörler ve farklı seviyeleri ve akma dayanımı üzerine çeşitli proses parametrelerinin etkisi sırasıyla Şekil 2.8.a ve Şekil 2.8.b'de gösterilmiştir[16].

Faktörler	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Odak ofseti (mA)	39	42	45	48	51
Hız faktörü	29	32	35	38	41
Çizgi ofseti (mm)	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28

(a)



(b)

Şekil 2.8. a.) EBM yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerinin deney tasarımında kullanılan faktörler ve farklı seviyeleri, b.) EBM yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerinin akma dayanımı üzerine çeşitli proses parametrelerinin etkisi [16]

Literatürdeki çalışmalar genel olarak incelendiğinde; optimize edilmiş proses parametreleri ile %99'dan fazla yoğunluk elde edilebildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca gözeneklilik ve kısmen erimiş tozlardan kaynaklanan yüksek yüzey pürüzlülüğü, tabaka kalınlığı, odak ofseti, çizgi ofseti ve ışın akımı azaltılarak iyileştirilebilmektedir. Termal döngülerden dolayı farklı ön ısıtma sıcaklıklarında oluşan farklı mikroyapılar parçaların mekanik özellikleri üzerinde önemli derecede etkilidir. Ti-6Al-4V parçaların yapısında bulunan α fazının kabalaşmasıyla sertlik ve akma dayanımı azalır. α fazı dışında gözenekliliğin varlığı da malzemelerin akma mukavemetini ve yorulma performansını azalttığı görülmüştür. EBM yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların değişen üretim parametrelerine karşılık parçanın yüzey ve yüzey altı ve performans özelliklerinin incelendiği makaleler Tablo 2.9. 'da verilmiştir.

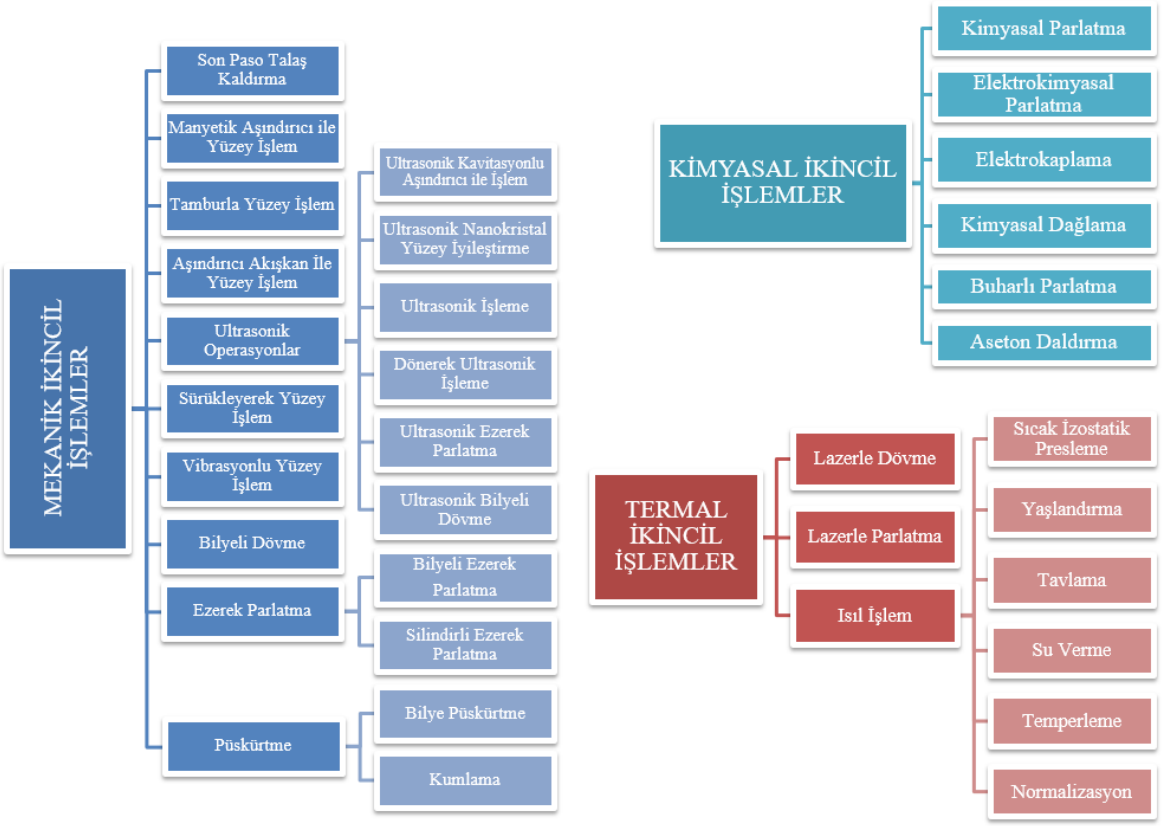
Tablo 2.9. EBM yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçaları için yapılan literatür analizi.

Ref.	Üretim Parametreleri					Yüzey ve Yüzey Altı Özellikleri		Performans		
	Katman Kalınlığı (µm)	Işın Akımı (mA)	Hız Fonk./ Tarama Hızı (mm/s)	Odak Ofseti (mA)	Çizgi Ofseti (mm)	Gözenek-lilik (%)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	UTS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)
[38, 65]	70	7.5	30	19	-	-	-	1007.7	952.2	12.3
[56]	100	20	15000 mm/s	10	0.21	-	35	-	-	-
[52]	-	5	6000 mm/s	0	-	-	15.4	-	-	-
[41]	50	4	4	0		-	19.7	-	-	-
[24]	50	21	98	3	0.1	-	-	1012	962	8.8
[66]	70	-	36	19	0.2	-	-	-	997	
[67]	50	15	10000 mm/s	3	0.1	-	-	~1000	-	~1.8
[16]	90	-	35	39	0.25	1.51	-	966.3	753.8	15.5
[16]	90	-	29	48	0.25	1.94	-	981.6	747.7	15.9
[16]	90	-	35	48	0.25	1.67	-	980.8	831.1	16.1
[16]	90	-	35	48	0.28	1.72	-	1000.3	871.2	14.7

Literatürdeki çalışmalarda, EBM üretim süreçlerinin iyileştirilmesi için optimum parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ancak her ne kadar optimum parametreler seçilerek parçaların yüzey kaliteleri ve mekanik özellikleri iyileşse de Ti-6Al-4V parçalarının yaygın olarak kullanıldığı havacılık endüstrisi için istenilen seviyeye erişilememiştir. Bu yüzden EBM ile üretilen parçalara ikincil işlemlerin yapılmasına gerek duyulmaktadır.

2.3. Eklemeli İmalat Sonrası Kullanılan İkincil İşlemler

Eklemeli imalat proses parametrelerinin optimizasyonu sırasında yüzey kalitelerinde ve mekanik özelliklerinde istenilen seviyede sonuçlar elde edilmeyebilmektedir [68]. Parçaların yüzey kalitelerinin ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için ikincil işlemlerin uygulanması gerekli olabilmektedir [69]. Eklemeli imalatta parametre optimizasyonu her ne kadar nihai ürünün belirtilen toleranslar içerisinde üretilmesini hedeflese de genellikle durum böyle olmamaktadır. Bu durumlarda, ürünün kullanılabilmesi için ihtiyaç duyulan makro ve mikro boyuttaki mekanik, geometrik ve yüzey özelliklerini elde edebilmek için ikincil işlemler uygulanır.



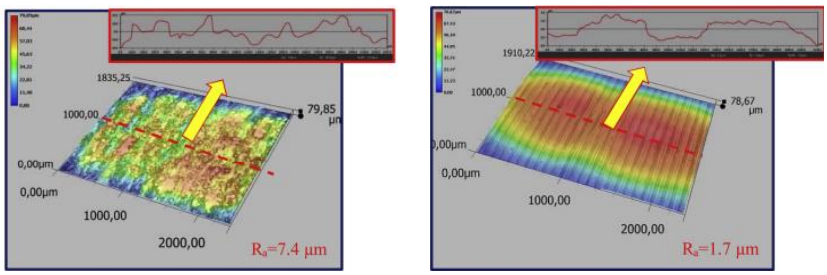
Şekil 2.9. İkincil işlemlerin sınıflandırılması

Eklemeli imalat ile üretilen parçalara uygulanan ikincil işlemleri 3 ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar mekanik, kimyasal ve termal işlemlerdir. Malzemeye kazandırılmak istenen özelliklere göre bu ikincil işlemlerden birini uygulamak veya birkaçını peş peşe uygulamak mümkündür, bunlar literatürde hibrid ikincil işlemler olarak geçmektedir. Şekil 2.9.'da ikincil işlemler uygulanma tekniklerine göre sınıflandırılmıştır.

2.3.1. Mekanik İkincil İşlemler

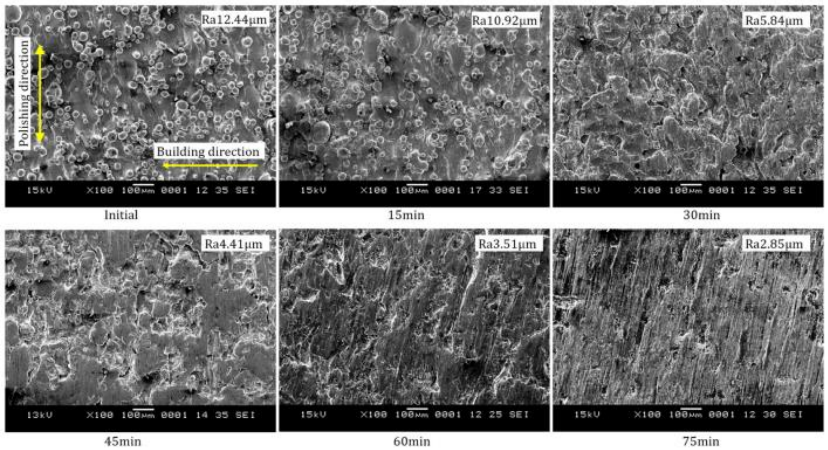
En sık tercih edilen ikincil işlemler mekanik ikincil işlemlerdir. Literatürde kullanılan çok sayıda mekanik tabanlı ikincil işlem vardır, ancak bunlardan sadece bazıları akademi ve endüstriler tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar son paso talaş kaldırma operasyonları, ultrasonik işleme, bilyeli dövme, manyetik aşındırıcılı yüzey işlem, aşındırıcı akışlı işleme, sürükleyerek yüzey işlem, vibrasyonlu yüzey işlem, parlatma, kumlama ve tamburlu yüzey işlemedir.

Son Paso Talaş Kaldırma: Parçaya nihai şeklini vermek ve malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu operasyon geleneksel imalatla üretilen parçaların yanı sıra, eklemeli olarak üretilen 316L, In718, Ti64, Ti553 gibi malzemelerin yüzeyini işlemek için kullanılmaktadır. Taşlama, frezeleme ve tornalama en yaygın son paso talaş kaldırma yöntemlerindendir. Bu operasyonlardaki en önemli parametreler; kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme koşullarıdır. Bu parametreler yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkilemektedir [70-72]. Bu işleme tabii tutulan parçalar yüksek termal ve mekanik deformasyona maruz kalmaktadır. Ayrıca işlem gören yüzeye yakın yerlerde yüksek gerinim kaynaklı tane incelmesi görülmektedir. Bu tane incelmesi malzemenin mekanik dayanımına katkı sağlar ve bir yüzey mikro sertliğinde artışa sebep olur. Ayrıca takım ile iş parçası arasında oluşan termal gradyanın da mikro sertliği arttırdığı görülmüştür [73]. Malzeme yüzeyindeki çatlak başlangıçlarına sebep olabilecek kusurlar kaldırıldığından parçanın yorulma ömrünü de artırdığı görülmüştür [74]. Parçaya kazandırdıkları bu özelliklerle son paso talaş kaldırma işlemi, eklemeli imalat ile üretilen parçalar için tercih edilen mekanik ikincil işlemlerden biridir. Ancak eklemeli imalat ile üretilen karmaşık geometrili parçaların işlenmesine uygun bir yöntem değildir. Kaynak ve arkadaşlarının [75] L-PBF yöntemi ile imal edilmiş 316L paslanmaz çeliği üzerinde yaptığı bir araştırmada başlangıç yüzey kalitesi Ra=7.4 µm olan iş parçasının yüzey kalitesi uygulanan son paso talaş kaldırma operasyonu sonrasında Ra=1.7 µm seviyesine düşürülmüştür. Şekil 2.10.'da son paso talaş kaldırma işleminin yüzey üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Yine aynı çalışmada son paso talaş kaldırma işleminin yüzey pürüzlülüğünü azaltmanın yanı sıra pekleşmeye sebep olduğu ve dolayısıyla yüzey mikro sertliğinde artışa yol açtığı saptanmıştır.



Şekil 2.10. Toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçalarının a) işlem görmemiş ve b) son paso talaş kaldırma uygulandıktan sonraki yüzey görüntüleri [75].

Manyetik Aşındırıcı İle Yüzey İşlem: Bu işlemde iş parçası üzerindeki ferromagnetik aşındırıcı partiküller, oluşturulan manyetik alan sayesinde hareket ederek iş parçası üzerinden mikro talaşlar kaldırır ve böylece yüzey finisajı sağlanır [76]. Manyetik aşındırıcı genelde feeromagnetik aşındırıcı (demir, çelik tanecikleri) ve aşındırıcı taneciklerin (alümina, SiC, elmas) karışımı şeklinde olur. Yapılan çalışmalarda uygulanan manyetik kuvvetin; manyetik parçacıkların hacmi ve duyarlılığı, ayrıca manyetik alana bağlı olduğu tespit edilmiştir [77, 78]. Genellikle paslanmaz çelik, seramik, bakır ve polimer malzemelerin işlenmesinde kullanılır [79]. Ayrıca disklerin, çubukların, boruların, karmaşık yapılı parçaların, kesici takımların, sıhhi boruların, kavisli boruların, biyopsi iğnesi gibi kılcal boruların işlenmesinde tercih edilir [80-85]. İşlem gören iş parçasının yüzey özelliklerine göre; silindirik yüzey bitirme, iç yüzey bitirme ve düz yüzey bitirme olarak üç farklı şekilde uygulanır [86]. Zhang ve arkadaşlarının [87] yaptığı bir çalışmada, toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçalarına manyetik aşındırıcı ile yüzey işlem uygulanmıştır. Manyetik aşındırıcı parçacık olarak G50 çelik parçacıklarının kullanıldığı çalışmada alt mıknatıs (N50 Nd-Fe-B) sabitken üst mıknatıs (N50 Nd-Fe-B) 20 mm genliğinde 28.8 Hz'lik bir titreşim frekansıyla çalışmaktadır. Şekil 2.11.'de görüldüğü üzere yüzey pürüzlülüğü Ra=12.44 μm'den 75 dakikada Ra=2.85 μm'ye düşürülmüştür. Ayrıca kısmen erimiş toz tanecikleri ve küreselleşme kusurları giderilmiştir. Uniform bir yüzey elde edilmiştir.

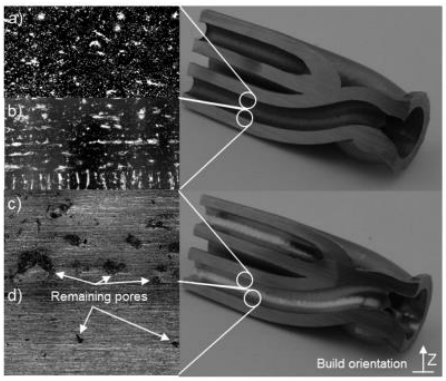


Şekil 2.11. Manyetik aşındırıcı ile yüzey işlem süresinin toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçalarının yüzey topolojisine etkisi [87].

Tamburla Yüzey İşlem: Dönen bir tahrik mekanizmasının içinde belirli oranlarda su, kimyasal ve aşındırıcı medya eklenerek, döne hareketiyle birlikte aşındırıcı medyanın iş parçasına sürtünmesinden kaynaklı gerçekleşen yüzey bitirme işlemidir [88]. Endüstride, çapak alma, cilalama, yayma, kaba işeme ve bitirme işlemleri için yaygın olarak kullanılmaktadır [89]. Proses; işlem gören parçanın niteliği, tamburun doldurulma oranı, aşındırıcı medyanın cinsi, su ve kimyasalın bileşim oranı, döndürme hızına bağlıdır [90]. Tamburla yüzey işlemin en büyük avantajı tekrarlanabilirliğidir. Ayrıca parçanın herhangi bir yere sabitlenmesi gerekmediğinden karmaşık geometrili parçaların işlenmesinde kullanılabilir. Boschetto ve arkadaşlarının [91] toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V parçaları üzerinde farklı parametrelerde uyguladığı tamburla yüzey işlem sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün belirgin bir şekilde azaldığını bununla birlikte çekme, akma dayanımlarının ve uzamanın arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca dönüş hızı ve işlem süresi arttıkça beklenildiği üzere daha düzgün yüzeyler elde edilmiştir.

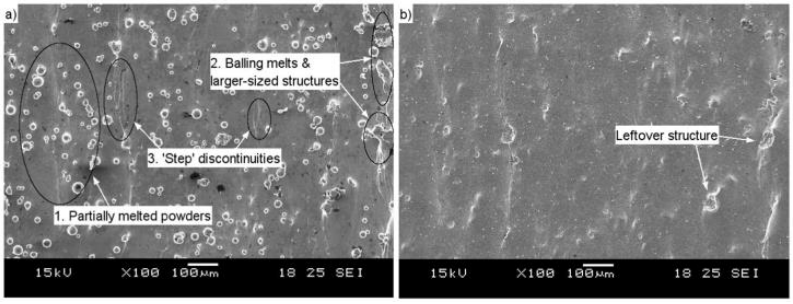
Aşındırıcı Akışkan ile Yüzey İşlem: Kimyasal olarak aktif olmayan bir macun içerisindeki aşındırıcı medyalar parça iç yüzeyinde taşlama görevi görerek yüzey kalitesinin artırıldığı bir yöntemdir. Aşındırıcı akışkan ile işleme, parçaların iç yüzeyinden çapak almak, parlatmak, köşe yuvarlatması yapmak ve yüzey gerilimini gidermek için kullanılır [92]. Yüksek yüzey özellikleri istenen ancak işlenmesi zor geometrilere sahip parçalar için kullanılır. Pürüzsüz bir yüzey elde ederek; havacılık komponentlerinde sürtünmeyi azaltmak, motorlarda tork ve yakıt verimliliğini artırmak, medikal sektöründe kusursuz yüzeyler elde etmek için kullanılır. İşlem parametreleri; iş parçasının sertliği, medya akış hızı, viskozitesi ve aşındırıcı medyanın boyutu, oranı, yoğunluğu, sertliğidir. Bu parametreler kontrol edilerek kaldırılan malzeme oranı ayarlanabilir. Tutarlı ve tekrarlanabilir bir prosestir. Tek yönlü, iki yönlü ve yörüngesel aşındırıcı akışkan ile işleme olmak üzere üç çeşittir.

Toz yatağında seçici lazer ergitme prosesiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik kanallarına (Şekil 2.12.) uygulanan aşındırıcı akışkan ile işleme öncesi alt yüzey pürüzlülüğü Ra=27.7 µm ve üst yüzey pürüzlülüğü Ra=4.12 µm iken, proses sonrasında alt yüzey pürüzlülüğü Ra=5.52 µm ve üst yüzey pürüzlülüğü Ra=0.39 µm'ye düşürülmüştür [93].



Şekil 2.12. Toz yatağında seçici lazer ergitme prosesiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik kanalların aşındırıcı akışkan işleminde önce a)alt yüzey, b)üst yüzey ve sonra c)alt yüzey, d)üst yüzey topografileri [93].

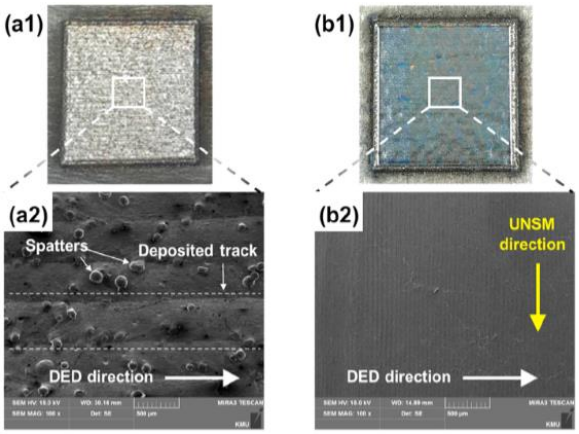
Ultrasonik Kavitasyonlu Aşındırıcı İşlem: Sıvı bir ortamda sinüzoidal ultrasonik basınç dalgasının meydana getirdiği kavitasyon kabarcıklarının yüksek basınçla patlayarak iş parçasından parçacıklar koparması prensibine dayanır. Normalde yüzey pürüzlülüğünün bozulmasına sebep olan bir hasar mekanizması olarak değerlendirilir [94]. Ancak yapılan çalışmalarda prosese mikro aşındırıcıların eklenmesiyle, pürüzlülük gidermeye yönelik bir ikincil işlem olarak kullanılmasının mümkün olduğu ortaya konmuştur [95]. İş parçasının iç ve dış yüzeylerine uygulamak mümkündür. Tan ve arkadaşlarının [95] direkt metal lazer sinterleme yöntemiyle üretilmiş Inconel 625 parçasına uyguladığı ultrasonik kavitasyonlu aşındırıcı işlem sonrasında elde ettiği sonuçlar incelendiğinde, yüzey düzensizliklerinin giderildiği ve yüzey homojenizasyonunun sağlandığı görülmüştür. Şekil 2.13.'te kısmen erimiş tozların, basamak süreksizliklerinin, küreselleşme kusurlarının giderildiği görülmüştür.



Şekil 2.13. Direkt metal lazer sinterleme yöntemiyle üretilmiş Inconel 625 parçasının a) işlem görmemiş halinin tipik yan yüzey özellikleri ve b) 30 dakikalık UCAF işleminden sonra yüzey topografisi [95].

Ultrasonik Bilyeli Dövme: Bu yöntemde iş parçası yüzeyine yüksek salınım frekanslı sert cisimler çarpıtılır. Geleneksel bilyeli dövmeden farklı olarak kinetik enerji kaynağı olarak titreşen bir sonotrodun ultrasonik enerjisini kullanır. Parçalarda basma artık gerilmesi oluşturarak parçaların mekanik mukavemetini ve yorulma ömrünü artırır [96]. Malzeme kaldırma olmadığı ve yüksek yüksek boyutsal doğruluk nedeniyle özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılır [97]. Persenot ve arkadaşlarının [97] toz yatağında elektron demeti ile ergitme yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V çekme numunelerine 100C6 çelik bilyeler ile vibrasyon genliği 110 µm ve frekansı 20 kHz olan ultrasonik bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü Ra=46.2 µm'den Ra=15.7 µm'ye düşürülmüştür. Yüzey kalitesinin, basma kalıntı gerilmesinin ve yorulma ömrünün arttığı görülmüştür.

Ultrasonik Nanokristal Yüzey İyileştirme: Bu işlem ultrasonik ezerek parlatma ve ultrasonik dövmenin bir kombinasyonudur. Titreşen ultrasonik bir cihaza bağlı olan tungsten karbür uç, malzemenin yüzeyine belirli bir güzergahta yüksek frekanslı (10-30 KHz) darbeler uygular. Ultrasonik darbeler daha derinlerde plastik deformasyonlar oluşturmaktadır. Yüksek frekanslı ultrasonik darbeler basma kalıntı gerilmesini artırırken, yüzey porozitesini de azaltıcı rol oynar. Çekme dayanımını, aşınma direncini ve yorulma ömrünü artırır. Bunun yanında uygulanan statik yük parlatma işlemi uygular gibi davranarak yüzey kalitesini geliştirir, mikrosertliği artırır [98-100]. Kim ve arkadaşları [101] bir çalışmasında doğrudan enerji depolama yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çeliğe farklı parametrelerde (statik kuvvet, tarama yolu aralığı ve tarama hızı) ultrasonik nanokristal yüzey iyileştirme işlemi uygulanmıştır. Şekil 2.14.'te gösterilen çalışmada doğrudan enerji depolama yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçasının işlem görmemiş halinin ve ultrasonik nanokristal yüzey iyileştirme uygulandıktan sonraki yüzey görüntüleri yer almaktadır. Yüzeydeki erimemiş ve kısmen erimiş toz parçacıkaları işlem sonrasında tamamen kaybolmuştur. Yüzey pürüzlülüğü ve dalgalanmalar kıyaslandığında en etkili parametrenin uygulanan statik yük ve etkisi en az olan parametrenin ise tarama hızı olduğu görülmüştür. Yükün işlem gören parçanın mukavemet ve süneklik özelliklerine göre belirlenmesi gerekir çünkü aşırı yüksek veya aşırı düşük statik yükün parça yüzeyini bozduğu görülmüştür. Prosesin dezavantajlarından biri her malzeme için proses parametrelerinin yeniden optimizasyonu gerekir. Ayrıca karmaşık geometrili parçaların işlenmesi için uygun bir yöntem değildir.



Şekil 2.14. Doğrudan enerji depolama yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçasının a1,a2) işlem görmemiş halinin ve b1,b2) ultrasonik nanokristal yüzey iyileştirme uygulandıktan sonraki yüzey görüntüleri [101].

Ultrasonik Ezerek Parlatma: Malzemeden parça kaldırmadan, dik bir torna tezgahına bağlanan ultrasonik parlatma aleti ile iş parçası yüzeyine dinamik (ultrasonik titreşim kaynaklı) ve statik (aletin iş parçası üzerine bastırılması kaynaklı) kuvvetler uygulanarak plastik deformasyonlar meydana getirir [102, 103]. İşlem parçada yüksek basma gerilmeleriyle sonuçlanır. Ayrıca parça mikro sertliğindeki artış ile birlikte aşınma direncini, korozyon direncini ve yorulma mukavemetini artırır. İşlem parametreleri ultrasonik nanokristal yüzey iyileştirme işlemine benzer olarak uygulanan ultrasonik frekans, uygulanan statik yük, tarama aralığı, tarama hızı ve uygulama derinliğidir. Eklemeli imalat le üretilen AlSi10Mg parçalarına, Tarama aralıklarının, ezerek parlatma süresinin ve ezerek parlatma derinliklerinin farklı olduğu vibrasyon genliği 0.8 µm ve frekansı 27 kHz olan ultrasonik ezerek parlatma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem ile yüzey pürüzlülüğünü %98 oranında iyileştirmek mümkün olmuştur. Ayrıca takım şeklinin işlem sonucuna daha az etki etmesi için daha dar tarama aralıkları, kusurları elimine etmek için daha derin ezerek parlatma ve daha yüksek yüksek mikro sertlikler için daha uzun işlem sürelerinin seçilmesi gerektiğini saptamışlardır [104].

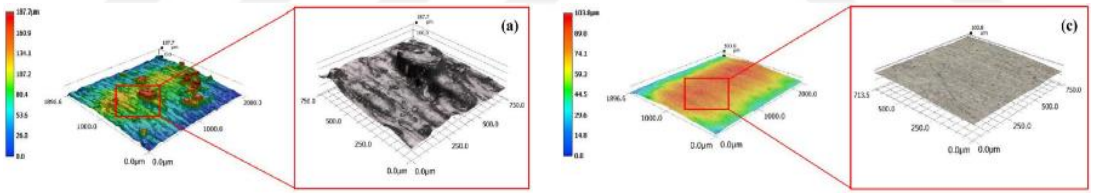
Ultrasonik Talaş Kaldırma ve Dönerek Ultrasonik Talaş Kaldırma: Ultrasonik talaş kaldırma prosesi, sünek ve tok bir takımın ultrasonik frekanslarda titreşerek iş parçası ile takım arasındaki aşındırıcı akışkanın ilerlemesi sırasında aşındırıcının iş parçasından minik talaş kaldırması prensibi ile çalışır. Takım ile iş parçası arasındaki boşluk oldukça azdır. İletken olmayan, kırılgan, ısıl geçirgen olmayan parçaların işlenmesinde

kullanılabilir [105]. Literatürde eklemeli imalat ile üretilen parçaların işlenmesinde ultrasonik talaş kaldırmadan ziyade, dönerek ultrasonik talaş kaldırmanın tercih edildiği görülmektedir. Yapılan bir çalışmada toz yatağında elektron demeti ergitme yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçasına dönerek ultrasonik talaş kaldırma işlemi uygulanmıştır [106]. En iyi yüzey kalitesi düşük besleme oranı, kesme derinliği, vibrasyon güç kaynağı, titreşim frekansı ve yüksek dönme hızlarında elde edilmiştir. Elektron demeti ergitme yöntemi ile üretilmiş parçaların yüzey kalitesini artırmak için etkili bir yöntem olduğu ortaya konmuştur.

Sürükleyerek Yüzey İşlem: Sürüklemeli yüzey iyileştirme bir kütle yüzey işlemi olarak birçok endüstride özellikle yüzey iyileştirme işlemlerinin ciddi maliyetlerini düşürmek için uygulanan yaygın bir teknoloji olarak kabul görmüştür [107]. Endüstride yaygın olarak kullanılan bir dizi farklı kütle bitirme işlemi olmasına rağmen, kullanım kolaylığı, otomasyon ve malzeme işleme açısı gibi yönteme özgü avantajlar bu tip ikincil işlemler baskın yöntemler haline gelmiştir. Ayrıca biyomedikal ve havacılık dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerdeki birçok büyük ve karmaşık parçanın yüzey iyileştirme işlemleri bu tip uygulamalarla tamamlanmıştır. Sabit iş parçası düzeneğinin kullanıldığı sürüklemeli yüzey iyileştirme prosesinde parçalar bu düzenek sayesinde çarpışmamakta ve etkin bir şekilde işlem gerçekleşmektedir [108]. Tıbbi implantlar, dişli bileşenleri, türbin kanatları ve kesici takım kenarlarının yuvarlatılması gibi birçok endüstride geniş bir uygulama alanına sahiptir [109]. Bu yüzey iyileştirme prosesi geleneksel yöntemlerle üretilen parçalarda halihazırda kullanılırken eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey kalitelerini istenilen seviyeye taşıma konusunda da yüksek potansiyele sahiptir. Sürüklemeli yüzey iyileştirme işlemi, geometrik olarak tanımlanmamış bir kesme kenarına sahip bir işleme sürecidir. İş parçası, serbest aşındırıcı taneciklerin bulunduğu bir kaba daldırılır. Aşındırıcı ortam genellikle seramik, plastik bağlı aşındırıcı parçacıklar, silisyum karbür, korundum, kuvars veya ceviz kabuklarından oluşur. Ana kolu ve uydu taşıyıcıları döndürerek, iş parçasını döner namlunun içinde hareket ettirerek, aşındırıcı ortam parçacıkları, malzeme kaldırmaya yol açan takım yüzeyi boyunca sıçrar ve sürüklenir [110, 111]. Talaş kaldırma hızı, aşındırıcı ortamın özelliklerine, iş parçasının özelliklerine, daldırma derinliğine, ana kolun dönüş hızına ve yönüne ve uydu taşıyıcıların yanı sıra işleme süresine bağlı olarak etkilenebilir [110]. Her araç bir gezegensel hareketi tanımlar ve aynı zamanda kendi ekseni üzerinde döner. Kenarların

düzgün bir şekilde yuvarlanmasını sağlamak için, işlem sırasında dönme hissi periyodik olarak tersine çevrilir. Keskin/öğütülmüş öğütücülerle elde edilen sonuçlar, daha sonra, bir Otec DF 70 makinesinde gerçekleştirilen, sürükleme bitirme işlemine tabi tutulan takımlarla elde edilen sonuçlar beklendiği gibi, aşındırıcı bir etki uygulayan sürükleme bitirme işlemi, kenar yarıçapını arttırır ve kenar yüzey kalitesini iyileştirir: pürüzlülük tepe noktaları kısmen yeniden şekillendirilir ve böylece düzlenir [112].

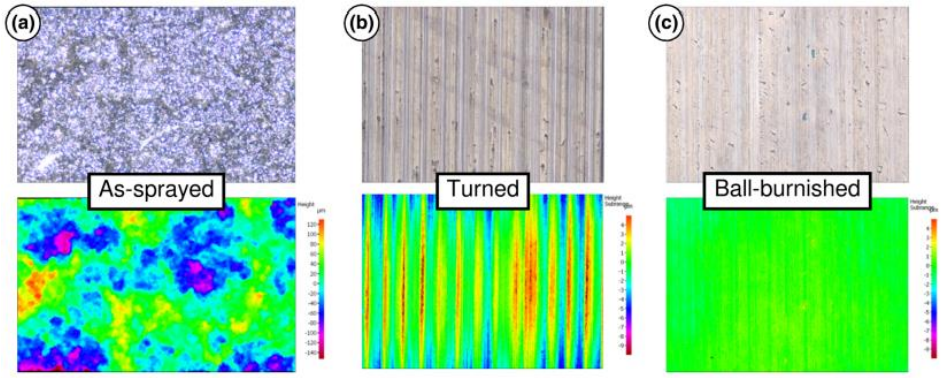
Jamal ve ark. [113] düşük enerji gereksinimleri ve hızlı çevrim süreleri, sürüklemeli yüzey iyileştirme prosesinin sabit parça proseslerini endüstriyel olarak sürdürülebilir kıldığını, yüksek kalite ve performansın önemli gereklilikler olduğu farklı üretim alanlarında umut verici hale getirir. Kaynak ve ark. [111] (Şekil 2.15.), lazerle toz yatağında ergitme ile üretilen Inconel 718 süper-alaşım parçalarına uygulanan ikincil işlemleri incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Sürüklemeli yüzey iyileştirme prosesinin yüzey pürüzlülüğünü işlem görmemiş parçaya göre %87,8 oranında azalttığı, mikrosertlik değerini ise yüzeyde %11 civarında arttırarak ise aşınma hacmini %6,73 oranında azalttığı analiz edilmiştir.



Şekil 2.15. L-PBF ile üretilen Inconel 718 süper-alaşım parçalarının işlem görmemiş ve sürüklemeli yüzey işlem uygulanmış topografileri [111].

L-PBF yöntemi ile imal edilmiş 316L paslanmaz çeliği üzerinde yapılan bir araştırmada, iş parçası numuneleri çeşitli şekillerde hareketlendirilen aşındırıcı ortamlar içerisinde işlenmektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi dairesel hareket kazandırılan aşındırıcı ortam içindeki silindirik numune 2 ve 4 saat süreyle işlenmektedir. Başlangıç yüzey kalitesi Ra=7.4 µm olan iş parçasının yüzey kalitesi 2 saat sonrasında Ra=3.3 µm, 4 saat sonrasında ise Ra=2.7 µm seviyesine düşmektedir [75].

Ezerek Parlatma: CNC tezgahlarına bağlanan parlatma takımının iş parçası üzerine kuvvet uygulama suretiyle parça üzerindeki girinti ve çıkıntıları ezerek pürüzsüz bir yüzey elde etmeyi amaçlayan bir yöntemdir [114, 115]. Parlatma takımının şekline göre küresel ezerek parlatma ve silindirik ezerek parlatma olarak iki çeşidi vardır. Küresel ezerek parlatmada kuvvet iş parçasına küresel bilyenin temas ettiği noktadan uygulanırken, silindirik ezerek parlatmada silindirin iş parçasına temas ettiği eksen boyunca uygulanır. Küresel veya silindirik takım yaklaşık 60 Rockwell sertliğine sahip sertleştirilmiş çelikten üretilir [116]. Ezerek parlatma işleminin işlem parametreleri (ezme kuvveti, ezme hızı, besleme oranı, ezme derinliği, işlem sıcaklığı) iş parçasına kazandırılan mekanik özellikleri doğrudan etkiler. Hem yüzey kalitesini iyileştirirken hem de basma kalıntı gerilmesi oluşturur. Ayrıca yüzey sertliğini artırıp, yüzeye yakın yerlerdeki mikroyapıda tane küçülmelerine sebep olur. Bu da iş parçasına aşınma direnci, yorulma dayanımı, aşınma ve korozyon direnci kazandırır. Bu sebeple hem geleneksel yöntemlerle üretilen hem de eklemeli imalat ile üretilen parçaların işlenmesinde kullanılan bir yöntemdir [117, 118]. Eklemeli imalat ile üretilen parçalara ezerek parlatma işlemi uygulamadan önce tornalama operasyonu yapılması durumunda daha homojen ve düzgün yüzeyler elde edilmektedir. Şekil 2.16.'da ezerek önce işleminden önce tornalama işlemi uygulanmış parçanın topografileri ve 3D görüntüleri gösterilmektedir. Ezerek parlatma işlemi ile tornalama sonrası parça yüzeyinde kalan merdiven etkisinin giderildiği görülmüştür [119].



Şekil 2.16. Soğuk sprey yöntemi ile üretilmiş 17-4 PH paslanmaz çeliğin a)işlem görmemiş, b)tornalanmış ve ezerek parlatma uygulanmış yüzeyinin görüntüleri [119].

Ezerek parlatma işlemi malzemeye kazandırdığı özellikler sayesinde yaygın olarak kullanılan bir süperfinisaj yöntemi olarak kabul edilmekle birlikte, uygulanabilen

yüzeyler açısından oldukça kısıtlıdır [120]. Yalnızca ezerek parlatma takımın işlevsel olarak hareket edebileceği yüzeylere sahip parçalar için kullanılabilir.

Bilye Püskürtme: Bilyeli dövme parçanın mekanik dayanımını artırıp, parça ömrünü artırıcı özellikler kazandırırken, bilye püskürtme daha çok bir sonraki prosese hazırlık aşaması gibidir. Endüstride kir ve yağ gibi kirletici maddelerin iş parçasından uzaklaştırılmasında kullanılır. İş parçasının yüzey pürüzlülüğünü azaltma amacıyla kullanıldığı gibi yüzeyi pürüzlendirmek için de kullanılabilir. Eklemeli imalat ile üretilen parçaların ise yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için kullanılır [121].

Bilyeli Dövme: Küçük küresel medyaların malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmesi amacıyla iş parçası yüzeyine çarpmasıyla yüzeyde plastik deformasyonlar oluşturur. Bilyeli dövmede her atış bir çekiç görevi görür. Dövme yoğunluğu, medya çeşidi, medya hızı ve temas açısıyla kontrol edilir [122, 123]. Genellikle medya olarak metal, cam, seramik, karbit kullanılır ve bu aşındırıcılar tekrar kullanılabilir [124]. Alüminyum alaşımlarının yüzeyinin iyileştirilmesinde genellikle bilyeli dövme kullanılır [125]. Toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen AlSi10Mg parçalarına iki farklı büyüklükte cam kürecikler püskürtüldüğü çalışmada, küre boyutu küçüldükçe daha yüzeyler elde edildiği ve mikro çatlakların önüne geçildiği saptanmıştır. Ayrıca yüzeyde yüksek basma kalıntı gerilmeleri ve sertleşme görülmüştür [126]. Direkt metal lazer sinterleme yöntemiyle üretilmiş 17-4 paslanmaz çeliğe iki aşamalı olarak basınçlı hava ile önce alüminyum oksit bilyeye (340 kPa, 30 s) ve ardından cam bilyeye (380 kPa, 30 s) maruz bırakıldığı çalışmada; iş parçasının yüzey pürüzlülüğünün Sa= 4.008 µm'den Sa= 1.164 µm'ye, mikro sertliğin 260 HV'den 450 HV'ye, akma dayanımın 314 Mpa'dan 934 Mpa'a, aşınan hacmin 1.74 µm'den 1.06 µm'ye değiştiği görülmüştür [127].

Kumlama: Bir nozuldan iş parçası üzerine basınçlı hava ile kinetik enerji kazandırılmış kumların püskürtülerek, iş parçasından malzeme kaldırması prensibi ile çalışır. Farklı kullanım amaçları ve alanları vardır. Geleneksel yöntem ile üretilmiş parçalara pürüzlülük kazandırmak için kullanılırken, eklemeli imalat ile üretilmiş parçaların ise yüzey pürüzlülüğünü gidermek için kullanılır [128, 129]. Kumlama işlemi bir ön ikincil işlem olarak eklemeli imalat ile üretilen parçaların üzerindeki yapışmamış tozları uzaklaştırma için kullanılır [130]. Toz yatağında elektron demeti ile ergitme yöntemiyle üretilen parçalar, vakum altında üretildikleri için üretimden üzerinde metal tozlaarı ile bir

kalıp halinde çıkar. Aynı toz kullanılarak kumlama işlemi yapılarak iş parçaları tozlardan arındırmak amacı ile de kullanılmaktadır [131]. Paslanmış parçaların üzerindeki oksidasyon tabakasını kaldırmak için kullanılmaktadır [132]. Yapıla bir çalışmada toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarına kumlama işlemi uygulayarak yüzey pürüzlüğünü Ra= 17.9 μm'den Ra=10.1 μm'ye düşürdüğü, parlatma ve mikro talaş kaldırma işlemlerine göre yorulma ömrüne daha çok katkı sağladığı gösterilmiştir [133].

2.3.2. Kimyasal İkincil İşlemler

Kimyasal ikincil işlemler, parçaların yüzey kalitesini ekonomik ve kolay biçimde iyileştirebildiği için tercih edilmektedir. Özellikle biyomedikal endüstrisinde kullanılan parçaların yüzey temizliği ve parlatılmasında sıkça kimyasal ikincil işlemler kullanılmaktadır [134]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, kimyasal çözeltilerin plastik parçalara daha iyi nüfuz edebilmesi özelliği sebebiyle FDM ile üretilen ABS parçalara genel olarak kimyasal son işlem yöntemleri uygulandığı görülmektedir [135]. Bazı kimyasal ikincil işlemlerin yüzey pürüzlülüğünü azaltmanın yanı sıra eğilme mukavemeti ve aşınma direnci özelliklerini de artırdığı görülmüştür [136]. Ancak bazı çalışmalarda ise bu yöntemin çekme mukavemetini azalttığı ve parçanın hedef boyutunda sapmalara sebep olduğu sonucuna varılmıştır [137]. Aşağıda kimyasal ikincil işlemlerden kısaca bahsedilmektedir.

Elektrokaplama (Electroplating): Her ikisi de bir eletrolit banyosuna daldırılan iki elektrot, anot ile katot arasında bir akım oluşturur. Metal iyonları anottan katota birikir. Böylece malzeme yüzeyinde elektrokimyasal yöntemlerle metalik bir film tabakası oluşturulur [138]. Kaplama; parçanın mukavemetini geliştirir [139], parçaların young modülünü artırır [140], korozyon direncini artırır [141] ve parçaya bir miktar iletkenlik kazandırır [142]. Malzemeye kazandırdığı mekanik özelliklerin yanı sıra estetik nedenler için de tercih edilebilen bir yöntemdir. Kaplama malzemesi olarak en sık; altın, bakır, gümüş, krom, nikel, çinko, pirinç gibi malzemeler kullanılır [143].

Kimyasal Dağlama (Chemical Etching): Parça yüzeyi ile kimyasal çözelti arasında gerçekleşen reaksiyon sayesinde, yüzey pürüzlülüğünü düşüren bir yöntemdir. Daha çok karmaşık geometrili parçalar için tercih edilir. Bu sebeple eklemeli imalat ile üretilen parçalar için uygundur. Ancak eklemeli imalatın en sık kullanıldığı medikal sektöründe

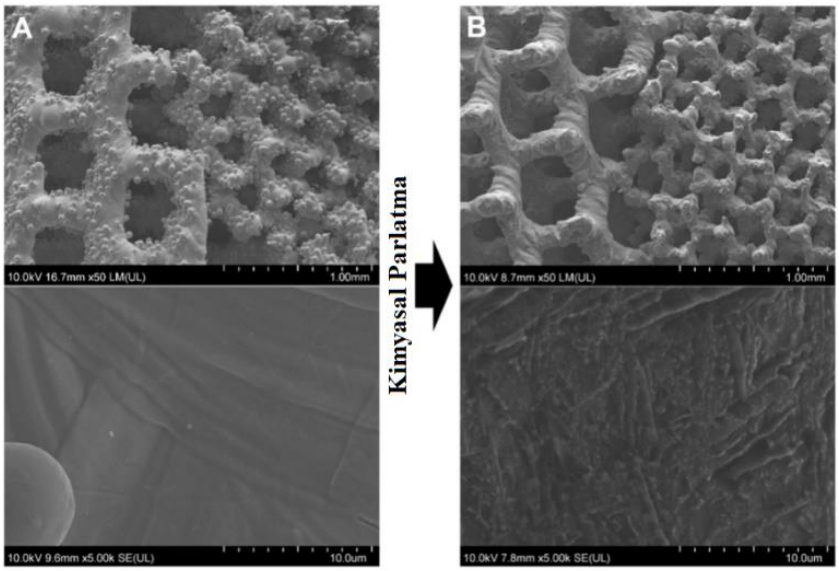
bu işlemin kullanılması tavsiye edilmez [144]. Çünkü parça yüzeyinde kalan kimyasallar insan sağlığı için tehlike arz edebilir. İşlem; uygulaması basit bir yöntem olmakla beraber, her malzeme için farklı kimyasal dağlama solüsyonuna ihtiyaç vardır. Ayrıca solüsyonun hazırlığı ve kullanımı sırasında koruyucu donanım ve ekipman kullanımına dikkat etmek gerekir.

Buharlı Parlatma (Vapour Smoothing): Sıcak kimyasal buharın iş parçasından tanecik koparak yüzeyi düzleştirmesi prensibi ile uygulanır [145]. Daha çok termoplastik malzemelerin parlatılmasında tercih edilir. Kimyasal olarak ise; aseton, dikloroetilen, tetra hidrofloroid, etil asetat vb. kullanılır [146]. İşlem parametreleri; iş parçasının niteliği, kimyasal çözelti birleşimi, uygulama sıcaklığı ve maruz kalma süresidir. Eklemeli imalatta eriyik yığma modelleme ile üretilen ABS parçaların parlatılmasında sıkça kullanılan bir yöntemdir [145-147]. Yapılan çalışmalarda, eriyik yığma modelleme ile üretilen ABS parçalarda en iyi yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için buharlı parlatma işlem sıcaklığının 60 ° ila 80 ° C arasında olması gerektiği belirtilmiştir [148].

Aseton Daldırma (Aseton Dipping): Parçaların aseton solüsyonu dolu bir banyoya daldırılarak yüzey kalitesini geliştirmeye yönelik bir işlemdir. Kullanımı kolay, hızlı ve ucuz bir yöntemdir. Buharlı parlatmaya benzer şekilde eriyik yığma modelleme ile üretilen ABS parçaların yüzey kalitesini geliştirmek için kullanılır [135]. ABS parçaların yüzey pürüzlülüğünü %90'a kadar iyileştirebilir [149]. Bununla birlikte parçanın mukavemetini ve aşınma direncini artırır. Dezavantaj olarak; parçanın boyutsal doğruluğunda sapmalara sebep olabilir, aseton çatlaklara sızarak parçada bozulmalara sebep olabilir. Aseton solüsyonu soluması insan sağlığına zararlı bir kimyasaldır. Aseton solüsyonun derişikliğine göre uygulama süresi değişiklik gösterir [134].

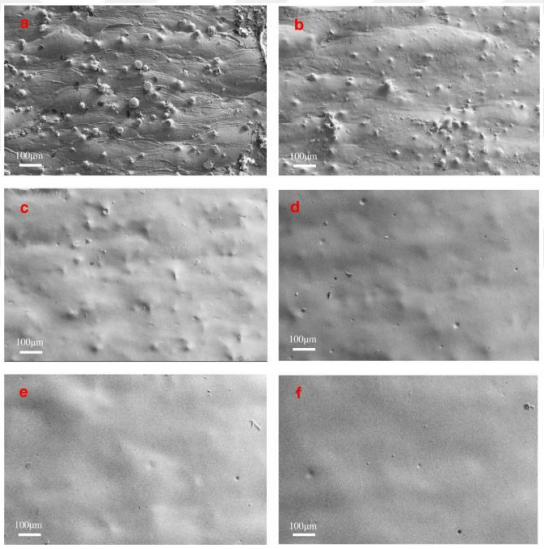
Kimyasal Parlatma (Chemical Polishing): Bu yöntem eklemeli imalatla veya geleneksel imalatla üretilmiş metal parçanın yüzeyinin kalitesini artırmak için belirli sürelerde belirli kimyasal solüsyonlara tabii tutulmasıyla gerçekleştirilir. Yaygın kullanım amaçlarından biri kısmen erimiş tozların yüzeyden uzaklaştırmaktır. Kimyasal parlatma işlemi üç aşamadan oluşmaktadır. İlki yüzey hazırlığı aşamasıdır. Yüzey hazırlığında eklemeli imalat numuneleri sabun çözeltisi, izopropil alkol, saf su, etanol gibi sıvılarla temizlenir. Bu sayede kimyasal parlatma çözeltisini etkileyebilecek erimemiş veya tam tutunamamış tozlardan parça arındırılır. İkinci aşama kimyasal

parlatma aşamasıdır. Bu aşamada belirli bir sıcaklıkta hazırlanmış kimyasal solüsyonun içerisine parça daldırılır. Belirli bir süre bekletildikten sonra üçüncü adım olan final temizlemesi için çıkarılır. Son olarak parça solüsyondan arındırılır ve kurutulur. Bu işlemin sonunda eklemeli imalat parçalarında kütle kayıpları ve hacim değişiklikleri olur. olabilmektedir. Bartłomiej Wysocki ve arkadaşları [150] bir çalışmasında titanyum malzemesinden (CP Ti) toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş yapı iskeletlerine kimyasal dağlama yapıldığında mekanik dayanımlarına ve hücre iskeleti davranışlarına olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada üç farklı kimyasal orana sahip çözelti (I.% 2.0 HF /% 20 HNO_3, II.% 2.2 HF /% 20 HNO_3, III. % 1.3 HF /% 9.0 $HN0_3$) kullanılmıştır. Parçanın dış yüzey pürüzlülüğü 5 µm'den 0.4 µm'ye, iç yüzey pürüzlülüğü ise 15 µm'den 0.4 µm'ye düşürmek mümkün olmuştur. Bununla birlikte parçanın young modülü %70 ve basma dayanımı %30 azalmıştır. Şekil 2.17.'de L-PBF ile üretilmiş titanyum hücre kafesinin kimyasal parlatmadan önceki ve sonraki görüntüleri verilmiştir. Görüldüğü üzere yapıdaki kısmen erimiş tozlar parçadan uzaklaştırabilmiştir. Bu yöntemin en büyük avantajı kimyasalın nüfuz edebileceği her yüzeye uygulanabilmesidir. Ancak her malzeme grubu için farklı solüsyonlara ihtiyaç vardır. Ayrıca sıcaklık, bekletme süresi gibi parametreler yine her bir malzeme için değişkenlik göstermektedir.



Şekil 2.17. Yüzeyin hücre yapısı ve iskelesinin kimyasal parlatmadan önce (A) ve sonra (B) yüksek büyütmeli görüntüleri [150].

Elektrokimyasal Parlatma (Electrochemical Polishing): Bu yöntem uygulanan potansiyel fark sayesinde bir elekrolit içine daldırılan elektrotun (katot) iletken metal numuneden (anot) mikron mertebesinde parçacıklar uzaklaştırma prensibine dayanır [151]. Prosesi etkileyen faktörler; sıcaklık, elektrolitin kimyasal birleşimi, karıştırma hızı ve süredir [152]. Elektrokimyasal parlatma işleminde kullanılacak elektrot ve elektrolit işlemin uygulanacağı metal numuneye göre belirlenir. Eklemeli imalat ile üretilen metal parçalar için genellikle elektrot olarak paslanmaz çelik, bakır, kurşun, titanyum gibi metaller ve elektrolit için perklorik asit, sülfirik asit, fosforik asit, asedik asit kombinasyonlarından oluşan asidik çözeltiler kullanılır. Elektrot ile işlem gören parça arasında doğrudan temas olmadığı için karmaşık geometriler, işlenmesi zor, kırılgan ve sertleşmiş malzemeler için kullanımı uygundur. Bu sebeple eklemeli imalat ile üretilen parçaların işlenmesinde kullanımı uygundur.



Şekil 2.18. Toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş In718 parçalarına elektrokimyasal parlatma işlemi a) uygulanmadan önceki hali b)1 dk, c)2 dk, d)3 dk, e)4 dk, f)5 dk süreyle uygulandıktan sonraki yüzey görüntüleri [153].

Toz yatağında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş In718 parçalarına uygulanan elektrokimyasal parlatma işleminin sonucunda yüzey pürüzlülüğü %40 kadar iyileşirken, nano sertliğinin %35 ve Young modülünün %45 azaldığı görülmüştür [153]. Elektrokimyasal parlatma işlem süresinin yüzey pürüzlüğüne etkisi Şekil 2.18.'de görülmektedir. Kimyasal parlatma işlemi iç yüzeylerde etkiliyken, elektrokimyasal parlatma işlemi daha çok dış yüzeylerde etkilidir [154].

2.3.3. Termal İkincil İşlemler

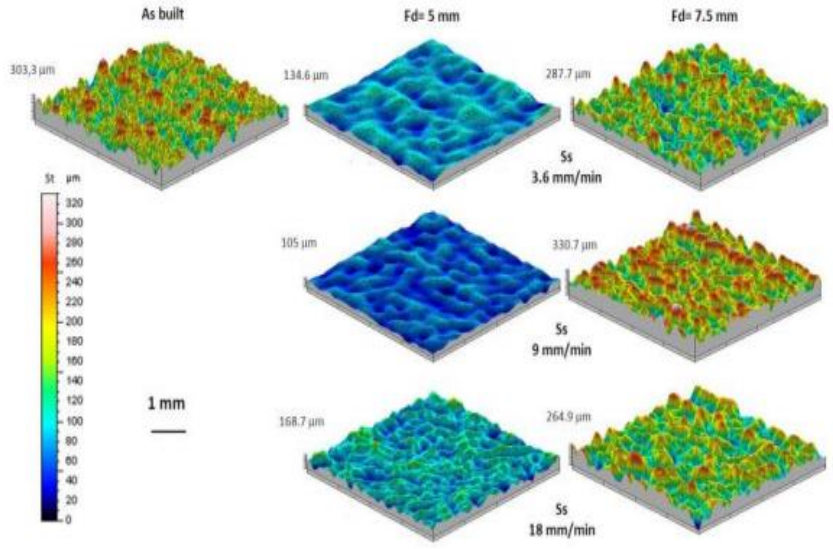
Termal ikincil işlemler, eklemeli imalat ile üretilen parçanın doğrudan veya dolaylı şekilde ısıya ilişkin teması ile parçanın yüzeyinde veya bütünündeki özellikleri iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri ile parça üretimi sonrası tabladan sökerek ya da tabladan sökmeden uygulanacak ısıl işlemler öncelikle süreç sırasında oluşan artık gerilmeleri en aza indirirken, sonrasında ise başta mikroyapı, mikrosertlik, porozite gibi mekanik özellikleri doğrudan etkileyen unsurlar olmak üzere diğer tüm parça özelliklerini istenilen seviyeye getirmektedir. Bu durum dolayısıyla final performansına etkisi çok büyük olan parametreleri ciddi anlamda etkilemiş ve özellikle günümüzde bu konuda yapılan çalışmaların da hızlanmasına yol açmıştır [155-161].

Eklemeli imalatta katmanlar, malzemeye bağlı olarak bir bağlayıcı sistem veya lazer/ışın teknolojisi ile birbirlerine bağlanır. Pek çok eklemeli imalat yöntemi, üretilen bileşenlerin daha sonra ısıl işlem görmesini gerektirecek cinsten özellikler barındırmaktadır. Isıl işlem için fırınların gereksinimleri, bileşen malzemesine, çalışma sıcaklığına, fırındaki atmosfere ve tabi ki eklemeli imalat sürecine bağlıdır. Lazer bazlı prosesler ile işlenen parçalarda lazer işlemleri, hızlı soğutmaya sahip olmaları nedeniyle genellikle kalıntı gerilmelere neden olmaktadır. Bu yüzden, bu parçalar bir gerilme giderme işlemine tabi tutulabilir. Buna karşılık, elektron ışını esaslı eklemeli imalat parçaları herhangi bir artık gerilme giderme işlemi gerektirmez. Eklemeli imalat ile üretilmiş parçaların özellikle mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla tavlama işlemleri gibi tek kademe ısıl işlemler yapılabildiği gibi, T6 benzeri ısıl işlemler (çökelti sertleşmesi: çözeltiye alma işlemini takiben yapılacak su verme ve sonrasında suni yaşlandırma) de etkili bir şekilde uygulanabilmektedir. Eklemeli imalat parçaları ısıl işleme tabi olurken, geleneksel ısıl işlemlerde kullanılan fırınlar ve benzer soğutma hızı/soğutma ortamları kullanılmaktadır. Fakat parçalara ısıl işlem uygularken ısıl işlem fırınının atmosferi, yani hangi tür gaz altında işlem yapıldığı veya vakum ortamının olup olmaması önem arz etmektedir. Bilindiği üzere, oksitlenme davranışı açısından hassas parçalar için hava ortamı yerine argon gibi inert atmosferler; parçaların korozyon özelliklerinin en iyilenmesi istendiği durumlarda ise inert atmosferler yerine hidrojen ve vakum gibi indirgeyici ortamlar tercih edilmelidir. Dolayısıyla, eklemeli imalatı yapılan metalik malzemeler göz önüne alındığında, alüminyum alaşımları haricindeki tüm malzemelerin (titanyum, süperalaşım,

çelik esaslı vb.) ısıl işlemi sırasında oluşabilecek oksitlenmenin önüne geçmek için işlem koruyucu (inert) atmosferlerde ya da hidrojen ve vakum gibi atmosferlerde ısıl işleme tabi tutulması gerekmektedir.

Ayrıca, ısıl işlemlerin malzemenin yüzey topoğrafyasını da etkilediği bilinmektedir. Malzemenin mikroyapısının ısıl işlemler ile değişim geçirmesi, yüzey özelliklerinin de farklı boyutsal ölçülerde değişiklik göstermesine yol açmaktadır. Bu durum aşınma, yorulma ve korozyon gibi doğrudan malzemenin yüzey özellikleri ile ilişkili özellikleri etkilemektedir.

Lazerle Parlatma: Lazer demeti enerjisi kullanılarak parça yüzeyinin yeniden eritilerek daha uniform bir şekilde dağılmasını sağlamak suretiyle uygulanır [162]. Başlangıç yüzey pürüzlülüğü Ra=25 µm olan EB-PBF ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarına, farklı lazer hızlarında (3, 6 ve 9 mm/dak) ve farklı odak mesafesinde (5 ve 7,5 mm) gerçekleştirilen lazerle parlatma işlemi uygulanmıştır. 6 mm/dak lazer hızı ve 5 mm odak mesafesi parametrelerinde uygulanan işlem sonucu en düşük yüzey pürüzlülüğü olan Ra=5 µm değeri ölçülmüştür (Şekil 2.19.). İşlem sonrası beklenilenin aksine yüzey mikrosertliğinde bir artış gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi lazerin nüfuz ettiği katman kalınlığının çok düşük olması olarak açıklanmıştır [163].



Şekil 2.19. İşlem görmemiş, iki farklı odak mesafesinde (Fd) ve üç farklı lazer hızında (Ss) gerçekleştirilen lazerle parlatma sonrası yüzey pürüzlüğü topografileri [163].

Lazerle Dövme: Lazerle dövme (ing. Laser shock peening- LSP) işlemi; malzeme yüzeylerine yüksek enerjili kısa darbeleri uygulayarak basma kalıntı gerilmesini artırmak ve taneleri inceltmek için kullanılan bir ikincil işlemdir. Havacılık ve savunma endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [164-166]. EB-PBF ile üretilmiş Ti-6Al-4V üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada, başlangıç mekanik değerleri yaklaşık UTS= 916 MPa, YS= 817 MPa, EL=9.3 %, olarak verilmiştir. Dalga boyu 1064 nm olan, 1 Hz Nd:YAG lazer kullanılan ve darbe süresi 12 saniye, lazer ışın çapı 2,5 mm olan lazerle dövme işleminden sonra bu değerlerin arttığı görülmüştür. UTS= 961 MPa, YS= 8330 MPa ve EL=10,5 % olarak ölçülmüştür. Mekanik özelliklerdeki gelişime ek olarak lazerle dövme işleminden sonra basma kalıntı gerilmesi de artmıştır. Parçaların mikroyapısı incelendiğinde ise beta fazı yaklaşık %7,2 'den lazerle dövme sonrasında %5,8'e düşmüştür [167].

Sıcak Izostatik Presleme: İş parçasına yüksek basınçlı genellikle inert bir gazın yüksek sıcaklıklarda uygulanmasıdır. Sıcak izostatik presleme (HIP), toz yatak füzyonu (PBF) teknolojileri tarafından üretilen işlem görmemiş bileşenlerdeki doğal kusurların, gözeneklerin kapatılmasını ve ortadan kaldırılmasını sağlayan iyi bilinen bir termomekanik işlemdir [168, 169].Toz metalürjisi, havacılık ve uzay endüstrisi, pompa bileşenleri ve kimya endüstrisi gibi çeşitli birçok alanda kullanılır. Eklemeli imalat endüstrisinde ise kusurların giderilmesini, süneklik ve özellikle yorulma özellikleri iyileştirilmesi için kullanılır. [170-174]. Parçadaki kusurlar çoğunlukla imalat sırasında oluşan füzyon eksikliği kusurları ve toz parçacıklarından gelen hapsolmuş gaz gözenekliliğidir. Bu kusurlar, malzemenin mekanik özelliklerini azaltıp, malzemede gerilme yığılmaları ve çatlak başlangıç noktaları oluşumuna sebep olabilir. HIP işleminin başlıca parametreleri; sıcaklık, basınç, soğuma hızı ve süredir. HIP işleminde sıcaklık parametresi değiştiğinde, mekanik özelliklerinin yanı sıra yorulma performansı da değişmektedir. Ganor ve ark. [175] toz yatağında elektron demeti ile ergitme yöntemiyle ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarına 780 °C'de ve 920 °C'de 2 saat uyguladıkları HIP sonrasında işlem görmemiş numunede %1'den küçük olan β fazı içeriği, 780 °C'deki HIP'ten sonra %1,25, 920 °C'deki HIP'ten sonra %3,2'ye çıktığı görülmüştür. Bununla birlikte işlem görmemiş numuneye kıyasla numune yorulma ömürlerindeki artışın en yüksek olduğu HIP parametresinin 920°C'de gerçekleştirilen olduğu görülmüştür [175]. Literatürde yorulma ömrünü arttırmak için seçilen HIP parametrelerinde, HIP işleminden

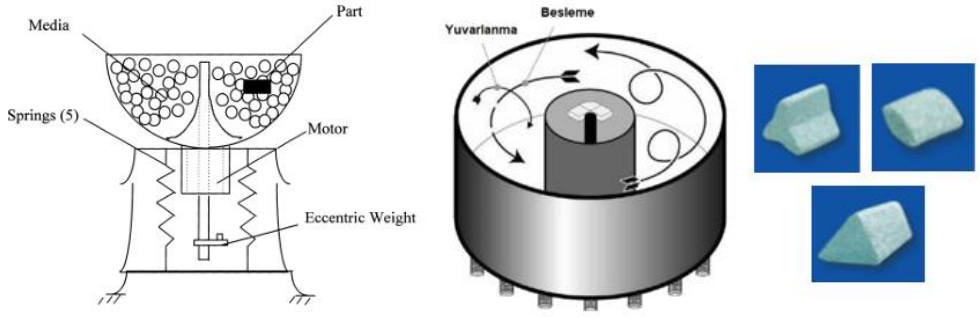
sonra yorulma ömrünü artırmanın yanı sıra, uzamayı (%EL) ve korozyon direncini artırdığı [176] ancak çekme dayanımını (UTS) ve akma mukavemetini (YS) düşürdüğü görülmüştür [175].

Tavlama: Tavlama işlemi yaygın olarak çeliğin sertliğini azaltmak, sünekliğini artırmak ve iç gerilmelerini minimize etmek için kullanılır. Sadece çeliklere değil bütün metallere farklı tavlama işlemleri uygulanabilir. Malzemenin sertliğinin azaltılması, işlenebilirliğini kolaylaştırır. Tavlama işleminin parça ıslanabilirliği üzerinde de etkisi vardır. Süperhidrofobik yüzey elde etmek için lazer parlatma işlemi uygulanan Ti-6Al-4V malzemesine bu işlem öncesinde 120°C'de 4 saat süreyle tavlama işlemi uygulandığında, süperhidrofobik yüzeye ulaşmak için gereken sürenin azaldığı görülmüştür [177].

Normalizasyon: Normalizasyon genellikle karbonlu ve düşük alaşımlı çelikleri, dövme, sıcak haddeleme ya da döküm işlemlerinden sonra homojen ve ince taneli bir yapı elde etmek için kullanılır [178]. Normalizasyon sonrasında ulaşılan sertlik, malzemenin boyutsal özelliklerine ve kullanılan soğutma hızına göre değişir. Dövme, sıcak haddeleme ya da döküm işlemlerinden sonra çeliğin mikroyapısı iri taneli ve homojenize olmayan bir duruma gelir ve beynit, karbür gibi istenmeyen yapısal bileşenlerden oluşur. Bu mikroyapı, çeliğin mekanik özelliklerini ve tabi ki işlenebilirliğini olumsuz etkiler. Normalizasyon sayesinde çelik, ince taneli homojenize bir yapı ile öngörülebilir özellikler ve işlenebilirlik kazanır [179].

2.4. Vibrasyonlu Yüzey İşlem

Vibrasyonlu yüzey işlem en etkili kütle yüzey işlemlerinden biridir. Bu proseste, işlem görecek parçalar aşındırıcı medya ile doldurulmuş bir kasenin içine yerleştirilir. Tüm kurulum daha sonra tambura bağlı ofset ağırlıkları olan bir motor kullanılarak titreştirilir. Bu Şekil 2.20.'de görüldüğü gibi ortamın karmaşık toroidal sarmal şeklinde bir yol izlemesiyle sonuçlanır. Aşındırıcı medya titreşim kaynaklı sürtünmenin etkisiyle iş parçası yüzeyinden parça koparak, yüzey özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar. Aşındırıcı medyanın malzemesi, boyutu, geometrisi ve yoğunluğu yüzey kalitesini etkiler [180].

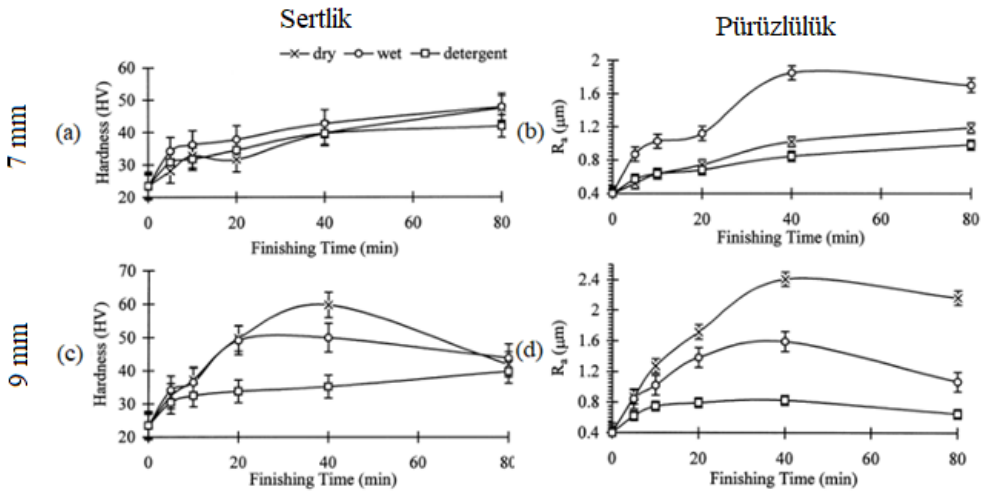


Şekil 2.20. Vibrasyonlu yüzey işlem düzeneğinin şematik gösterimi, aşındırıcı medyanın toroidal sarmal şeklindeki yolu ve farklı geometrilerdeki seramik aşındırıcılar [180].

Vibrasyonlu yüzey işlemin parametreleri; titreşim frekansı ve genliği, su ve yağlayıcı miktarı, ortamın boyutu, şekli ve özellikleridir. Bu parametrelerin seçimi operatörün deneyimine ve deneme yanılma durumuna bağlıdır [181, 182]. Aşındırıcı medya olarak ortalama çapı 8.6 mm olan küresel seramik medya kullanılan bir çalışmada kuru ve ıslak koşulların, iş parçasına gelen temas kuvveti ve kaydırma üzerindeki etkisi incelendiği bir çalışmada; kuru koşulda maksimum darbe kuvveti ıslak koşula göre daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Bununla birlikte ıslak koşulda, sürtünme katsayısını azaldığından enerji transfer verimliliği azalmış, ancak ıslak koşuldaki medya üzerinde oluşan su filminin adezyonu desteklediği için medyaların iş parçası üzerinde kayması çok daha yaygın olmuştur [182].

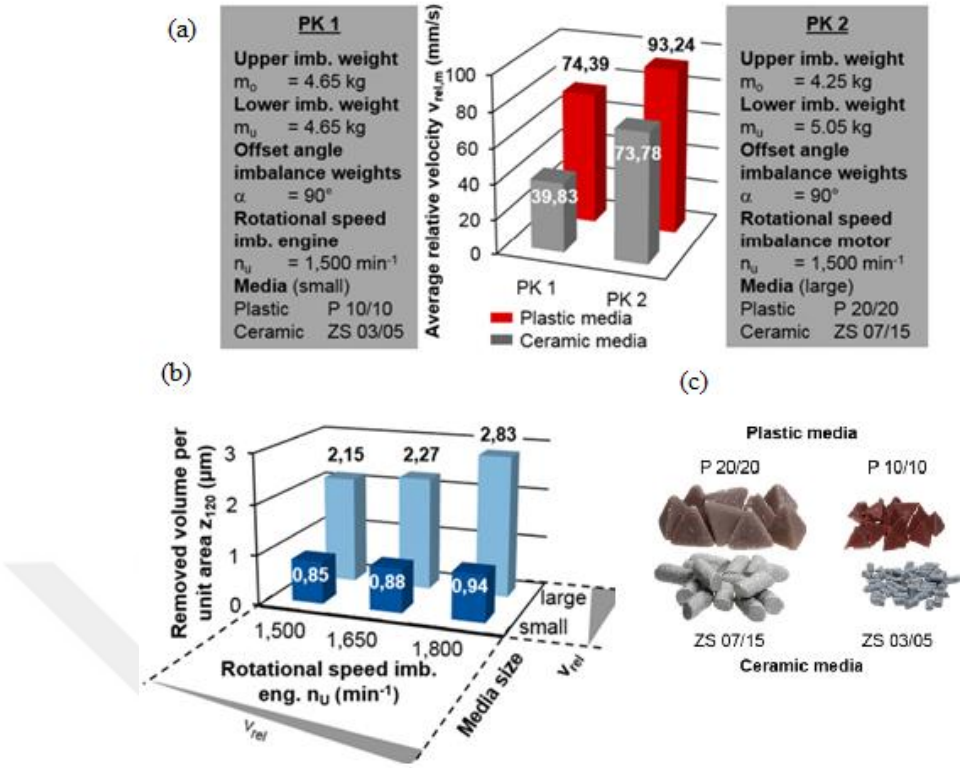
İki farklı alüminyum alaşımının (AA1100-O ve AA6061-T6), 7.1, 8.6, 11 mm çaplarında seramik aşındırıcı medya ve kuru, sulu, deterjanlı su kullanılarak vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulduğu bir çalışmada, temas kuvvetinin parçaların yüzey pürüzlülüğü ve sertlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kuru koşulda 8 saat süredeki parçaya temas sayısı en fazla olan 7mm çağında medya kullanıldığı durum olurken, en yüksek temas kuvveti 11mm çapındaki aşındırıcı medya kullanıldığında ölçülmüştür. Sulu koşulda 8 saat süredeki parçaya temas sayısı kuru koşula göre azalırken, temas kuvvetinde belirgin bir değişim olmamıştır. AA1100-O malzemesi için farklı koşullarda elde edilen sertlik ve pürüzlülük değerlerinin grafikleri Şekil 2.21.'de gösterilmiştir. Büyük medyanın iş parçasına teması sırasında daha fazla kinetik enerji çıkması daha fazla plastik deformasyona yol açtığı için sertliği daha fazla değiştirdiği gözlemlenmiştir. Islanma

koşulu sertlik değerleri üzerinde pürüzlülük değerleri üzerinde olduğundan daha fazla etkilidir [183].



Şekil 2.21. Kuru, sulu ve deterjanlı sulu ortamda yapılan (a) 7mm çaplı küresel seramik aşındırıcı kullanıldığında (a) sertlik (b) pürüzlülük değerindeki değişim ve 9mm çaplı küresel seramik aşındırıcı kullanıldığında (c) sertlik (d) pürüzlülük sertlik değerindeki değişim [183].

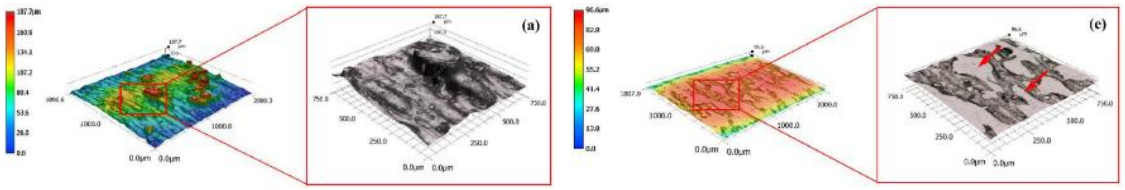
3 farklı döndürme hızında ve farklı boyuttaki plastik ve seramik aşındırıcı medya kullanılarak 42CrMo4'e vibrasyonlu yüzey işlem yapılan bir çalışmada, farklı parametre kombinasyonlarında (Parametre kombinasyonu 1=PK 1 ve Parametre kombinasyonu 2=PK 2, şekil 20.a'da gösterilmiştir) büyük medya kullanılması bağıl hızı arttırmıştır. Plastik medyayla gerçekleştirilen vibrasyonlu yüzey işlemde artan dönüş hızı ile bağıl hız da orta derecede arttığı ve bunun birim alan başına çıkarılan hacimdeki bir artışla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Daha büyük medya kullanılması, birim alan başına çıkarılan hacimde önemli bir artışa yol açtığı (Şekil 2.22.b,c), bunun da bağıl hız için ana etki grafiklerinin sonuçlarıyla uyumludur (Şekil 2.22.a) [184].



Şekil 2.22. (a)Proses girdi parametrelerinin iki farklı kombinasyonu (PK 1 ve PK2) için ortalama bağıl hız karşılaştırması ve (b) dönme hızına ve plastik medyanın boyutuna bağlı olarak birim alanda kaldırılan hacim değerleri [184].

Bagehorn ve ark. [185], DMLS ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım malzemelerine uygulanan farklı ikincil işlemlerin yüzey kalitelerine ve yorulma ömürlerine etkileri vb. durumları incelemişlerdir. Vibrasyonlu yüzey iyileştirme uygulanan parçaların yüzey pürüzlülüğü ciddi anlamda azalmışken, işlem görmemiş numuneye kıyasla yorulma ömürlerinde de nispi bir artış sağlamıştır. Vibrasyonlu yüzey işlemin en yaygın kullanım amacı yüzey pürüzlülüğünü düşürmektir. Vibrasyonlu yüzey işlem sonrasında elde edilebilecek yüzey pürüzlülüğünü tahmin edebilmek için bir takım ampirik yaklaşımlar da mevcuttur [186].

Kaynak ve ark. [187] (Şekil 2.23.), SLM ile üretilen Inconel 718 süper-alaşım parçalarına uygulanan ikincil işlemleri incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Vibrasyonlu yüzey işlem prosesinin yüzey pürüzlülüğünü işlem görmemiş parçaya göre %82,49 oranında azalttığı, mikrosertlik değerini ise yüzeyde %10 civarında arttırdığı analiz edilmiştir.



Şekil 2.23. SLM ile üretilen Inconel 718 süper-alaşım parçalarının işlem görmemiş ve vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış topografileri [187].

Bu parametreler göz önünde bulundurularak uygulanan vibrasyon yüzey işlemin etkisini anlayabilmek için geliştirilen bir takım dinamik [188], kinematik [189] ve kütle kaldırma [190] modelleme çalışmaları mevcuttur.

Vibrasyonlu yüzey işlemin en yaygın kullanım amacı yüzey pürüzlülüğünü düşürmektir. Vibrasyonlu yüzey işlem sonrasında elde edilebilecek yüzey pürüzlülüğünü tahmin edebilmek için bir takım ampirik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Hashimoto ve ark. [186] yaptığı çalışmalar sonucu elde ettikleri yaklaşımlar Denklem 4 ve Denklem 5'te verilmiştir. Bu formülde R_a yüzey pürüzlülüğünü, I_r ilk pürüzlülük değerini, D_r limit pürüzlülük değerini, t işlem zamanını, T optimum zamanı ifade etmek üzere;

$$R_a(t) = (I_r - D_r)e^{\frac{-t}{T}} + D_r \quad (1)$$

$$R_a(T) = (I_r - D_r)e^{-1} + D_r \quad (2)$$

olarak gösterilmiştir. Bu formülleri uygularken öncelikle yüzey pürüzlülüğünün inebileceği limit değeri bulunur (D_r). Sonrasında işlem süresinin zaman sabitine eşit olduğu formüle (2) bu limit değer ve diğer değişkenler yazılarak R_a değeri bulur. Sonra deneysel olarak bu R_a değerini elde ettiğimiz zaman da ana formüldeki (1) optimum zamanı (T) verir. Böylece elimizdeki formülle işlem süresini değiştirdiğimizde R_a değerini hesaplayabiliriz.

Vibrasyonlu yüzey işlem sırasında yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin yanında, işlem sona erdiğinde de yüzey pürüzlülüğüne bakılır. Ayrıca en son haldeki topografi ve mikro sertliklerine de bakılan parçalara aşınma testi yapılarak aşınan hacim ve aşınma

derinliği aşağıdaki formüller doğrultusunda hesaplanır [191]. Aşınma testinde, M_{loss} numunenin kütle kaybı ve ρ numunenin yoğunluğu olmak üzere aşınan hacim;

$$V = \frac{M_{loss}}{\rho} \quad (3)$$

W temas eden yük, L kayma mesafesi olmak üzere aşınma oranı (ω) ise aşağıdaki şekilde belirlenecektir;

$$\omega = \frac{V}{WL} \quad (4)$$

Bu işlemler neticesinde EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerine vibrasyon işlemi uygulanmak istendiğinde; aşındırıcı medyanın geometrisinin ve boyutlarının özellikle yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerine bakılarak, hangi aşındırıcının daha etkili olacağı hakkında bilgi sahibi olmak amaçlanır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

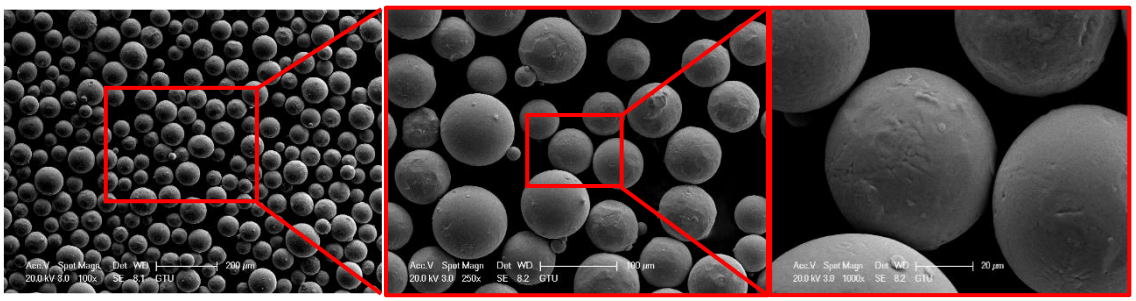
3.1. Deneysel Çalışma ve Düzenekler

Deneysel çalışma kapsamında, ASELSAN A.Ş. tarafından gaz atomize ARCAM Ti-6Al-4V alaşım tozu kullanılarak ARCAM A2X Elektron Işını İle Ergitme cihazıyla numuneler üretilmiştir. Parçaların üretim parametreleri Tablo3.1.'de verilmiştir. Üretilen parçaların geometrisi silindirik olup, boyutu Ø19*30 cm'dir.

Tablo 3.1. Ti-6Al-4V parçalarının üretim parametreleri.

Üretim Parametreleri	Değer
Katman Kalınlığı	0.005 mm
Işın Gücü	Max 3 kW
Uygulanan Voltaj	60 kV
Işın Hızı	10 mm/s (ön ısıtma) 140 mm/s (kontür) 9 mm/s (tarama)
Odak Ofseti	70 mA(ön ısıtma) 6 mA(kontür) 25 mA(tarama)
Hız Fonksiyonu	45 (tarama sırasındaki ışın hızını belirler)

Parçaların üretiminde kullanılan Ti-6Al-4V tozunun SEM görüntüleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Tozlar düzgün küresel, çapları 40 µm ile 220 µm arasında değişmekte olup, ortalama çapı 75 µm olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte kimyasal bileşimi %5.8 Al, %3.9 V, %0.19 Fe, % 0.15 O, % 0.004 H ve kalanı Ti olarak ölçülmüştür. Bu değerler ASTM F2924-14 standartlarını karşılamaktadır.



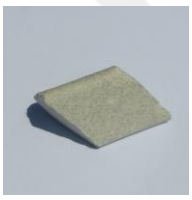
Şekil 3.1. Ti-6Al-4V alaşım tozu morfolojisini gösteren SEM görüntüleri (100x, 250x,1000x).

Çalışma kapsamında, elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalar için vibrasyonlu yüzey işlem süreçleri geliştirmek amaçlanmıştır. Parçaların bir kısmı

doğrudan vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulmuştur. Bir kısmı ise kumlama işlemi yapıldıktan sonra vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulmuştur. Cihazda tambura bağlı ofset ağırlıkları 1400 rpm hızındaki motor kullanılarak titreştirilmektedir. Tahrik gücü 0.55 kW ve kase hacmi 100 litredir. Vibrasyonlu yüzey işlemlerde, pH değeri 8.8 olan SP-45 işlem sıvısı ve su ¼ oranında karıştırılarak sürekli akışla sisteme verilmiştir.

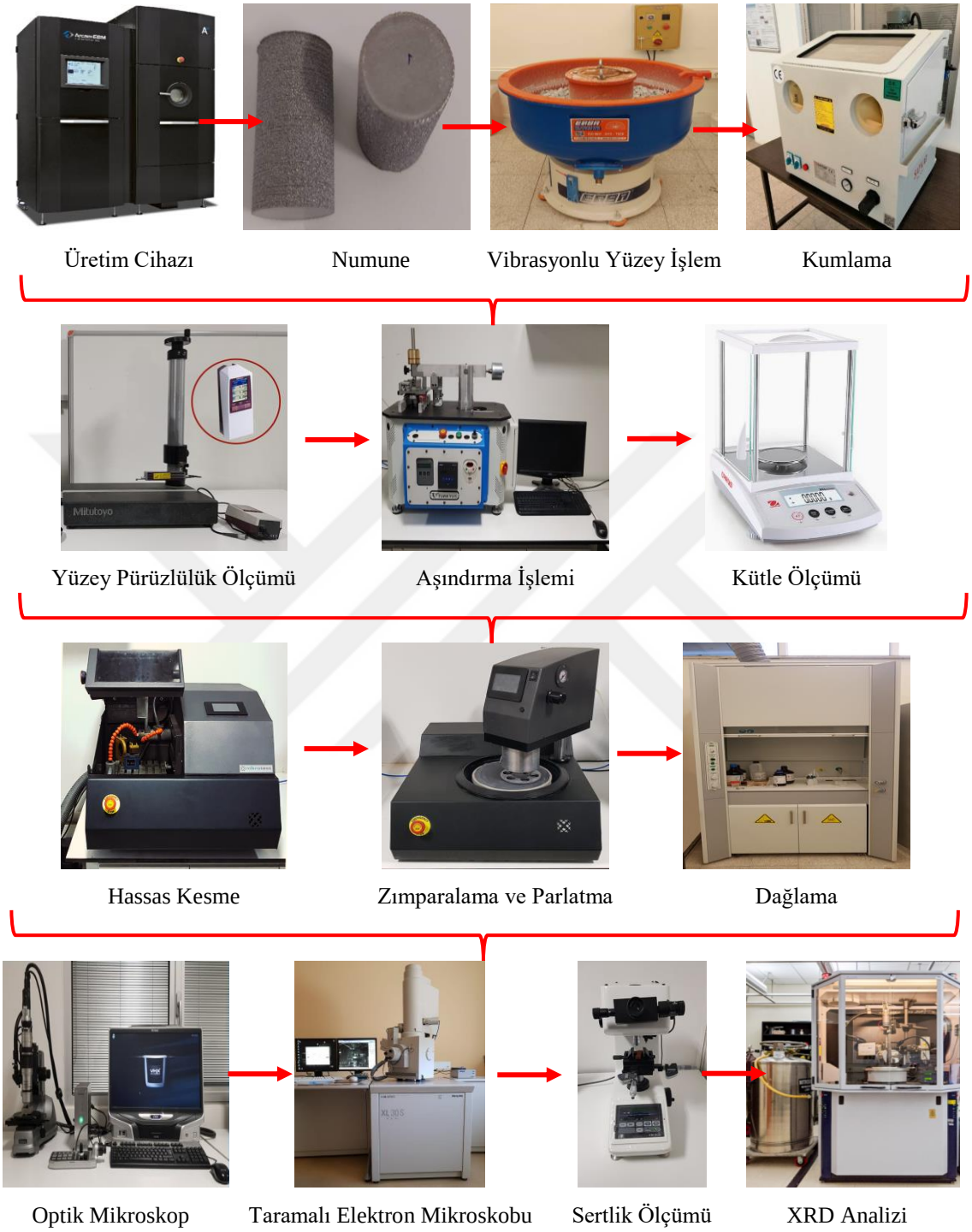
Vibrasyonlu yüzey işlemde kullanılan aşındırıcılar seramik, plastik, üreyik vb. taşlar olabilmektedir. Aşındırıcı medya, işlem görecek iş parçasının cinsine göre belirlenmektedir. Endüstride sertliği yüksek metallerin aşındırılmasında seramik aşındırıcılar tercih edilmektedir. Firma tecrübe ve tavsiyeriyle bu çalışmada aşındırıcı medya cinsi olarak seramik taşlar tercih edilmiştir. Aşındırıcı medyanın boyut ve geometrisinin istenilen hassasiyetteki sonuçları elde etmedeki rolü bu çalışma sayesinde ortaya konacaktır. Kullanılan aşındırıcı medya ölçü ve şekilleri Tablo 3.2.'de verilmiştir. Kullanılan tüm aşındırıcılar MX sınıfındandır.

Tablo 3.2. Vibrasyonlu yüzey işlemde kullanılan seramik aşındırıcılar.

06x06 Yıldız Üçgen	16x16 Yıldız Üçgen	19x19 Yıldız Üçgen	15x15 Açılı Kesim Üçgen	15x15x06 Elips
				

Kumlama işlemlerinde, SAYKAR SK-500 tezgah üstü kumlama makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.4.). Çalışma basınç aralığı 6-8 bar'dır. 6 bar'da 0.6 m^3/dk hava-kum karışımı püskürtebilen kumlama nozulu bulunmaktadır. Kumlama işleminde kahverengi alüminyum oksit kullanılmıştır. Kumlama işlemi parçanın yüzey pürüzlüğü Ra≈10 μm'ye düşürülene kadar, tüm yüzeylere düzgünce etki edecek şekilde 2-4 saat uygulanmıştır.

Numunelerin aritmetik ortalama yüzey pürüzlülükleri (Ra) yüzey pürüzlülükleri MITUTOYO SJ210 cihazı ile, ISO 1997 standardına uygun ölçülmüştür. Tüm değerler parçanın farklı bölgelerinden on ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Alansal aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (Sa) değerleri, yüzey topografileri, aşınma izleri görüntüleri için KEYENCE dijital mikroskop kulanılmıştır. Numunelerin üretim, ikincil işlem, test ve karakterizasyon sürecinde kullanılan ekipmanlar Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Numunelerin üretim, ikincil işlem, test ve karakterizasyon sürecinde kullanılan ekipmanlar.

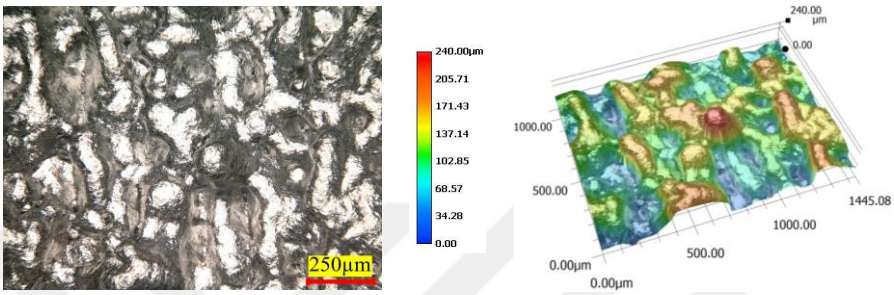
Mikroyapı görüntüleri için, parçalar MIKROTEST MULTICUT SENSE hassas kesme cihazı kullanılarak kesilmiş ve soğuk kalıba alınmıştır. Ardından MULTIPOL

ADVANCED PLUS zımparalama ve parlatma cihazında sırasıyla elmas zımpara, 15-30-60 µm hassasiyetli manyetik zımpara ve son olarak 50 nm elmas partiküllü parlatma solüsyonuyla manyetik parlatma keçesi kullanılarak parlatılmıştır. Yüzey ve yüzey altı özelliklerini incelemek için parlatılmış parçalar, 30 saniye süre ile Kroll dağlama solüsyonuna (92 ml saf su, 6 ml HNO_3 ve 2 ml HF [192]) tabii tutulmuştur. Yüzey ve yüzey altı incelemeleri için dijital optik mikroskobun yanı sıra, FEI (PHILIPS) XL30 SFEG SEM taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerin yüzey ve yüzey altı sertlikleri ISO 6507-2 standardına uygun olarak, FUTURE-TECH FM-310e Vickers (HV) mikrosertlik cihazıyla ölçülmüştür. Ölçümler 50 gf yük ile 15 saniye uygulanarak beşer kez tekrar edilmiş ortalama değerler alınmıştır. XRD analizleri 2 Theta ölçüm aralığı 10-90° seçilmiş, BRUKER SMART APEX II QUAZAR X-Işını tek kristal kırınım cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dalga boyu 1.54 A, akım 40 mA, voltaj 40 Kv olan Cu Kα katot kullanılmıştır. Aşınma testleri ASTM G133 standartlarına göre, TURKYUS RTW lineer aşındırma cihazında gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 20°C oda sıcaklığında ve nem düzeyinde, 15N yük altında, 6 mm sürtünme mesafesinde (stroke lenght) ve 30 dakika süreyle aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşındırıcı malzeme olarak ise 6 mm çapında tungsten karbür bilye (WC %94, CO %6) kullanılmıştır. İşlem görmemiş ve ikincil işleme tabii tutulmuş parçaların ağırlıkları OHAUS PR224 analitik terazi kullanılarak ölçülmüştür. Cihazın kapasitesi 220 gr, hassasiyeti ve tekrarlanabilirliği 0.1 mg'dır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Yüzey Topografyası ve Pürüzlülük

Üretilen parçaların ilk yüzey topografyası Şekil 4.1.'de verilmiştir. Homojen olmayan ergime ve tepe ile çukurlar arasındaki fark belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Bu durum yüksek yüzey pürüzlülüğü ile sonuçlanmıştır.



a) b)

Şekil 4.1. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların a)iki boyutlu ve b) üç boyutlu görüntüleri.

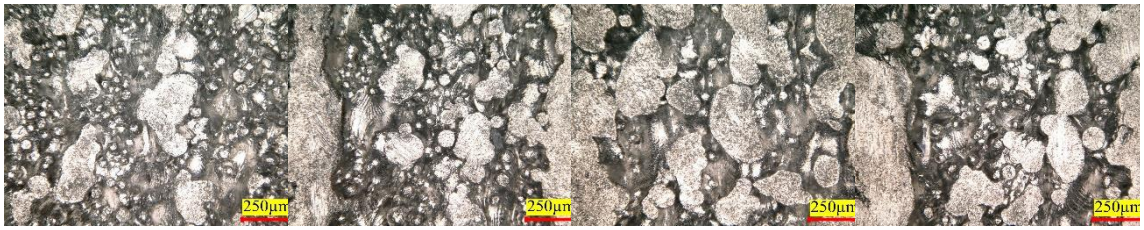
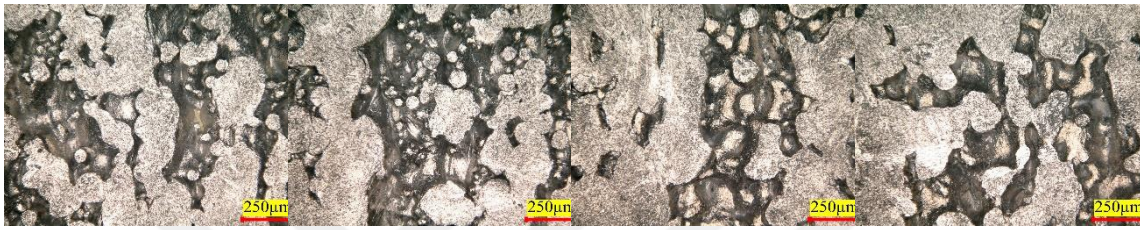
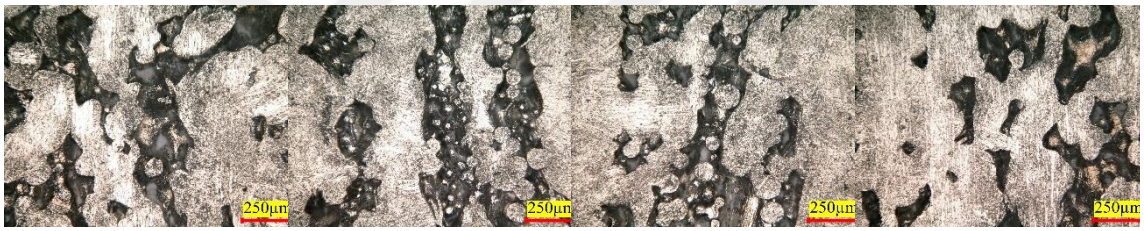
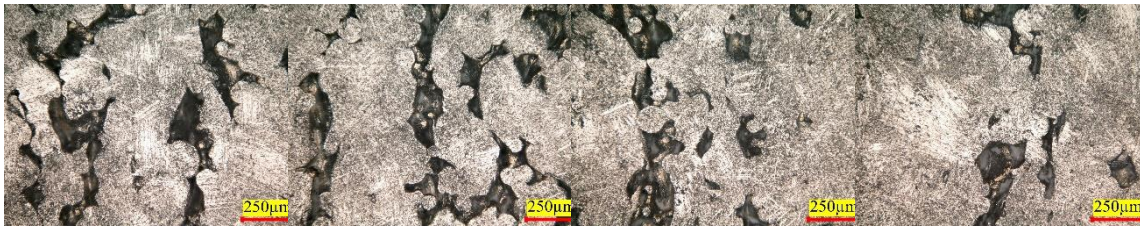
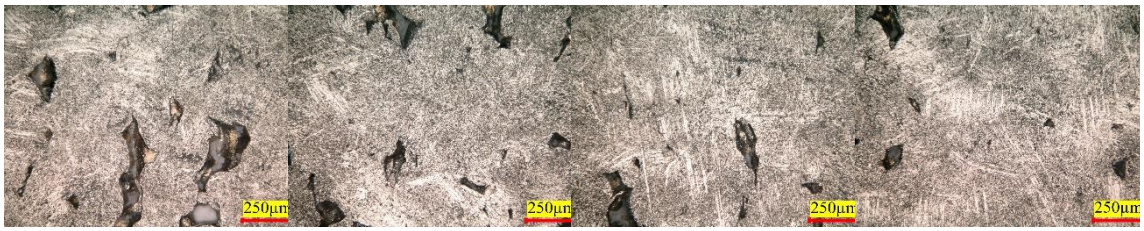
Ölçülen yüzey ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

	Ra	**Rz**	**Sa**	**Sz**
Ortalama Değer	36.965	200.5093	35.8635	276.5495
Standart Sapma	9.4555	38.4846	5.8237	55.653

Hedeflenen pürüzlülük değerine ulaşmanın süresini hesaplayabilmek için, deney planındaki 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile denemeler yapılmıştır. Bu medya aynı geometrideki aşındırıcıların orta boyu ve yaklaşık aynı boyuttaki taşlardan biri olduğu için ortalama bir taş olarak düşünülmüştür. 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulan parçaların yüzey topografyası ve ortalama pürüzlülük değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Buna göre yüzey pürüzlülüğü istenilen seviyeye ancak 60 saatin sonunda düşürülebilmektedir. Ancak bu işlem süresi endüstride yaygın kullanım için oldukça uzundur. Bununla birlikte Tablo 4.2.'de işlem görmemiş parçaya doğrudan uygulanan vibrasyonlu yüzey işlemin yüzeydeki tepe çukurlar arasındaki farkı süreye bağlı olarak nasıl indirdiği görülmektedir.

Tablo 4.2. Ti-6Al-4V parçalara 16x16 Yılsız üçgen aşındırıcı medya ile farklı işlem sürelerinde uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem sonrası yüzeylerin iki boyutu görüntüleri.

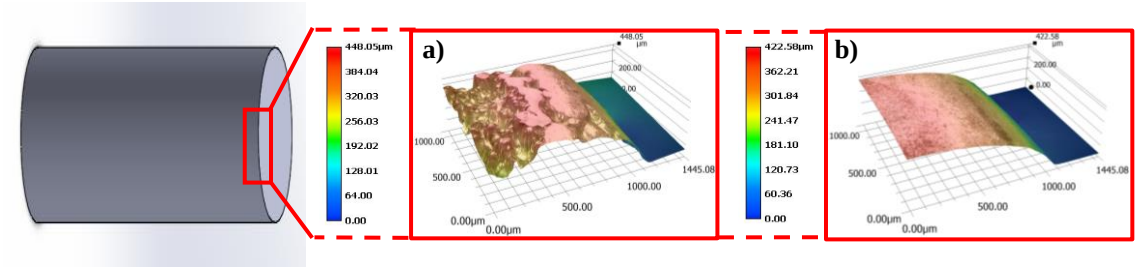
3 saat	6 saat	9 saat	12 saat
			
15 saat	**18 saat**	**21 saat**	**24 saat**
			
27 saat	**30 saat**	**33 saat**	**36 saat**
			
39 saat	**42 saat**	**45 saat**	**48 saat**
			
51 saat	**54 saat**	**57 saat**	**60 saat**
			

Yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 4.1.'de verilen başlangıç değerine göre 60 saat sonunda Ra %89.4 azalarak 3.895 µm'ye, Rz %78 azalarak 44.188 µm'ye, Sa %92.3 azalarak 2.758 µm'ye ve Sz %91.9 azalarak 22.141 µm'ye düşürülmüştür. 12, 24 ve 36 saat sonraki yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 4.3.'te sunulmuştur.

Tablo 4.3. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile farklı sürelerde uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

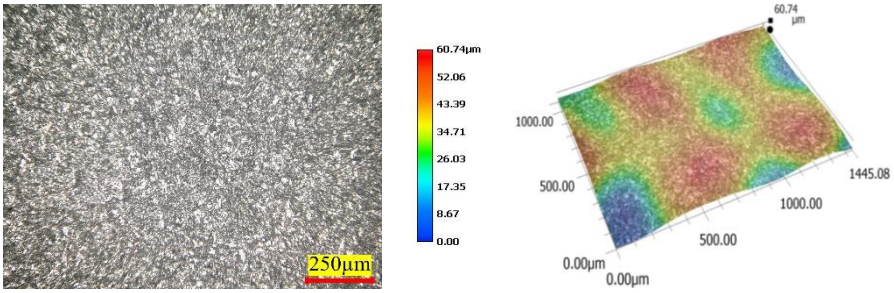
	İşlem Süresi	Ra	Rz	Sa	Sz
Ortalama Değer	12 saat	19.963	115.914	16.45	158.284
Standart Sapma		6.112	29.309	2.691	15.244
Ortalama Değer	36 saat	8.913	74.476	6.388	105.124
Standart Sapma		5.762	25.076	3.323	18.609
Ortalama Değer	60 saat	3.895	44.188	2.758	60.969
Standart Sapma		3.287	28.051	1.553	22.141

Bununla birlikte uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem köşelerde yuvarlatmalara sebep olmuştur. Şekil 4.2.'de 3 saat vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulmuş köşe ile 60 saat işleme tabii tutulmuş köşe arasındaki fark belirgin şekilde görülmektedir. 3 saat sonunda işlem görmemiş numuneye benzer şekilde keskin bir geçiş varken, 60 saatin sonunda hem pürüzlülük azalmış hem de köşeler yuvarlanmıştır. Bu durum kritik geometrilerde işlem sonrasında boyutsal doğruluk testlerinin gerekli olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.2. Silindirik numuneye 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile a) 3 saat ve b) 60 saat vibrasyonlu yüzey işlem uyguladıktan sonra köşelerin görüntüleri.

Vibrasyonlu yüzey işlemin en önemli avantajlarından biri toplu finisaj işlemi olduğu için oldukça ekonomik olmasıdır. Ancak bu uzun işlem süresi ekonomiklik avantajını sönümlemektedir. Bu soruna çözüm olarak vibrasyonlu yüzey işlemden önce kumlama işlemi uygulanmıştır. Kumlama işlemi oldukça hızlı sonuç veren ekonomik bir yöntemdir. Ancak operatörün becerisi parça kalitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Tüm yüzeye homojen bir şekilde uygulanması gerekir. Şekil 4.3.'te kumlama işlemi yapıldıktan sonraki yüzey görüntüleri yer almaktadır.



a) b)

Şekil 4.3. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarına kumlama işlemi uygulandıktan sonraki a)iki boyutlu ve b) üç boyutlu görüntüleri.

Ra ve Rz yüzey pürüzlülükleri, Sa ve Sz yüzey pürüzlülüklerine göre daha kısa sürede ölçülebilmektedir. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğü belirli bir seviyeye indirilmek istenirken Ra yüzey pürüzlülüğü esas alınmıştır. Tablo 4.4.'te kumlama işlemi sonrasında ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.

Tablo 4.4. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının kumlama işlemi sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

	Ra	**Rz**	**Sa**	**Sz**
Ortalama Değer	10	53.093	6.69	46.482
Standart Sapma	1.738	12.406	0.787	5.675

Vibrasyonlu yüzey işlemin parametreleri; titreşim frekansı ve genliği, su ve yağlayıcı miktarı, ortamın boyutu, şekli ve özellikleridir. Bu parametrelerin seçimi operatörün deneyimine ve deneme yanılma durumuna bağlıdır [181, 182]. Bu çalışma kapsamında 5 farklı aşındırıcı medya ve 3 farklı sürede çalışılmıştır. Ayrıca parçalara vibrasyonlu yüzey işlem öncesinde kumlama yapılarak yüzey pürüzlülük değerleri Ra=10 µm'ye düşürülmüştür. Vibrasyonlu yüzey işlem sonrasında elde edilebilecek yüzey pürüzlülüğünü tahmin edebilmek için burada da Hashimoto ve ark. [186] yaptığı çalışmalar sonucu elde ettikleri Denklem 1 ve Denklem 2'de verilen yaklaşımlar kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında vibrasyon öncesi kumlama yapılarak 10 µm'ye düşürülen numunelerin pürüzlülük değerleri ilk pürüzlülük değeri (I_r) olarak kabul edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda yüzey pürüzlülüğünün inebileceği limit değer (D_r)=0.1 olarak kabul edilmiştir. Bu sayısal veriler denklem 2' de yerine koyulduğunda

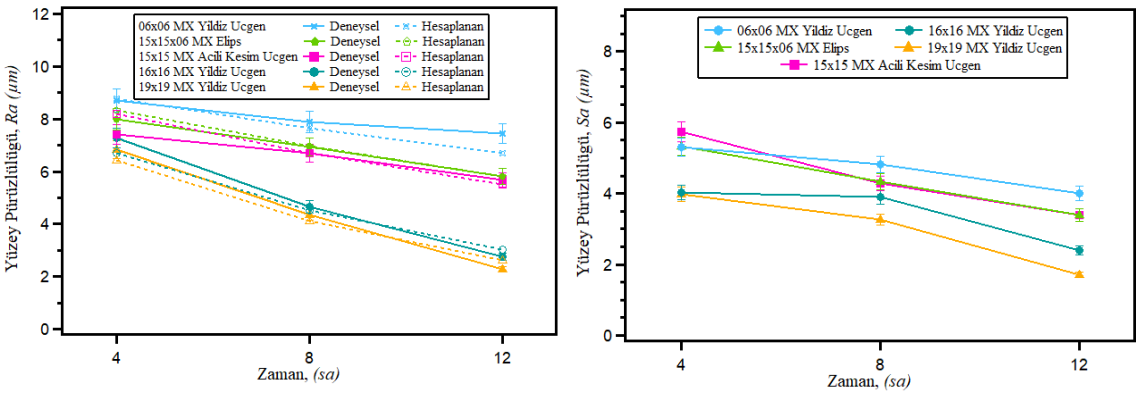
Ra=3.74 µm olarak hesaplanır. Deneysel olarak bu Ra değerinin bulunduğu süre bize her bir parametre seti için optimum süreyi (*T*) vermektedir. Deneysel olarak her bir parametre seti için optimum süre (*T*) ayrı ayrı bulunmuştur. Bulunan optimum süreler ve diğer değişkenler Denklem 1' de yerine yazılarak her bir işlem süresi için Ra değeri hesaplanmış ve bu değerler ölçülen pürüzlülük değerleri ile birlikte Tablo 4.5.'te verilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda bulunan optimum zamanlar (*T*) dakika cinsinden aşındırıcı medya isimlerinin yanında verilmiştir. Deneysel veriler ve hesaplanan verilerin ortalama yüzde uyumu 93.585 olarak bulunmuştur.

Tablo 4.5. Pürüzlülük değerleri

06x06 Yıldız Üçgen (Optimum zaman: 30 sa)			
Süre (sa)	4	8	12
Ölçülen Pürüzlülük (Ra)	8.71103	7.8744	7.4603
Hesaplanan Pürüzlülük (Ra)	8.7542	7.644	6.709
Yüzde Uyum	99.573	97.074	89.929
16x16 Yıldız Üçgen (Optimum zaman: 10 sa)			
Süre (sa)	4	8	12
Ölçülen Pürüzlülük (Ra)	7.2728	4.6626	2.7391
Hesaplanan Pürüzlülük (Ra)	6.689	4.505	3.026
Yüzde Uyum	91.972	96.619	89.528
19x19 Yıldız Üçgen (Optimum zaman: 9 sa)			
Süre (sa)	4	8	12
Ölçülen Pürüzlülük (Ra)	6.8486	4.3649	2.2768
Hesaplanan Pürüzlülük (Ra)	6.419	4.123	2.631
Yüzde Uyum	93.727	94.458	84.443
15x15 Açılı Kesim Üçgen (Optimum zaman: 20 sa)			
Süre (sa)	4	8	12
Ölçülen Pürüzlülük (Ra)	7.4232	6.6981	5.6863
Hesaplanan Pürüzlülük (Ra)	8.19	6.709	5.498
Yüzde Uyum	89.670	99.837	96.688
15x15x06 Elips (Optimum zaman: 22 sa)			
Süre (sa)	4	8	12
Ölçülen Pürüzlülük (Ra)	7.0001	6.9199	5.8032
Hesaplanan Pürüzlülük (Ra)	8.341	6.958	5.805
Yüzde Uyum	80.844	99.449	99.968

Şekil 9'da elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin grafikleştirilmiş hali verilmiştir. Aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve alansal aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (Sa) değerleri orantılı birlikte, birebir uyum göstermemiştir. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarının, üretim sonrası yüzey topografileri incelendiğinde homojen olmayan bir yüzey topografisi ile karşılaşılmıştır. Yapılan ikincil işlemler yüzeyin her yerinden eşit miktarda malzeme kaldırmaya sebep olduğu için, limit pürüzlülük değerine yaklaşana kadar parça yüzeyindeki dip ve tepe noktası arasındaki fark oransal olarak korunmaktadır. Bu durum alansal yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde

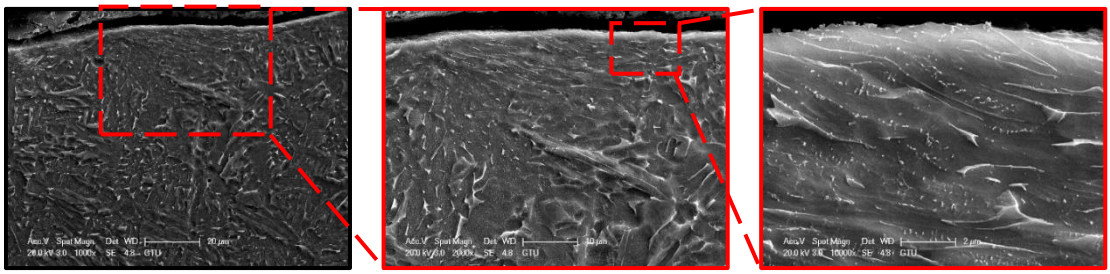
hataya sebebiyet verebildiği görülmüştür. Bu sebeple yüey pürüzlülüğündeki artış azalış yorumlarında daha çok Ra yüzey pürüzlülüğü değerlerine bakarak kıyaslama yapılmıştır.



Şekil 9. Farklı işlem süresi ve farklı seramik aşındırıcılar kullanılarak uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem sonrası elde edilen Ra (a) ve Sa (b) cinsinden yüzey pürüzlülükleri grafikleri.

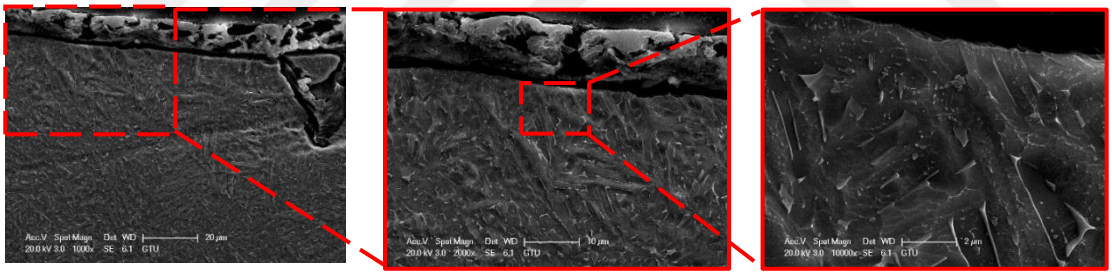
4.2. Mikroyapı

Bu bölümde parçalara yapılan ikincil işlem sonrasında yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen mikroyapı değişiklikleri sunulmuştur Şekil 4.4.'te işlem görmemiş parçanın farklı büyütmelerde SEM görüntüleri yer almaktadır. Yapıda koyu bölgeler α, parlak bölgeler ise β fazlarını göstermektedir. Elektron ışını ile ergitme yönteminde tozlara her tarama öncesinde martenzit başlama sıcaklığının üzerinde ön ısıtma yapılır. Bu ön ısıtma β fazının martenzitik α' fazına dönüşümünü engeller. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarda Widmanstätten yapısı olarak da adlandırılan sepet yapı görülmektedir. Bununla birlikte tane sınırları çok belirgin değildir. Yapıda α ve β fazlarının bulunduğunu denge halinde söylemek mümkündür. Ayrıca mikroyapıda α kalınlığının artması sünekliğin artmasını sağlamakla birlikte alaşımın mukavemetini ve akma dayanımını azaltır [193].



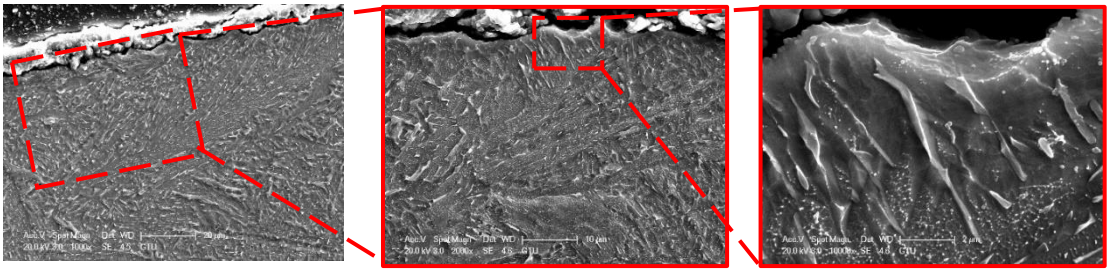
Şekil 4.4. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının işlem görmemiş SEM görüntüleri.

Şekil 4.5.'te herhangi bir ön ikincil işlem olmaksızın doğrudan 16x16 yıldız üçgen seramik aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulmuş parçanın mikroyapı görüntüsü yer almaktadır. Vibrasyonlu yüzey işlemde aşındırıcı medyalar talaş kaldırmakla birlikte dövme işlemine benzer şekilde parça yüzeyine kuvvet uygular. 1000x büyütmede kesme kuvvetlerinin yüzeydeki pürüzlülüğü azaltmakla birlikte, parça yüzeyindeki yabancı maddelerin parçaya yapışmasına da sebep olabildiği görülmektedir. İşlem görmemiş parçanın yüzeyinde ince bir film tabakası şeklinde bulunan parlak β taneleri, vibrasyonlu yüzey işlemden sonra görülmemiştir.



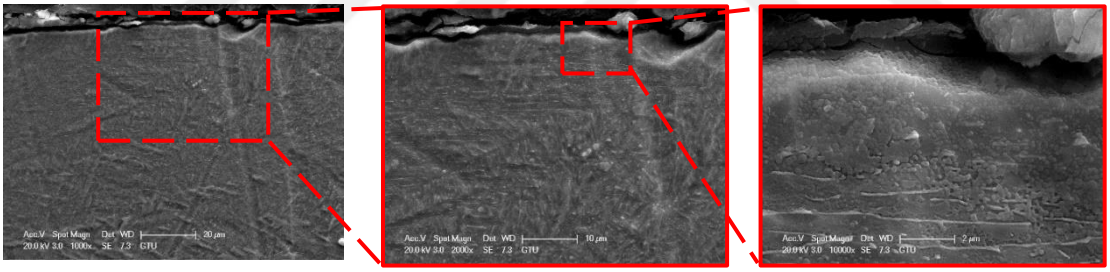
Şekil 4.5. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri.

Şekil 4.6.'da parçaya kumlama işlemi yapıldıktan sonraki mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Kumlama işlemi parça yüzeyindeki pürüzlülüğü azaltmakla birlikte vibrasyonlu yüzey işlem uygulamasından sonraki gibi homojen bir yüzey elde edilememiştir. Bununla birlikte girintilerde işlem görmemiş duruma benzer şekilde yüzeyde parlak β taneleri görülmüştür.



Şekil 4.6. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının kumlama işlemi sonrası SEM görüntüleri.

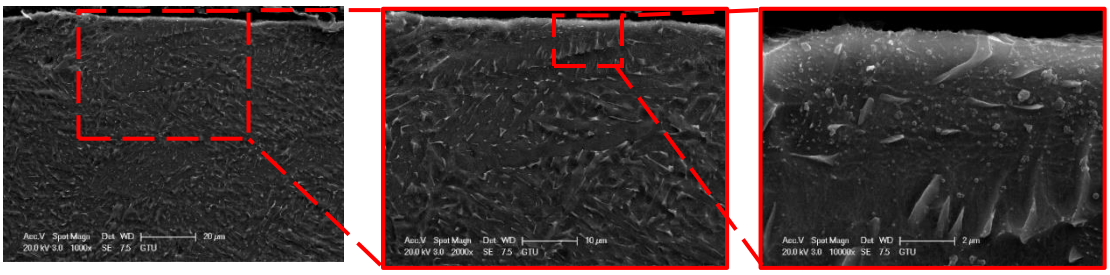
Şekil 4.7.'de önce kumlama işlemine ardından, 19x19 yıldız üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulan parçanın mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Yapıda eş eksenli sütunlu α+ β fazıyla birlikte α ve α' fazlarını görmek mümkündür. Daha küresel olan bu fazlar yapıda mukavemet artışına sebep olmaktadır. Mikroyapıdaki bu dağılımın etkisi sertlik ve aşınma direnci değerlerini de artırıcı yönde etkimiştir. Nitekim sonraki bölümlerde verilen mikrosertlik ve aşınma direnci verileri bunu doğrular şekilde olmuştur.



Şekil 4.7. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 19x19 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri.

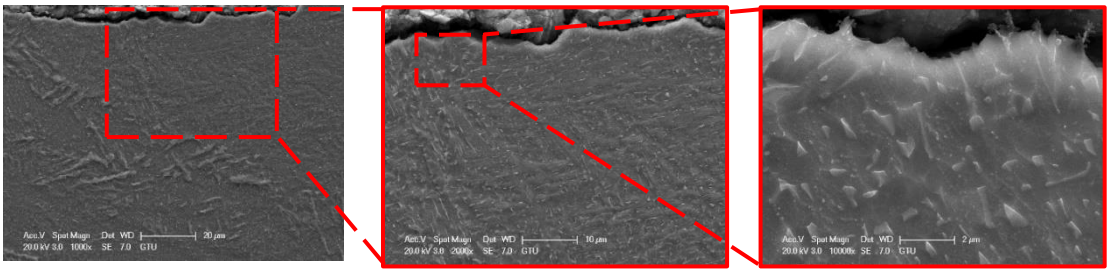
Şekil 4.8.'de kumlama işlemi ve sonrasında 12 saat 16x16 yıldız üçgen aşındırıcı medya ile vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulmuş parçanın mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Aynı aşındırıcı medya ile doğrudan 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan parçaya göre mikroyapının özellikle yüzeye yakın yerlerinde farklılık göstermektedir. Doğrudan vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan parça yüzeyinde β tanelerinden kaynaklı parlak tabaka görülmezken, kumlama işleminden sonra uygulanan vibrasyonlu yüzey işlemde bu tabaka görülmüştür. Bu durum kumlama işleminden sonra

yapılan vibrasyonun parçanın sertliğine daha fazla katkı sunduğunu göstermektedir. Verilen aşınma profillerinde de doğrudan vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulan parçanın aşınma derinliği, kumlama işleminin ardından vibrasyonlu yüzey işlem uygulanana göre daha yüksektir. Bu durum verilen XRD sonuçları ile de örtüşmektedir.



Şekil 4.8. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 16x16 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri.

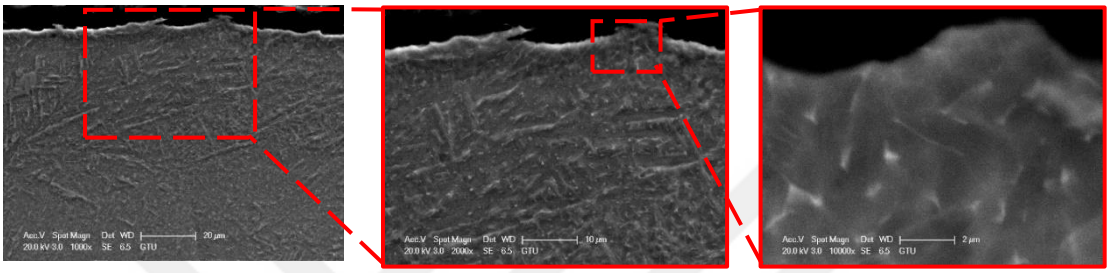
Şekil 4.9'da kumlama ve ardından 15x15 açılı kesim üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan parçanın mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Bu aşındırıcı medya 16x16 yıldız üçgen aşındırıcılar ile yaklaşık aynı boyuttadır. Ancak geometrinin yüzey üzerindeki etkisi belirgin bir şekilde farklılık göstermiştir. Yıldız üçgendeki köşe sayısı, açılı kesim üçgene göre parçanın daha pürüzsüz bir yüzeye ulaşmasını sağlamıştır.



Şekil 4.9. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 15x15 Açılı Kesim Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri.

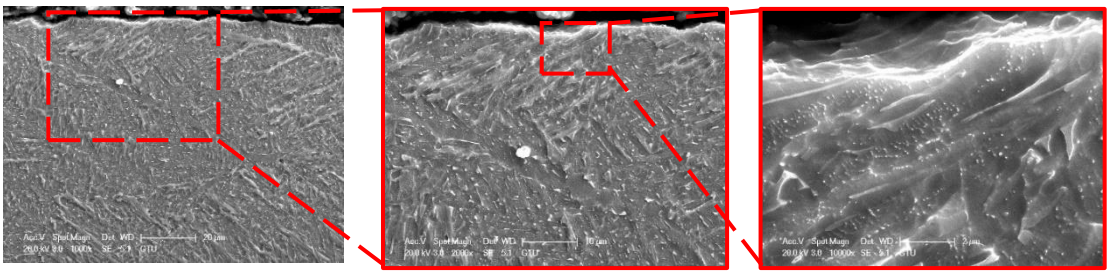
Şekil 4.10'da kumlama işlemi ardından 12 saat 15x15x06 elips aşındırıcı medya ile vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan parçanın mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Yaklaşık aynı boyutlardaki yıldız üçgen ve açılı kesim üçgen ile kıyaslandığında yüzeydeki katman

daha incedir. Bu durum daha düşük mikrosertlik ve aşınma direnci ile sonuçlanmıştır. Bu farklılığın sebebi aşındırıcı medya geometrilerinin farklı sürüklenme katsayısına sahip olmasıdır [194]. Aşındırıcı medya geometrisi, vibrasyonlu yüzey işlem kasesinin içindeki akıcılığa doğrudan etki eder. Köşe sayısı arttıkça aşındırıcıların birbiri üzerine tutunması kolaylaşır akıcılığı artar. Bu sırada iş parçası aynı sürede daha fazla köşeye dolayısıyla daha fazla kuvvete maruz kalacağından yüzey işlem daha etkili olmaktadır. Parça yüzeyinde homojen bir şekilde pürüzlülük düşüşü görülür.



Şekil 4.10. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 15x15x06 Elips aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri.

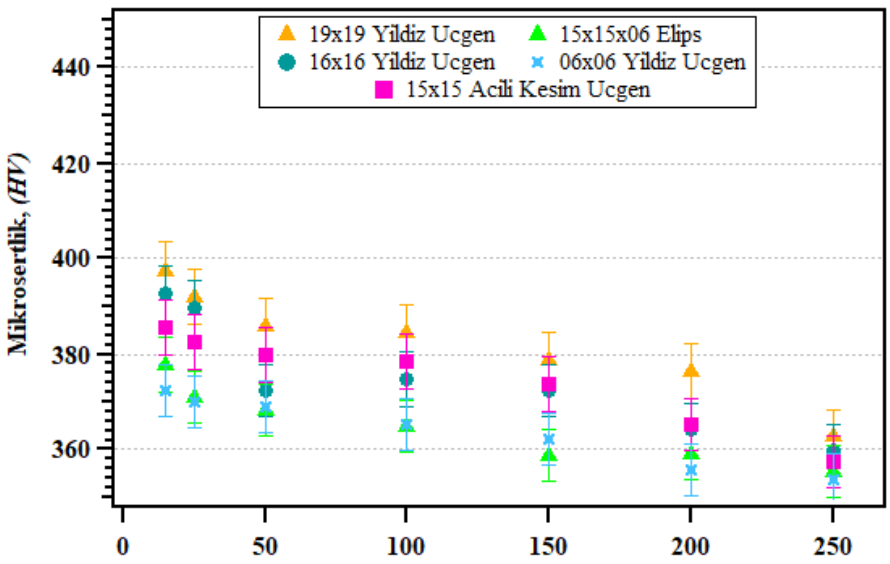
Şekil 4.11.'de kumlama işleminin ardından tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerdeki en küçük boyuttaki aşındırıcı medya olan 06x06 yıldız üçgen ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan parçanın geometrisi verilmiştir. Mikroyapı yüzeyden aşağı inildikçe işlem görmemiş parçaya benzer şekilde dağılım göstermiştir. Ancak yüzeyde oluşan ince taneli katmanın kalınlığı farklılık göstermektedir. Bu durum sertlik değerleri, XRD sonuçları ve aşınma dirençleri ile uyumluluk göstermektedir.



Şekil 4.11. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 06x06 Yıldız Üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası SEM görüntüleri.

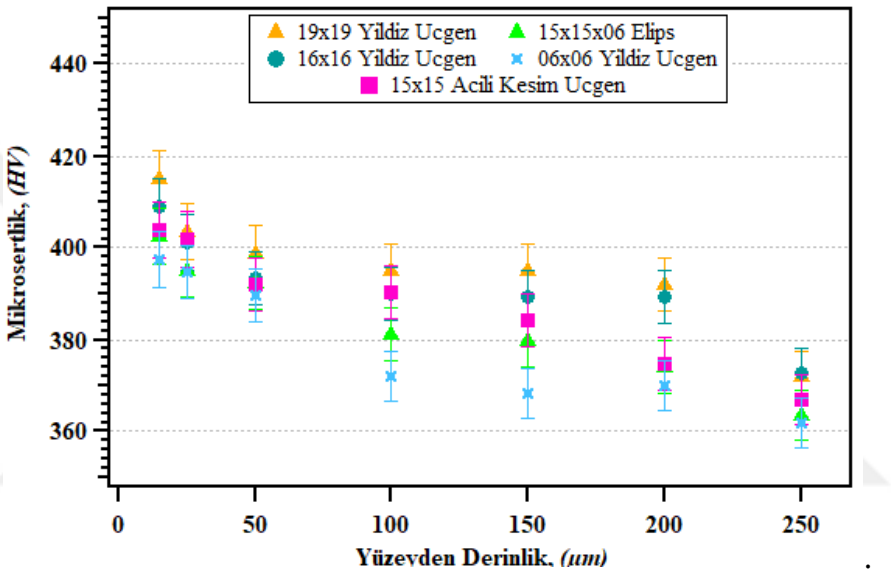
4.3. Mikrosertlik

Mikrosertlik parçanın mekanik özelliklerini belirlemek için esas alınan önemli bir değerdir. Mikrosertlik değerlerine bakılarak parçanın mukavemeti, aşınma direnci hakkında yorum yapmak mümkün olabilmektedir. Özellikle elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarda sertli değerleri kullanım yerine göre kritik olabilmektedir. Parçanın üretim sonrası sertlik değerini belirgin bir şekilde değiştiren işlemler genelde termal ikincil işlemler olmakla birlikte, mekanik ikincil işlemler de parçanın yüzey ve yüzey altı bölgelerinde sertleşmeye sebep olabilmektedir [195, 196]. Tez kapsamında yapılan mekanik ikincil işlemler sonrasında parçaların yüzey ve yüzey altında mikrosertlik değişimleri görülmüştür. İşlem görmemiş parçanın sertliği yaklaşık 356 HV ölçülmüştür. Kumlama işleminden sonra, yüzeyden 15 µm derinlikte yaklaşık 375 HV ölçülmüştür. Yüzeyden 25, 50, 100, 150, 200 ve 250 µm derinliklerde ise sırasıyla; 370.9 HV, 369.8 HV, 367.5 HV, 363 HV, 360 HV ve 358.1 HV ölçülmüştür. Yüzey işlemin etki ettiği derinliğin yaklaşık 250 µm olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.12.'de kumlama işlemi ardından farklı aşındırıcı medyalar ile uygulanan 4 saatlik vibrasyonlu yüzey işlem sonrası ölçülen mikrosertlik değerleri verilmiştir. 4 saatlik yüzey işlemlerin sonrasında yüzeyden 15 µm derinlikteki sertlikler kıyaslığında, %11.6'lık artışla 19x19 yıldız üçgen aşındırıcı medya ile uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem sonrasında en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir.



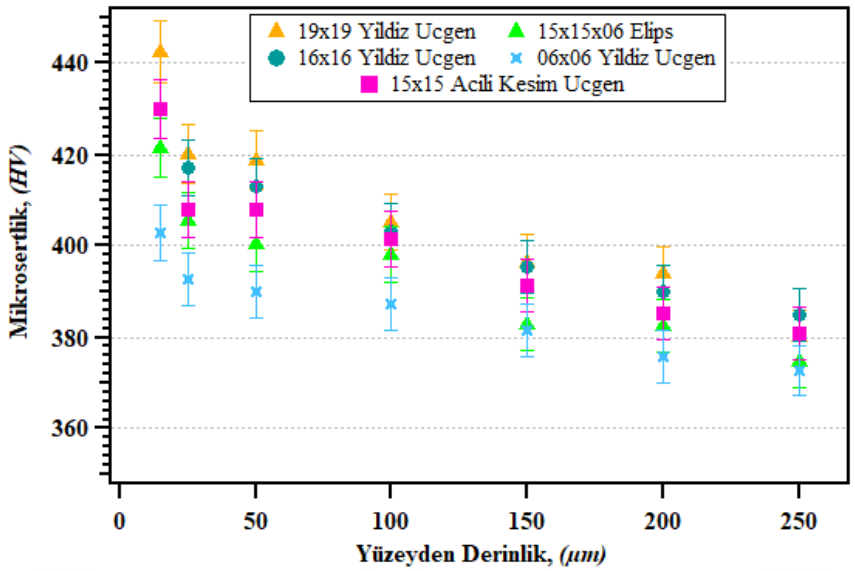
Şekil 4.12. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 4 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası mikrosertlik değerleri.

Şekil 4.13.'te kumlama işlemi ve ardından 8 saatlik vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan parçaların mikrosertlik değerleri verilmiştir. 4 saatlik yüzey işlemin etkilerine benzer şekilde mikrosertlik değeri en çok 19x19 yıldız üçgen aşındırıcı medya ile uygulanan işlem sonrasında ölçülmüştür. %16.5 artarak 414.9 HV'e yükselmiştir. Bu sertlik değişimini %14.7 artışla 16x16 yıldız üçgen, %13.6 artışla 15x15 açılı kesim üçgen, %12.9 artışla 15x15x06 elips, %11.6 artışla 06x06 yıldız üçgen ile uygulanan vibrasyonlu yüzey işlemler takip etmiştir. İşlem süresi arttıkça işlem etki derinliğinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 4.13. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 8 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası mikrosertlik değerleri.

Şekil 4.15'te kumlama işlemi ardından aynı aşındırıcı medyalar ile uygulanan 12 saatlik vibrasyonlu yüzey işlem sonrası elde edilen mikrosertlik değerleri verilmiştir. İşlem süresinin mikrosertlik üzerindeki etkisi belirgin şekilde görülmektedir. 19x19 yıldız üçgen aşındırıcı medya ile uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem sonrasında mikrosertlik yüzeyden 15 µm derinlikte %24.3 artarak 442.5 HV olmuştur. Mekanik bir ikincil işleme göre bu oldukça yüksek bir artıştır. Bu sertlik değişimini %20.7 artışla 16x16 yıldız üçgen, %20.4 artışla 15x15 açılı kesim üçgen, %18.4 artışla 15x15x06 elips, %13.21 artışla 06x06 yıldız üçgen ile uygulanan vibrasyonlu yüzey işlemler takip etmiştir. En az etki eden 06x06 yıldız üçgen aşındırıcı medyada 250 µm derinlikte ölçülen mikrosertlik değerleri 4, 8 ve 12 saatte sırasıyla 355.7, 361.7 ve 372.6 olarak ölçülmüştür. İşle süresi arttıkça işlemin etki ettiği derinlik artış göstermiştir.



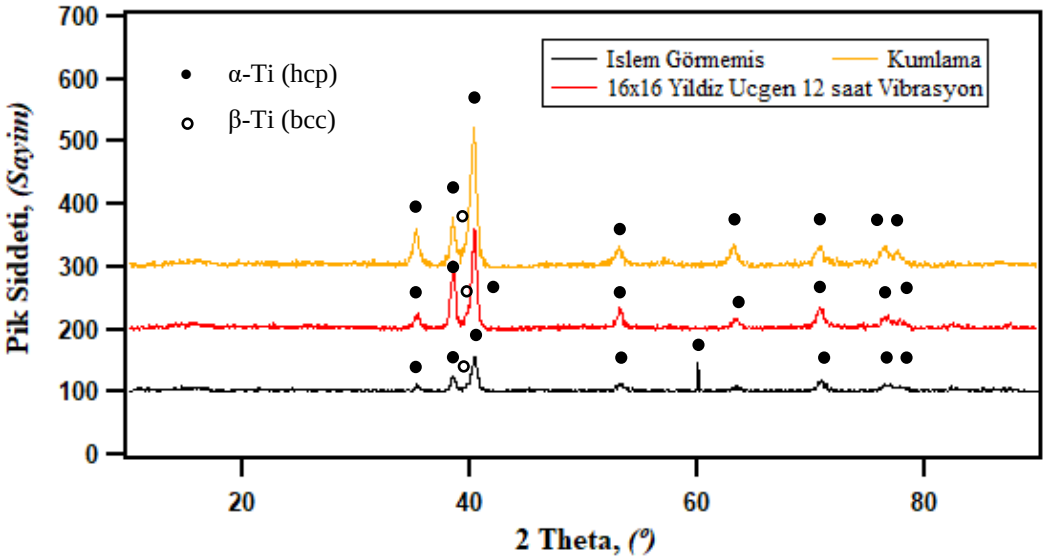
Şekil 4.14. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının önce kumlama ardından 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem sonrası mikrosertlik değerleri.

Kumlama işlemi yapılmaksızın, 12 saat 16x16 yıldız üçgen aşındırıcı medya ile gerçekleştirilen vibrasyonlu yüzey işlem sonrasında yüzeyden 15, 25, 50, 100, 150, 200 ve 250 µm derinliklerde ise sırasıyla; 413.8 HV, 388.2 HV, 379.1 HV, 378.9 HV, 368.3 HV, 364.7 ve 359.7 HV ölçülmüştür. Kumlama işleminin ardından bu aşındırıcı medya ile 12 saatlik vibrasyonlu yüzey işlem uygulandığında sertlik değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bu durum vibrasyonlu yüzey işlemden öncesinde uygulanan kumlama işleminin parçanın sertliğini artırıcı yönde etki ettiğini göstermektedir. Yapılan işlemlerin mikroyapıda farklılıkları yol açtığı ortaya konmuştu. Kumlama işlemi uygulanmadan vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan ve kumlama işlemi sonrasında vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan parçanın sertlik değerlerindeki farklılık mikroyapılarındaki farklılık ile açıklanabilmektedir. Bu iki işlem arasındaki fark XRD sonuçları ile de doğrulanmıştır.

Yapılan yüzey işlemler sonrasında en yüksek sertlik değerleri kumlama işlemi ardından uygulanan 12 saatlik vibrasyonlu yüzey işlemlerden sırasıyla 19x19 yıldız üçgen, 16x16 yıldız üçgen, 15x15 açılı kesim üçgen, 15x15x06 elips ve 06x06 yıldız üçgen aşındırıcı medya kullanılanlarda ölçülmüştür.

4.4. XRD Analizi

XRD analizleri yapılan ikincil işlemler sonrasında yüzey altında meydana gelen tane küçülmelerini ve faz dönüşümlerini yorumlamak için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen pik şiddetlerinde ve genişliklerindeki artış mikroyapıda tane küçülmesi ile açıklanmaktadır [197, 198]. Şekil 4.15.'te elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçanın işlem görmemiş halinin, kumlanmış halinin ve 16x16 yıldız üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulmuş halinin XRD sonuçları yer almaktadır. Yapıda yaygın olarak sıkı paket hegzagonel (hcp) α ve hacim merkezli kübik (bcc) β fazları görülmüştür. Yapılan ikincil işlemler sonrasında yeni bir faza rastlanmamış olup yalnızca pik şiddetlerinde değişiklikler olmuştur. 2 Theta yaklaşık 40 derecede (101) düzlemindeki ana pikin şiddeti yapılan ikincil işlemlerle artırılmıştır.

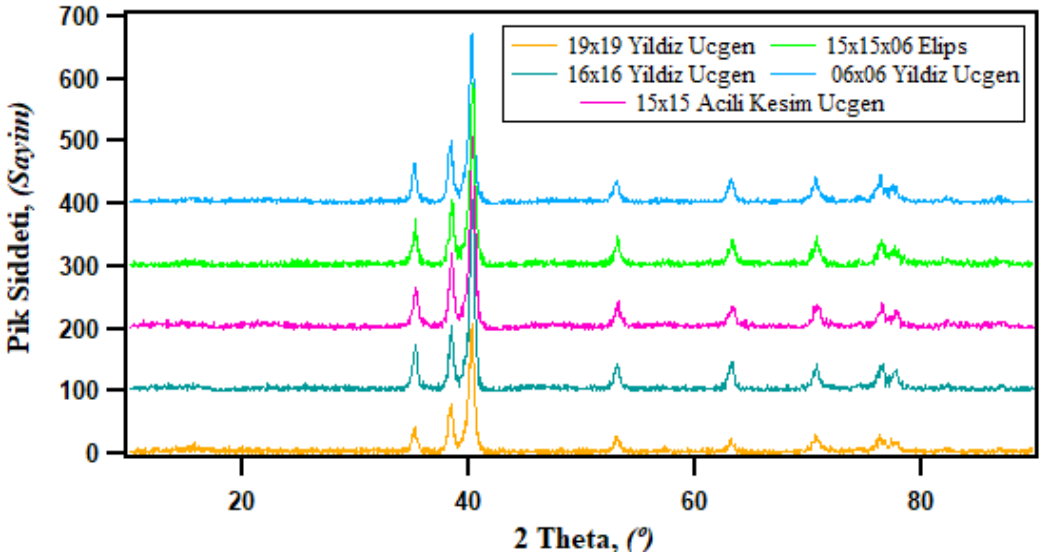


Şekil 4.15. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen işlem görmemiş, kumlama yapılmış ve 12 saat 16x16 Yıldız Üçgen seramik medya ile vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V parçalarının XRD sonuçları.

Deneyler kapsamında kullanılan aşındırıcı medyaların etkilerini anlamak için tüm medyalar ile aynı işlem süresince vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulan parçaların XRD sonuçları tek bir grafikte Şekil 4.16.'da verilmiştir. Şekil 4.15.'te verilen 16x16 yıldız üçgen aşındırıcı medya ile 12 saat doğrudan vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış parçanın XRD sonuçları ile kumlama işleminden aynı medya ve aynı süre ile sonra vibrasyonlu yüzey işlemin uygulandığı parçanın sonuçları kıyaslamak mümkündür. Buna

göre 2 Theta yaklaşık 40 derecedeki pik şiddetleri, doğrudan vibrasyonlu yüzey işleme tabii tutulanda 150, kumlama işleminin ardından vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan da ise 300 ölçülmüştür. Pik şiddeti fazla olan parçanın mikroyapısı incelendiğinde, düşük olana göre daha küçük taneli bir mikroyapı görülmüştür.

Şekil 4.16.'da görüldüğü üzere yapılan işlemler kendi içerisinde herhangi bir faz farklılığına sebep olmamıştır. Aynı düzlemlerde benzer pik şiddetleri ölçülmüştür. Bunula birlikte (101) düzlemindeki ana pikin şiddetleri sırasıyla 19x19 yıldız üçgen 203 sayım, 16x16 yıldız üçgen 300 sayım, 15,15 açılı kesim üçgen 304 sayım, 15x15x06 elips 270 sayım ve 06x06 yıldız üçgen 265 sayım olarak ölçülmüştür. Değerler birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bununla birlikte işlem görmemiş numunenin bu düzlemdeki pik şiddeti 52 sayım ölçülmüştür. Tüm ikincil işlemler belirgin şekilde bu düzlemdeki taneciklerin boyutunun değişmesine sebep olmuştur.

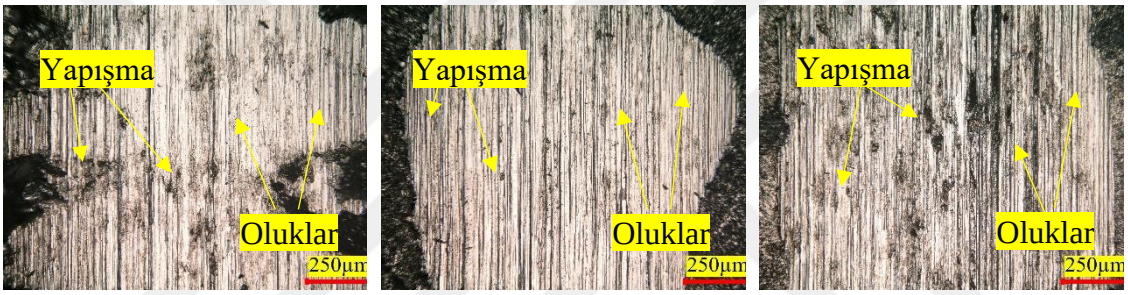


Şekil 4.16. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen işlem görmemiş, kumlama yapılmış ve 12 saat 16x16 Yıldız Üçgen seramik medya ile vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V parçalarının XRD sonuçları.

4.5. Aşınma Analizi

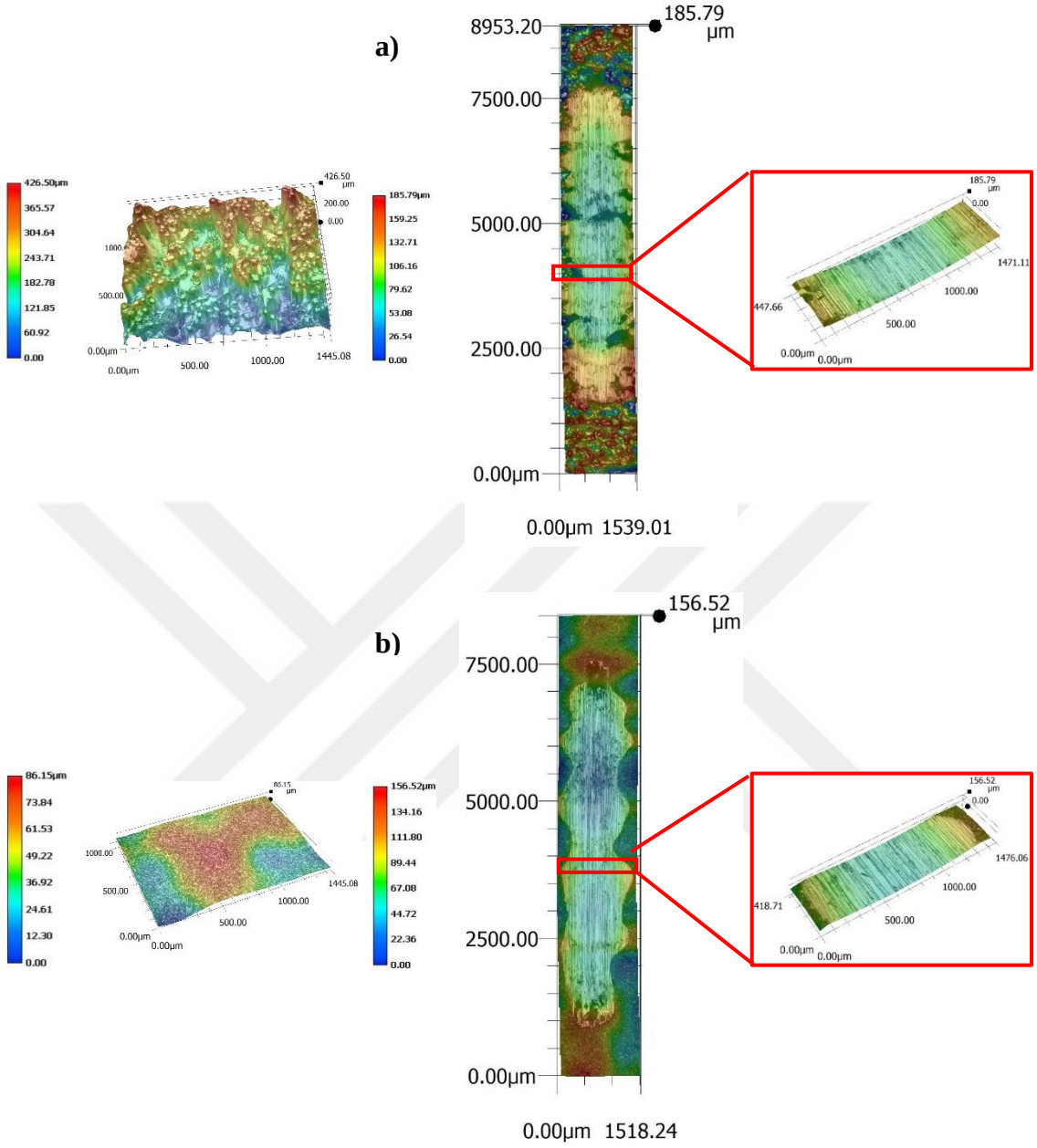
Şekil 4.17'de işlem görmemiş, kumlama işlemine tabii tutulmuş, kumlama işlemi sonrası 19x19 Yıldız Üçgen seramik medya ile vibrayonla yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V parçasının 2 boyutlu aşınma görüntüleri gösterilmiştir. Aşınma mekanizması açısından

incelendiğinde malzemenin maruz kaldığı adhesif ve abrasif aşınmanın aynı anda oluşması durumu gözlenmektedir. Abrasif aşınma, aşınma testi başlangıcında, parçacıkların sert veya normal temas basıncı altında daha yumuşak bir yüzeye nüfuz etmesi ve bu yüzeyden talaş kaldırması ile sonuçlanmaktadır. Tungsten karbür bilyenin Ti-6Al-4V alaşım malzemesine göre çok daha sert malzeme olması, teğetsel bir hareket uygulandığında, daha yumuşak olan tarafın oluklar ve çizikler oluşturacak şekilde aşınmasına ve böylece abrasif aşınma mekanizmasını ortaya çıkarmasına neden olur. Ayrıca bu mekanizma türünde mikro-yarık veya mikro-oluk gibi aşınma kalıntılarının oluşması da söz konusudur. Oluşan bir diğer aşınma türü olan adhesif aşınma ise iki temas yüzeyinin birbirleri ile göreceli olarak hareket etmesi sonucu zayıf olan yüzeyden malzemenin yırtılması ve bunun sonucunda malzeme taşınmasının oluşması olarak tanımlanmaktadır. Transfer edilen parça, kayma işlemi devam ederken plastik olarak deforme edilir, böylece aktarılan malzeme karşı yüzeyde katmanlı bir yüzey morfolojisinin oluşması ile sonuçlanır.



Şekil 4.17. İşlem görmemiş, kumlama işlemine tabii tutulmuş, kumlama işlemi sonrası 19x19 Yıldız Üçgen seramik medya ile vibrayonlu yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V alaşım malzemesinin aşınma mekanizmaları

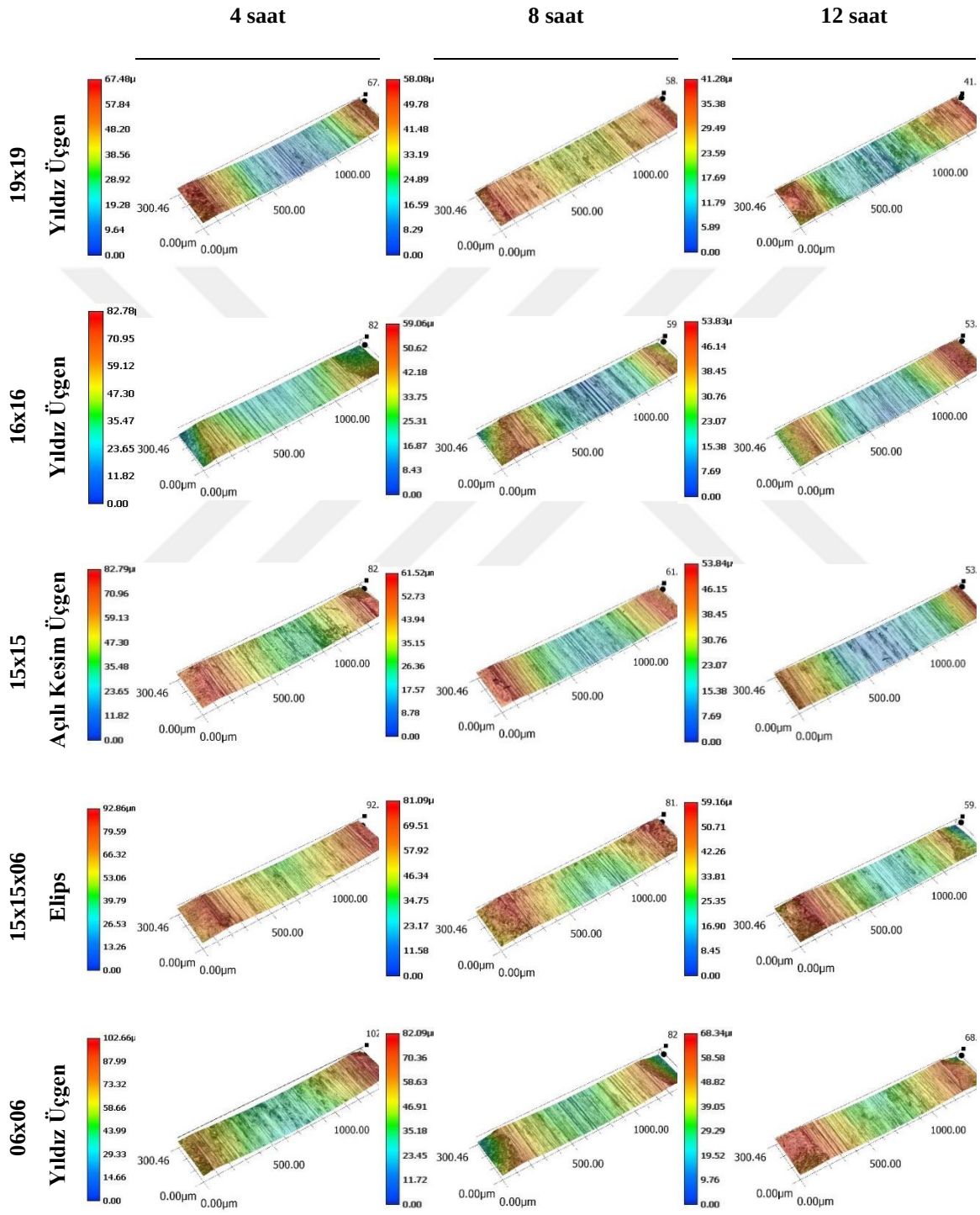
Şekil 4.16.'da işlem görmemiş (a) ve kumlama işlemine tabii tutulmuş numunenin aşınma izleri verilmiştir. İşlem görmemiş numune yüzeyindeki ergimemiş tozlar ve yüksek yüzey pürüzlülüğü görülebilmektedir. İşlem görmemiş numunenin yüzey pürüzlülüğünün beklenilenden fazla olması ve yapılan ön çalışmalar sonrasında, işlem görmemiş numuneye doğrudan vibrasyonlu yüzey işlem uygulayarak istenilen yüzey pürüzlülük seviyesine getirilmesi çok uzun sürmüştür. 16x16 yıldız üçgen seramik medya ile yapılan vibrasyonlu yüzey işlem ile işlem görmemiş parçanın yüzey pürüzlülüğünü ~Ra=2.5 µm'ye düşürmek 60 saat sürmüştür. Bu yaygın kullanımı hedeflenen bir toplu bitirme işlemi için oldukça fazla bir süredir. Bu sebeple süreyi azaltmak için, parçalara vibrasyonlu yüzey işlem öncesi kumlama işlemi uygulanarak yüzey pürüzlülüğü belirli bir seviyeye indirilmiştir. Şekil 4.18. (b)'de kumlama işleminden sonra yüzeydeki gelişme görülebilmektedir.



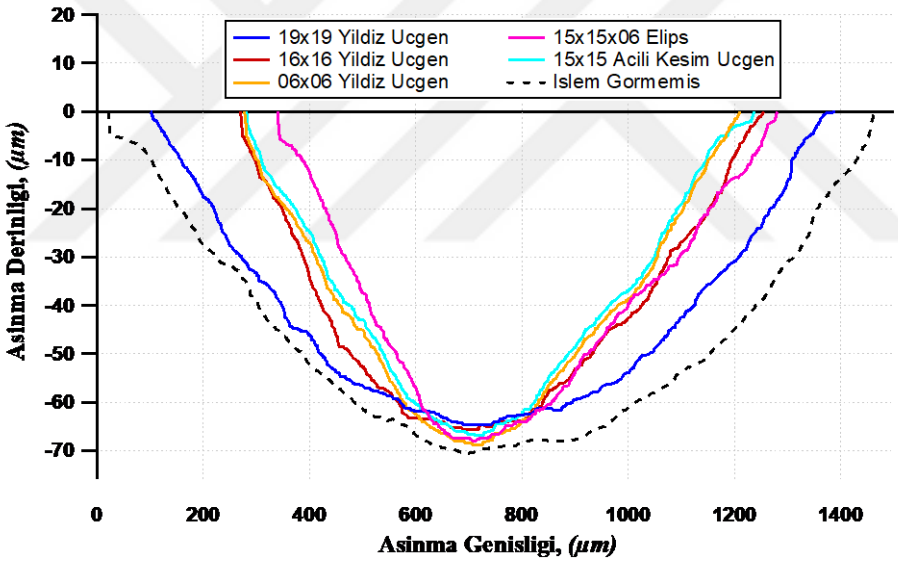
Şekil 4.18. İşlem görmemiş (a) ve kumlama işlemi yapılmış (b) numunenin topografi ve aşınma izi görüntüleri

Tablo 4.6.'da vibrasyonlu yüzey işlemin parametrelerinin aşınma direnci üzerindeki etkisini anlayabilmek için yapılan lineer aşındırma testlerinden elde edilen aşınma izleri verilmiştir. İşlem süresi arttıkça, pürüzlülüğü daha düşük yüzeyler elde edilmiş ve buna bağlı olarak düşük aşınma derinlikleri elde edilmiştir. Aşınmaya karşı gösterilen direncin arttığı görülmüştür.

Tablo 4.6. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ø19x30 mm boyutundaki Ti-6Al-4V parçalara kumlama işlemi uygulanıp yüzey pürüzlülükleri belirli bir noktaya (~Ra=10 μm) indirildikten sonra uygulanan vibrasyonlu yüzey işlemleri sonrasında yapılan lineer aşındırma testleri sonucu elde edilen aşınma izleri.



Şekil 4.19.'da işlem görmemiş ve 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem tabii tutulan parçalara yapılan lineer aşınma testi sonrasında elde edilen aşınma profilleri verilmiştir. Burada yalnızca vibrasyonlu yüzey işlemin etkisini karşılaştırabilmek için, parçalara öncesinde kumlama işlemi yapılmamıştır. Aşındırıcı medya boyutunda ve geometrisindeki değişimler, aşındırıcı taşların izlediği toroidal sarmal yoldaki akıcılığına etki etmektedir [199, 200]. Aşınma profilleri incelendiğinde aşınma derinliğinin en az elde edildiği işlemin 19x19 yıldız üçgen seramik aşındırıcı medya ile uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla takip eden aşındırıcı medyalar ise; 16x16 yıldız üçgen, 15x15 açılı kesim üçgen, 15x15x06 elips, 06x06 yıldız üçgendir. Elde edilen sonuçlar aşındırıcı medya boyutunun arttıkça, malzeme kaldırma oranının artmış ve buna bağlı olarak daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. 19x19, 16x16 ve 06x06 yıldız üçgen seramik medyalar boyut kıyaslaması için kullanılmıştır. 16x16 yıldız üçgen, 15x15 açılı kesim üçgen ve 15x15x06 elips medyaları ise benzer boyutlu ancak farklı geometrili aşındırıcıların kıyaslanması için kullanılmıştır. Bu kombinasyondan ise, aşındırıcı medyada köşe sayısındaki artışın iş parçasından daha fazla talaş kaldırdığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.19. İşlem görmemiş ve 12 saat vibrasyonlu yüzey işlem yapılmış numunelerin aşınma profilleri.

İşlem görmemiş numunelerin kütlesi ortalama 38.6 gr olarak ölçülmüştür. Kumlama işleminin ardından 19x19 yıldız üçgen aşındırıcı medya ile yapılan vibrasyonlu yüzey işlem sonrası %6.2 azalarak 36.2 gr'a düşmüştür. Kütle kaybı arttıkça aşınma oranları azalmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerinin, vibrasyonlu yüze işlem süreçlerini geliştirmek üzerine çalışılmıştır. Vibrasyonlu yüzey işlemin en önemli iki parametresi olan aşındırıcı medya cinsi ve işlem süresi değiştirilerek farklı kombinasyonlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrasında parçanın yüzey topografyası ve pürüzlülüğü, mikroyapısı, mikrosertliği, XRD analizleri ve aşınma analizleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- İşlem görmemiş numuneye doğrudan vibrasyonlu yüzey işlem uygulandığında, ortalama boyutlardaki aşındırıcı medya ile yüzey pürüzlülüğünü yaklaşık Ra=3.8 µm seviyelerine düşürmek için 60 saatlik işlem süresi gerekmektedir. Bu uygulanabilirliği düşüren, işlem maliyetini yükselten bir durumdur.
- Vibrasyonlu yüzey işlem öncesi kumlama uygulayarak yüzey pürüzlülüğünü Ra=10 µm'ye düşürmek, işlem süresini %80 azaltabilmektedir. Ayrıca yapılan bu öncül ikincil işlem parçanın mekanik özelliklerini, doğrudan uygulanan vibrasyonlu yüzey işleme göre daha fazla geliştirmektedir.
- Kullanılan aşındırıcı medyaların yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, XRD ve aşınma analizleri kıyaslandığında etkinlik sıralaması; 19x19 yıldız üçgen, 16x16 yıldız üçgen, 15x15 açılı kesim üçgen, 15x15x06 elips, 06x06 yıldız üçgen olmuştur.
- Aynı geometriye ancak farklı boyutlara sahip olan aşındırıcı medyalar kıyaslandığında; medya boyutu arttıkça parça üzerindeki etkinin arttığı görülmüştür. Medyanın etkinliği boyut arttıkça artsa da, aşındırılmak istenen iş parçasının geometrisine bağlı olarak seçilmelidir. 06x06 yıldız üçgen aşındırıcı medya daha düşük etki etse de, karmaşık geometrili parçalarda tüm yüzeye nüfuz edebilme açısında önemli bir seçenektir.
- Benzer boyutlarda ancak farklı geometriye sahip aşındırıcı medyalar, farklı reolojik davranışlara sahiptir. Saniyede alınan yol 19x19 yıldız üçgen medyada 16.4 cm, ardından 16x16 yıldız üçgen medyada 16 cm, 15x15 açılı kesim üçgen medyada 15.3 cm, 15x15x06 elips medyada 15.2 cm, 06x06 yıldız üçgen medyada 12.1 cm olarak ölçülmüştür. Bu hızlara göre aynı geometride boyut arttıkça birim sürede iş parçası üzerine çarpan medya sayısı arttığından, parça üzerindeki

etkinliği artmaktadır. Benzer boyutta farklı geometriler karşılaştırıldığında ise köşe sayısı arttıkça birbiri üzerindeki tutunmaya bağlı olarak akış hızlanmakta ve hızın artışı aşındırıcı medyanın iş parçası üzerindeki etkinliğini artırmaktadır.

- Vibrasyonlu yüzey işlem süresi arttıkça parça üzerinde etki ettiği derinlik artmıştır.
- Yapılan ikincil işlemler ile parçanın yüzey mikrosertliğini yaklaşık %.25 artırmak mümkün olmuştur.

KAYNAKÇA

1. Zhai, Y., D.A. Lados, and J.L. LaGoy, *Additive manufacturing: making imagination the major limitation.* Jom, 2014. **66**(5): p. 808-816.
2. Gökhan, Ö., *Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme.* Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2020. **9**(1): p. 606-621.
3. YALÇIN, B. and B. Ergene, *ENDÜSTRİDE YENİ EĞİLİM OLAN 3-B EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE METALURJİSİ.* SDU International Journal of Technological Science, 2017. **9**(3).
4. Redwood, B. *Additive manufacturing technologies: An overview*. Available from: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/.
5. Dermeik, B. and N. Travitzky, *Laminated object manufacturing of ceramic-based materials.* Advanced Engineering Materials, 2020. **22**(9): p. 2000256.
6. Rack, H. and J. Qazi, *Titanium alloys for biomedical applications.* Materials Science and Engineering: C, 2006. **26**(8): p. 1269-1277.
7. Peters, M., et al., *Titanium alloys for aerospace applications.* Advanced engineering materials, 2003. **5**(6): p. 419-427.
8. Bhowmik, S., et al., *High-performance nanoadhesive bonding of titanium for aerospace and space applications.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(3): p. 259-267.
9. Izamshah, R., et al., *Experimental study of milling titanium alloy (TI-6A1-4V) for defence application.* Journal of Fundamental and Applied Sciences, 2017. **9**(3S): p. 245-256.
10. Leyens, C. and M. Peters, *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. 2003: John Wiley & Sons.
11. Liu, S. and Y.C. Shin, *Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review.* Materials & Design, 2019. **164**: p. 107552.
12. Campbell, G., et al., *The HCP to BCC phase transformation in Ti characterized by nanosecond electron microscopy*. 2005, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
13. Donachie, M.J., *Titanium: a technical guide*. 2000: ASM international.
14. Bikramjit, B., *Biomaterials for Musculoskeletal Regeneration*. 2016, Singapore: Springer.
15. Lütjering, G. and J.C. Williams, *Titanium*. 2007: Springer Science & Business Media.
16. Ran, J., et al., *Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Electron Beam Melting.* Crystals, 2020. **10**(11): p. 972.
17. Murr, L., et al., *Microstructure and mechanical behavior of Ti–6Al–4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications.* Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2009. **2**(1): p. 20-32.
18. Ahmed, T., H.J.M.S. Rack, and E. A, *Phase transformations during cooling in α+ β titanium alloys.* 1998. **243**(1-2): p. 206-211.
19. Işik, B. and A. Kentli, *The prediction of surface temperature in drilling of Ti6Al4V.* Archives of Metallurgy and Materials, 2014. **59**.
20. Modgil, A., *Effects of high speed machining on surface topography of titanium alloy (TI6AL4V)*. 2003, University of Florida Gainesville, FL.
21. Mruthunjaya, M. and K. Yogesha, *A review on conventional and thermal assisted machining of titanium based alloy.* Materials Today: Proceedings, 2021.
22. Horn, T.J. and O.L.J.S.p. Harrysson, *Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications.* 2012. **95**(3): p. 255-282.
23. Shui, X., et al., *Effects of post-processing on cyclic fatigue response of a titanium alloy additively manufactured by electron beam melting.* Materials Science and Engineering: A, 2017. **680**: p. 239-248.

24. Gong, H., et al., *Influence of defects on mechanical properties of Ti–6Al–4 V components produced by selective laser melting and electron beam melting.* Materials & Design, 2015. **86**: p. 545-554.

25. Cormier, D., O. Harrysson, and H. West, *Characterization of H13 steel produced via electron beam melting.* Rapid prototyping journal, 2004.

26. Facchini, L., et al., *Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by electron beam melting of pre-alloyed powders.* Rapid Prototyping Journal, 2009.

27. Rossoll, A., et al., *Mechanical aspects of the Charpy impact test.* Nuclear engineering and design, 1999. **188**(2): p. 217-229.

28. Galati, M. and L. Iuliano, *A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations.* Additive Manufacturing, 2018. **19**: p. 1-20.

29. Burgman, O. and C. Lundberg, *Understanding process atmosphere interactions in Electron Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF) additive manufacturing.* 2021.

30. Takezawa, A., et al., *Isotropic Ti–6Al–4V lattice via topology optimization and electron-beam melting.* Additive Manufacturing, 2018. **22**: p. 634-642.

31. Zäh, M.F. and S. Lutzmann, *Modelling and simulation of electron beam melting.* Production Engineering, 2010. **4**(1): p. 15-23.

32. Balachandramurthi, A.R., et al., *Additive manufacturing of alloy 718 via electron beam melting: Effect of post-treatment on the microstructure and the mechanical properties.* 2019. **12**(1): p. 68.

33. Vayssette, B., et al., *Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life.* Procedia engineering, 2018. **213**: p. 89-97.

34. Murr, L.E., et al., *Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies.* Journal of Materials Science & Technology, 2012. **28**(1): p. 1-14.

35. Thijs, L., et al., *A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V.* Acta materialia, 2010. **58**(9): p. 3303-3312.

36. Zhao, X., et al., *Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti–6Al–4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting.* Materials & Design, 2016. **95**: p. 21-31.

37. Edwards, P. and M. Ramulu, *Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti–6Al–4V.* Materials Science and Engineering: A, 2014. **598**: p. 327-337.

38. Hrabe, N. and T. Quinn, *Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size.* Materials Science and Engineering: A, 2013. **573**: p. 264-270.

39. Tammas-Williams, S., et al., *XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti–6Al–4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting.* Materials Characterization, 2015. **102**: p. 47-61.

40. Chan, K.S., et al., *Fatigue life of titanium alloys fabricated by additive layer manufacturing techniques for dental implants.* Metallurgical and Materials Transactions A, 2013. **44**(2): p. 1010-1022.

41. Wang, P., et al., *Effects of processing parameters on surface roughness of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting.* Materials, 2017. **10**(10): p. 1121.

42. Galarraga, H., et al., *Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM).* Additive Manufacturing, 2016. **10**: p. 47-57.

43. Greitemeier, D., et al., *Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting.* International Journal of Fatigue, 2017. **94**: p. 211-217.

44. Balachandramurthi, A.R., et al., *Additive manufacturing of alloy 718 via electron beam melting: Effect of post-treatment on the microstructure and the mechanical properties.* Materials, 2019. **12**(1): p. 68.

45. Safdar, A., et al., *Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V.* Rapid Prototyping Journal, 2012.

46. Narra, S.P., et al., *Location specific solidification microstructure control in electron beam melting of Ti-6Al-4V.* Additive Manufacturing, 2018. **19**: p. 160-166.

47. Gong, H., et al. *The effects of processing parameters on defect regularity in Ti-6Al-4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting*. in *24th annual international solid freeform fabrication symposium—an additive manufacturing conference, Austin, TX*. 2013.

48. Pobel, C.R., et al., *Immediate development of processing windows for selective electron beam melting using layerwise monitoring via backscattered electron detection.* Materials Letters, 2019. **249**: p. 70-72.

49. Higashi, M. and K. Yoshimi, *Electron beam surface melting of MoSiBTiC alloys: Effect of preheating on cracking behavior and microstructure evolution.* Materials & Design, 2021. **209**: p. 110010.

50. Shao, M., et al., *The effect of beam scan strategies on microstructural variations in Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion.* Materials & Design, 2020. **196**: p. 109165.

51. Karlsson, J., et al., *Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder fractions.* Journal of materials processing technology, 2013. **213**(12): p. 2109-2118.

52. Abdeen, D.H. and B.R. Palmer, *Effect of processing parameters of electron beam melting machine on properties of Ti-6Al-4V parts.* Rapid Prototyping Journal, 2016.

53. Edwards, P., A. O'conner, and M. Ramulu, *Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance.* Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013. **135**(6).

54. Cunningham, R., et al., *Evaluating the effect of processing parameters on porosity in electron beam melted Ti-6Al-4V via synchrotron X-ray microtomography.* Jom, 2016. **68**(3): p. 765-771.

55. Bauereiß, A., T. Scharowsky, and C. Körner, *Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting.* Journal of Materials Processing Technology, 2014. **214**(11): p. 2522-2528.

56. Prisco, U., et al., *Influence of processing parameters on microstructure and roughness of electron beam melted Ti-6Al-4V titanium alloy.* Materials and Manufacturing Processes, 2019. **34**(15): p. 1753-1760.

57. Del Guercio, G., et al., *Microstructure and mechanical performance of Ti–6Al–4V lattice structures manufactured via electron beam melting (EBM): a review.* Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020. **33**(2): p. 183-203.

58. Wysocki, B., et al., *Laser and electron beam additive manufacturing methods of fabricating titanium bone implants.* Applied Sciences, 2017. **7**(7): p. 657.

59. Chastand, V., et al., *Comparative study of fatigue properties of Ti-6Al-4V specimens built by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM).* Materials Characterization, 2018. **143**: p. 76-81.

60. Hrabe, N., R. Kircher, and T. Quinn. *Effects of processing on microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V fabricated using electron beam melting (EBM): Orientation and location*. in *Proceedings of the 23rd Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA*. 2012.

61. Ahn, Y.-K., et al., *Mechanical and microstructural characteristics of commercial purity titanium implants fabricated by electron-beam additive manufacturing.* Materials Letters, 2017. **187**: p. 64-67.

62. Antonysamy, A.A., *Microstructure, texture and mechanical property evolution during additive manufacturing of Ti6Al4V alloy for aerospace applications*. 2012: The University of Manchester (United Kingdom).

63. Bruno, J., et al., *Effect of build orientation of electron beam melting on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V.* 2017. **26**(2): p. 692-703.

64. Jafary-Zadeh, M., et al., *A critical review on metallic glasses as structural materials for cardiovascular stent applications.* 2018. **9**(1): p. 19.

65. Hrabe, N. and T. Quinn, *Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location.* Materials Science and Engineering: A, 2013. **573**: p. 271-277.

66. de Formanoir, C., et al., *Electron beam melted Ti–6Al–4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material.* Materials Science and Engineering: A, 2016. **652**: p. 105-119.

67. Kirchner, A., et al., *Process window for electron beam melting of Ti-6Al-4V.* Powder Metallurgy, 2015. **58**(4): p. 246-249.

68. Yaman, N., et al., *Enhancing Surface Integrity of Additively Manufactured Inconel 718 by Roller Burnishing Process.* Procedia CIRP, 2022. **108**: p. 681-686.

69. Bourell, D., et al., *Materials for additive manufacturing.* CIRP annals, 2017. **66**(2): p. 659-681.

70. Rotella, G., et al., *Surface integrity of machined additively manufactured Ti alloys.* Journal of Materials Processing Technology, 2018. **259**: p. 180-185.

71. Guo, J., et al., *On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi high-entropy alloy.* Materials & Design, 2018. **153**: p. 211-220.

72. Brown, D., et al., *Surface integrity of Inconel 718 by hybrid selective laser melting and milling.* Virtual and Physical Prototyping, 2018. **13**(1): p. 26-31.

73. Tian, C., et al., *Study on Grindability of Inconel 718 Superalloy Fabricated by Selective Laser Melting (SLM).* Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2018. **64**(5): p. 319-328.

74. Yu, H., et al., *Fatigue performances of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy: Influence of surface finishing, hot isostatic pressing and heat treatments.* International Journal of Fatigue, 2019. **120**: p. 175-183.

75. Kaynak, Y. and O. Kitay, *The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting.* Additive Manufacturing, 2019. **26**: p. 84-93.

76. Fox, M., et al., *Magnetic abrasive finishing of rollers.* CIRP annals, 1994. **43**(1): p. 181-184.

77. Chang, G.-W., B.-H. Yan, and R.-T. Hsu, *Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002. **42**(5): p. 575-583.

78. Jain, V., et al., *Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process.* Wear, 2001. **250**(1-12): p. 384-390.

79. Yamaguchi, H., O. Fergani, and P.-Y. Wu, *Modification using magnetic field-assisted finishing of the surface roughness and residual stress of additively manufactured components.* CIRP Annals, 2017. **66**(1): p. 305-308.

80. Guo, J., et al., *Surface quality improvement of selective laser sintered polyamide 12 by precision grinding and magnetic field-assisted finishing.* Materials & Design, 2018. **138**: p. 39-45.

81. Zhang, W., *Intelligent energy field manufacturing: interdisciplinary process innovations*. 2010: CRC Press.

82. Yamaguchi, H. and A.A. Graziano, *Surface finishing of cobalt chromium alloy femoral knee components.* CIRP Annals, 2014. **63**(1): p. 309-312.

83. Yamaguchi, H., et al., *Polishing of uncoated cutting tool surfaces for extended tool life in turning of Ti–6Al–4V.* Journal of Manufacturing Processes, 2016. **24**: p. 355-360.

84. Yamaguchi, H., et al., *Magnetic abrasive finishing of cutting tools for machining of titanium alloys.* CIRP annals, 2012. **61**(1): p. 311-314.

85. Heng, L., Y.J. Kim, and S.D. Mun, *Review of superfinishing by the magnetic abrasive finishing process.* High Speed Machining, 2017. **3**(1): p. 42-55.

86. Singh, R.K., D. Singh, and S. Gangwar, *Advances in Magnetic Abrasive Finishing for Futuristic Requirements-A Review.* Materials Today: Proceedings, 2018. **5**(9): p. 20455-20463.

87. Zhang, J., A. Chaudhari, and H. Wang, *Surface quality and material removal in magnetic abrasive finishing of selective laser melted 316L stainless steel.* Journal of Manufacturing Processes, 2019. **45**: p. 710-719.

88. Handbook, A., *vol. 5: Surface Engineering.* ASM International, Materials Park, OH, 1994: p. 345-347.

89. Boschetto, A., V. Giordano, and F. Veniali, *Surface roughness prediction in fused deposition modelling by neural networks.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **67**(9-12): p. 2727-2742.

90. Henein, H., J. Brimacombe, and A. Watkinson, *Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns.* Metallurgical transactions B, 1983. **14**(2): p. 191-205.

91. Boschetto, A., L. Bottini, and F. Veniali, *Surface roughness and radiusing of Ti6Al4V selective laser melting-manufactured parts conditioned by barrel finishing.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **94**(5): p. 2773-2790.

92. Kumar, S.S. and S.S. Hiremath, *A review on abrasive flow machining (AFM).* Procedia Technology, 2016. **25**: p. 1297-1304.

93. Ferchow, J., et al., *Model of surface roughness and material removal using abrasive flow machining of selective laser melted channels.* Rapid Prototyping Journal, 2020.

94. Laguna-Camacho, J., et al., *A study of cavitation erosion on engineering materials.* Wear, 2013. **301**(1-2): p. 467-476.

95. Tan, K.L. and S.H. Yeo, *Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing.* Wear, 2017. **378**: p. 90-95.

96. Yin, F., et al., *Overview of ultrasonic shot peening.* Surface Engineering, 2017. **33**(9): p. 651-666.

97. Persenot, T., et al., *Effect of ultrasonic shot peening on the surface defects of thin struts built by electron beam melting: Consequences on fatigue resistance.* Additive Manufacturing, 2019. **28**: p. 821-830.

98. Ma, C., et al., *Improving surface finish and wear resistance of additive manufactured nickel-titanium by ultrasonic nano-crystal surface modification.* Journal of Materials Processing Technology, 2017. **249**: p. 433-440.

99. Amanov, A., et al., *Fretting wear and friction reduction of CP titanium and Ti–6Al–4V alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification.* Surface and coatings technology, 2012. **207**: p. 135-142.

100. Cao, X., Y. Pyoun, and R. Murakami, *Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification.* Applied Surface Science, 2010. **256**(21): p. 6297-6303.

101. Kim, M.S., et al., *Optimization of ultrasonic nanocrystal surface modification for surface quality improvement of directed energy deposited stainless steel 316L.* Journal of Materials Research and Technology, 2020. **9**(6): p. 15102-15122.

102. Salmi, M., J. Huuki, and I.F. Ituarte, *The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing.* Progress in Additive Manufacturing, 2017. **2**(1-2): p. 31-41.

103. Huuki, J. and S.V. Laakso, *Integrity of surfaces finished with ultrasonic burnishing.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013. **227**(1): p. 45-53.

104. Teramachi, A. and J. Yan, *Improving the surface integrity of additive-manufactured metal parts by ultrasonic vibration-assisted burnishing.* Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 2019. **7**(2).

105. Chakravorty, R., S. Gauri, and S. Chakraborty, *Optimization of multiple responses of ultrasonic machining (USM) process: a comparative study.* International Journal of Industrial Engineering Computations, 2013. **4**(2): p. 285-296.

106. Ahmed, N., et al., *Electron beam melting of titanium alloy and surface finish improvement through rotary ultrasonic machining.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **92**(9): p. 3349-3361.

107. Davidson, D.A., *Vibratory finishing: versatile, effective, and reliable.* Metal finishing, 2008. **106**(5): p. 30-34.

108. Uhlmann, E., A. Eulitz, and A. Dethlefs, *Discrete element modelling of drag finishing.* Procedia Cirp, 2015. **31**: p. 369-374.

109. Holzknecht, E., *Drag Finishing Displaces Manual And Robotic Grinding & Polishinig.* MFN Metal Finishing News, 2014: p. 42-44.

110. Denkena, B. and D. Biermann, *Cutting edge geometries.* CIRP annals, 2014. **63**(2): p. 631-653.

111. Kaynak, Y. and E. Tascioglu, *Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing.* Progress in Additive Manufacturing, 2020. **5**(2): p. 221-234.

112. Priarone, P.C., et al., *Effects of cutting angle, edge preparation, and nano-structured coating on milling performance of a gamma titanium aluminide.* Journal of Materials Processing Technology, 2012. **212**(12): p. 2619-2628.

113. Jamal, M. and M.N. Morgan, *Design process control for improved surface finish of metal additive manufactured parts of complex build geometry.* Inventions, 2017. **2**(4): p. 36.

114. Başak, H., S. Özkan, and A. Taşkesen, *Application of burnishing process on friction stir welding and investigation of the effect of burnishing process on the surface roughness, hardness and strength.* Experimental Techniques, 2011. **35**(1): p. 8.

115. Bounouara, A., H. Hamadache, and A. Amirat, *Investigation on the effect of ball burnishing on fracture toughness in spiral API X70 pipeline steel.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **94**(9-12): p. 4543-4551.

116. Klocke, F. and J. Liermann, *Roller burnishing of hard turned surfaces.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998. **38**(5-6): p. 419-423.

117. STWORA, A. and G. SKRABALAK, *Improvement of mechanical properties of parts produced from AlSi10Mg powder with use of SLS/SLM technology by densification of the product surface layer.*

118. *What is Burnishing and what is it used for?* 2020; Available from: https://www.engineeringclicks.com/burnishing-process/.

119. Sova, A., et al., *Effect of turning and ball burnishing on the microstructure and residual stress distribution in stainless steel cold spray deposits.* Journal of Thermal Spray Technology, 2017. **26**(8): p. 1922-1934.

120. Chomienne, V., et al., *Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2016. **13**: p. 90-96.

121. Huynh, L., J. Rotella, and M.D. Sangid, *Fatigue behavior of IN718 microtrusses produced via additive manufacturing.* Materials & Design, 2016. **105**: p. 278-289.

122. Mahagaonkar, S., P. Brahmankar, and C. Seemikeri, *Effect of shot peening parameters on microhardness of AISI 1045 and 316L material: an analysis using design of experiment.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. **38**(5-6): p. 563-574.

123. Moriyama, M., et al., *Effect of shot peening on fatigue strength of 18% Ni maraging steel.* JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering, 2001. **44**(2): p. 301-308.

124. Kumar, H., S. Singh, and P. Kumar, *Modified shot peening processes–a review.* International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, 2013. **5**(1): p. 12-19.

125. Oguri, K., *Fatigue life enhancement of aluminum alloy for aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP).* Journal of Materials Processing Technology, 2011. **211**(8): p. 1395-1399.

126. Maamoun, A.H., M.A. Elbestawi, and S.C. Veldhuis, *Influence of shot peening on AlSi10Mg parts fabricated by additive manufacturing.* Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2018. **2**(3): p. 40.

127. AlMangour, B. and J.-M. Yang, *Improving the surface quality and mechanical properties by shot-peening of 17-4 stainless steel fabricated by additive manufacturing.* Materials & Design, 2016. **110**: p. 914-924.

128. Baleani, M., M. Viceconti, and A. Toni, *The effect of sandblasting treatment on endurance properties of titanium alloy hip prostheses.* Artificial Organs, 2000. **24**(4): p. 296-299.

129. Bernevig-Sava, M., et al. *Considerations on the surface roughness of SLM processed metal parts and the effects of subsequent sandblasting*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. IOP Publishing.

130. Lachmayer, R., A. Wolf, and G. Kloppenburg, *Additive manufacturing of optical components.* SPIE Newsroom, 2015. **6233**.

131. Yang, J., et al., *Electron beam-based additive manufacturing of Fe93. 5Si6. 5 (wt.%) soft magnetic material with controllable magnetic performance.* Scripta Materialia, 2022. **210**: p. 114460.

132. Bekker, A.C. and J.C. Verlinden, *Life cycle assessment of wire+ arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel.* Journal of Cleaner Production, 2018. **177**: p. 438-447.

133. Maleki, E., et al., *Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities.* Additive Manufacturing, 2021. **37**: p. 101619.

134. McCullough, E.J. and V.K. Yadavalli, *Surface modification of fused deposition modeling ABS to enable rapid prototyping of biomedical microdevices.* Journal of Materials Processing Technology, 2013. **213**(6): p. 947-954.

135. Galantucci, L.M., F. Lavecchia, and G. Percoco, *Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts.* CIRP annals, 2009. **58**(1): p. 189-192.

136. Mazlan, S.N.H., et al., *Surface Finish and Mechanical Properties of FDM Part After Blow Cold Vapor Treatment.* Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2018. **48**(2): p. 148-155.

137. Havenga, S., et al. *Effectiveness of acetone postproduction finishing on entry level FDM printed ABS artefacts*. in *RAPDASA Conference Proceedings 2015*. 2015.

138. Angel, K., et al., *Selective electroplating of 3D printed parts.* Additive Manufacturing, 2018. **20**: p. 164-172.

139. Saleh, N., et al., *Effects of electroplating on the mechanical properties of stereolithography and laser sintered parts.* Rapid prototyping journal, 2004.

140. Kannan, S. and D. Senthilkumaran, *Investigating the influence of electroplating layer thickness on the tensile strength for fused deposition processed ABS thermoplastics.* International Journal of Engineering and Technology, 2014. **6**(2): p. 1047-1052.

141. Nikzad, M., S.H. Masood, and I. Sbarski, *Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling.* Materials & Design, 2011. **32**(6): p. 3448-3456.

142. Mirzaee, M., et al. *Developing flexible 3D printed antenna using conductive ABS materials*. in *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. 2015. IEEE.

143. Schlesinger, M. and M. Paunovic, *Modern electroplating*. Vol. 55. 2011: John Wiley & Sons.

144. Pyka, G., et al., *Surface modification of Ti6Al4V open porous structures produced by additive manufacturing.* Advanced Engineering Materials, 2012. **14**(6): p. 363-370.

145. Chohan, J.S., et al., *Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications.* Composites Part B: Engineering, 2017. **117**: p. 138-149.

146. Rajan, A.J., et al., *Influence of Vapour Smoothing Process Parameters on Fused Deposition Modelling Parts Surface Roughness at Different Build Orientation.* Materials Today: Proceedings, 2020. **22**: p. 2772-2778.

147. Rao, A.S., et al., *Investigation of post processing techniques to reduce the surface roughness of fused deposition modeled parts.* International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2012. **3**(3): p. 531-544.

148. Singh, T.B., J.S. Chohan, and R. Kumar, *Performance analysis of vapour finishing apparatus for surface enhancement of FDM parts.* Materials Today: Proceedings, 2020.

149. Colpani, A., A. Fiorentino, and E. Ceretti, *Characterization of chemical surface finishing with cold acetone vapours on ABS parts fabricated by FDM.* Production Engineering, 2019. **13**(3-4): p. 437-447.

150. Wysocki, B., et al., *The influence of chemical polishing of titanium scaffolds on their mechanical strength and in-vitro cell response.* Materials Science and Engineering: C, 2019. **95**: p. 428-439.

151. Ramasawmy, H. and L. Blunt, *Investigation of the effect of electrochemical polishing on EDM surfaces.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007. **31**(11-12): p. 1135-1147.

152. Landolt, D., *Fundamental aspects of electropolishing.* Electrochimica Acta, 1987. **32**(1): p. 1-11.

153. Baicheng, Z., et al., *Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing.* Materials & Design, 2017. **116**: p. 531-537.

154. Tyagi, P., et al., *Reducing the roughness of internal surface of an additive manufacturing produced 316 steel component by chempolishing and electropolishing.* Additive Manufacturing, 2019. **25**: p. 32-38.

155. Milewski, J.O., *Additive Manufacturing of Metals*. Vol. 258. 2017: Springer International.

156. Brandt, M., *The role of lasers in additive manufacturing*, in *Laser Additive Manufacturing*, M. Brandt, Editor. 2017, Woodhead Publishing. p. 1-18.

157. Gebhardt, A. and J.-S. Hötter, *Additive Manufacturing*, in *Additive Manufacturing*, A. Gebhardt and J.-S. Hötter, Editors. 2016, Hanser. p. I-XX.

158. Girelli, L., et al., *Study of heat treatment parameters for additively manufactured AlSi10Mg in comparison with corresponding cast alloy.* Materials Science and Engineering: A, 2019. **739**: p. 317-328.

159. Girelli, L., et al., *Evaluation of the impact behaviour of AlSi10Mg alloy produced using laser additive manufacturing.* Materials Science and Engineering: A, 2019. **748**: p. 38-51.

160. Salman, O.O., et al., *Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L steel synthesized by selective laser melting.* Materials Science and Engineering: A, 2019. **748**: p. 205-212.

161. Zhou, L., et al., *Microstructure, precipitates and mechanical properties of powder bed fused inconel 718 before and after heat treatment.* Journal of Materials Science & Technology, 2019. **35**(6): p. 1153-1164.

162. Bordatchev, E.V., A.M. Hafiz, and O.R. Tutunea-Fatan, *Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014. **73**(1): p. 35-52.

163. Genna, S. and G. Rubino, *Laser finishing of Ti6Al4V additive manufactured parts by electron beam melting.* Applied Sciences, 2020. **10**(1): p. 183.

164. Liao, Y., C. Ye, and G.J. Cheng, *A review: Warm laser shock peening and related laser processing technique.* Optics & laser technology, 2016. **78**: p. 15-24.

165. Lin, D., et al., *Shock engineering the additive manufactured graphene-metal nanocomposite with high density nanotwins and dislocations for ultra-stable mechanical properties.* Acta Materialia, 2018. **150**: p. 360-372.

166. Nalla, R., et al., *On the influence of mechanical surface treatments—deep rolling and laser shock peening—on the fatigue behavior of Ti–6Al–4V at ambient and elevated temperatures.* Materials Science and Engineering: A, 2003. **355**(1-2): p. 216-230.

167. Lan, L., et al., *Microstructural evolution and stress state related to mechanical properties of electron beam melted Ti-6Al-4V alloy modified by laser shock peening.* Journal of Materials Science & Technology, 2020. **50**: p. 153-161.

168. Molaei, R., A. Fatemi, and N. Phan, *Significance of hot isostatic pressing (HIP) on multiaxial deformation and fatigue behaviors of additive manufactured Ti-6Al-4V including build orientation and surface roughness effects.* International Journal of Fatigue, 2018. **117**: p. 352-370.

169. Kondo, D., et al., *The effect of HIP treatment on the mechanical properties of titanium aluminide additive manufactured by EBM.* Hot Isostatic Pressing: HIP'17, 2019. **10**: p. 114.

170. Leuders, S., *On the mechanical performance of structures manufactured by Selective Laser Melting: Damage initiation and propagation.* University of Paderborn, Germany, as presented at AMPM2014, MPIF, USA.

171. Hrabe, N., T. Gnäupel-Herold, and T. Quinn, *Fatigue properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress.* International Journal of Fatigue, 2017. **94**: p. 202-210.

172. Kirchner, A., et al. *Mechanical properties of Ti-6Al-4V additively manufactured by electron beam melting*. in *Proceedings of the European Powder Metallurgy Association 2015 Congress & Exhibition, Reims, France*. 2015.

173. Lewandowski, J.J. and M. Seifi, *Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties.* Annual review of materials research, 2016. **46**: p. 151-186.

174. Haan, J., et al., *Effect of subsequent Hot Isostatic Pressing on mechanical properties of ASTM F75 alloy produced by Selective Laser Melting.* Powder Metallurgy, 2015. **58**(3): p. 161-165.

175. Ganor, Y.I., et al., *Tailoring microstructure and mechanical properties of additively-manufactured ti6al4v using post processing.* Materials, 2021. **14**(3): p. 658.

176. Popov, V.V., et al., *Texturing and Phase Evolution in Ti-6Al-4V: Effect of Electron Beam Melting Process, Powder Re-Using, and HIP Treatment.* Materials, 2021. **14**(16): p. 4473.

177. Sierra, D.R., S. Edwardson, and G. Dearden, *Laser surface texturing of titanium with thermal post-processing for improved wettability properties.* Procedia CIRP, 2018. **74**: p. 362-366.

178. Gao, H., Y.-F. Wu, and C.-Q. Li, *Performance of normalization method for steel with different strain hardening levels and effective yield strengths.* Engineering Fracture Mechanics, 2019. **218**: p. 106594.

179. Totemeier, T., H. Tian, and J. Simpson, *Effect of normalization temperature on the creep strength of modified 9Cr-1Mo steel.* Metallurgical and Materials Transactions A, 2006. **37**(5): p. 1519-1525.

180. Gaggar, S., et al., *Application of smoothed particle hydrodynamics for the simulation and analysis of vibratory finishing process.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **108**: p. 183-190.

181. Gillespie, L.R.K., *A quantitative approach to vibratory deburring effectiveness.* SME Tech. Report., 1975.

182. Yabuki, A., M. Baghbanan, and J. Spelt, *Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher.* Wear, 2002. **252**(7-8): p. 635-643.

183. Wang, S., R.S. Timsit, and J.K. Spelt, *Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum.* Wear, 2000. **243**(1-2): p. 147-156.

184. Lachenmaier, M., et al., *Analysis of the relative velocity and its influence on the process results in unguided vibratory finishing.* Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018. **140**(3).

185. Bagehorn, S., J. Wehr, and H. Maier, *Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts.* International Journal of Fatigue, 2017. **102**: p. 135-142.

186. Hashimoto, F. and D.B. DeBra, *Modelling and optimization of vibratory finishing process.* CIRP annals, 1996. **45**(1): p. 303-306.

187. Kaynak, Y. and E. Tascioglu, *Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing.* Progress in Additive Manufacturing, 2019: p. 1-14.

188. Zhang, C., et al., *Dynamic modeling and trajectory measurement on vibratory finishing.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **106**(1): p. 253-263.

189. Tian, Y., Z. Zhong, and S. Tan, *Kinematic analysis and experimental investigation on vibratory finishing.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **86**(9): p. 3113-3121.

190. Domblesky, J., R. Evans, and V. Cariapa, *Material removal model for vibratory finishing.* International journal of production research, 2004. **42**(5): p. 1029-1041.

191. Jia, Q. and D. Gu, *Selective laser melting additive manufacturing of TiC/Inconel 718 bulk-form nanocomposites: Densification, microstructure, and performance.* Journal of Materials Research, 2014. **29**(17): p. 1960-1969.

192. Walker, P. and W.H. Tarn, *CRC handbook of metal etchants*. 1990: CRC press.

193. Nguyen, H.D., et al., *A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties.* Journal of Materials Research and Technology, 2022. **18**: p. 4641-4661.

194. Cheeseman, I., *Fluid-Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance. SF Hoerner. Hoerner Fluid Dynamics, Brick Town, New Jersey. 1965. 455 pp. Illustrated. $24.20.* The Aeronautical Journal, 1976. **80**(788): p. 371-371.

195. Sova, A., et al., *Effect of turning and ball burnishing on the microstructure and residual stress distribution in stainless steel cold spray deposits.* Journal of Thermal Spray Technology, 2017. **26**: p. 1922-1934.

196. Sabban, R., et al., *Globularization using heat treatment in additively manufactured Ti-6Al-4V for high strength and toughness.* Acta materialia, 2019. **162**: p. 239-254.

197. Kaynak, Y. and E. Tascioglu, *Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing.* Progress in Additive Manufacturing, 2020. **5**: p. 221-234.

198. Mohammadi, M. and D. Fray, *Synthesis and characterisation of nanostructured neodymium titanium oxides by sol–gel process: Controlling the phase composition, crystal structure and grain size.* Materials Chemistry and Physics, 2010. **122**(2-3): p. 512-523.

199. Kang, Y.S., et al., *Discrete element modeling of 3D media motion in vibratory finishing process.* CIRP Annals, 2017. **66**(1): p. 313-316.

200. Hashimoto, F., S.P. Johnson, and R.G. Chaudhari, *Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process.* Cirp Annals, 2016. **65**(1): p. 325-328.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Nihal YAMAN

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans: Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü (2020-2023)

Lisans: Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2015-2020)

PROJELER

“Eklemeli İmalatla Üretilen Parçaların Mekanik-Kimyasal Yüzey İşlemleri”, Destekleyen Kuruluş: ASELSAN, Görev: Proje Bursiyeri

"Eklemeli İmalat Yöntemiyle İmal Edilen Ürünler İçin İkincil İşlem Süreçleri Geliştirme”, Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK TEYDEB (TÜBİTAK-SAYEM Projesi), Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 121D017

YAYINLAR ve BİLDİRİLER

- Yaman, N., Sunay, N., Kaya, M., & Kaynak, Y. (2022). Enhancing Surface Integrity of Additively Manufactured Inconel 718 by Roller Burnishing Process. Procedia CIRP, 108, 681-686.
- Kaya, M., Yaman, N., Tasçıoğlu, E., & Kaynak, Y. (2023). Influence Of Burnishing Process On Surface Integrity Of Inconel 718 Fabricated By Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences