



Improving the surface quality of Ti-6Al-4V alloy produced by electrical discharge machining with abrasive flow machining

Kürşad Göv¹, Osman Soydan¹, Ömer Eyercioglu²

¹Aircraft and Aerospace Engineering, Gaziantep University, Şehitkamil, Gaziantep, 27310, Turkey

²Mechanical Engineering, Gaziantep University, Şehitkamil, Gaziantep, 27310, Turkey

Highlights:

- Polishing the surface of aerospace material
- Removing the white layer
- Surface finishing

Keywords:

- Abrasive flow machining (AFM)
- EDM
- Surface roughness
- Material removal

Article Info:

Research Article

Received: 19.08.2019

Accepted: 13.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.606484

Correspondence:

Author: Kürşad Göv
e-mail: gov@gantep.edu.tr
phone: +90 342 360 1200

Graphical/Tabular Abstract

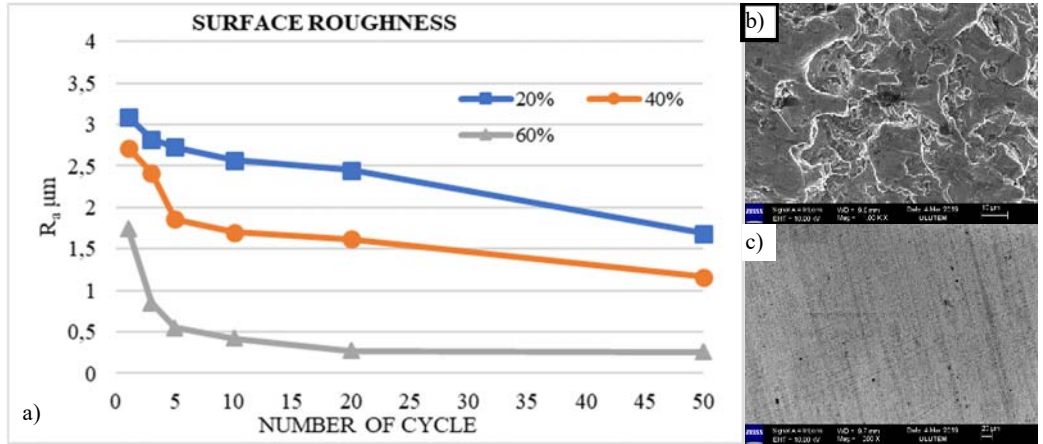


Figure A. Surface roughness value of Abrasive Flow Machined Ti-6Al-4V by 180 mesh abrasive (a) before AFM process (b) After AFM process (c)

Purpose: Traditional finishing techniques do not provide the desired surface quality, especially in industries such as aerospace and medical. Parts have to be kept in an extra finishing method to have the desired surface quality. Abrasive flow machining (AFM) technique is one of the non-traditional finishing process used to improve surface quality of parts. The aim of the study is to increase the surface quality of aerospace alloy (Ti-6Al-4V) by AFM process.

Theory and Methods:

Abrasive flow machining (AFM) is a nontraditional machining process that was developed in the USA in the 1960s. AFM can be described as pressurized media passing through the surfaces to reach the desired surface quality. The experiments were performed on the Ti-6Al-4V alloy with three mesh size abrasive and three abrasive concentration. The pressurized abrasive media flowed through the WEDMed surfaces with an opening of 10×20 mm, the experiments were carried out for 1, 3, 5, 10, 20 and 50 cycles.

Results:

The experimental study showed that the undesired white layer was removed by AFM process. The highest material removal rate was obtained by 180 grit size and 60% abrasive concentration of 14 mg / min. Workpiece surface quality was reduced from 3.5 µm to 0.25 µm by AFM process.

Conclusion:

It is concluded that the surface quality of the titanium alloy (Ti-6Al-4V) produced by WEDM process, which is widely used in aviation industry, is improved after AFM process. The white layer formed during WEDM is successfully removed by AFM in a few cycles. The removal of this layer eliminates surface cracks and thus the fatigue strength may increase.



Aşındırıcı macun ile elektro erozyonla işlenmiş Ti-6Al-4V alaşımının yüzey kalitesinin iyileştirilmesi

Kürşad Göv^{1*}, Osman Soydan¹, Ömer Eyercioğlu²

¹Gaziantep Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye

²Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 27310 Şehitkamil, Gaziantep, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Havacılık malzemesinin yüzeyinin parlatılması
- Beyaz tabakanın giderilmesi
- Yüzey iyileştirme

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 19.08.2019
Kabul: 13.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.606484

Anahtar Kelimeler:

Aşındırıcı akışkan ile yüzey işleme,
EDM,
yüzey pürüzlülüğü,
malzeme kaldırma

ÖZET

Aşındırıcı macun ile yüzey işleme metodu geleneksel olmayan yüzey bitirme yöntemlerinden biridir. Üretim teknolojilerinin ilerlemesiyle birlikte endüstride kullanılan parçalar giderek daha karmaşık bir şekil almıştır. Özellikle havacılık, medikal ve otomotiv endüstrisinde kullanılan bu karmaşık geometri parçaların yüzey kalitesini iyileştirmek klasik yöntemlerle pek mümkün değildir. Ayrıca zamanın iyi kullanılması ve maliyetin düşürülmesi endüstride çok önemli bir beklentidir. Bu çalışmada, havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan yüksek ısı ve korozyon direncine sahip Titanyum alaşım malzeme yüzeyinin aşındırıcı macun ile yüzey işleme metodu kullanılarak yüzey iyileştirilmesi yapılmıştır. Elektriksel tel erozyon ile kesilerek hazırlanan numuneler için aşındırıcı macun ile işlem parametrelerini belirlemek ve deney tasarımı için Taguchi metodu kullanılmıştır. Deneysel çalışmada aşındırıcı macun ile işleme parametreleri tur sayısı, aşındırıcı tane boyu, aşındırıcı macun oranını, çıktı parametreleri yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri, malzeme kaldırma oranları (MKO) ve beyaz katman tabakası kalınlığına olan etkileri ölçülmüştür. Elektriksel erozyon ile kesme sırasında açığa çıkan yüksek ısının etkisiyle oluşan beyaz tabakası giderilmesi SEM analizleri ile tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sonunda, istenilmeye beyaz katman tabakasının AMİ yöntemi ile kaldırıldığı görülmüştür. En yüksek malzeme kaldırma oranı, 180 elek ölçüsünde ve %60 aşındırıcı oranında 14 mg/dk olarak gerçekleşmiştir. İş parçası yüzey kalitesi AMİ yöntemi ile 3.5 μ m seviyelerinden 0.25 μ m seviyelerine düşürülmüştür.

Improving the surface quality of Ti-6Al-4V alloy produced by electrical discharge machining with abrasive flow machining

H I G H L I G H T S

- Polishing the surface of aerospace material
- Removing the white layer
- Surface finishing

Article Info

Research Article
Received: 19.08.2019
Accepted: 13.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.606484

Keywords:

Abrasive flow machining,
EDM,
surface roughness,
material removal

ABSTRACT

Abrasive flow machining is one of the non-traditional manufacturing methods. With the advancement of manufacturing technologies, the parts which are used in the industry have become increasingly complex shape. It is not possible to improve the surface quality of these complex geometry parts, especially used in the aerospace, medical, and automotive industries by conventional methods. In addition, efficient use of time and cost reduction is a very important expectation in the industry. In this study, surface improvement of Titanium alloy material surface which has high heat and corrosion resistance, which is often used in aviation industry, was done using surface treatment method with abrasive media. The Taguchi method was used to determine process parameters with abrasive media for samples prepared by cutting through wire electrical discharge machining and to design experiments. The effects of abrasive media processing parameters on number of cycles, abrasive mesh size, abrasive concentration, output parameters surface roughness (R_a) values, material removal rate (MRR) and white layer thickness were measured in the experimental study. The removal of the white layer caused by the high heat released during cutting by wire electrical discharge machining has been determined by SEM analyses. The experimental study showed that the undesired white layer was removed by AMI method. The highest material removal rate was obtained by 180 grit size and 60% abrasive ratio of 14 mg / min. Workpiece surface quality was reduced from 3.5 μ m to 0.25 μ m by AMI method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüzey parlatma ve temizleme işlemleri üretim aşamasının en maliyetli ve zaman alan kısımlarından birisidir. Bu zorlukları aşmak, maliyetleri düşürerek işlem zamanını azaltabilmek ve üretim miktarını arttırabilmek için geleneksel yüzey bitirme yöntemlerinin yerine yeni yöntemler geliştirilmektedir. Teknolojik ilerlemelere rağmen geleneksel yüzey bitirme yöntemleri karmaşık şekillerin yüzeylerini işlemede yetersiz kalmaktadır. Aşındırıcı akış ile işleme (AMİ) yöntemi, geleneksel olmayan ve yeni geliştirilen yüzey bitirme yöntemlerinden birisidir.

AMİ yöntemi 1960'lı yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Extrude Hone firması tarafından geliştirilmiş geleneksel olmayan bir yüzey bitirme işlemidir [1]. Lebleme, taşlama ve kumlama gibi geleneksel yüzey bitirme işlemlerinin ulaşamadığı dar ve karmaşık yüzeylerin bitirme işlemlerinde önemli zaman ve ekonomik avantaj sağlayan AMİ tekniği, erişilmesi zor ve karmaşık şekilli yüzeylere uygulanabilirliği sayesinde diğer yöntemlerden ayrılmaktadır. Günümüzde havacılık sektörünün önemi gittikçe artmaktadır ve bu sektörde çok karmaşık şekilli parçalar, ileri mühendislik malzemeleri ve ileri üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Kalitenin ve güvenliğin en üst düzeyde gerekli olduğu havacılık sektöründe ileri imalat yöntemleri ile üretilen parçaların son yüzey bitirmelerinin geleneksel yöntemler ile gerçekleştirilmesi kalifiye personele bağımlı olduğundan hatalara sebebiyet verebilmektedir. Bu gereksinimlerin karşılanması, üretim sürecinin hızlandırılması ve homojen bir yüzey elde edilebilmesi için AMİ yüzey bitirme işlemi havacılık sektöründe verimli ve etkin kullanılabilmektedir. Havacılık sektöründe verimlilik her zaman istenilen bir durumdur. Havacılıkta kullanılan parçaların yüzey kaliteleri yakıt tasarrufu açısından önemlidir [2, 3]. Yüzey iyileştirme yöntemleri ile elde edilecek iş parçası yüzeyinin homojen ve yüksek yüzey kalitesinde olması, havacılık bileşenlerinin yüksek verimli çalışmasını sağlayacaktır.

Polimerik taşıyıcı macuna aşındırıcı parçacıkların katılmasıyla hazırlanan macun, işlem yapılacak iş parçası yüzeyinden basınçlı bir şekilde akıtılması ile gerçekleştirilen AMİ yüzey bitirme işlemi, mikro ölçekte talaş kaldırarak iş parçası yüzey kalitesini arttırmaktadır. AMİ yönteminin en önemli süreç bileşenlerinden birisi olan polimerik macunun AMİ yüzey bitirme işleminin en önemli ve etkili faktörü olduğu ortaya konulmuştur [4]. Yapılan çalışmalarda, AMİ öncesinde en uygun aşındırıcı tipi, tane boyutu ve konsantrasyonunu belirlenmesinin zorlukları ortaya konulmuştur [5]. Aşındırıcı akış işleme metoduna dair çalışmalar devam etmektedir, ancak bu alanda henüz yeterli araştırma yapılmadığı ve mevcut çalışmalarda yüzey pürüzlülük değerlerinin %25 iyileştirilebileceğini gözlemlenmiştir [6]. Ayrıca ulaşılmak istenilen hassas yüzey kalitelerinin, iş parçasının geometrisine ve başlangıç yüzey kalitesine bağlı olduğu belirtilmiş, ve AMİ uygulamasının üretim maliyetlerinde %15'e yakın düşüş sağladığı

belirtilmektedir [7]. Yadav ve Shing [8]'in, AMİ yüzey bitirme yönteminin işleme parametrelerinin etkisini araştırdığı çalışmada, polimer bazlı hazırlanan aşındırıcı bir macun ile farklı aşındırıcı oranları, farklı aşındırıcı tane boyutları ve değişen döngü sayılarının uçak ve otomotiv sektöründe kullanılan parçalar üzerine etkileri araştırılmış ve sonuçları verilmiştir, çalışmada bu üç farklı değişkenin R_a ve MKO üzerine etkileri ortaya konulmuştur. Han vd. [9] paslanmaz çeliğin iç kanal yüzeylerine AMİ metodu uygulamışlardır. Aşındırıcı tane boyutu ve konsantrasyonu değişkenlerinde, malzeme kaldırma oranlarında büyük fark olduğunu gözlemlenmişlerdir. En yüksek malzeme kaldırma miktarının %65 aşındırıcı oranı ve 150 aşındırıcı tane boyutunda olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca yüzeyde net ve düz aşınma izlerini gözlemlenmişlerdir. Titanyum ve pirinç malzemeler kullanılarak yapılan deneylerde, titanyum yüzeyinden kaldırılan malzeme miktarının, pirinç malzeme yüzeyinden kaldırılan malzeme miktarından fazla olduğu belirtilmiştir [10]. AMİ işlem parametrelerinin incelendiği çalışmalarda, basınç, macun içindeki aşındırıcı miktarı gibi parametrelerin artırılması ile yüzey pürüzlülük değerinin (R_a) azaldığı gözlemlenmiştir [11], AMİ yöntemi için yüzey iyileştirmedeki en etkili parametrenin, macun içindeki aşındırıcı oranının olduğu vurgulanmıştır [12]. Ayrıca aşındırıcı oranının artmasıyla, işlem gören iş parçaları yüzeylerinde aşındırıcı partiküllerin oluşturduğu çizikler meydana geldiği gözlemlenmiştir [13].

Elektro erozyon ile işlemenin (EEİ) doğası gereği işleme sonrasında iş parçası yüzeyinde çok sert ve kırılabilir yapıda ayrıca çok miktarda mikro çatlak içeren beyaz katman tabakası oluşmaktadır [14, 15]. EEİ yöntemi ile üretilen iş parçalarından kopan partiküllerin bazıları tekrar iş parçası yüzeyine yapışır, soğutma sıvısının etkisiyle hızlı soğuyarak katılan bu partiküller yüzeyde beyaz katman tabakası oluştururlar. EEİ işleme yüzeyinin yüzey kalitesini bu kopan partiküller ve EEİ işlem parametreleri belirlemektedir [16]. EEİ yöntemi ile işleme parametrelerinin yapıldığı birçok çalışmada beyaz katman tabakası ve bu tabaka kalınlığının azaltılması ve önlenmesi yönünde çalışmalar yapılmıştır [17-19].

AMİ yöntemi ile EEİ ile hazırlanmış farklı sertliklere sahip AISI D2 takım çeliğine uygulanan yüzey bitirme işleminde, AMİ yönteminin sert malzemelerde daha iyi sonuçlar verdiği Göv ve Eyercioğlu [20] tarafından verilmiştir. Ayrıca Kenda vd. [21] sertleştirilmiş takım çeliği (AISI D2) ile hazırlanan iş parçasının EEİ yüzeylerindeki hasarlı ve istenmeyen tabakanın AMİ tekniği ile kaldırıldığını belirtmişlerdir. Yine bu çalışmada aşındırıcı macun akış yönüne dik alınan R_a değerinin paralel olarak alınan R_a değerinden büyük olduğunu göstermişlerdir.

Seçici lazer ergitme tekniği ile üretilmiş, ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş Maraging 300 çeliğinin iç yüzeyine AMİ metodunun uygulandığı çalışmada ısıl işlem görmüş yüzeyin, ısıl işlem görmemiş yüzeyden daha sert olduğu belirtilmiş ve ısıl işlem görmemiş iş parçasında belirgin

aşındırıcı izleri gözlemlenmiştir [22]. AMİ tekniğiyle malzeme kaldırmanın ısı işlem görmüş yüzeylerde daha etkin bir rol oynadığına değinmiş ve sert yüzeylerde daha iyi sonuçlara varılacağı belirtilmiştir. Titanyum katkılarının korozyon özellikleri üzerine yapılan çalışmada farklı oranlardaki titanyum katkıları nedeniyle Al-25Zn alaşımının mekanik ve korozyon özelliklerinin olumsuz etkilediği tespit edilmiştir [23]. Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen titanyum alaşımlarının yüzey karakterizasyonu ve mekanik özellikleri Kayacan vd. [24] tarafından çalışılmış ve gerçek kemik dokusuna yakın ürün geliştirilmeye çalışılmıştır. Grafit ve MoS₂ kaplamaların tribolojik özelliklerinin araştırıldığı çalışmada kaplamaların ömür değerleri istatistiksel olarak hesaplanmıştır [25]. Plazma püskürtme yöntemiyle kaplanan AISI 8620 çelik malzemenin aşınan yüzeyleri servis şartlarındaki aşınma dayanımlarını belirlemek için aşınma testleri yapılmış, aşınma testleri sonucunda en yüksek aşınma direncinin CRC-106 kaplamasından elde edildiği tespit edilmiştir [26].

AMİ metodunun uygulanacağı malzemenin özellikleri ve geometrisi işlem performansını doğrudan etkilemektedir [27]. Titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) ve paslanmaz çelik (SUS 304) plakalarındaki mikro deliklere AMİ metodunun uygulandığı çalışmada, EEİ derin delik delme yöntemi ile üretilen iş parçalarında mikro deliklerden [28], Titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) malzemenin EEİ yüzeyinde AMİ sonrasında beyaz katman tabakasının artan işlem döngü sayılarında giderildiği belirtilmiştir [29].

AMİ yönteminin işlem parametreleri ve performans parametrelerinin etkileşimlerinin belirlenmesinde yeni yöntemler kullanılmakta ve deney hazırlık aşamalarında Taguchi metodu gibi deney tasarım metodları kullanılarak en uygun parametre kombinasyonlarını belirlenmektedir [30]. Kumar ve Hiremath [31], AMİ ile ilgili genel bir inceleme yapmış, çeşitli işleme yöntemleri ve parametrelerin belirlenmesinde kullanılan programlar ve bu yöntemin kullanım alanlarını belirtmişlerdir. AMİ yönteminin uygulamalarıyla ilgili yapılan güncel araştırmalar, çeşitli AMİ uygulama teknikleri ve bu yöntemle ilgili daha fazla deneysel veri ve araştırma yapılmasının, geleneksel yöntemlerle elde edilecek pahalı ve uzun süren bitirme işlemlerinin yerini alabileceğini vurgulanmaktadır [32]. Günümüzde artan simülasyon programları sayesinde çeşitli analizler yapılabilmektedir. Seifu vd. [33] AMİ ile ilgili hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonlarında malzeme kaldırmayı araştırmak için ANSYS FLUENT yazılımını kullanmışlar ve bu yöntemle eksenel ve radyal kuvvetleri hesaplayıp, malzeme kaldırılan radyal kuvvetin eksenel kuvvetten daha küçük olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Bu çalışmada havacılık sektöründe yaygın kullanılan titanyum alaşımı Ti-6Al-4V malzemesinden hazırlanan iş parçalarına AMİ yöntemi uygulanarak yüzey kalitesinin iyileştirilmesi deneysel olarak çalışılmıştır. AMİ işlem parametrelerinin (aşındırıcı tane boyutu, aşındırıcı oranı, aşındırıcı tipi ve değişen döngü sayısı) performans

parametrelerine (malzeme kaldırma oranı, yüzey pürüzlülük değeri R_a ve yüzey görüntüleri) etkileri deneysel olarak çalışılmış ve sonuçları ortaya konulmuştur.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Aşındırıcı Macun Makinesi (Abrasive Flow Machine)

Bu deneysel çalışmada, Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde mevcut (Şekil 1) iki yönlü AMİ makinesi kullanılmıştır. AMİ makinesi; ana gövde, iş parçası tutucusu, kontrol sistemi ve hidrolik sistemden oluşmaktadır. Hidrolik sistem, AMİ deneylerinin gerçekleştirilmesi için gerekli basıncı ve akışı sağlar. Kontrol ünitesi ile deney tasarımı ile belirlenen AMİ işlem parametreleri ayarlanır. Kısaca iki yönlü AMİ makinesinin çalışma prensibi şu şekildedir; iş parçası tutucusuna yerleştirilen numuneler makinenin üst ve alt çeneleri arasında sabitlenir, deneyde kullanılacak aşındırıcı macun üst silindir içerisine doldurulur, alt ve üst pistonlar alt ve üst silindirleri kapatırlar. Alt piston alt silindirin üst noktasına itilir, üst piston üst silindirin arka kısmına itilir. İşlem döngüsü başlatıldığında alt piston alt silindir içerisinde geri çekilirken üst piston üst silindir içerisinde ileri doğru hidrolik basınç ile aşındırıcı macunu iş parçası yüzeyinden akıtır. Aynı işlem alt piston alt silindir geri noktasına gelince tersi yönde tekrarlanır. Pistonların aşındırıcı macunu üst silindirden alt silindire ve tekrarında alt silindirden üst silindire akıtılması ile bir işlem döngüsü tamamlanır.



Şekil 1 İki yönlü aşındırıcı macun makinesi
(Two-way abrasive flow machine)

2.2. İş Parçası (Workpiece Material)

Deneyde kullanılan Titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) numuneleri, Şekil 2'de görüldüğü gibi 5x10x20 mm ölçülerinde Tel EEİ yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. AMİ deneylerinin gerçekleştirilmesi için numunelere uygun ölçülerde tutucu kalıp kullanılmıştır. AMİ sonrası kullanılan her numunenin üç adet akış yönünde ve üç adet akışa dik olmak üzere toplam altı yüzey pürüzlülük değeri (R_a) ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır, malzeme kaldırma oranları (MKO) hesaplanmıştır.



Şekil 2 Ti-6Al-4V iş parçası (Workpiece of Ti-6Al-4V)

2.3. Aşındırıcı Macun (Abrasive Media)

AMİ yönteminin en önemli bileşeni olan aşındırıcı macun (Şekil 3), polimerik bir taşıyıcı içerisine istenilen oranlarda aşındırıcı partikül eklenerek yapılmaktadır. Polimerik taşıyıcılı aşındırıcı macun kütleli olarak %15 hidrolik yağı ihtiva etmektedir. Bu yağ katkısı polimerin iş parçasına yapışmasını ve macun akışının kolay gerçekleşmesini sağlamaktadır. Aşındırıcı macun yüksek basınç altında sertleşerek taşlama taşı gibi davranmakta ve bu özelliği ile işlediği yüzeyin geometrisini alarak yüzeyde parlatma işlemi gerçekleştirmektedir. Bu deneysel çalışmada, aşındırıcı tipi olarak silisyum karbür (SiC) kullanılarak, %20, %40 ve %60 aşındırıcı-polimer oranlarında ve 400, 240 ve 180 aşındırıcı tane boyutlarında ayrı ayrı toplam dokuz çeşit aşındırıcı macun hazırlanmıştır. 1, 3, 5, 10, 20 ve 50 işlem döngü sayılarında deneyler gerçekleştirilmiş ve yüzey kalitesindeki değişimler gözlemlenmiştir. Makinede bir döngü, alt ve üst pistonun en alt konumdan üst konuma gelip, tekrar en alt konuma gelmesiyle tamamlanmaktadır.

2.4. Deneysel Tasarımı (Experimental Design)

AMİ deneysel çalışmasında işlem parametre kombinasyonlarının belirlenmesinde Taguchi metodu kullanılmıştır. Uygun parametreler Minitab programı kullanılarak çıkarılmıştır. Taguchi ortogonal dizi tasarımına göre L18 ($6^1, 3^2$) tablosu oluşturulmuştur. Parametre kombinasyonları ve kullanılacak parametrelerin düzenlenmiş hali Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Taguchi metodu ile parametrelerin belirlenmesi (Determination of parameters by Taguchi method)

A	B	C	D	Deney sayısı	Döngü sayısı	Tane boyutu	Aşındırıcı oranı
1	1	1	1	1	1	400	20
2	1	2	2	2	1	240	40
3	1	3	3	3	1	180	60
4	2	1	1	4	3	400	20
5	2	2	2	5	3	240	40
6	2	3	3	6	3	180	60
7	3	1	2	7	5	400	40
8	3	2	3	8	5	240	60
9	3	3	1	9	5	180	20
10	4	1	3	10	10	400	60
11	4	2	1	11	10	240	20
12	4	3	2	12	10	180	40
13	5	1	2	13	20	400	40
14	5	2	3	14	20	240	60
15	5	3	1	15	20	180	20
16	6	1	3	16	50	400	60
17	6	2	1	17	50	240	20
18	6	3	2	18	50	180	40



Şekil 3 Polimer bazlı aşındırıcı macun (Polymer-based abrasive media)

2.5. Deneyin Yapılışı (Experimental Procedure)

Hazırlanan aşındırıcı macunlar deney tasarımı ile belirlenen parametrelerde çalıştırılmak üzere AMİ makinesine doldurulur. Deneylerde kullanılan Titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) numuneleri, Şekil 4'te gösterilen iş parçası tutucusuna yerleştirilir. Bu tutucu, numune ölçülerine uygun, yüksek basınç altında çalışacak ve bir seferde 10 adet numune tutacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Böylelikle belirlenen döngü sayısına ulaşan numune çıkarılmakta ve kalan numunelerle işleme devam etmektedir. Her numune farklı aşındırıcı oran ve boyutlarında, değişken döngü sayılarında çalıştırılmıştır. Aşındırıcı macun, yapısı gereği hava ile yüzeyden kolayca uzaklaştırılabilmektedir, sonrasında etil alkol ile temizlenmektedir. Önceden ağırlıkları Shimadzu Aux 220 hassas terazisiyle ölçülmüş iş parçaları, AMİ sonrası tekrar ölçülüp MKO hesaplanmıştır. İşlem sonrasında yüzeyler üzerinde Mitutoyo SJ 401 cihazı kullanılarak yüzey pürüzlülük R_a değerleri ölçülmüştür.

Yüzey incelemeleri, Taramalı elektron mikroskobu (SEM) Zeiss GeminiSEM 300 cihazıyla alınan görüntüler ile yapılmıştır.



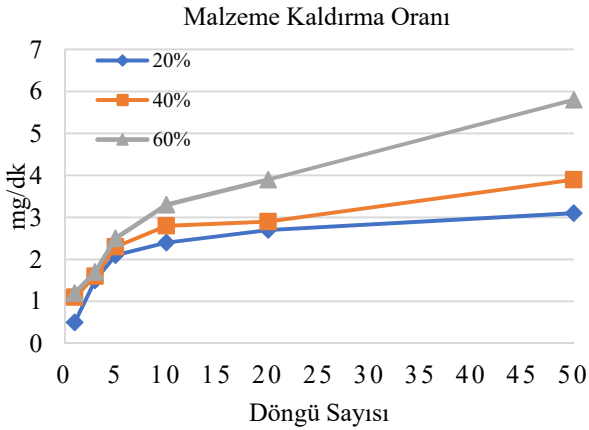
Şekil 4 İş parçası tutucusu (Workpiece holder)

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

3.1. Malzeme Kaldırma Oranı (Material Removal Rate)

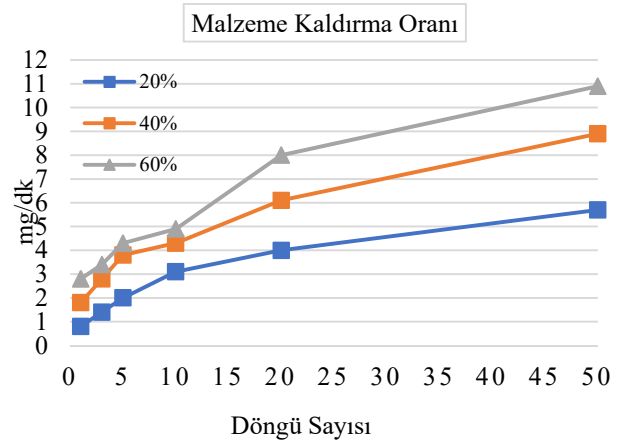
Aşındırıcı macun ile işlemede, birim zamanda kaldırılan malzeme miktarı Eş. 1'de gösterilen formülle hesaplanmıştır. Hassas teraziyle önceden ağırlıkları ölçülen her deney numunesinin, AMİ sonrasında da ağırlıkları ölçülerek MKO hesaplanmıştır. Sırasıyla Şekil 5'te 400 aşındırıcı tane boyutunda, %20, %40, %60 aşındırıcı oranlarında, Şekil 6'da 240 aşındırıcı tane boyutunda, %20, %40, %60 aşındırıcı oranlarında ve Şekil 7'de 180 aşındırıcı tane boyutunda, %20, %40, %60 aşındırıcı oranlarında Titanyum alaşımı için malzeme kaldırma oranları grafiklerde verilmiştir.

$$MKO = \frac{\text{ilk ağırlık} - \text{son ağırlık}}{\text{işleme süresi}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{dk}} \right) \quad (1)$$



Şekil 5 400 aşındırıcı tane boyutunda MKO (MRR in 400 abrasive mesh size)

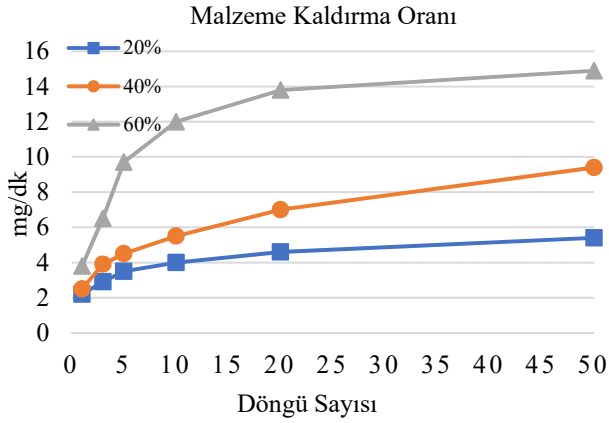
Genel olarak incelendiğinde işlem döngüsünün artması ile tüm aşındırıcı tane boylarında malzeme kaldırma oranının arttığı görülmektedir. Şekil 5'te verilen ve en ince aşındırıcı tane boyutu olan 400 elek ölçüsü için %60 aşındırıcı-polimer oranına sahip macunun en yüksek MKO verdiği ve en düşük MKO ise %20 aşındırıcı-polimer oranında olduğu görülmektedir. Bu durum 20 işlem döngüsüne kadar neredeyse liner bir eğilim gösterirken, 20 işlem döngüsünden sonra artarak liner olmayan bir eğilim göstermiştir. Bu durum Şekil 9'da verilen SEM görüntüleri ile birlikte değerlendirildiğinde beyaz katman tabakasının sert yapısından ilk 20 işlem döngüsüne kadar bu katmandan talaş kaldırmanın zor olduğu ve sonrasında alt katmanlardan talaş kaldırmanın kolay olduğunu görmekteyiz.



Şekil 6 240 aşındırıcı tane boyutunda MKO (MRR in 240 abrasive mesh size)

400 elek ölçüsündeki aşındırıcıya oranla daha kaba olan 240 aşındırıcı tane boyutu ile hazırlanan macun kullanılarak yapılan deneyler sonrası Şekil 6'da verilen malzeme kaldırma oranlarında, 400 aşındırıcı tane boyutuyla hazırlanan macun ile yapılan deneylere göre artış görülmektedir. Tane boyutunun kaba olması 400 elek boyundaki macuna oranla daha hızlı beyaz katman tabakasının kalkmasına neden olmuş ve ilk 10 işlem döngüsüne kadar liner ilerleyen MKO, sonrasında artarak liner olmayan bir durum sergilemiştir. Bu durum Şekil 11'de verilen SEM görüntüleri ile birlikte değerlendirildiğinde açıkça görülmektedir. Aynı aşındırıcı boyutunun farklı aşındırıcı macun oranları incelendiğinde %60 oranının en yüksek MKO verdiği görülmektedir.

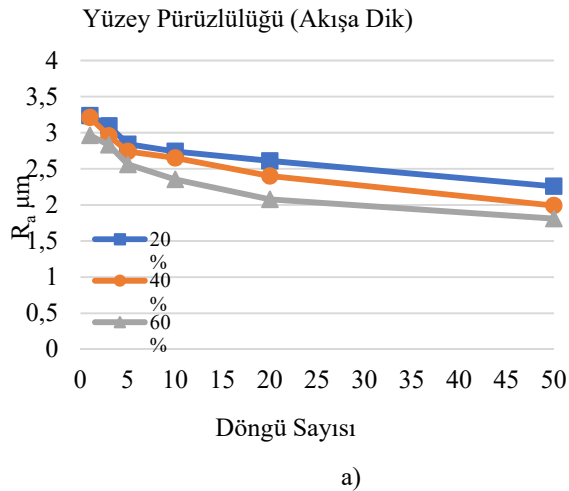
Belirlenen aşındırıcı boyutlarından en kabası olan 180 elek ölçüsü ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, 180 elek ölçüsünde hazırlanan aşındırıcı macunun en yüksek MKO sonuçlarını verdiğini ve en hızlı beyaz katman tabakasını kaldırdığını görmekteyiz. Deneysel sonuçların MKO incelemeleri sonucunda en az malzeme kaldırma oranı 400 aşındırıcı tane boyutunda %20 aşındırıcı-polimer oranında ve en fazla malzeme kaldırma oranının 180 aşındırıcı tane boyutunda, %60 aşındırıcı-polimer oranında elde edildiği görülmüştür.



Şekil 7 180 aşındırıcı tane boyutunda MKO (MRR in 180 abrasive mesh size)

3.2. Yüzey İncelemeleri (Surface Observations)

AMİ yöntemi ile yüzey kalitesinin artırılması yönünde yapılan deneysel çalışmada, yüzey incelemeleri için yüzey pürüzlülük değerleri R_a ve yüzeyden alınan SEM görüntüleri incelenmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri ölçülürken, her numuneden üçer adet akış yönünde ve akış yönüne dik olmak üzere toplam altı adet numunenin R_a değeri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlerin ortalamaları alınarak sonuçlar alt başlıklar halinde verilmiştir. Yapılan genel değerlendirme ve gözlemler, deneyler sonucunda dokuz farklı macun tipinden en iyi yüzey kalitesi, $0.25 \mu\text{m}$ R_a değeri, aşındırıcı tane boyutu 180 ve aşındırıcı oranı %60 olan polimer bazlı macundan elde edilmiştir. AMİ işlemi öncesinde ve sonrasında alınan SEM görüntüleri ile EEİ sonrasında oluşan beyaz tabakası gözlemlenmiş ve AMİ işlemi sonrasında bu tabakanın giderildiği gözlemlenmiştir. Beyaz tabakanın farklı aşındırıcı oranlarında ve tane boyutlarında aşındırıcı macuna nasıl tepki verdiği ortaya konulmuş ve Ti-6Al-4V yüzeyinde oluşan çatlaklar görüntülenmiştir.



3.2.1. 400 Aşındırıcı tane boyutuyla işlenen yüzeyler (Processed Surfaces With 400 Abrasive Mesh Size)

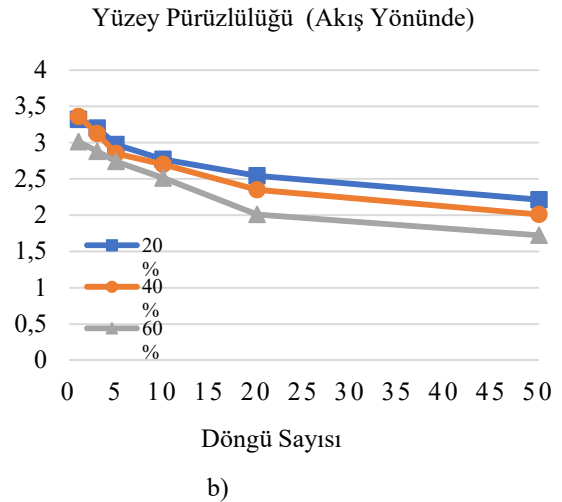
Şekil 8'de 400 aşındırıcı tane boyutunda %20, %40, %60 aşındırıcı oranları içeren macun ile işlenen Ti-6Al-4V iş parçası yüzeylerinden ölçülen R_a değerleri akışa dik ve akış yönünde olmak üzere verilmiştir. 1, 3, 5, 10, 20, 50 işlem döngü sayılarında işlenen Ti-6Al-4V yüzeylerinden alınan yüzey pürüzlülük değerlerinin, döngü sayısı arttıkça azaldığı ölçülmüştür. En ince tane boyutu olan 400 elek ölçüsünde hazırlanan aşındırıcı macunun MKO'nun düşük olmasının yanı sıra buna bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerindeki iyileşmenin de düşük olduğu görülmektedir. Kaba yüzeye ince tane ile uygulanan AMİ yönteminde döngü sayısının artmasının etkisinin az olduğu görülmektedir. Aynı durum SEM görüntülerinden de açıkça görülmektedir.

Şekil 9'da verilen SEM görüntülerinden de anlaşıldığı gibi %60 aşındırıcı-polimer konsantrasyonunda hazırlanan aşındırıcı macun en iyi performansı göstermiştir.

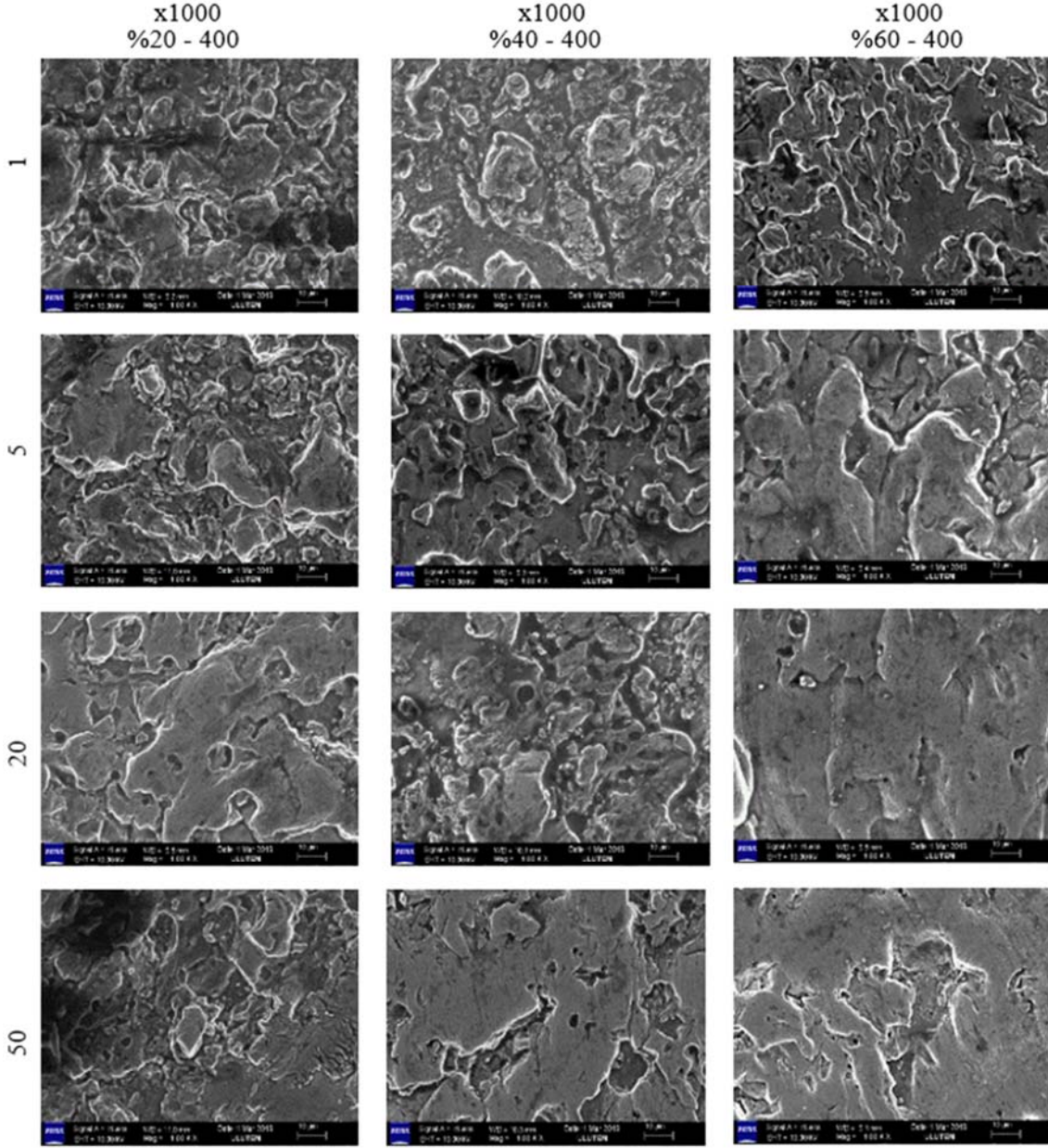
400 aşındırıcı boyutunda hazırlanan macunlarla yapılan deneyler sonrası Ti-6Al-4V numunelerden alınan SEM görüntülerinde beyaz tabakanın artan döngü sayılarında giderek azaldığı fakat tam olarak giderilmediği görülmektedir.

3.2.2. 240 Aşındırıcı tane boyutuyla işlenen yüzeyler (Processed surfaces with 240 abrasive mesh size)

Şekil 10'da 240 aşındırıcı tane boyutunda %20, %40, %60 oranlarında Ti-6Al-4V için R_a değerleri, akışa dik ve akış yönünde olmak üzere gösterilmiştir. 400 elek ölçüsünde hazırlanan macuna göre daha kaba olan 240 elek ölçüsündeki aşındırıcı macun ile işlenen yüzeylerden ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin eğimi 400 elek ölçüsündeki macuna oranla çok daha fazladır. Bu aşındırıcı büyüklüğünde daha hızlı ve etkili yüzey iyileştirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 8 400 aşındırıcı tane boyutunda a) akışa dik yönde alınan R_a değerleri b) akış yönünde alınan R_a değerleri (a) R_a values which were measured perpendicular to flow (b) R_a values which were measured along to flow in 400 abrasive mesh size)



Şekil 9 400 tane boyutu; %20, %40, %60 aşındırıcı oranlarında AMİ sonrası SEM görüntüleri (400 abrasive mesh size; 20%, 40%, 60% abrasive concentration SEM images after AFM)

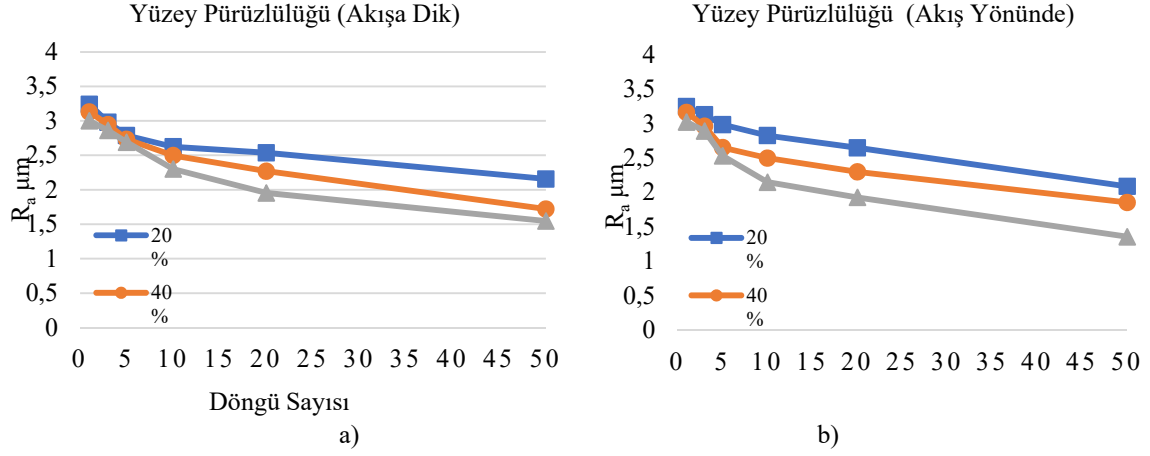
Aynı sonuçlar Şekil 11’de verilen SEM görüntülerinde de desteklenmektedir. İri tanelerin talaş kaldırma kabiliyeti ince tanelere oranla daha fazla olmasından 240 elek ölçüsünde hazırlanan aşındırıcı macunun yüzey pürüzlülük değerini daha fazla düşürmüştür. %60 aşındırıcı-polimer oranında hazırlanan macun ile en iyi R_a sonuçları elde edilmiştir.

240 aşındırıcı tane boyutu ile yapılan AMİ sonrası iş parçalarından alınan SEM görüntüleri Şekil 11’de gösterildiği gibi %20 aşındırıcı-polimer oranında Ti-6Al-4V yüzeyinde 50 işlem döngü sayısında halen beyaz tabaka gözlemlenirken, %60 aşındırıcı-polimer oranında 20 işlem döngüsünden sonra beyaz katman tabakasının tamamen giderildiği gözlemlenmiştir.

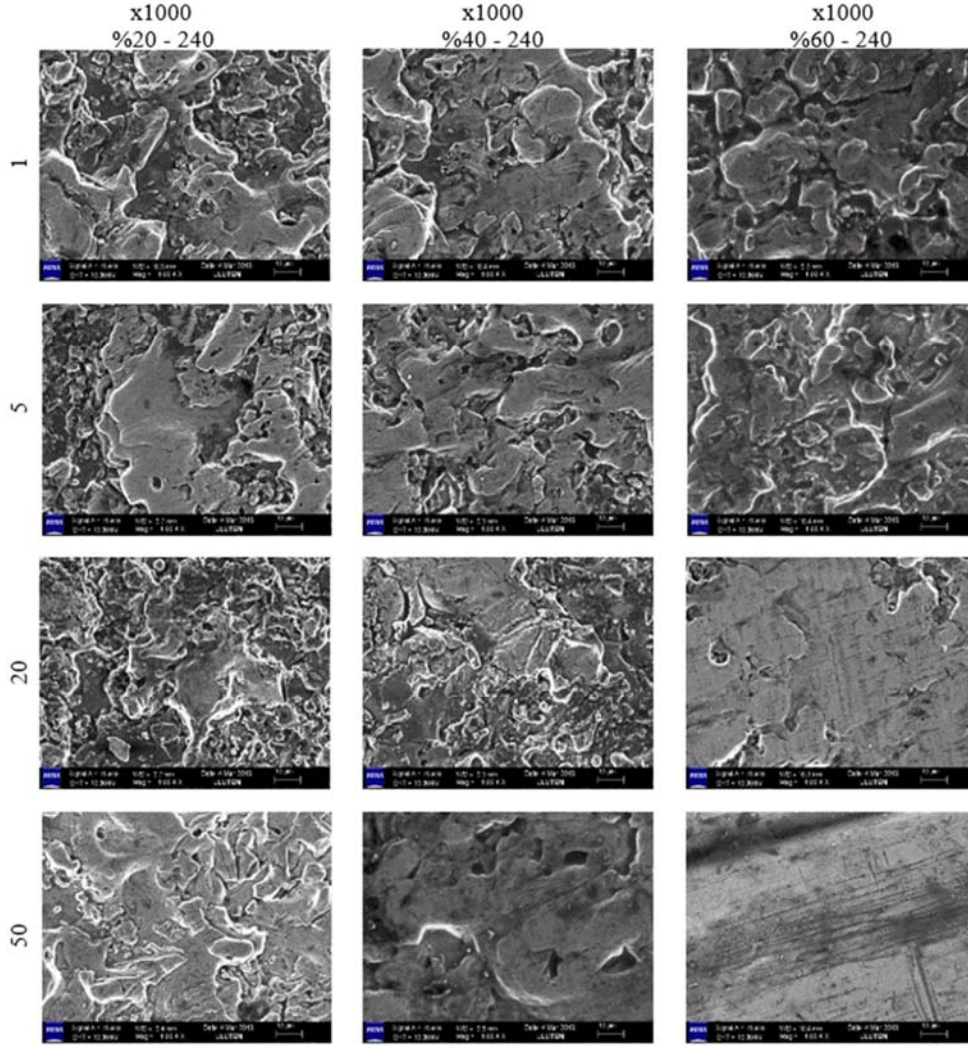
3.2.3. 180 Aşındırıcı tane boyutuyla işlenen yüzeyler (Processed surfaces with 180 abrasive mesh size)

Şekil 12’de en iri aşındırıcı tane boyutu olan 180 elek ölçüsündeki aşındırıcı macunun %20, %40, %60 oranlarında Ti-6Al-4V iş parçası için R_a değerleri akışa dik ve akış yönünde ölçülerek, grafiklerde gösterilmiştir.

En iri tane boyutu olan 180 elek ölçüsünde hazırlanan aşındırıcı macunun diğer macunlar ile elde edilen yüzey kalitelerine oranla çok daha iyi ve etkili olduğu Şekil 12’de görülmektedir. En az iyileşmenin %20 aşındırıcı oranında olduğu gözlemlenmiştir. Aşındırıcı oranının %40’a çıkması ile birlikte yüzey pürüzlülük değeri giderek azalmıştır.



Şekil 10 240 aşındırıcı tane boyutunda a) akışa dik yönde alınan R_a değerleri b) akış yönünde alınan R_a değerleri
 ((a) R_a values which were measured perpendicular to flow (b) R_a values which were measured along to flow in 240 abrasive mesh size)



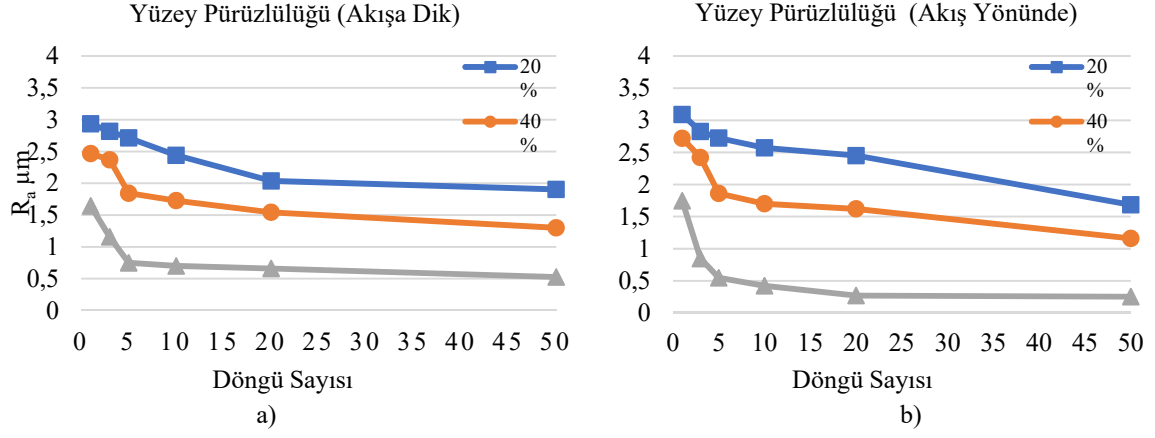
Şekil 11 240 tane boyutu; %20, %40, %60 aşındırıcı oranlarında AMİ sonrası SEM görüntüleri
 (240 rasive mesh size; 20%, 40%, 60% abrasive concentration SEM images after AFM)

%60'a yükselen aşındırıcı oranıyla birlikte yapılan tüm deneylerdeki en iyi yüzey pürüzlülük değerleri alınmıştır.

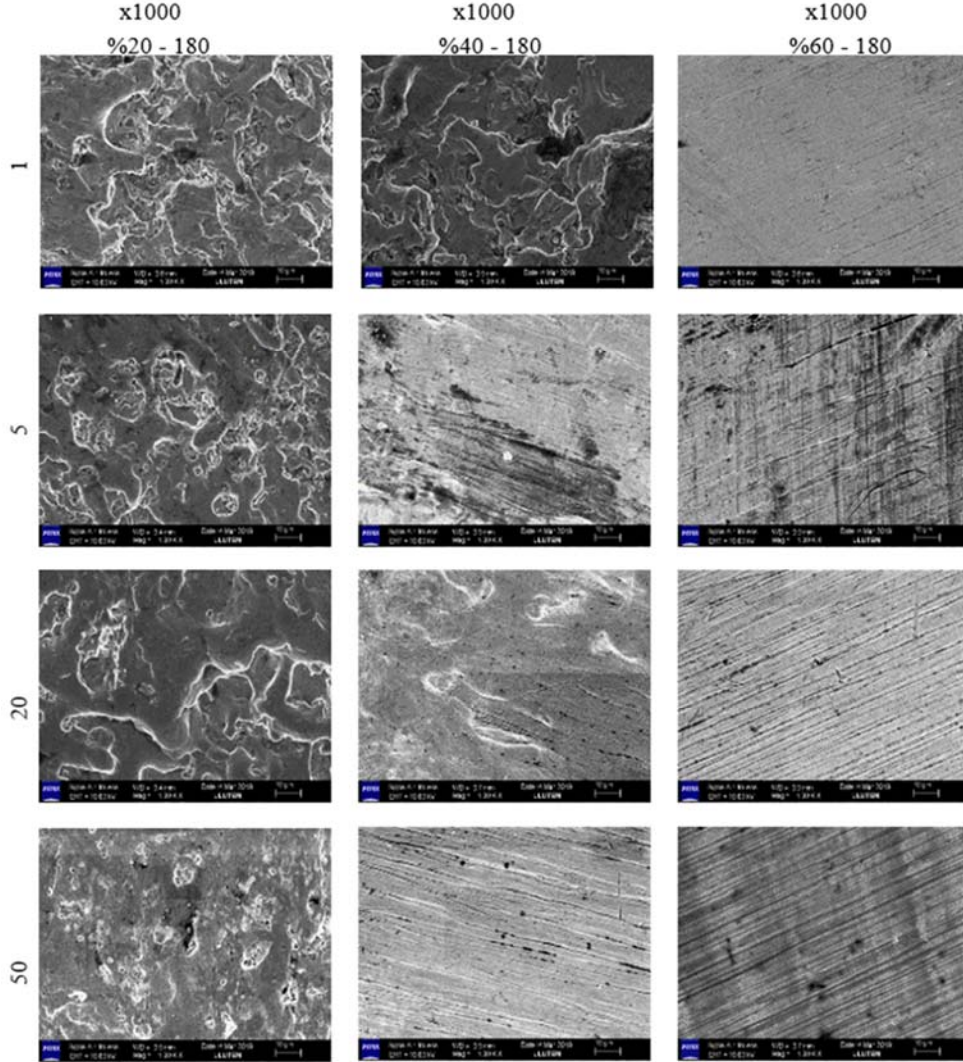
%60 aşındırıcı-polimer oranında hazırlanan aşındırıcı macun ile yapılan deneyde beşinci döngüye kadar yüzey pürüzlülük

değerlerinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiş ve devamında bu düşüş azalarak devam etmiştir.

Şekil 13'te AMİ sonrası numune yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, yüzeydeki değişimler ilk beş



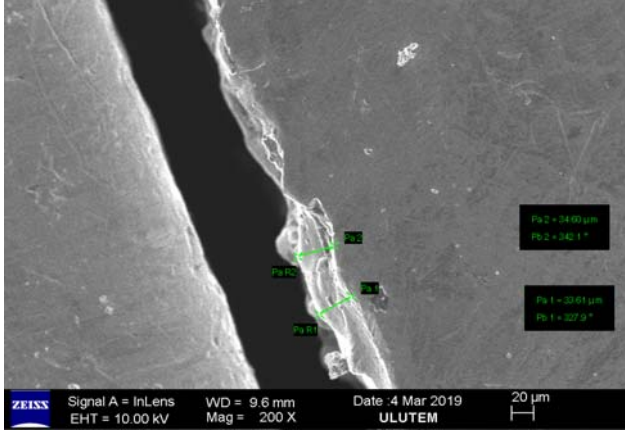
Şekil 12 180 aşındırıcı tane boyutunda a) akışa dik yönde alınan R_a değerleri b) akış yönünde alınan R_a değerleri ((a) R_a values which were measured perpendicular to flow (b) R_a values which were measured along to flow in 180 abrasive mesh size)



Şekil 13 180 tane boyutu; %20, %40, %60 aşındırıcı oranlarında AMİ sonrası SEM görüntüleri (180 abrasive mesh size; 20%, 40%, 60% abrasive concentration SEM images after AFM)

işlem döngüsünde beyaz katmanın tümüyle giderildiğini ve yüzey görüntüsünde çukurcuklar ve çatlakların tamamen yok edildiği gözlemlenmektedir.

En iyi AMİ işleme yüzeyi 180 elek ölçüsündeki tane boyutunda alınmıştır. Artan döngü sayıları ve yüksek aşındırıcı konsantrasyonu iş parçası yüzeyinde akış yönünde işleme izleri oluşturmuştur. Bu işleme izleri aşındırıcı tane boyu ile doğru orantılıdır. AMİ yöntemi ile EEİ ile oluşan, Şekil 14'te verilen görüntüde, yaklaşık 30 µm kalınlığındaki beyaz katman tabakası kaldırılmıştır.



Şekil 14 AMİ öncesi kesit SEM görüntüsü
(Cross-sectional SEM image of workpiece before AFM)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Havacılık sektöründe yaygın kullanılan, Tel EEİ yöntemi ile üretilen Titanyum alaşımı Ti-6Al-4V numunelerin yüzeyine uygulanan AMİ işlemi sonrası yüzey kalitesinin arttığı ortaya konulmuştur. EEİ yüzeyinde yüksek ısı ve ani soğumadan oluşan ve oldukça sert bir yapıya sahip olan beyaz tabakanın AMİ işlemi sonrasında tamamen giderilebileceği görülmüştür. Kısaca:

İşlem döngü sayısının artması ile MKO artmış, R_a değeri 3.5 µm seviyelerinden 0.25 µm seviyelerine düşmüş ve yaklaşık 30 µm kalınlığındaki beyaz katman tabakası giderilmiştir, bu şekilde yüzey kalitesi artırılmıştır.

Aşındırıcı-polimer oranının artması MKO değerini arttırmış R_a değerini düşürmüş ve beyaz katman tabakasının daha hızlı kaldırılmasını 15 mg/dk düzeyinde sağlamıştır.

Aşındırıcı tane boyutunun artması ile MKO artmış, R_a düşmüş ve beyaz katman tabakası çok hızlı (15 mg/dk) bir şekilde uzaklaştırılmıştır.

AMİ işlemi neticesinde ölçü toleransı 30 µm düzeyinde etkilenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Dayal K., Kumar S., Brar B., Latest Trends in Abrasive Flow Machining Process, 2017.

- Sato T., Wan S., Ang Y., Study of Process Characteristics of Abrasive Flow Machining (AFM) for Ti-6Al-4V and Validation with Process Model, 797, 2013.
- Çaydaş U., Çelik M., Köklü U., Investigation of material removal rate and surface roughness in finishing of internal surfaces of AISI 304 L austenitic stainless steel pipes by magnetic abrasives, Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University, 34 (3), 1213-1225, 2019.
- Ali P., Dhull S., Walia R.S., Murtaza Q., Tyagi M., Hybrid Abrasive Flow Machining for Nano Finishing - A Review, Materials Today: Proceedings, 4 (8), 7208-7218, 2017.
- Williams R.E., Investigation of the Abrasive Flow Machining Process and Development of a Monitoring Strategy using Acoustic Emission, 1993.
- Uhlmann E., Roßkamp S., Surface Integrity and Chip Formation in Abrasive Flow Machining, Procedia CIRP, 71, 446-452, 2018.
- Rhoades L., Abrasive Flow Machining: A Case Study, Journal of Materials Processing Technology, 28 (1), 107-116, 1991.
- Yadav S., Singh E.M., Singh P.B.R., Effect of Unconventional Machining on Surface Roughness of Metal: Aluminum and Brass-A Case Study of Abrasive Flow, 2, 2015.
- Han S., Salvatore F., Rech J., Residual Stress Profiles Induced by Abrasive Flow Machining (AFM) in 15-5PH Stainless Steel Internal Channel Surfaces, Journal of Materials Processing Technology, 267, 348-358, 2019.
- Singh S., Shan H.S., Kumar P., Experimental Studies on Mechanism of Material Removal in Abrasive Flow Machining Process, Materials and Manufacturing Processes, 23 (7), 714-718, 2008.
- Cherian J., Issac D.J.I.J.o.E.T., Engineering A., Effect of Process Variables in Abrasive Flow Machining, 3 (2), 554-557, 2013.
- Jain V.K., Adsul S.G., Experimental Investigations into Abrasive Flow Machining (AFM), International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40 (7), 1003-1021, 2000.
- Sankar M.R., Jain V.K., Rajurkar K.P., Nano-finishing Studies using Elastically Dominant Polymers Blend Abrasive Flow Finishing Medium, Procedia CIRP, 68, 529-534, 2018.
- Göv K., Experimental investigation of the effects of the coolant on the performance parameters of electrical discharge drilling of some aerospace materials, Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University, 32 (1), 293-301, 2017.
- Avlar E., Dilmeç M., Halkacı H.S., Experimental investigation on feasibility of using spherical-tip tool electrodes in EDM for rough machining-machining of rectangular pockets, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1155-1170, 2019.
- Göv K., Investigation of the effects of the dissolved oxygen in the coolant on the hole geometries drilled by

- electro erosion, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2), 231-239 2016.
17. Gov K., The effects of the dielectric liquid temperature on the hole geometries drilled by electro erosion, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92 (1), 1255-1262, 2017.
 18. Kürşad G., Experimental Investigation of the Effects of Electrodes on EDM Hole Drilling Process, Politeknik Dergisi, 20 (2), 377-382, 2017.
 19. Göv K., Eyercioğlu Ö., Çakır M.V., Hardness Effects on Abrasive Flow Machining, 10, 2013.
 20. Kenda J., Pusavec F., Kermouche G., Kopac J., Surface Integrity in Abrasive Flow Machining of Hardened Tool Steel AISI D2, Procedia Engineering, 19, 172-177, 2011.
 21. Duval-Chaneac M.S., Han S., Claudin C., Salvatore F., Bajolet J., Rech J., Characterization of Maraging Steel 300 Internal Surface Created by Selective Laser Melting (SLM) After Abrasive Flow Machining (AFM), Procedia CIRP, 77, 359-362, 2018.
 22. Hekimoğlu A.P., ÇALIŞ M., Effect of grain refinement with titanium on the microstructure, mechanical and corrosion properties of Al-25Zn alloy, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 311-322, 2020.
 23. Kayacan M.C., Delikanlı Y.E., Duman B., Özsoy K., Examining of mechanical properties of transitive (variable) porous specimens produced by SLS using ti6Al4v alloy powder, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (1), 127-143, 2018.
 24. İmece Y., Erdem O., Tuç B., Investigation of tribological properties of MoS2 and graphite coatings under different environmental conditions, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (3), 995-1012, 2018.
 25. Kaya Y., Aktürkoğlu F., Kahraman N., Coating of AISI 8620 steel by plasma spraying and characterization of coating, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (3), 1111-1122, 2018.
 26. Mali H.S., Manna A., Current Status and Application of Abrasive Flow Finishing Processes: A Review, 223, No 7, 809-820, 2009.
 27. Lin Y.-C., Chow H.-M., Biing Hwa Y., Tzeng H.-J., Effects of Finishing in Abrasive Fluid Machining on Microholes Fabricated by EDM, 33, 2007.
 28. Göv K., Eyercioğlu Ö., Abrasive Flow Machining of TI-6AL-4V, in International Science and Technology Conference. 2017.
 29. Butola R., Jain R., Bhangadia P., Bandhu A., Walia R., Murtaza Q., Optimization to the Parameters of Abrasive Flow Machining by Taguchi Method, 5, 2018.
 30. Kumar S.S., Hiremath S.S., A Review on Abrasive Flow Machining (AFM), Procedia Technology, 25, 1297-1304, 2016.
 31. Brar B., Walia R., Singh V., State of Art Abrasive Flow Machining, in National Conf. on Adv. and Futur. Trends in Mech. and Matrls. Engg.(AFTMME'10), Yadavindra College of Engg., Talwandi Sabo, Distt. Bathinda, Punjab, India. 2010.
 32. Seifu Y., Kumar S.S., Hiremath S.S., Modeling and Simulation: Machining of Mild Steel using Indigenously Developed Abrasive Flow Machine, Procedia Technology, 25, 1312-1319, 2016.