

Derleme Makalesi/Review Article

Eklemele imalat ile imal edilmiş metal parçalara uygulanan yüzey bitirme işlemleri

Tolgahan Ermergen¹, Fatih Taylan²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Eklemele imalat
Yüzey bitirme işlemleri
Yüzey kalitesi
Yorulma dayanımı

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 31.07.2019

Kabul Tarihi: 03.06.2020

Özet: Eklemele imalat yöntemleri, talaşlı imalat gibi geleneksel yöntemlerle imalatı mümkün olmayan karmaşık geometrili parçaların imalatında kolaylık sağladığı için son yıllarda oldukça popüler hale gelmiştir. Zira bu yöntemler sayesinde söz konusu karmaşık geometrili parçaların yekpare olarak imalatının mümkün olması, ayrıca imal edilen parçaların mekanik özelliklerinin talaşlı imalat ya da plastik şekil verme yöntemleri ile imal edilmiş versiyonlarına oldukça yakın olması da eklemele imalat yöntemlerinin yaygınlığını pekiştirmiştir. Eklemele imalat yöntemleri her ne kadar birçok avantaja sahip olsa da, başta düşük yüzey kalitesi olmak üzere bazı dezavantajları da mevcuttur. Düşük yüzey kalitesi neticesinde yorulma dayanımları olumsuz etkilenen parçalar, dinamik yüklerin söz konusu olduğu çalışma ortamlarında arzu edilen performansı sergileyememektedir. Bu sebeple, eklemele imalat ile imal edilmiş parçaların imalat sonrası ikincil işlemlere tabii tutularak yüzeylerindeki pürüzlülükler giderilmektedir. Bu çalışmada, eklemele imalat ile imal edilmiş metal parçaların yorulma dayanımını arttırmak için imalat sonrası uygulanan yüzey kalitesini artırıcı bitirme işlemleri anlatılmaktadır.

Atıf için/To Cite:

Ermergen T. Taylan F. Eklemele imalat ile imal edilmiş metal parçalara uygulanan yüzey bitirme işlemleri. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 12(1), 34-44, 2020.

Surface finish processes for additively manufactured metal parts

Keywords

Additive manufacturing
Surface finishing
Surface roughness
Fatigue strength

Article history:

Received: 31.07.2019

Accepted: 03.06.2020

Abstract: Additive manufacturing offers the possibility of manufacturing of parts with complex geometries which are not possible to be manufactured by conventional machining processes. Since it is likely to manufacture complex parts as a single element, which have similar mechanical properties compared to their counterparts manufactured by machining or plastic deformation methods, additive manufacturing methods grown very popular recently. Although additive manufacturing methods have lots of advantages, there are also some disadvantages concerning surface quality. Parts with low fatigue strength due to their bad surface quality can not offer high performance under dynamic load conditions. For this reason, additively manufactured parts should be subjected to surface finish processes in order to eliminate surface roughness. In this work, surface finish processes that are applied to additively manufactured metal parts, for the purpose of surface roughness elimination thus fatigue strength increase, have been explained.

1. Giriş

Eklemele imalat (Eİ) yöntemleri, diğer yöntemler ile imalatı çok zor olan ya da hiç mümkün olmayan karmaşık geometrili parçaların imalatını olanaklı kılmaktadır. Özellikle geometrik karmaşıklığın veya ihtiyaca göre özelleştirmenin söz konusu olduğu alanlarda Eİ sahip olduğu avantajlar ile öne

çıkılmaktadır. Zira son yıllarda Eİ ile imal edilmiş parçalar, başta uzay/havacılık ve medikal olmak üzere, birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1], [44].

Sahip olduğu avantajlar ile son yıllarda kullanımı yaygınlaşan Eİ yöntemleri bazı kısıtlayıcı dezavantajlara da sahiptir. Özellikle yüzey kalitesi hususunda diğer yöntemlerle imal edilmiş parçalara

kiyasla Eİ ile imal edilmiş parçalar daha pürüzlü yüzeylere sahiptir [2]. Her ne kadar doku mühendisliği gibi başlıca medikal alanlarda kullanılan parçalarda hücre tutunması ve doku oluşumu için bir miktar yüzey pürüzlülüğü istense de [3],[4] yüzey pürüzlülüğünün önem arz ettiği uygulamalarda ya da yüksek yorulma dayanımı istenen durumlarda kötü yüzey kalitesine sahip parçaların kullanımı tercih edilmez. Örneğin; bakteri oluşumunun ve doku hasarının önlenmesi için dental alanda kullanılacak parçaların iyi yüzey kalitesine sahip olması istenir [5]. Bununla beraber, dinamik yükler altında çalışacak parçalarda da iyi yüzey kalitesi aranır. Çünkü düşük yüzey kalitesi parçanın korozyon ve yorulma dayanımını azaltarak istenilen performansı sergileyememesine neden olur [6]. Eİ yöntemleri ile imal edilmiş Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde yapılan yorulma deneylerinde, deney numunelerin sergiledikleri yorulma dayanımlarının sahip oldukları yüzey kaliteleri ile doğru orantılı olduğu; dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldıkça malzemenin yorulma dayanımının arttığı belirtilmiştir [7]. Benzer bir çalışmada [8], eklemeli imalat ile imal edilmiş Inconel 718 alaşımlarının yüzey iyileştirme öncesi ve sonrası yorulma dayanımlarını incelemiştir. İnceleme sonucu yüzey pürüzlülüğünü giderici işlemlere tutulan numunelerin işleme tabi olmayan numunelere kıyasla daha iyi bir yorulma davranışı sergilediği görülmüştür.

Eklemeli imalatın söz konusu dezavantajını giderebilmek için, imalat sonrası parçaların ikinci bir işleme tabi tutularak yüzey kaliteleri iyileştirilmektedir. Yüzey bitirme işlemleri olarak anılan bu işlemler hakkında literatürde daha önce pek çok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar neticesinde görülmüştür ki, yüzey kalitesini arttırmak için uygulanan işlemler kendi içlerinde de bir takım avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Nitekim bazı işlemler daha hızlı ve iyi sonuçlar vermekte ama karmaşık geometriye yüzeylere uygulanamamakta iken; bazı işlemler karmaşık geometriye yüzeylere de uygulanabilmekte ama oldukça zaman almaktadır.

Bu makalede, Eİ ile imal edilmiş metal parçaların yüzey kalitesini arttırmak adına uygulanan yüzey bitirme işlemleri incelenmektedir. Birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıflıkları da incelenen bu çalışmada, söz konusu yöntemler hakkında genel bilgiler verilmektedir.

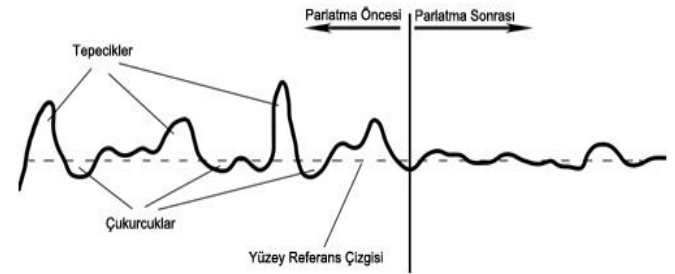
2. Yüzey Bitirme İşlemleri

Eklemeli imalat ile imal edilmiş metal parçaların yüzey iyileştirilmesi sırasında farklı yöntemler tercih edilebilmektedir. Birbirine göre üstünlükleri bulunan bu yöntemler kullanılan malzeme, parça boyutu ve geometrisi, işlem sonrası elde edilmek istenen yüzey kalitesi, içyapı değişiklikleri vb. gibi faktörler göz

önünde bulundurulurken seçilir. Yüzey bitirme işlemleri mekanik, termal ya da kimyasal tabanlıdır.

2.1. Lazerle parlatma

Lazerle parlatma (laser polishing), Eİ ile imal edilmiş metal parçaların yüzey kalitesini iyileştirmek için kullanılan en modern yöntemlerden biridir. Talaşlı imalatın aksine herhangi bir kuvvet gereksinimi olmayan bu yöntemde, lazer ışınlarının iş parçası ile teması sonucu meydana gelen ergime-katılma olayı neticesinde parçanın yüzey kalitesi artırılmış olur [9]. Yeterli enerji yoğunluğuna sahip lazer ışını malzeme yüzeyine uygulandığında, malzeme yüzeyindeki tepcikler eriyerek çekme kuvvetlerinin ve yer çekiminin etkisiyle akma eğilimi gösterip yüzeydeki çukurcuklara dolar. Soğuma neticesinde ise ergiyik havuzu çatlak ve gözenek gibi kusurlardan arındırılmış olarak katılaşır. Malzeme yüzeyindeki morfolojik süreksizliklerin Şekil 1'de de gösterildiği şekilde azaltılması ile parçanın yüzey pürüzlülüğü büyük oranda giderilmiş olur.



Şekil 1. Lazerle Parlatma ile Yüzey Kalitesini Arttırmanın Prensibi

Lazerle parlatma işlemi sırasında nihai yüzey kalitesini etkileyen üç ana parametre vardır [10]. Bunlar:

- ✓ Malzemenin türü,
- ✓ İşlem öncesi başlangıç yüzey kalitesi,
- ✓ Enerji yoğunluğudur.

Ti-6Al-4V ve Inconel 718 alaşımları üzerine yapılan bir çalışmada [11], başlangıç yüzey kaliteleri aynı olan deney numunelerinde parlatma işlemi sonrası farklı pürüzlülük değerleri oluştuğunu gözlenmiştir. Benzer bir çalışmada ise [12], Ti-6Al-4V ile takım çeliklerini işlenerek aynı başlangıç yüzey kalitelerine sahip farklı malzemelerin sabit parametreler altında lazerle parlatma işlemi sonrası farklı yüzey kalitelerine sahip olabileceğini gözlemlenmiştir.

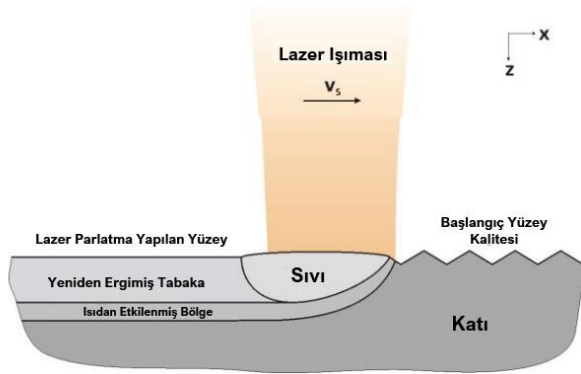
İşlem öncesi başlangıç yüzey kalitesinin nihai sonuca etkisi de bazı çalışmalarca kanıtlanmıştır. Takım çelikleri ile yapılan bir çalışmada [13], farklı başlangıç yüzey pürüzlülüklerine sahip numunelerin aynı işlem parametreleri altında lazerle parlatma sonrası değişik yüzey kalitelerine sahip olduğu görülmüştür. Ti-6Al-4V

ile yapılan benzer bir çalışmada ise [14] elde edilen sonuçlar başlangıç yüzey kalitesinin işlem sonrası nihai yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olduğunu destekler niteliktedir. Söz konusu çalışmalara göre işlem öncesi numunenin sahip olduğu yüzey pürüzlülüğü arttıkça işlem sonrası elde edilen yüzey kalitesi değerleri kötüleşmektedir.

Lazerle parlatma işlemi için önem arz eden ana faktörlerden biri de işlem sırasında kullanılan lazer ışınının iş parçası yüzeyinde meydana getirdiği enerji yoğunluğudur. Denklem 1'de ifade edilen enerji yoğunluğu formülüne göre iş parçası yüzeyinde oluşan enerji yoğunluğu (ED) lazer gücüne (P - Watt), lazer ışını çapına (D - mm) ve lazer ışınının tarama hızına (Vf- mm/sn) bağlıdır [10].

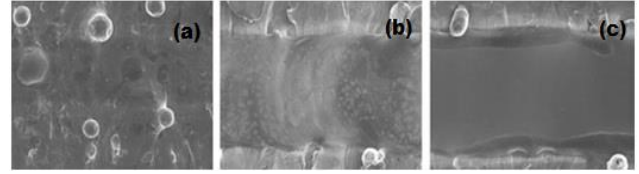
$$ED = \frac{6000 \cdot P}{D \cdot Vf} \text{ (J/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

Lazerle parlatma işlemi sırasında lazerin parça yüzeyine değişik şekillerde gönderilmesi sonucu farklı sonuçlar alındığı gözlemlenmiştir. Şekil 2'de gösterildiği gibi sürekli (Continuous Wave - CW) bir lazer ışımalarının olduğu parlatma işlemi yüzey kalitesini makro boyutta iyileştirmektedir. Sürekli lazer ışımalarında lazer ışını iş parçası yüzeyine aralıksız bir şekilde gönderilmektedir.



Şekil 2. Sürekli Lazer Işımaları ile Metal Yüzeyin Lazerle Parlatılması [15]

Sürekli bir lazer akışı sayesinde malzeme yüzeyinde ergitilen bölge devamlı bir ergiyik havuzu görüntüsüne sahip olmaktadır. 18Ni (300 Grade) Nikel alaşımı üzerine yapılan bir çalışmada [16], iş parçası farklı enerji yoğunluklarına sahip sürekli bir lazer ışımaları ile işlenmiştir. Şekil 3'te farklı enerji gücü ve tarama hızlarına sahip CW lazer ile işlenmiş Nikel alaşımı iş parçasının işlem sonrası sahip olduğu SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3. CW Lazer ile İşlenmiş Nikel Yüzeylerin SEM Görüntüleri: (a) 5 W ve 90 mm/sn; (b) 20 W ve 20 mm/sn; (c) 25 W ve 90 mm/sn [16]

Şekil 3a'da optimize edilmemiş lazer gücü ve tarama hızından ötürü enerji yoğunluğu düşük kalmış, bu durumda iş parçası yüzeyinin yeterince ergitilememesine neden olmuştur. Yetersiz ergime sonucu iş parçası yüzeyinde topaklaşmalar meydana gelmiştir. Şekil 3b'de ise tarama hızı oldukça düşük olduğundan birim alana etkiyen enerji yoğunluğu artış göstermiş, bu durum ise aşırı ergimeye neden olarak parça yüzeyindeki ergiyik havuzlarında çatlaklara ve düzensizliklere sebebiyet vermiştir. İşlem parametrelerinin optimize edildiği Şekil 3c'de ise düzgün bir ergime ve katılma işlemi gerçekleştiği görülmektedir. Düzenli ve devamlı bir ergiyik havuzunun görüldüğü Şekil 3c'de katılma sonrası yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana gelmektedir.

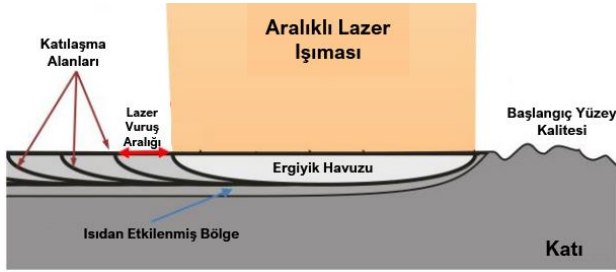
Sürekli lazer ışımaları makro boyutta bir iyileştirme sağladığı için başlangıç yüzey pürüzlülüğü yüksek olan parçalarda kullanılmaktadır. Daha önce de bahsedilen çalışmada [12], Ra=3 µm başlangıç yüzey pürüzlülüğüne sahip Ti-6Al-4V alaşımı ve Ra=4 µm başlangıç yüzey pürüzlülüğüne sahip takım çeliği CW lazer ile işlenmiştir. CW lazer ile yapılan bu parlatma türüne makro parlatma da denmektedir. Söz konusu iş parçalarının daha iyi yüzey kaliteli versiyonları ise daha hassas bir işleme kapasitesine sahip aralıklı (pulsed) lazer ışımaları ile işlenmiştir. Bu çalışmaya ait veriler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Farklı Başlangıç Yüzey Kalitelerine Sahip Metallerin Tabi Gördüğü İşlem Türü ve Sonuçları [12]

Malzeme	İşleme Türü	Başlangıç Ra	Nihai Ra
Takımçeliği	CW	1-4 µm	0.07-0.15 µm
Takımçeliği	Aralıklı	0.5-1 µm	0.3 µm
Ti-6Al-4V	CW	3 µm	0.5 µm
Ti-6Al-4V	Aralıklı	0.3-0.5 µm	0.1 µm

Daha az pürüzlü yüzeylerin hassas olarak işlenmesi için ise aralıklı lazer ışımaları adı verilen ve lazerin, sürekli lazer ışımalarının aksine, aralıklı olarak gönderildiği bir parlatma işlemi gerçekleştirilir. Mikro boyutta bir parlatmanın yapıldığı bu işleme türünde parlatma hızı sürekli lazer ışımalarından daha hızlı olduğu için, aralıklı lazer ışımaları parlatma işlemi

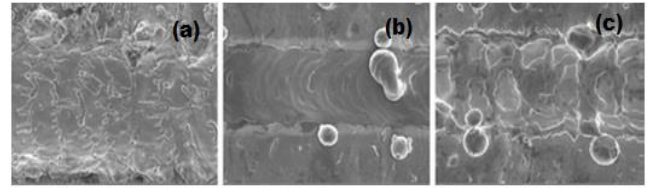
(mikro parlatma) daha çabuk yapılabilmektedir [17]. Sürekli lazer ışmasının (makro parlatma) söz konusu olduğu işlemlerde parça yüzeyinde oluşan enerji yoğunluğu fazla olduğu için, ufak çaptaki süreksizliklerin iyileştirilmesi mümkün olmamakta; aksine parça yüzeyinde yeni kaviteasyonlar yaratılarak yüzey kalitesi daha da bozulmaktadır [18]. Bu sebeple, ufak boyutlu süreksizliklerin iyileştirilmesinde daha az enerji yoğunluğu sağlayan mikro parlatma işlemi tercih edilir. Şekil 4’de aralıklı lazer ışması ile yapılan bir mikro parlatma işleminin şematiki verilmiştir.



Şekil 4. Aralıklı Lazer Işıması ile Metal Yüzeyin Lazerle Parlatılması [15]

Mikro parlatma işlemi ile, makro parlatmanın aksine, başlangıç yüzey kalitesi daha iyi parçalar işlenebildiği için iş parçası olarak işlem öncesi taşlama ya da yüzey tormalama işlemlerine tabii tutulmuş numuneler kullanılabilir [19]. Bu sebeple, aralıklı lazer ışması ile gerçekleştirilen mikro parlatma işlemi Eİ ile imal edilmiş metal parçaların yüzey iyileştirme süreçlerinde kullanılan en hassas yöntemlerden biridir.

İşlem parametreleri açısından mikro ile makro parlatma arasındaki en belirgin fark, aralıklı lazer ışmasındaki frekans değerleridir [20]. Makro parlatmada kullanılan sürekli lazer ışması ile büyük enerji yoğunlukları devamlı bir şekilde sağlanırken, mikro parlatmada kullanılan aralıklı lazer ışması ile küçük enerji yoğunlukları parça yüzeyinde belli aralıklarla oluşturulmaktadır. Bu nedenle mikro parlatmada oluşan ergiyik havuzları, makro parlatmadaki devamlı şekilden farklı olarak, dikişli bir şekilde meydana gelmektedir. Şekil 5’te, Nikel alaşımları üzerinde yaptıkları çalışmanın [16] ikinci basamağı olan mikro parlatmanın SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5a ve 5c’de optimize edilmemiş değerler nedeniyle ergitilen yüzeyde ergiyik düzensizlikleri ve sıçramalar görülmektedir. Şekil 5b’de ise düzgün bir ergiyik havuz oluşumunun varlığı nettir. Aralıklı lazer ışması ile oluşturulan ergiyik havuz profilinin dikiş dikiş bir görüntüsünün olmasının nedeni lazer ışınının belli frekanslarla numune yüzeyine gönderilmesi, dolayısıyla bölgesel ergime/katlama olaylarının gerçekleşmesidir.



Şekil 5. Aralıklı Lazer ile İşlenmiş Nikel Yüzeylerin SEM Görüntüleri: (a) 25 W, 5 kHz ve 165 mm/sn; (b) 5 W, 30 kHz ve 20 mm/sn; (c) 19 W, 60 kHz ve 90 mm/sn [16]

Lazerle parlatma işlemi sonrası parçanın yüzey kalitesi iyileşmekle birlikte, ısıdan etkilenen bölgede bir sertlik artışı olduğu da gözlenmektedir. Sertlikteki bu artışın lazerle parlatma uygulanan bölgede beta fazı içermeyen martenzitik alfa fazı barındırmasından kaynaklanmaktadır [21]. Yapılan çalışmalar sonucu lazerle parlatma işlemi sonrası Ti-6Al-4V alaşımında yaklaşık %32 ve TC11 Titanyum alaşımında %42’lik bir sertlik artışı gözlemlenirken [21], bu değer CoCr alaşımında yaklaşık %8 [18], IN 718 Inconel alaşımında ise %27 civarında [22] olmuştur.

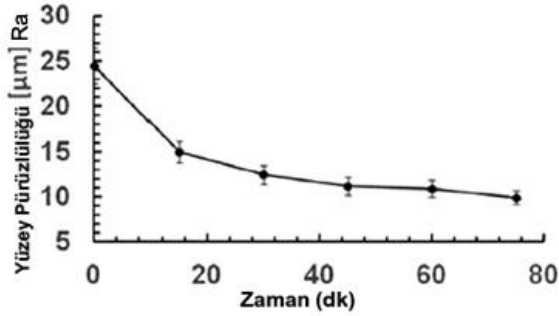
Lazerle parlatma işlemi metal parçalar için iyi bir yüzey kalitesi sağlasa da bazı dezavantajları da bünyesinde barındırmaktadır. İlk yatırım maliyetinin yüksek olması bu alanda çalışmak isteyen firmalar açısından sıkıntı yaratmaktadır [23]. Bunun dışında, yukarıda da anlatıldığı gibi, enerji yoğunluğunun uygun seviyelerde tutulamaması sonucu tam ergimeme ya da aşırı ergime sorunları baş gösterebilir. Ayrıca ısı kaynaklı bir süreç söz konusu olduğu için işlem sonrası parça yüzeyinde bir takım termal kalıntı gerilmeler oluşması olasıdır [24]. Bunların haricinde, karmaşık geometrili yüzeylerin lazerle parlatılması sırasında yaşanan zorluklar da bu yöntemin kısıtlayıcı unsurlarından biridir [18].

2.2. Kimyasal İşlemler

Eklemeli imalat ile imal edilmiş metal parçaların yüzey kalitesini iyileştirmede sık kullanılan yöntemlerden bir diğeri ise kimyasal işlemlerdir. Genel hatlarıyla, kimyasal bir solüsyona batırılan parçanın zamanla solüsyon içerisinde çözünerek yüzey veya yüzeylerinden parça aşındırılması ilkesine dayanmaktadır [25]. Bu işlem sırasında kimyasal solüsyonun statik halde olması [26] ya da solüsyonun parça üzerine püskürtülmesi [27] gibi çeşitli yöntemler ile farklı yüzey kalitesi sonuçları elde edilebilmektedir.

Solüsyonun durağan halde olup parçanın solüsyona batırılarak bekletilmesi ve belirli bir süre sonra solüsyondan çıkarılarak kimyasaldan arındırılması ile gerçekleşen yüzey bitirme işlemi literatürde statik

kimyasal dağlama (static chemical etching) olarak adlandırılmaktadır. AlSi10Mg üzerinde yaptığı çalışmada [26] söz konusu kimyasal işlem, *kimyasal işleme* ve *kimyasal parlatma* olarak iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk basamak olan kimyasal işlemede, iş parçası kimyasal solüsyon içerisinde belli bir süreyle bekletilmektedir. Bu işlem sırasında iş parçası belli aralıklarla solüsyondan çıkarılıp temizlenerek yüzeyinde biriken çözünmüş artıklardan arındırılır ve ardından yeniden batırılır. Arzu edilen süre boyunca bu işlemler tekrarlanır. Kimyasal işlemin ardından parçaya istenilen nihai yüzey kalitesini verebilmek adına ikinci bir işlem uygulanır. Kimyasal parlatma adı verilen bu işlemde ise ilk basamaktan geçen iş parçası su ve çeşitli solüsyonların bulunduğu bir çözeltide bekletilir. İlk basamakta olduğu gibi belli aralıklarla çözeltiden çıkarılan iş parçası yüzeyindeki çözünmüş artıklardan arındırılarak yeniden solüsyona batırılır. Bu süreç boyunca parçanın kimyasal solüsyon içerisinde bekletilme süresi, parçanın yüzeyinden kaldırılan malzeme miktarını etkilemektedir. Şekil 6'da gösterildiği gibi iş parçası solüsyon içerisinde daha uzun bekletildikçe parça yüzeyinden kaldırılan malzeme sayısı artarak yüzey kalitesini iyileştirmektedir.

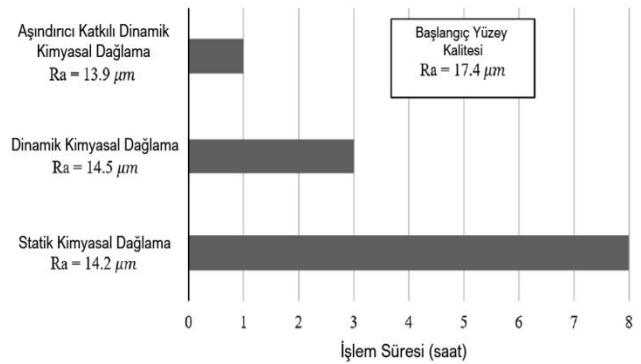


Şekil 6. Statik Kimyasal Dağlamaya Tabii Tutulan AlSi10Mg Alaşımının Zamana Bağlı Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi [26]

Kimyasal dağlama işlemi sonunda elde edilen parça yüzey kalitesinin işlem süresi (parçanın solüsyon içerisinde bekletilme süresi) ve solüsyonun kimyasal yapısına bağlı olarak değiştirdiği çeşitli çalışmalarca incelenmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmaya [26] ek olarak, Ti-6Al-7Nb'dan imal edilmiş iskelet yapılar üzerinde yaptığı araştırmada [28], iş parçasının kimyasal solüsyon içerisinde bekletilmesi ile parça yüzeyinde oluşan malzeme kaybı artmaktadır. Bu malzeme kaybı parçanın nihai yüzey kalitesini arttırmakla beraber boyut hassasiyetini bozabilmektedir. Ti-6Al-4V üzerinde yaptığı çalışmada [29] ise benzer nitelikte sonuçlara erişilmiştir. İş parçasının solüsyon içerisinde bekletilme süresi arttıkça boyut hassasiyetinde bozulmalar gözlemlenmiş, daha uzun sürelerde bekletilmesi

durumunda ise parça boyutlarının kullanılamayacak kadar kötüleştirdiği raporlanmıştır.

Kimyasal dağlama işlemi statik olarak yapılabildiği gibi dinamik olarak da uygulanabilmektedir. Kimyasal solüsyonun sabit haldeki iş parçası üzerine yollandığı bu yöntemde, birim zamanda parça yüzeyinden kaldırılan malzeme miktarının sıvının hareketinden ötürü daha fazla olduğu; dolayısıyla dinamik olarak yapılan bu işlemin statik versiyonuna kıyasla daha hızlı sonuç verdiği saptanmıştır. IN 625 alaşımı üzerinde yapılan çalışmada [27] iş parçası hem statik hem de dinamik olarak kimyasal işleme tabii tutulmuş, arzu edilen yüzey kalitesine ne kadarlık bir sürede erişileceği gözlemlenmiştir. Şekil 7'de gösterildiği üzere, dinamik olarak yapılan kimyasal dağlama işleminin statik olarak yapılanına kıyasla çok daha hızlı sonuç verdiği saptanmıştır. Öte yandan, aynı çalışmada dinamik haldeki kimyasal solüsyonun içine bir takım aşındırıcı partiküller konulmuş, aşındırıcı partikül içeren hareketli solüsyonun daha da hızlı bir sonuç yarattığı görülmüştür.



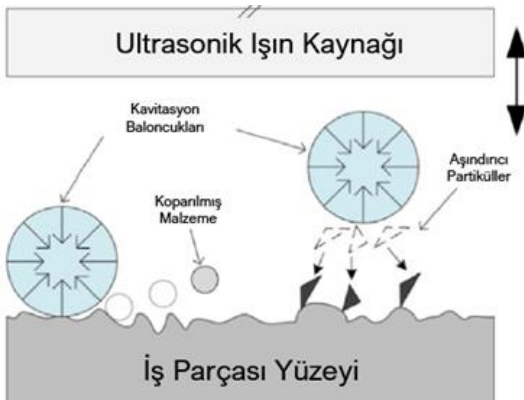
Şekil 7. Inconel 625 Alaşımının Statik ve Dinamik Kimyasal Dağlama İşleme Süreleri [27]

Kimyasal dağlama yönteminin en büyük avantajı, talaşlı imalat ya da lazerle parlatma yöntemlerinin aksine, karmaşık geometriye sahip parçaların işlenmesine elverişli olmasıdır [25]. Ayrıca, işlem sırasında parça üzerinden kaldırılan malzeme miktarı tahmin edilebildiğinden, oluşan son parça boyutları kontrol altında tutulabilmektedir. Öte yandan işlem sonrası parça yüzeyinde kimyasal artıkların kalması mümkün olduğu için iş parçası işlem sonrasında dikkatli bir arındırılma işleminden geçirilmelidir [26], [27].

2.3. Ultrasonik Kaviteasyon

Eİ ile imal edilmiş metal parçaların yüzey bitirme süreçlerinde kullanılan diğer bir yöntem ise *Ultrasonik Kaviteasyon* adı verilen ve kimyasal dağlama yöntemine benzer bir şekilde parça yüzeyinden malzeme koparak gerçekleştirilen bir yüzey bitirme işlemidir.

Bu yöntemde yüzey kalitesi iyileştirilecek parça bir solüsyon sıvının içine daldırılır. Ardından solüsyona yüksek frekanslı ultrasonik dalgalar gönderilir. Bu dalgalar nedeniyle sıvı içerisinde - özellikle parça yüzeyine yakın yerlerde- Kavitasyon baloncukları oluşur. Bu baloncukların patlaması ile oluşan basınç sayesinde ise parça yüzeyinden malzeme koparılması gerçekleşir [30]. Şekil 8'de görüldüğü üzere ultrasonik kavitasyon işlemi sırasında sıvı solüsyon içerisinde isteğe bağlı olarak aşındırıcı partiküller de katılabilir. Bu partiküllerin varlığı parça yüzey kalitesini arttırmakla beraber daha sert yüzeylerin işlenmesini de kolaylaştırmaktadır. Başka bir çalışmada [31] solüsyon içerisine eklenen aşındırıcı partiküllerin işlem gören sert metal yüzeylerini daha rahat aşındırdığı, dolayısıyla daha başarılı bir yüzey bitirme işlemi sağladığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada, partikül şeklinin nihai yüzey kalitesine olan etkisi araştırılmış, partikül şeklinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir değişiklik yaratmadığı vurgulanmıştır. Inconel 625 alaşımı üzerine yapılan bir deneyde ise [32] metal yüzeyi çeşitli büyüklüklerdeki partiküller eşliğinde işlenmiş ve % 45 civarında bir yüzey iyileştirme sonucuna varılmıştır.

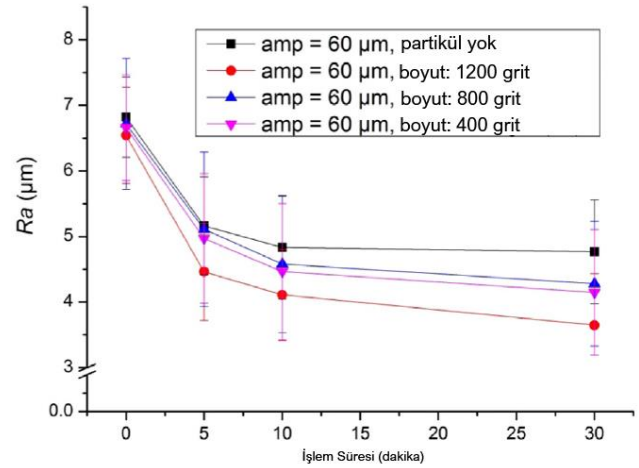


Şekil 8. Ultrasonik Kavitasyon İşlemi [32]

Aynı çalışmada Ultrasonik Kavitasyon'un iki basamakta gerçekleştirilen bir işlem olduğunu belirtmişlerdir. İlk basamakta yüzeyde oluşturulan baloncukların patlaması ile yüzeydeki tam ergimemiş tozlar uzaklaştırılmaktadır. Fakat bu işlem sonrası yüzeyde yorulma dayanımını olumsuz etkileyecek bir takım kraterler oluşmaktadır. İkinci basamak da ise ultrasonik frekans gönderilen sıvı içerisindeki aşındırıcı partiküller, ilk basamakta oluşan kraterleri yontarak düzensizlikleri azaltır. Böylece, malzemenin yüzeyi hem Eİ sırasında oluşan tam ergimemiş tozlardan arındırılmış, hem de yüzey kalitesi iyileştirilmiş olur.

Söz konusu çalışmada partikül boyutlarının yüzey kalitesine olan etkileri de araştırılmıştır. Her ne kadar partikül şeklinin nihai yüzey kalitesi üzerinde belirgin

bir etkisi olmadığını belirtilse de [31], partikül boyutunun yüzey pürüzlülüklerini giderme hususunda önemli bir role sahip olduğunu ispatlamışlardır [32]. Şekil 9'da aşındırıcı partikül boyutunun yüzey kalitesine etkisi gösterilmiştir. Aşındırıcı partikül katılmadan yapılan deneylerde yüzey kalitesi $Ra=6.7$ μm civarında kalırken, grit sayısının artmasıyla (partikül boyutunun küçülmesi) $Ra=3.6$ μm 'a kadar indirgenebilmiştir.



Şekil 9. Aşındırıcı Partikül Boyutunun Yüzey Kalitesine Etkisi [32]

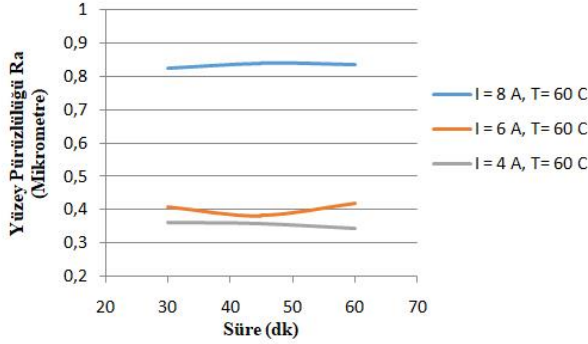
Her ne kadar diğer yöntemlere kıyasla Ultrasonik Kavitasyon yöntemi oldukça hızlı olsa da, yüzey kalitesi iyileştirme oranı olarak diğer alternatifler kadar güçlü olamamaktadır. Lazerle parlatma ya da kimyasal işlemler sonrası % 70-80 civarında bir yüzey pürüzlülüğü giderme oranı yakalanabilirken, Ultrasonik Kavitasyon ile ancak % 40-45 civarında bir düzeltme elde edilebilmektedir. Daha henüz çok yeni olan bu yöntem, hızı sonuç alınması istenen durumlarda tercih edilebilir bir seçenek olarak görülebilir.

2.4. Elektromanyetik İşlemler

Elektromanyetik bir işlem olan Elektropolisaj (electropolishing) metal yüzeylerin iyonik sıvılar içerisinde kontrollü bir çözünme ile işlenmesi temeline dayanan elektrokimyasal bir işlemdir. Elektropolisaj başta paslanmaz çelikler olmak üzere bakır, nikel ve titanyum alaşımlarının işlenmesinde kullanılabilen bir yöntemdir [33].

Elektropolisaj ile alakalı 316L paslanmaz çelikleri üzerine bir çalışmada [34], SLM yöntemi ile imal edilen numuneler 2:1 oranında Kolin Klorür (ChCl) ve Etilen Glikol (EG) ihtiva eden iyonik solüsyonun içine batırılmıştır. Solüsyon içerisindeki numuneler belli akım değerleri altında belli süre ve sıcaklıklarda

bekletilmişlerdir. İyon alışverişi nedeniyle parça yüzeyinden malzeme kaldırılan bu yöntem ile oldukça pürüzsüz yüzeyler elde edilebilmiştir. Şekil 10'da söz konusu çalışmada elektropolisaj ile işlenen 316L paslanmaz çeliğinin yüze kalitesini etkileyen parametreler grafikleştirilmiştir.



Şekil 10. 316L Paslanmaz Çeliğinin Elektropolisaj ile İşlenmesi Sırasında Etki Eden Parametreler

Şekil 10'da da görüleceği üzere işlem süresinin parçanın nihai yüzey kalitesi üzerinde çok belirgin bir etkisi olmamakla beraber, uygulanan akım değerinin azaldıkça daha pürüzsüz bir yüzey elde edildiği nettir. Başlangıç yüzey pürüzlülüğünün Ra=12 µm civarında olduğu göz önünde bulundurulursa elektropolisaj yönteminin oldukça iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.

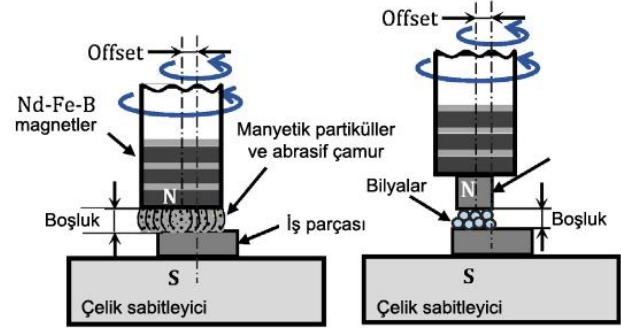
316L paslanmaz çeliği üzerine yapılan benzer bir çalışmada [35], 316L'den DMLS ile imal edilmiş numuneler 30 dk süreyle % 85 fosforik asit ve % 15 sülfürik asit ihtiva eden bir solüsyonda işlenmiştir. Oldukça iyi bir netice alınan çalışmanın çıktıları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. 316L Üzerinde Yaptıkları Elektropolisaj İşleminin Sonuçları [35]

	İşlem Öncesi (µm)	İşlem Sonrası (µm)
Sp	166.35 ± 18.65	16.38 ± 6.65
Sv	60.12 ± 20.1	28.12 ± 8.31
Sz	226.44 ± 17.67	44.5 ± 13.45
Sa	13.88 ± 2.65	3 ± 0.75

Başka bir çalışmada ise [36] 316L paslanmaz çeliği MAF (magnetic field-assisted finishing) yöntemi ile işlenerek başlangıç yüzey kalitesi Rz=100 µm'dan nihai yüzey kalitesi Rz=0.1 µm'e indirgenmiştir. İş parçası

yüzeyi ile magnet arasında bir manyetik alan oluşturulan bu yöntemde, söz konusu manyetik alan içerisine abrasif özelliği olan çamurumsu sıvı ya da bilyalar konur. Manyetik alanın değişimi ile abrasive sıvı ya da bilyalar hareket ederek iş parçası yüzeyinden malzeme kaldırır. Şekil 11'de MAF yöntemini anlatan şekil verilmiştir.



Şekil 11. MAF Yöntemi [36]

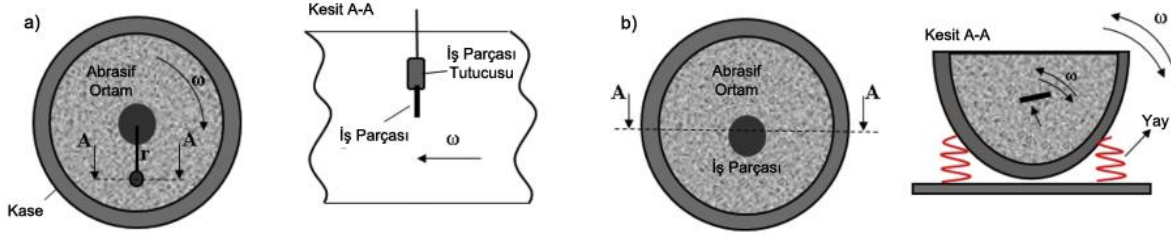
316L çeliği ise aynı yöntemle işlenerek Ra yüzey pürüzlülük değerinde % 75.7'lik bir iyileşme elde etmiştir. Başlangıç yüzey pürüzlülüğü Ra=12.5 µm olan 316L numunelerin nihai yüzey pürüzlülükleri Ra=3 µm'a kadar indirgenebilmiştir [37].

2.4. Diğer Yöntemler

Yukarıda bahsedilen yöntemlere ek olarak literatürde farklı şekillerde yapılan yüzey iyileştirme işlemleri de mevcuttur. Aynı bir başlık altında değerlendirilebilecek bu yöntemler sık kullanılan mevcut yöntemlere alternatif olarak seçilebilir.

Eİ ile imal edilmiş AlSi10Mg üzerinde yapılan bir çalışmada [38], musluk suyu içerisine abrasif partiküller ekleyerek oluşturdukları aşındırıcı sıvıyı hidrodinamik bir motor aracılığı ile yüzeyi işlenecek iş parçası üzerine kontrollü bir şekilde püskürtmektedirler. Hidrodinamik Kaviteasyon Abrasif Bitirme (Hydrodynamic Cavitation Abrasive Finishing -HCAF) adı verilen bu yöntemde % 90'a kadar bir yüzey iyileştirme oranı elde edilebilmektedir. Söz konusu çalışmada başlangıç yüzey kalitesi Ra=20 µm olan iş parçasının işlem sonrası yüzey kalitesi Ra=5 µm'nın altına kadar indirgenebilmiştir.

SLM yöntemi ile imal edilmiş 316L paslanmaz çeliği üzerinde yapılan başka bir çalışmada ise [39], iş parçası numuneleri çeşitli şekillerde hareketlendirilen abrasive ortamlar içerisinde işlenmektedir. Şekil 12a'da görüldüğü gibi dairesel



Şekil 12. Alternatif Yüzey Bitirme İşlemleri a) Drag Finishing (DF), b) Titreşimli Yüzey Bitirme (VSF) [39]

hareket kazandırılan aşındırıcı ortam içindeki silindirik numune 2 ve 4 saat süreyle işlenmektedir. Başlangıç yüzey kalitesi $Ra=7.4 \mu m$ olan iş parçasının yüzey kalitesi 2 saat sonrasında $Ra=3.3 \mu m$, 4 saat sonrasında ise $Ra=2.7 \mu m$ seviyesine düşmektedir. Drag Finishing (DF) denilen bu yöntemin, aşındırıcı ortamın sabitken iş parçasının abrasif ortam içerisinde dairesel hareketlerle işlendiği versiyonları da mevcuttur. Şekil 12b'de gösterilen ve Titreşimli Yüzey Bitirme (Vibratory Surface Finishing - VSF) olarak isimlendirilen yöntemde ise titreşim kazandırılmış abrasif ortam içerisinde bekletilen numune titreştirilen ortam sayesinde işlenmektedir. Söz konusu çalışmada 316L paslanmaz çeliğin nihai yüzey kalitesi $Ra=4.1 \mu m$ olarak elde edilmektedir.

Eklemeli İmalat ile imal edilmiş metal parçaların yüzey bitirme işlemleri olarak kullanılan yöntemlerden bir tanesi de talaşlı imalattır. Çok sık tercih edilmemekle beraber, özellikle silindirik parçaların yüzey iyileştirme süreçlerinde tornalama işlemi kullanılabilir. Yüzey iyileştirme tornası olarak da adlandırılan bu talaşlı imalat yönteminde amaç, torna tezgâhi aracılığı ile silindirik parçaları hassas bir şekilde işleyerek yüzey kalitelerini arttırmaktır [40]. Yüzey iyileştirme tornalamasında parça yüzey kalitesi kesme parametrelerine, kesici uç geometrisine, malzemenin mekanik ve metalürjik özellikleri ile kesme ortamındaki unsurlara bağlıdır [40], [41].

Her ne kadar yüzey iyileştirici tornalama işlemi en yaygın olarak kullanılan geleneksel yöntemlerden biri olsa da, bazı kısıtlamaları sebebiyle Eİ sonrası yüzey bitirme işlemlerinde tercih edilemeyebilir. İyi bir yüzey kalitesi sağlasa da tornalama işleminin sadece silindirik parçalarda kullanılabilmesi sebebiyle, yüzey iyileştirme tornalaması silindirik olmayan ya da karmaşık geometrili parçaların işlenmesi hususunda yetersiz kalmaktadır. Öte yandan, işlem sonrası artık oluşması da çevresel faktörler göz önünde bulundurulduğunda kısıtlayıcı bir unsur olarak dikkate alınmalıdır.

Tornalama dışında frezeleme de yüzey bitirici talaşlı işlem olarak değerlendirilebilir. Yüzey iyileştirici freze olarak da isimlendirilen bu işlem, yüzey iyileştirici

tornalama işlemi ile aynı etki ve sonuçlara sahip olmakla beraber, tornanın aksine, sadece düzlemsel - silindirik olmayan yüzeylerde kullanılmaktadır [42].

Genellikle torna, freze vb. gibi talaş kaldırmaya ana işlemler sonrası parçanın yüzey kalitesinin daha da iyileştirmek amacıyla kullanılan taşlama, honlama ve lepleme gibi işlemler de oldukça iyi yüzey kalitesi sağlamasına karşın, diğer talaşlı imalat yöntemleri gibi, karmaşık geometrili parçalarda kullanılmaya uygun değildir [43].

3. Sonuç

Eklemeli İmalat yöntemleri, geleneksel yöntemler ile imalatı mümkün olmayan parçaların imalatına olanak verse de Eİ ile imal edilmiş parçaların kötü yüzey kalitesine sahip olması Eİ yöntemlerinin en büyük dezavantajlarından biridir. Dolayısıyla Eİ sonrası parçalar, yüzey pürüzlülüklerini giderecek bir takım ikincil işlemlere ihtiyaç duyarlar.

Bu çalışmada, Eİ ile imal edilmiş metal parçaların yüzey kalitelerini arttırıcı yüzey bitirme işlemleri incelenmiştir. Talaşlı imalat gibi daha geleneksel yöntemlerin dışında lazerle parlatma, ultrasonik kaviteasyon gibi daha modern yöntemler ya da HCAF veya VSF gibi alternatif metotlar kullanılsa da, yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri ve kısıtlamaları bulunmaktadır. Örneğin; lazerle parlatma işlemi yüzey kalitesi açısından çok iyi sonuçlar verse de işlem sırasında enerji yoğunluğunun ayarlanması özellikle karmaşık geometrili parçalarda sıkıntı çıkarmaktadır. Öte yandan, ultrasonik kaviteasyon ya da kimyasal dağlama gibi işlemler karmaşık parçaların işlenmesinde kolaylıkla uygulanabilmekte fakat lazerle parlatma kadar hassas sonuçlar verememektedir.

Tablo 3'te çalışma boyunca incelenen yüzey bitirme işlemlerinin genel bir kıyaslaması yapılmıştır. Söz konusu tabloda görülmektedir ki yüzey kalitesini iyileştirme noktasında en iyi sonuçları talaşlı imalat (%85-90 yüzey iyileştirme oranı) ve lazerle parlatma

Tablo 3. Eİ ile İmal Edilmiş Metal Parçaların Yüzey Bitirme İşlemlerinin Genel Kıyaslaması

	İşlem Hızı	İyileştirme Oranı	Karmaşık Geometriye Uygunluk	Kalıntı Gerilme	İşlem Sonrası Atık
Talaşlı İmalat	++	+++	-	Mekanik	+
Lazer Parlatma	+++	+++	-	Termal	-
Kimyasal İşlem (Statik)	+	++	+	-	+
Kimyasal İşlem (Dinamik)	+++	++	+	-	+
Ultrasonik Kaviteasyon	+++	+	+	-	-
Elektromanyetik İşlemler	+++	+++	+	-	-
HCAF	++	+++	+	-	+
DF ve VSF	+++	++	-	Mekanik	-

işlemleri (%80-85 yüzey iyileştirme oranı) sağlamaktadır. Fakat her iki yöntem de karmaşık geometriye parçalara kolaylıkla uygulanamamakta ve parça yüzeyinde kalıntı gerilmelere sebep olmaktadır. Özellikle talaşlı imalatın Eİ ile imal edilmiş parçalar söz konusu olduğunda oldukça kısıtlayıcı bir noktada olması, bu yöntemin çok tercih edilememesine neden olmaktadır.

Karmaşık geometriye parçaların yüzey bitirme işlemi söz konusu olduğunda ise kimyasal dağlama ve ultrasonik kaviteasyon işlemleri ön plana çıkmaktadır. Herhangi bir kalıntı gerilme yaratmayan bu işlemlerde ise elde edilen son yüzey kalitesi talaşlı imalat ya da lazerle parlatma kadar iyi olmamaktadır (kimyasal dağlama %50-60 civarı bir yüzey iyileştirme oranı sağlarken, ultrasonik kaviteasyon ancak %40-45 oranında bir iyileşmeye olanak vermektedir). Öte yandan elektromanyetik işlemler oldukça hızlı ve iyi sonuçlar vermekte; HCAF, DF ve VSF gibi alternatif yöntemlerde imalat sonrası yüzey bitirme işlemleri adına alternatif çözümler olarak kendini göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Grimm T, Wiora G, Witt G. Characterization of typical surface effects in additive manufacturing with confocal microscopy. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3(1), 2015.
- [2] Kumbhar NN, Mulay AV. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. *Journal of The Institution of Engineers India: Series C*, 99(4), 481-487, 2016.
- [3] Melchels PW, Domingos AN, Klein TJ, Malda J, Bartolo BJ, Huttmacher DW. Additive manufacturing of

tissues and organs. *Progress in Polymer Science*, 37, 1079- 1104, 2012.

[4] Zadpoor AA, Malda J. Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs. *Annals of Biomedical Engineering*, 45, 1-11, 2017.

[5] Gora WS, Tian Y, Cabo AB, Ardron M, Maier RR, Prangnell P, Weston NJ, Hand DP. Enhancing surface finish of additively manufactured titanium and cobalt chrome elements user laser based finishing. *9th International Conference on Photonic Technologies. Physics Procedia* 83, 258 - 263, 2016.

[6] Ippolito R, Iuliano L, Gatto A. Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 44, 157-60, 1995.

[7] Nakatani M, Masuo H, Tanaka Y, Murakami Y. Effect of Surface Roughness on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Alloy Manufactured by Additive Manufacturing. *Procedia Structural Integrity*, 19, 294-301, 2019.

[8] Balachandramurthi AR, Moverare J, Dixit N, Pederson R. Influence of defects and as-built surface roughness on fatigue properties of additively manufactured Alloy 718. *Material Science and Engineering: A*, 735, 463-474, 2018.

[9] Ma CP, Guan YC, Zhou W. Laser polishing of additively manufactured Ti alloys. *Optics and Lasers in Engineering*, 93, 171-177, 2017.

[10] Lamikiz A, Sánchez JA, López de Lacalle LN, Arana JL. Laser polishing of parts built up by selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 2040-2050, 2007.

- [11] Kumstel J, Kirsch B. Polishing Titanium- and Nickel-based Alloys using CW-Laser Radiation. *Physics Procedia*, 41, 362–371, 2013.
- [12] Willenborg E. Polishing with laser radiation in: *Laser Application Technology*, Poprawe R, ed. Tailored Light 2. Berlin: Springer, 196–203, 2011.
- [13] Chow MTC, Bordatchev EV, Knopf GK. Experimental study on the effect of varying focal off set distance on laser micropolished surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 2607–2617, 2012.
- [14] Marimuthu S, Triantaphyllou A, Antar M, Wimpenny D, Morton H, Beard M. Laser polishing of selective laser melted components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 95, 97–104, 2015.
- [15] Temmler A, Willenborg E, Wissenbach K. Laser Polishing. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 8243:19, 2012.
- [16] Solheid dS, Seifer HJ, Pflöging W. Laser surface modification and polishing of additive manufactured metallic parts. *Procedia CIRP*, 74, 280-284, 2018.
- [17] Nüsser C, Wehrmann I, Willenborg E. Influence of Intensity Distribution and Pulse Duration on Laser Micro Polishing. *Physics Procedia*, 12, 462–471, 2011.
- [18] Yung KC, Xiao TY, Choy HS, Wang WJ, Cai ZX. Laser polishing of additive manufactured CoCr alloy components with complex surface geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 53–64, 2018.
- [19] Perry TL, Werschmoeller D, Li X, Pfefferkorn FE, Duffie NA. Pulsed laser polishing of micro-milled Ti6Al4V samples. *Journal of Manufacturing Processes*, 11, 74–81, 2009.
- [20] Jang PR, Jang TS, Kim NC. Laser micro-polishing for metallic surface using UV nano-second pulse laser and CW laser. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 2367–2375, 2016.
- [21] Ma CP, Guan YC, Zhou W. Laser polishing of additively manufactured Ti alloys. *Optics and Lasers in Engineering*, 93, 171-177, 2017.
- [22] Zhihao F, Libin L, Longfei C, Yingchun G. Laser Polishing of Additive Manufactured Superalloy. *4th CIRP Conference on Surface Integrity (CSI 2018): Procedia CIRP*, 71, 150-154, 2018.
- [23] Krishnan A, Fang F. Review on mechanism and process of surface polishing using lasers. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(3), 299–319, 2019.
- [24] Preußner J, Oeser S, Pfeiffer W. Microstructure and residual stresses of laser structured surfaces. *Advanced Materials Research*, 996: 568–573, 2014.
- [25] Lee H, Lee D, Jeong H. Mechanical Aspects of the Chemical Mechanical Polishing Process: A Review. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 17:4, 525-536, 2016.
- [26] Sherillo F. Chemical surface finishing of AlSi10Mg components made by additive manufacturing. *Manufacturing Letters*, 19, 5–9, 2019.
- [27] Mohammadian N, Turenne S, Brailovski V. Surface finish control of additively-manufactured Inconel 625 components using chemical-abrasive flow polishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 252, 728–738, 2018.
- [28] Łyczkowska E, Szymczyk P, Dybała B, Chlebus E. Chemical polishing of scaffolds made of Ti–6Al–7Nb alloy by additive manufacturing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14, 586–594, 2014.
- [29] Pyka G, Burakowski A, Kerckhofs G, Moesen M, Van Bael S, Schrooten J. Surface modification of Ti6Al4V open porous structures produced by additive manufacturing. *Advanced Engineering Materials*, 14, 363–370, 2012.
- [30] Pečnik P, Hočevar M, Širok B, Bizjan B. Scale deposit removal by means of ultrasonic cavitation. *Wear*, 356–357, 45–52, 2016.
- [31] Haosheng C, Jiadao W, Darong C. Cavitation damages on solid surfaces in suspensions containing spherical and irregular particles. *Wear*, 266:5, 345-348, 2009.
- [32] Tan KL, Yeo SH. Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing. *Wear*, 378-379, 90–95, 2017.
- [33] Sautebin R, Froidevaux H, Landolt D. Theoretical and Experimental Modeling of Surface Leveling in ECM Under Primary Current Distribution Conditions. *Journal of Electrochemical Society*, 27, 1096–1100, 1980.
- [34] Alrbaey K, Wimpenny DI, Al-Barzinjy AA, Moroz A. Electropolishing of Re-melted SLM Stainless Steel 316L Parts Using Deep Eutectic Solvents: 3 × 3 Full Factorial Design. *Journal of Material Engineering and Performance*, 25, 2836–2846, 2016.
- [35] Tyagi P, Goulet T, Riso C, Stephenson R, Chuenprateep N, Schlitzer J, Benton C, Garcia-Moreno F. *Additive Manufacturing*, 25, 32-38, 2019.
- [36] Yamaguchi H, Fergani O, Wu PY. Modification using magnetic field-assisted finishing of the surface

roughness and residual stress of additively manufactured components. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 66, 305-308, 2017.

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

[38] Nagalingam AP, Yuvaraj HK, Yeo SH. Synergistic effects in hydrodynamic cavitation abrasive finishing for internal surface-finish enhancement of additive-manufactured components. *Additive Manufacturing*, 33, 2020.

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

[40] Ratnam MM. Factors Affecting Surface Roughness in Finish Turning. *Comprehensive Material Finishing*, 1, 1-25, 2017.

[41] He CL, Zong WJ, Zhang JJ. Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process: State-of-the-art. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 129, 15-26, 2018.

[42] Berenji KR, Karagüzel U, Özlü E, Budak E. Effects of turning milling conditions on chip formation and surface finish. *CIRP Annals*, 68, 113-116, 2019.

[43] Saravankumar A, Dhanabal S, Jayanand E, Logeshwaran P. Analysis of Process Parameters in Surface Grinding Process. *Materials Today: Proceedings* 5, 8131-8137, 2018.

[44] Yalçın B, Berkay E. Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklmeli İmalat Yöntemi ve Metalurjisi. *SDU International Journal of Technological Science*, 9:3, 65-88, 2017.