



**Makale
(Article)**

Mikro-İmalat Uygulamalarında Kullanılan Yeni Nesil Lazer Makinalarının Genel Bir Değerlendirmesi

Serap ÇELEN*

* Ege Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir/Türkiye, seracelen@hotmail.com

Özet

Darbeli lazerlerle malzemelerin işlenmesi 1967 yılında gerçekleştirilen ilk lazer derin delme uygulamasından sonra önemli bir araştırma alanı olmuştur. Bir lazer mikro-imalat cihazı yüksek güç, darbe tekrar hızı, değiştirilebilir darbe süresi ve darbe şekli gibi önemli özelliklere sahiptir. Yüksek güç ve kısa işlem zamanlarının gerektiği derin oyma, ısıtma işlem ve özel mikroyapılandırma uygulamalarında kullanılabilir. Özel geliştirilmiş modellerde, kendiliğinden ayar yapabilen ve yüksek güçlü tarama modülleri tarama hızına bağlı uygun darbe tekrar hızları sağlayabilmektedir. Böylece özellikle ısıya hassas malzemelerin mikro-imalatı düşük işlem zamanları ile mümkün olabilmektedir. Bu makalenin amacı, lazer mikro-imalat uygulamaları hakkında bilgi vermek ve Brinksmeier'in enerji destekli prosesler başlığı altında sınıflandırdığı bu yöntemin hızlı gelişimini değerlendirmektir.

Anahtar Kelimeler: lazer, mikro-imalat teknolojisi, kritik lazer parametreleri

A General Overview of New Age Laser Machines Used in Micro-manufacturing Applications

Abstract

Material processing with pulsed lasers has been an important investigation field after the first laser deep drilling application in 1967. A laser micro-manufacturing device has important characteristics such as high power, high pulse repetition rate and variable definite pulse duration and pulse shape. It can be used in deep graving, heat treatment and special microstructuring applications which needs high power requirements and short processing times. There are self-adjusting and high performance scanning modules that adjust their scanning speeds according to high pulse repetition rates in special developed models. Thus micro-machining can be performed especially for heat sensitive materials with reduced manufacturing times. The aim of the present manuscript is to

Bu makaleye atıf yapmak için

Çelen S., "Mikro-İmalat Uygulamalarında Kullanılan Yeni Nesil Lazer Makinalarının Genel Bir Değerlendirmesi",

Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2014, (11) 39-47

How to cite this article

Çelen S., "A General Overview of New Age Laser Machines Used in Micro-manufacturing Applications",

Electronic Journal of Machine Technologies, 2014, (11) 39-47

give beneficial information about laser micro-manufacturing applications and evaluate the rapid development of laser micro manufacturing techniques which classified in energy-auxiliary processes by Brinksmeier.

Keywords : laser, micro-manufacturing technology, critical laser parameters.

1. GİRİŞ

Günümüzde lazer çeşitli mikro-yapıların üretiminde kullanılabilen çok amaçlı bir takımdır [1,2,3,4,5,6]. Markalama, delme ve kaynak uygulamaları dışında kesme işlemi en çok kullanılan mikro-malzeme işleme uygulamasıdır. Lazerle imalatın temel avantajları şunlardır.

- a) Işının çok küçük bir boyuta odaklanabilmesi,
 - b) Ayna ve fiber optik kablolar aracılığıyla istenilen alana taşınabilmesi,
 - c) Işın gücünün hassas kontrolü böylece yüksek yoğunluklu ve yüksek lokalize ısıtma kaynağı olarak çevre alanlara minimum etkisi dolayısıyla düşük ITAB ve distorsiyon,
 - d) Temiz ve temassız bir yöntem olması.
- Dezavantajı ise yüksek yatırım gerektirmesi ve metallerdeki yüksek yansıma sebebiyle yüksek enerji kaybı oluşturmaktadır [7].

Havacılık, otomotiv, biyomedikal ve mikro-elektronik endüstrileri gibi imalat endüstrilerinde akışkan sistemleri için yüksek güçlü ve yüksek hassasiyette mikro delik delme işlemlerinde en çok kullanılan mikro-imalat uygulamasıdır. İnk jet yazıcılarda, yakıt enjeksiyon sistemlerinde, akış/dozaj regülatörlerinde veya analitik mikro akışkan sensörlerinde yüksek hassasiyette delik delme işlemi gerekmektedir. Örneğin; yüksek rekabetin yaşandığı otomotiv endüstrisinde dizel enjektör nozullarındaki mikro deliklerin 100-200 µm çapında imalatı gerekmektedir. Geçmişte bu nozullardaki hassas deliklerin imalatı için elektro-deşarj makinası kullanılmaktaydı. Ancak işlem için özel olarak hazırlanan bakır kalıpların delinmesi istenilen yere ulaştırılma zorlukları gibi bir takım sınırlamaları söz konusuydu. Günümüzde lazerle kısa işlem süreleri ile temassız ve temiz olarak imal edilebilmektedirler [8].

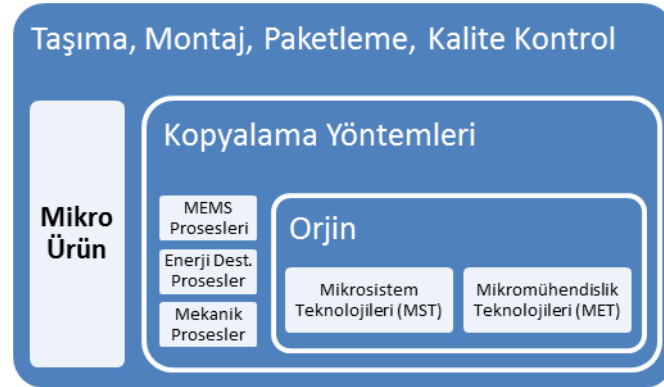
Metallerin delinmesinde bir çok endüstriyel uygulama için gerekli olan en önemli kriter delik geometrisi ve kalitedir. Lazer ile delme işlemlerinde üç method kullanılmaktadır. Bunlar; darbeli, perküzyon ve helisel delme yöntemleridir. Darbeli delme yüksek işlem hızının gerekli olduğu ve kalitenin ikinci planda olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Perküzyon delmede ise daha fazla darbe kullanılarak prosesin tamlığını arttırılmakta ve her darbeye daha küçük bir hacim buharlaştırılmaktadır. Helisel delme yönteminde ise odaklanmış lazer ışını iş parçasına göre dairesel bir patikada hareket etmektedir. Bu yöntem birkaç milimetreye kadar olan büyük çaplı deliklerin delinmesinde kullanılan standart bir tekniktir. Böylece dairesellikleri tam ve ışın profiline bağlı olmayan mikro delikler imal edilebilmektedir. Metaller için lazer kesme prosesi oksijen reaksiyonu ile ergitme ve süblimleşme ile gerçekleştirilmektedir. Süblimleşme yöntemi ile kesmenin avantajı ısı tesiri altında kalan bölgenin minimize edilebilmesi, dezavantajı ise metallerin yüksek entalpisinden dolayı kesme hızının oldukça düşük olmasıdır. Oksijen kesimi oksidasyon dezavantajına rağmen yüksek işlem hızlarına ulaşılabilen bir yöntemdir. Konvansiyonel yöntemlerde her iki kesim işlemide sonraki imalat adımlarında temizlenmelerini gerektiren yüzeysel metal kalıntıları oluşturmakta, parametreleri hassas bir şekilde ayarlanmış lazerli sistemlerle bu işlem ortadan kaldırılabilir [8].

Lazer ile mikro-markalama yöntemi ise medikal implantlarda kullanılmaktadır. Böylece son derece korozyon in-vivo ortamlarda uzun süre tanımlanmış verilerini koruyabilen ve gerektiğinde okunabilen yazılar oluşturulabilmektedir [9].

2. BRINKSMEIER'İN YAKLAŞIMIYLA MİKRO-İMALAT

Mikro ürün üretiminde kullanılan teknolojilerin sayısı ve çeşitliliği oldukça fazladır. Bunlar temel olarak üç ana sınıfa ayrılabilir; bu sınıflardan birincisi büyük blokların küçük parçalara ayrılmasına dayalı

bütünden-parçaya üretim yöntemleridir. İkincisi ise atom/molekül gibi küçük parçacıkların büyük fonksiyonel yapıların üretimi için birleştirildiği parçadan-bütüne imalat yöntemleridir. Üçüncüsü ise mevcut teknolojilerin kombinasyonu veya tamamen yeni teknolojilerin geliştirilmesini kapsamaktadır. (Şekil 1)



Şekil 1. Brinksmeier'e göre hassas parçaların ve mikroyapıların üretim proses teknolojileri [10]

Benzer şekilde, mikro-imalat teknolojilerinin çeşitli sınıflandırmaları rapor edilmiştir. Bunlardan en popüler olanı Brinksmeier'in mikro-imalat teknolojileri temel olarak dört grupta sınıflandırmaktadır. Bunlar;

- MEMS mikro-imalat prosesleri: UV-litografisi, silikon mikro imalatı.
- Enerji destekli mikro-imalat prosesleri: Lazer ışını ile mikro-imalat, odaklanmış iyon ışını ile imalat, elektron ışını ile imalat ve mikro elektro erozyon gibi.
- Mekanik mikro-imalat prosesleri: Mikro ölçekte tornalama, frezeleme, delme ve parlatma, mikro-frezeleme veya mikro-taşılama.
- Kopyalama yöntemleri; enjeksiyonla kalıplama veya döküm gibi. Bu teknolojiler kendi sınıflarına sahip olsalar da, bir önceki mikro-imalat basamaklarını gerektirirler, örneğin enjeksiyon prosesi için kalıpların imalatı gibi.

Bu dört temel gruba beraber, raporda taşıma, montaj, paketleme, kalite kontrol ve metroloji gibi önemli basamakları kapsayan ilave bir alt grup da sunulmuştur. Her grup sınıflandırmada her ne kadar belli başlıklar altında verilsede de grupların birbirlerinden tamamen bağımsız olmadığı vurgulanmıştır [10].

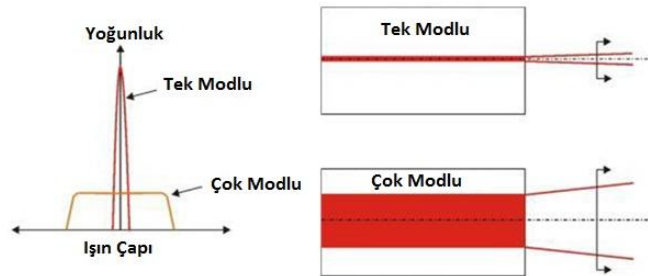
3. LAZERLE MİKRO-İMALATTA TEORİK KONULAR

Lazer mikro-imalat uygulamaları için kullanılabilen çok amaçlı eşsiz bir takımdır. Lazer ışınının elektromagnetik ışınımı opak malzemelerde ilk atomik tabaka içerisinde absorbe edilmektedir. Lazerle mikro imalat, yüksek yoğunluklu bir lazer ışınının yüzey üzerindeki küçük bir noktaya odaklanabilmesine ve o noktadaki yüksek ışın yoğunluğunun malzemeyi ergitme ve buharlaştırmasına dayalı olarak yapılmaktadır. Enerjinin yüzey üzerindeki istenilen noktaya çok hassas bir şekilde bırakılabilmesi lazeri bu alanda diğer imalat yöntemlerine göre avantajlı hale getirmiştir. Bu yaklaşımla, bir mikrometreden daha küçük yapılar üretilebilmektedir. Işın hareketinin hassas kontrolü ile hem optik elemanlar kullanarak, hemde numuneyi hareket ettirerek önceden tasarlanmış geometrileri elde etmek mümkündür. Mikro-imalatla lazeri kullanmanın avantajları, darbe frekansının hassas kontrolü, frekans aralığının çok geniş olması, yüksek enerji yoğunluğu, hassas odaklama kabiliyeti, bu sayede hem ısı hemde özgün uyarılmanın etkisini değiştirerek kaynaktaki darbe kabiliyetinin ve etkileşim zamanının kontrolüne olanak sağlamasıdır. İşlemler 100 nanosaniyeden pikosaniyelik darbe zamanlarına kadar darbeleri veya 1 milisaniyeden daha düşük etkileşim zamanlarına sahip sürekli dalga şeklinde ayarlanabilmektedir [11].

Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi, lazerle mikro imalat kullanılan tekniğe göre yüksek hassasiyette kesme, delme uygulamaları, mikro birleştirme işlemleri ve yüzey yapılandırma metodları olarak alt sınıflara ayrılabilir. Yeni nesil fiber lazer markalama cihazları XY çalışma alanında yüksek ışın kaliteleri ($M^2 \sim 1.1$), tek modlu işleme imkanı ve cazip fiyatları sayesinde bir çok geleneksel lazer mikro imalat ekipmanı ile yer değiştirmektedir.

Bu sistemlerde optik odak çapı $20 \mu\text{m}$ 'ye kadar indirilebilmektedir. Ayrıca darbe süresi ve tepe gücünün darbe frekansı ile bağımsız olarak kontrol edilebilmesi geleneksel sabit darbe genişlik/tepe güç ayarlarına sahip olan q-anahtarlamalı lazerlere göre proses kontrolü açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu özellikleri ile çok ince levha/folyo malzemelerin hatasız olarak işlenmesini gerçekleştirebilirler. Lazer kafası, lazeri istenilen yere bırakabildiği için, etkin hareket, uygun tekrarlanabilirlik, tamlik sağlamak açısından sistemin anahtar parçasıdır [12].

Mikro-imalatta darbe şeklinin önemi büyüktür, yüksek genlikli üçgen darbeler yüksek lazer enerjisinin iş parçası içine hızlıca girmesini sağlarken ve kare darbe sonundaki uzun bir kuyruk ise malzemeye nüfuziyeti arttırması nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca ışın çapını minimuma düşürebilen tek modlu uygulamalar işlem hassasiyeti açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. [Şekil 2]



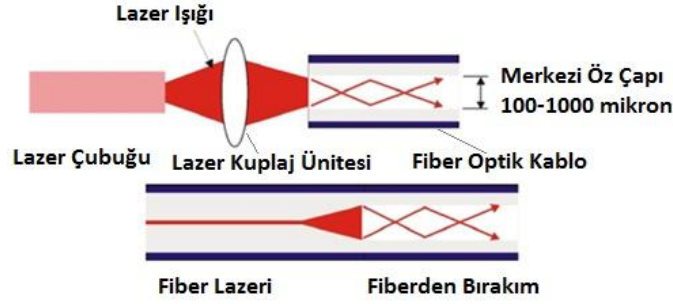
Şekil 2. Tek modlu ve çok modlu lazerde ışın çapı [12 Unitek Miyachi]

Yüksek lazer güç yoğunluğu ve darbeli lazer parametrelerinin ayar esnekliği, 0.5 mm den daha ince malzemelerin kuru veya ıslak metotla delinmesi için imkan sağlamaktadır. İnce malzemelerin kesilmesinde iki tip kesme işlemi mevcuttur. Birinci tip, ergiterek kesme yönteminde lazer ışını iş parçasını hızla ısıtır ve malzemeyi ergiterek işlemi gerçekleştirir. Bu işlemde ergimiş malzemeyi kesilmiş kenardan atmak için yardımcı gaz kullanılır. Kesme esnasında yardımcı gaz olarak genellikle oksijen, nitrojen ve argon kullanılmaktadır. Oksijen kullanıldığında sağladığı ekzotermik reaksiyon sayesinde hassas bir ergimiş malzeme atılımı sağlamakta ve kesme hızını %50 oranında arttırmaktadır. Bununla beraber, nitrojen kesim alanını hızlıca soğutur ve aynı kesme kalitesine ulaşabilmek için çok daha fazla lazer gücü harcanmasını gerektirir [13, 14].

Bir çok levha malzemenin yüksek güçle kesimi bu yöntemle yapılmaktadır. Bu amaçla genellikle CO_2 , Nd:YAG ve fiber lazerleri kullanılmaktadır. Isıdan etkilenmiş bölgenin ve yeniden katılaştıran katmanın minimizasyonu ve kalite kontrolü için dikkatli bir proses optimizasyonu gerekmektedir. Diğer tip kesme işlemide buharlaştırarak kesmedir. Herhangi bir yardımcı gazın kullanılmadığı bu işlemde katı malzeme herhangi bir sıvı faza geçmeden doğrudan buhar fazına dönüştürülür. Bu yöntem yüksek kaliteli mikroelektronik ve yarı iletken endüstrilerine yönelik mikro-imalat uygulamaları için kullanılmaktadır. Ergime olmadığından, yüksek kalitede çok düşük ITAB'lı işlemlere imkan tanımaktadır. Bakır ve altın gibi yüksek yansıtıcılığa sahip malzemeleri kesmekte yüksek tepe güçlü kısa darbeli lazerler kullanılmaktadır. Örneğin; nanosaniye bölgesinde çalışan bir darbe genişliğine sahip diyod pompalı bir katı hal lazerleri bu işlem için oldukça uygundur.

Fiber lazerler darbeli Nd:YAG lazerlere göre bir takım avantajlara sahiptirler. Bunlar düşük odak çapları, hızlı kesme işlemine olanak sağlayan yüksek darbe tekrar hızları ve düşük maliyetleridir. Bu sebeplerden,

ince filmlerin hassas kesim işlemlerinde tercih edilmektedirler. Katı-hal ve fiber lazerde ışın bırakımı Şekil 3’de şematik olarak verilmiştir.



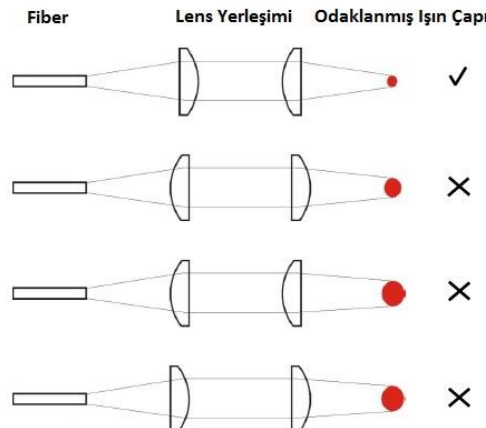
Şekil 3. Katı-hal lazeri ve fiber lazerinde ışın bırakımı [12 Unitek Miyachi]

Fiber lazerler 100-500 Watt’lık güçleri ile ince malzemelerle çalışırken çok yüksek bir boyutsal tamlik sağladıklarından ideal makinelerdir. Lazerin temassız bir işlem olması proses kontrolü açısından büyük önem taşımakta özellikle mikro parçaların yüksek hassasiyette işlenmesinde tercih edilmesini sağlamaktadır [13, 14]. (Şekil 4)

Darbeli Nd:YAG Lazeri CO2 Lazeri CW/Fiber Lazeri	Ortamala Güç: 50-200 W Darbe Süreleri: µs-ms Düşük Tepe Gücü (kW)	Ergiterek Kesme Ergitme ve Yardımcı Gaz ile Üfleme Büyük ITAB
Q-Anahtarlamalı DPSS Darbeli Fiber Lazeri	Ortamala Güç: 20-300 W Darbe Süreleri: ~ns Yüksek Tepe Gücü (kW)	Buharlaştırarak Kesme Malzeme ergitmeden ablasyona uğrar. Küçük ITAB

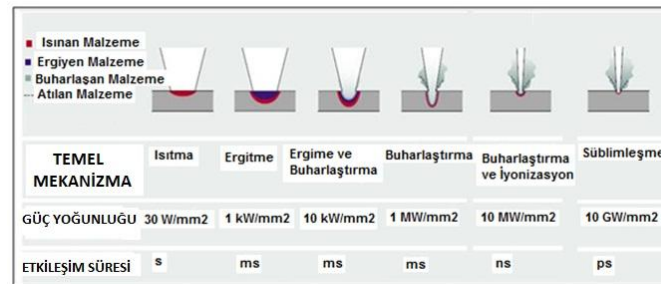
Şekil 4. Farklı lazer kesme prosesleri için ilgili parametreler [14]

Mikro-imalatla lazerler kesme işlemi dışında farklı amaçlar için yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Lazer yüzey mikro-yapılandırma işlemi, yüzeyin teknik özelliklerinde istenilen fonksiyonel değişimleri oluşturmak amacıyla yüzeyler üzerinde uniform düzenli geometrilerin mikro ölçekte üretilmesidir. Bu işlem ile, tek bir bileşen boyutunun mikrometre ve altı ölçekte yapılabilmesi yöntemi elektronik ve yarı-iletken teknolojisinde olduğu kadar takım ve kalıp imalatında da kullanılabilir duruma getirmiştir. Örneğin, enjeksiyonla plastik parçaların üretiminde kalıptaki üç boyutlu mikro detaylar lazerler tarafından üretilmektedir. Ancak bu yöntemde şekil 5’te görüldüğü gibi doğru bir mercek yerleşimi ile her bir lazer darbesi mikron boyutlarında küçük bir çöküntü oluşturabilir [15].



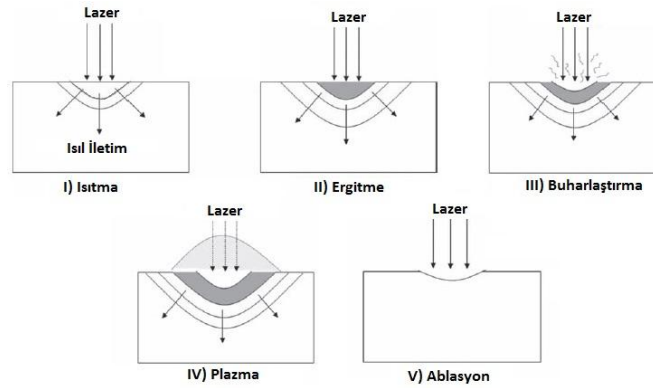
Şekil 5. Mercek yerleşiminin odak çapı üzerindeki etkisi [15 Unitek Miyachi]

Lazer güç yoğunluklarına bağlı olarak imalatla temel etki ve proses örnekleri Şekil 6'da verilmiştir. Lazerin malzeme ile uzun etkileşim zamanlarında, düşük lazer güç yoğunluklarında temel etki ısıtmadır. Milisaniyelik etkileşim zamanlarında, 1 kW/mm²'ye güçlerde kadar temel etki ergitmedir. Bu aralık lehimleme ve bazı kaynak işlemleri için oldukça uygundur. 10 kW/mm² ve üzerindeki lazer güç yoğunlukları aynı etkileşim zamanları ile malzemeyi ergitip, buharlaştırabilmektedirler ve bu sayede derin nüfuziyet kaynağı ve kesme işlemleri için uygun ortamı sağlamaktadırlar. Çok yüksek lazer güç yoğunluklarında ise (1 MW/mm²) temel etki malzemenin buharlaştırılmasıdır. Malzemenin hassas bir şekilde işlenmesi için gereken lazer güç yoğunluğu 10 MW/mm² ve üstü nanosaniyelik etkileşim zamanlarıdır. Gerekli buharlaşma ve iyonizasyon bu sayede oluşturulabilir ve bu değer aşıldığında ise malzeme doğrudan süblimleştirilebilir [16].



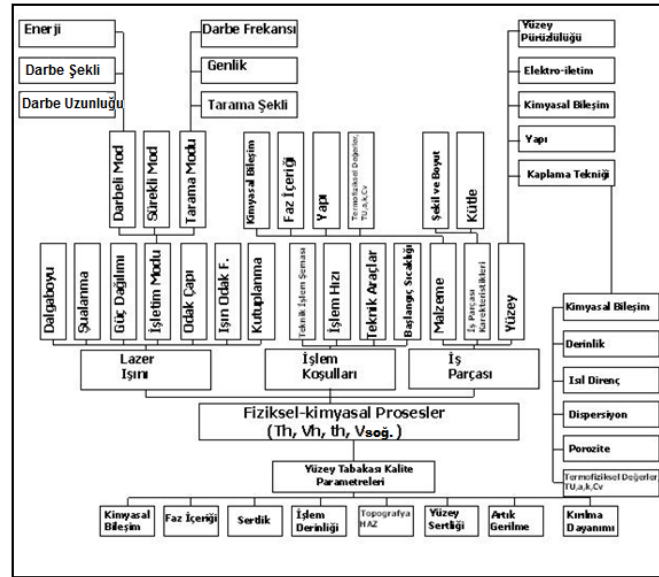
Şekil 6. Lazerin güç yoğunluklarına bağlı temel etki ve örnek prosesler [16 Trumpf]

Lazer-malzeme etkileşimini anlatan şematik resim Şekil 7'de verilmiştir. Şekildende görüleceği üzere; farklı lazer güç yoğunlukları, malzemede ısıtma, ergitme, buharlaştırma, plazma oluşumu ve ablasyona sebep olmakta ve bu sayede malzemelerin istenen şekilde işlenmesini gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 7. Lazer-malzeme etkileşiminin şematik gösterimi [17 Dahotre et al., 2008]

Şekil 8'de lazer yüzey yapılandırma prosesindeki işlem parametreleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, gerekli parametreler üç ana başlık altında toplanmıştır. Bunlardan birinci grup, dalgaboyu, şulanma, güç dağılımı, işletim modu, ışın odak çapı, ışın odak faktörü ve ışının kutuplanması gibi temel ışın özelliklerini içeren kullanılan lazer ışınının özelliklerini kapsamaktadır. Darbeli operasyonlarda, darbenin süresi ve zamansal şeklinin tanımlanması daha öcede bahsedildiği üzere özellikle önem taşımaktadır [18, 19, 20].



Şekil 8. Lazer yüzey yapılandırma işlemlerinde teknolojik sistem şeması [21 Ready, 2001]

4. YENİ NESİL LAZER MAKİNALARINA GENEL BİR BAKIŞ

Birkaç watt'tan 2 kilowatt'a kadar darbeli, Q-anahtarlamalı olarak çalışan plastik ve metalik malzemeleri kesme, markalama, delme ve oyma amaçlı olarak kullanılan fiber lazerler mevcuttur [21]. Şekil 9'de genellikle diyod pompalamalı olarak kullanılan lazer makineleri görülmektedir. Fiber lazer makineleri daha öncede bahsedildiği gibi kompakt boyutları, yüksek verimlilik ve performansları, yüksek malzeme işleme hızları, kısa işlem süreleri ve mükemmel ışın kalitelerinden dolayı tercih edilmektedirler. Çok düşük güçlü (20-30 Watt) fiber lazerler bile 1 milijoullük darbe enerjisini yüksek tepe güçleri ile geniş bir yelpazede ayarlanabilen darbe tekrar hızları ile bırakabilmektedirler. Böylece imalat hızı ve proses kapasitesi artabilmektedir. Darbeli modda genellikle, 50 kHz-200 kHz frekans aralığında çalıştırılmaktadırlar. Nominal güçleri 100-600 Watt aralığındaki lazerler hassas lazer kesim ve lazer mikro kaynak işlemlerinde kullanılmaktadırlar. Bu sistemler ile çok küçük odak çapları ile uygulamayada bağlı olarak oldukça düşük ısı girdisi sağlanabilmektedir. (Şekil 9)



Şekil 9. Çeşitli ticari lazer mikro-imalat cihazları [I] 20-50 Watt'lık diyod pompalamalı lazer mikro işlem cihazı [22-Rofin] [II] 20-50 Watt'lık diyod pompalamalı q-anahtarlamalı lazer mikro işlem cihazı [22-Rofin] [III] 300 Watt'lık diyod pompalamalı fiber lazer mikro işlem cihazı [23-Trumpf] [IV] LMF2000 tek modlu fiber lazer cihazı [14-Unitek Miyachi] [V] 200 Watt'lık fiber lazer hassas kesme cihazı [14-Unitek Miyachi] [VI] 100-600 Watt'lık diyod pompalamalı hassas lazer kesim ve kaynak cihazları [22-Rofin] [VII] 500-2000 Watt'lık yüksek güçlü fiber lazer kesim ve kaynak cihazı [22-Rofin] [VIII] 1400 Watt'lık yüksek güçlü Nd:YAG lazer hassas mikro işlem cihazı

Bazı gelişmiş modellerde, doğrudan tarama hızına göre yüksek darbe tekrar hızlarına kendini otomatik olarak ayarlayabilen yüksek performanslı tarama modülleri söz konusudur. Böylece işlem süreleri kısaltmakta ve özellikle ısıya hassasiyeti olan iş parçalarında mikro işlem yapılabilir. Ayrıca

istenirse iç odaklama ünitesi farklı boyutlardaki iş parçalarında uniform yüksek kaliteli ısıl işlemi mümkün kılmaktadır.

5. SONUÇ

Kısa süreli darbeli lazer işleme teknolojilerinde, minimum elde edilebilir yapı boyutu optik sistemin yansıma limiti ve lazer ışınının dalga boyunun katları ile belirlenmektedir. Nanosaniye-milisaniye aralığındaki darbe süreleri ile gerçekleştirilen konvansiyonel lazerli imalatın termal yük, yüksek ısıl iletim gibi bazı sınırlamaları söz konusudur. Her bir darbenin ablasyon derinliği elektron termal iletimi ve lazere bağlı şok dalgası üretimine bağlı olarak hedefe olan enerji transferi ile belirlenmektedir. Isıl yükün yüksek olması minimum üretilabilir yapı boyutunu sınırlamaktadır. Ayrıca nanosaniye işlemelerde yüksek yoğunluklu uzun darbeler plazma oluşturmakta ve plazma koruması ışıyım kayıplarına sebep olmaktadır. Bu durum ultrakısa lazer darbeleri için geçerli değildir. Ultrakısa (femtosaniye, pikosaniye) lazer darbeleri doğrudan malzeme yüzeyi ile etkileşime girmekte ve optik nüfuziyet derinliği 10 nm'ye kadar indirilebilen ince bir katman oluşturulabilmektedir. Ultrakısa lazer ışıyımı ile işlemede klasik ısıl iletim teorisi geçerli olmadığından katı-hal malzeme kafesi içerisinde ısıl difüzyon etkileri yoktur. Elektronlar kafesle kıyaslandığında düşük ısıl kapasitelerine bağlı olarak, doğrudan Fermi seviyesinin üzerine geçici sıcaklıklara ısıtılırlar, böylece kafes ve elektron arasında son derece dengesiz bir sistem oluşur. İlk aşamada lazer ışıyımı bir yüzey katmanı ve serbest elektronlar tarafından malzeme içine absorbe edilir. Sonra enerji elektronlardan kafese transfer edilir, bağ koparılması ve malzeme genişmesi meydana gelir. Ablasyon eşik değerine yakın olan lazer yoğunluklarında, elektron-iyon enerji transferi pikosaniyelik zaman ölçeğinde gerçekleşir. Elektron alt sisteminin ısıtılmasında çok hızlı bir enerji transferi olduğu halde lazer darbesi esnasında kristal kafes bağlı olarak soğuk kalır. Yalıtkan malzemelerde hedefteki elektron transportu baskılanmıştır. Elektronlar plazmayı nötral tutan şarj ayrılma kuvveti nedeniyle kaçamazlar. Metallerde elektron transportuna izin verilmiştir, hedef içerisinde sıcak elektronlar hareket ederek soğuk elektronlarla yer değiştirebilmektedirler. (dönüş akımı) Bununla beraber, ultrakısa darbelerle elektron ısıl iletimini azaltan bazı sebepler söz konusudur [24]. Özet olarak, metalik malzemelerin nanosaniye-milisaniye aralığında darbe süreleri ile çalışan fiber lazerlerle hassas mikro imalatı ısıl ve mekanik hasar sebepleriyle sınırlanmaktadır. Bu sınırlamalar ultrakısa darbe kullanımıyla ortadan kaldırılabilir. Bu açıdan, femtosaniye lazeri yüksek altyapı maliyetine rağmen mikro-imalat uygulamaları için son imalat işlemi gerektirmeyen gelecek vadeden bir takımdır.

6. KAYNAKLAR

1. R. Poprawe, 2005, Lasertechnik für die fertigung, Springer Verlag.
2. M. Bertolotti, 2005, History of the laser, IOP Publishing.
3. F. Bachmann, P. Loosen, R. Poprawe, 2007, High power diode lasers technology and applications, Springer Verlag.
4. S. Çelen, H. Özden, C. Efeoğlu, K.S. Çelen, 2011, Laser-Induced Micro-Pits: As Bone Stabilizers, Physics Procedia, Elsevier, 12/125-132.
5. S. Çelen, H. Özden, 2012, Laser-induced novel patterns: As smart strain actuators for new-age dental implant surfaces, Applied Surface Science, Elsevier, Vol. 263, 579-585.
6. S. Çelen, 2012, Laser micro-machined semi-slinky like MEMS structures: Novel interface coolers, Optics & Laser Technology, Elsevier, Volume 44, Issue 7, 2043-2048.
7. A. Elijah Kannatey, 2009, Principles of Laser Materials Processing, Wiley.
8. H. Misawa, S. Juodkasis, 2006, 3D Laser Microfabrication Principles and Applications, Wiley Verlag.
9. A. Knitsch, 2007, Laser technology sets the pace, ss. 10-14, Laser Community, Trumpf, 02.
10. E. Brinksmeier, O. Riemer, R. Stern, 2001, Machining of precision parts and microstructures, Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium, 2002, pp 3-11 10th International Conference on Precision Engineering (ICPE) July 18-20, Yokohama, Japan, Springer Verlag, Kluwer Academic Publishers.
11. L. Hao, J. Lawrence, Laser Surface Treatment of Bio-Implant Materials, John Wiley and Sons Ltd,.

12. G. Shannon, 2005, Single Mode Fiber Laser Markers Offer Processing Advantages, Available: www.miyachiunitekn.com.
13. High Speed Thin Metal Cutting using Fiber Laser Technology, Unitekn Miyachi, Available: www.miyachiunitekn.com.
14. Precision Cutting & Drilling of Metals with the LMF2000 Fiber Laser Marker, Available: www.miyachiunitekn.com.
15. G. Shannon, Laser Beam Delivery and Focusing Optics, Available: www.miyachiunitekn.com.
16. Trumpf, Available: <http://www.trumpf-laser.com>.
17. Dahotre N.B. Dahotre, S.P. Harimkar , 2008, Laser fabrication and machining of materials, Springer Verlag.
18. Trumpf, Available: <http://www.trumpf-laser.com>.
19. S.Çelen, H.Özden, E.Uyar, 2014, İterbiyum-katkılı fiber lazerle q-anahtarlamalı modda implant yüzeyi mikro-imalatı ve karakterizasyonu, GU J SCİ Part:C, 2 (2);197-202.
20. Ion J.C., 2005, Laser Processing of Engineering Materials, Principles, procedure and industrial application, Elsevier Publishing.
21. Ready J.F., Farson D.F., 2001, LIA Handbook of Laser Material Processing, Laser Institute of America, Magnolia publishing, Inc.
22. Rofin, www.rofin.com.
23. Trumpf, Available: <http://www.trumpf-laser.com>
24. M.E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha, 2001, Ultrafast Lasers Technology and Applications, Merce Dekker.