

İMALAT ALANINDA YAYGIN OLARAK KULLANILAN MİKRO İŞLEME TEKNİKLERİ

Emre YÜCEL¹, Adem ÇİÇEK²

¹Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Düzce, Türkiye. emreyucel@duzce.edu.tr

²Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye. ademcicek@duzce.edu.tr

ÖZET

İmalat sanayinde gelişen teknoloji ve yüksek hassasiyette parça gereksinimi, mikro işlemeyi ortaya çıkarmıştır. Mikro işleme ile tezgahlar ve iş parçaları minyatürleştirilmekte, malzeme ve güç tüketimi en az seviyeye indirilmektedir. Dünya genelinde hızla büyüyen bu endüstri sayesinde kaynak ve zaman kullanımında yüksek verim elde edilebilmektedir. Bu makalede son yıllarda mikro işleme alanında yapılan çalışmalar gözden geçirilerek farklı mikro işleme teknikleri sınıflandırılmış ve imalat sürecine katkıları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikro işleme teknikleri, Mikro mekanik işleme, Mikro aşındırıcılı işleme

MICRO MACHINING TECHNIQUES COMMONLY USED IN MANUFACTURING FIELD

ABSTRACT

Developing technology and the need for high-precision parts in manufacturing industry has revealed the micro-machining. Machine tools and work pieces are miniaturized through micro-machining, materials and power consumption reduced to a minimum level. High productiveness in the use of resources and time can be obtained through this rapidly growing industry around the world. In this paper, different micro-machining techniques have been classified revising the investigations recently performed in the field of micro-machining and discussed their contributions to manufacturing process.

Key Words: Micro machining techniques, Micro mechanical machining, Micro abrasive machining

1. GİRİŞ

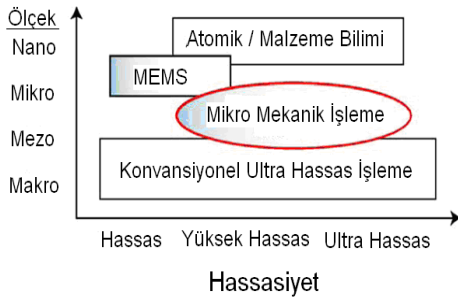
Günümüz imalat teknolojilerinde, minyatür parçaların yüksek hassasiyette imal edilmesinin önemi giderek artmaktadır. Minyatür sistemler, kolay taşınabilme ve kullanılabilme, düşük malzeme ve güç tüketimi, küçük

numune gereksinimleri, yüksek ısı transferi ve daha iyi süreç entegrasyonu ve otomasyonu sağlayabilmektedir [1,2]. Ayrıca böyle sistemlerde, hacimle ilgili kuvvetler (ağırlık/atalet) önemini yitirmektedir. Bunun doğal sonucu ise, çok hızlı mekanik sistemlerin mikro ölçekli dünyada gerçekleştirilebilmesidir [3]. Böylece anlık hareket

edebilen/durabilen mekanizmalardan; çok büyük ivmeli hareketlere dayanabilecek sensörlere kadar, birçok sistemi hayata geçirmek mümkün olmaktadır [4].

Mikro mekanik işleme yaklaşık 60 milyar dolar işlem hacmine sahip, dünya genelinde hızla büyüyen bir endüstridir. Bu hızlı büyüme, makro ölçekli dünya ile mikro ve nano ölçekli dünyaları birbirine bağlayan mikro (0,1-100µm) - mezo (100µm-10mm) ölçekteki parçaları imal etmeye oldukça artan ilgiden kaynaklanmaktadır.

Mikro mekanik işleme 10µm'dan bir kaç milimetre boyut aralığındaki unsurları içeren minyatür cihaz ve parçaları imal etmek için kullanılan bir imalat yöntemidir. Şekil 1'de Mikro mekanik işlemenin çalışma boyutları gösterilmiştir. Konvansiyonel işleme operasyonlarına benzetmesine rağmen, mikro mekanik işleme minyatürleştirilmiş kesici takımlar kullanılarak malzeme yüzeylerini şekillendirmektedir [5].



Şekil 1. Mikro işlemenin çalışma boyutları [6]

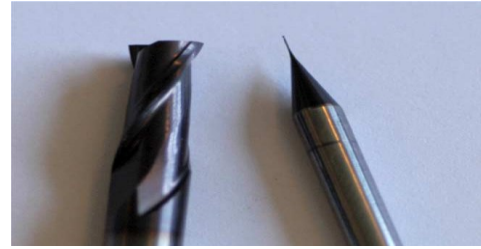
Mikro işleme, özellikle mikro enjeksiyon kalıplarının üretimi için önemli olan 3 boyutlu serbest şekilli yüzeyleri üretme yeteneğine sahiptir. Üstelik fonksiyonel cihazları imal etmek için çeşitli metalik alaşımlar, kompozitler, polimerler ve seramik malzemeleri işleyebilme kapasitesi de vardır. Mikro işlemenin sahip olduğu üstün özellikleri yanında işleme derinliği ve eğik yüzeylerin işlenmesinde bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Entegre mikro işleme teknikleri kullanılması ile bu sınırlılıklar aşılmaya çalışılmaktadır [7].

Bu makalede, dünyada gün geçtikçe daha fazla öneme sahip olan ve ülkemizde henüz yeterince çalışılmamış bir işleme yöntemi olan mikro işleme alanında yapılan çalışmalar gözden geçirilerek işleme yöntemlerine göre sınıflandırılmış ve imalat sürecine katkıları tartışılmıştır.

2. MİKRO MEKANİK İŞLEME

2.1. Mikro Frezeleme

Mikro mekanik işleme süreçleri arasında büyüyen öneme sahip olan mikro imalat süreçlerinden birisi de mikro parmak frezelemedir. Makroskobik parmak frezelemenin doğrudan ölçekte küçülmesi olan mikro parmak frezeleme bir adımda yüksek derinlik oranlı üç boyutlu unsurları işleyebilmektedir. Mikro frezelemede kullanılan 1 mm veya daha küçük çaptaki takımlar, mikro takımlar olarak kabul edilmiş ve son yıllarda 0,05 mm (50 µm) veya daha küçük çapta mikro takımlar ticari olarak üretilmeye başlanmıştır [8]. Şekil 2'de 0,2mm (200 µm) çapında imal edilmiş bir mikro takım gösterilmiştir.



Şekil 2. 6 mm çapında konvansiyonel parmak freze çakısı ve 200 µm çapında mikro parmak freze çakısı [9]

Minyatürleşen parmak freze çakıları takım ömrüne ve parça toleranslarının kontrolüne zarar verici olabilen küçük titreşimler ve aşırı kuvvetlerden oldukça etkilenirler. Bu etkiler neticesinde ortaya çıkan mikro parmak freze çakılarının kesici kenarlarında oluşan zararları, hatta takım kırılmasını algılamak zordur. Bazı araştırmacılar tezgaha monte ettikleri çeşitli sensörler ve görüntü sistemlerini takım aşınması ve kırılmalarını izlemek için kullanmışlardır. Mikro parmak frezelemede takımın diş başına ilerleme hızı konvansiyonel parmak frezeleme ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Bundan dolayı kesme şartlarının nasıl oluşturulacağı çok önemlidir. Kesme şartları uygun değilse, para ve zaman israfına neden olan takım kırılması kolayca ortaya çıkmaktadır. Bunun için mikro parmak frezelemede kesme kuvveti analizi, takım aşınması ve yüzey dokusu, kesme planlarının oluşturulması ve kesme şartlarının belirlenmesi gibi kesme işlemi karakteristiklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır [10,11]. Minyatür takımlar üzerine çok aşırı yükler uygulanabildiği ve küçük titreşimlerin dahi işlemede önemli etkisi bulunduğu için, mikro kesme kuvvetlerinin doğru ölçülmesi ve takım kalitesinin geliştirilmesi önem kazanmıştır. 3 eksenli minyatür kuvvet algılayıcılar kullanılarak mikro kesme kuvvetleri ölçülebilmektedir [12]. Kesme kuvvetlerini önceden saptayabilmek için, bazı matematiksel

modeller geliştirilmiştir [13]. Talaş morfolojisinin kristografik yapısını inceleyen Taylor bazlı matematiksel modeller de kullanılmaktadır [14]. Aynı zamanda sünek malzemelerin mikro işlenmesinde deforme olmamış talaş kalınlığının modellenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu yöntem sayesinde sünek malzemelerin kesme koşullarının belirlenmesinde, deneme yanılma yoluna başvurulmadan, doğru neticeler tahmin edilebilmektedir [15]. Elmas ile kesilen parçaların hassasiyeti takım ile iş parçası arasındaki nispi hareket ile tayin edildiğinden, mikro kesme işleminin fiziksel olarak ortaya çıkışını anlamak gereklidir. Özellikle kritik talaş derinliğinin araştırılması daha hassas işlemeyi gerçekleştirmek için gereklidir. Konvansiyonel kesmede takım kenar radüsü bir kaç milimetre kesme derinliği ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan dikkate alınmamıştır. Ultra hassas kesmede takım kenarının sadece bir kısmı temas ettiğinden talaş açısı daima negatiftir. Bu da kesme derinliğine bağlı olarak kazıma ve kötü yüzeye veya bazen polisaj ve parlak yüzeye sebep olabilmektedir.

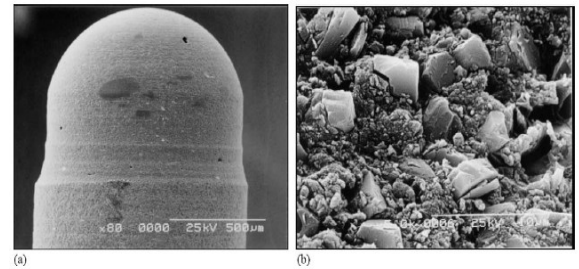
Bundan dolayı araştırmacılar takım-iş parçasının sürtünmesi arasındaki ilişki ve daha yüksek kalitede işlenmiş parçalar üretme amaçlı kritik talaş derinliği üzerine odaklanmıştır. Ultra hassas elmas ile işlemede kritik talaş derinliği deneysel ve teorik olarak incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [16].

Çeliklerden imal edilen serbest şekilli ve yüksek kalite mikro sac ve plastik kalıplar için pazarlar mikro sistemlere olan taleple orantılı olarak olağanüstü bir büyümeyi deneyeceği tahmin edilmektedir. Bununla birlikte sertleştirilmiş çeliklerin mikro işlenmesi, makro ölçekte işleme ile karşılaştırıldığında işlem mekanizmasında farklılıklar ve tahmin edilemeyen takım ömründen dolayı bir sorundur. Yapılan çalışmalarda AISI H13 sertleştirilmiş (45 HRC) sıcak iş takım çeliğinin mikro frezelenmesinde takım geometrisi ve boyut etkisi araştırılmış ve çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Kesici kenar radüsü ile deforme olmamış talaş kalınlığı oranı sertleştirilmiş çeliğin mikro frezelenmesinde kritik bir kontrol parametresidir. Kesici kenar radüsü ile deforme olmamış talaş kalınlığının oranı 1'den daha küçük olduğunda boyut etkisi ciddi boyutlardadır.
- Deforme olmamış talaş kalınlığı takım kenar radüsü ile aynı büyüklükte seçildiğinde takım çeliğinin mikro işlenmesi durumunda en iyi yüzey pürüzlülüğünün elde edildiğini araştırma göstermiştir.

- Kesici kenar radüsü ile deforme olmamış talaş kalınlığı oranının artması ile çapak miktarının azaldığı gözlenmiştir.
- Çapak için en küçük miktar, kenar radüsünden daha büyük deforme olmamış talaş kalınlığında olduğu bulunmuştur. Bundan dolayı optimum mikro frezeleme değişkenlerinin seçimi, en iyi yüzey pürüzlülüğü ve çapak miktarı arasında bir uyum olmasını gerektirmektedir. Mikro işlemede çapak oluşumu kaçınılmaz olduğundan kenar radüsüne eşit olan deforme olmamış talaş kalınlığı ile mikro frezeleme en iyi yüzey pürüzlülüğü ve mantıklı düşük çapak miktarını verecektir.
- Devir sayısı, aksel derinlik ve takım kaplamalarının uygun kullanımı gibi diğer kesme parametrelerinin optimize edilmesi ile daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmek için büyük bir faaliyet alanı vardır.
- Mikro frezelemede kesici takım geometrisi, yüzey pürüzlülüğünü ve çapak miktarını önemli derecede etkilemektedir. Yuvarlatılmış veya pahlandırılmış geometriler daha iyi yüzey pürüzlülüğünü elde etme bakımından daha uygun bulunmuştur [17].

Mikro takım geometrisi sert metallerin mikro frezelenmesi için kesme şartlarının seçiminde önemli bir rol oynamaktadır [18,19]. Mikro yuvarlak uçlar özellikle taşlama işlemlerinde kullanılmaktadır. Yuvarlak yüzeye yüksek yoğunlukta (%87) keskin kenarlı tanecikler giydirilmektedir. Yapılan uygulama sonucunda deforme olmamış talaş kalınlığına bakılarak yüzey kalitesinin iyi olduğu görülmüştür [20]. Şekil 3'te mikro ucun yapısı gösterilmiştir.

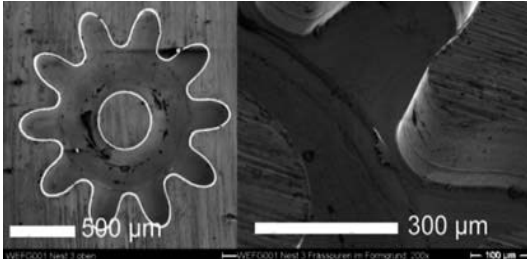


Şekil 3. Mikro ucun (a) genel ve (b) kaplanan taneciklerin yüzey morfolojisi [20]

Mikro frezeleme işleminde, kuvvetli tırlama titreşimleri görülebilmektedir. Mikro işlemede oluşan tırlama, takım aşınmasına ve işlenen parçanın kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Tırlama kararlılığının sağlanması ile iyi

bir işleme kalitesi elde etmek ve yüksek kesme hızlarında çalışmak mikro işlemede mümkündür [21]. Yüksek kesme hızlarında fener milinin termal analizi yapıldığında termal hataların büyük oranda azaltılabileceği görülmüştür [22]. Mikro işlemede termal izolasyona yönelik çalışmalar da halen sürmektedir [23]. Takım kırılması ve aşınmasını tahmin etmek için dinamometreler, termokupullar ve akustik emisyon sensörleri gibi cihazlar geliştirilmiştir.

Mikro plastik kalıplar mikro parçaların üretimi için yapılan plastik ve metal enjeksiyon baskı yapabilen nano/mikron düzeyinde hassasiyete sahip kalıp çeşididir. Bu kalıpların üretiminde kullanılan malzemelerin sertliği, işlenebilirliği, yüzey kalitesi ve ısıya dayanımları çok yüksek olmalıdır. Kalıp formları çok küçük olduğundan kalıbın deforme olma tehlikesi de artmaktadır. Bu kalıplardan çıkan mikro parçalar, ağırlıkları 1 gramdan az olan, toleransları 0,002 – 0,005 mm arasında olan mikroskobik parçalardır. Şekil 4'te mikro dişli için çelik kalıp boşluğu (52 HRC) ve frezelenmiş kenarın detayı gösterilmiştir.

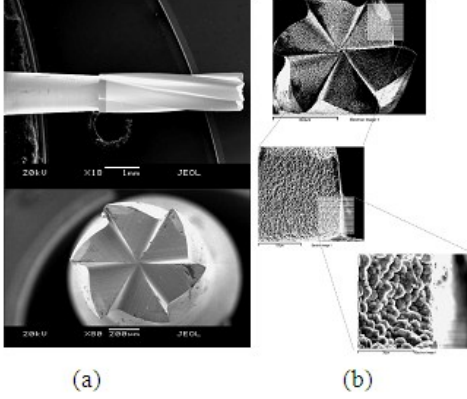


Şekil 4. Mikro dişli için çelik kalıp boşluğu (52 HRC) ve frezelenmiş kenarın detayı [18]

Mikro elektronik ve mekanik sistem aygıtları imal etmek için kullanılan frezeleme veya delik delme takımları gibi mikro takımların takım ömürlerini uzatmak ve performansını iyileştirmek için koruyucu kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Elmas ultra yüksek sertliği ve düşük sürtünme katsayısı gibi mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Kesici takımlar üzerine elmas biriktirmek için kullanılan en popüler yüzey işleme teknolojilerinden biri kimyasal buhar biriktirmedir (CVD – Chemical Vapor Deposition). Kimyasal buhar aracılığı ile biriktirilen elmas tabakalar mükemmel fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı kesici takım uygulamaları için son yıllarda dikkate değer bir ilgi çekmiştir. Bununla birlikte yapışkan yüksek kalite elmas tabakanın sementit karbür, paslanmaz çelik ve bağlantı elementini kapsayan çeşitli metal alaşımları gibi alt katmanların üzerine biriktirilmesinde sorun yaşanmaktadır. Genellikle alt katmana elmas tabakaların yapışması zayıftır ve çekirdeklenme yoğunluğu çok düşüktür. Bu eksikliklerin üstesinden gelinebilirse, CVD elmas kaplamaların, yüksek

aşındırıcı demir esaslı olmayan metalik alaşımlar, borosilikat cam, porselen veya akrilik diş, doğal insan diş ve seramik malzemeleri işlemek için uygulandığında, mikro kesici takımların ömrünü dikkate değer bir şekilde arttırmaktadır.

Kobaltın varlığı ilave takım tokluğu sağlar fakat elmas tabakasının yapışması üzerine yan etkisi vardır. En önemlisi işlem görmemiş WC-Co alt katmanı üzerine yapışkan elması biriktirmek oldukça zordur. Elmas film tabakalar modifiye edilmiş HFCVD (Hot Filament Chemical Vapour Deposition-Isınan Filaman Kimyasal Buhar Biriktirme) işlemi kullanılarak kimyasal olarak aşındırılmış sementit WC-Co mikro freze çakıllar ve matkaplar üzerine başarılı bir şekilde biriktirebilmektedir [24]. Mikro takımların ön işleme tabii tutularak asitle aşındırılması ile takım yüzeyinden kobalt bağlayıcı kaldırılmaktadır. Modifiye edilmiş HFCVD işlemi çok kristalli elmas film tabakalarla mikro sementit WC-Co takımlar uniform olarak kaplamanın başarılı bir yöntemi olarak literatüre sunulmuştur [25,26]. Şekil 5'te CVD yöntemi ile elmas kaplamadan önce mikro matkabın kesici kenarlarının SEM fotoğrafı ve CVD yöntemi ile elmas kaplandıktan sonra mikro matkabın kesici kenarlarının SEM fotoğrafı gösterilmiştir. Elmas kaplı 300 µm çapındaki tungsten karbür mikro parmak freze çakıllarının performansı 6061-T6 alüminyumun kuru kanal frezelenmesinde kaplanmamış WC-Co mikro parmak frezelerin performansı ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Takım aşınması, kaplama bütünlüğü ve talaş morfolojisi, SEM ve beyaz ışık interferometre kullanılarak karakterize edilmiştir. İlk sonuçlar, takım bütünlüğünde önemli derecede bir iyileşme (yani köşelerde kırılma olmaması), düşük bir aşınma oranı, BUE oluşmaması ve kesme kuvvetlerinde önemli derecede azalma (>50%) olduğunu göstermiştir. Kesme kuvvetlerinin azalması, elmas kaplamanın düşük sürtünme katsayısından dolayı BUE oluşmamasına atfedilmiştir. Bununla birlikte, ince taneli elmas ile daha kalın kaplanan takımların yaklaşık %80'i delaminasyondan dolayı deney esnasında başarısız olmuştur [27,28]. WC-Co takımlar üzerine elmas biriktirmek için geliştirilen farklı bir yöntem ise modifiye edilmiş dikey ısınan filaman kimyasal buhar biriktirme yöntemidir. Elmas kaplı WC-Co kesici, kaplamasız WC-Co kesici ve elmas katkılı (sinterlenmiş) kesicinin performansı, insan diş, borosilikat cam ve porselen diş gibi çeşitli malzemelere bir takım delikler delinerek karşılaştırılmıştır. Elmas kaplı WC-Co mikro matkaplar ve kaplamasız elmas matkaplar alüminyum alaşımları üzerinde test edilmiş ve kaplamasız takımlarla elmas kaplamalı takımlar karşılaştırıldığında %300 bir iyileşme sağlanmıştır [29].



Şekil 5. CVD yöntemi ile elmas kaplamadan önce (a) ve CVD yöntemi ile elmas kaplandıktan sonra mikro matkabın kesici kenarları (b) [30]

Alternatif kaplama yöntemleri denenerek, sert ve kırılğan parçaların imalatı için son yıllarda çalışmalar yapılmıştır [31]. Krom Nitrür (CrN) kaplamalar, yüksek sertliğin yanı sıra düşük sürtünme katsayısından ve kaplamaların yüksek aşınma direncine sahip olmalarından dolayı tribolojik şekillendirme ve döküm uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanında CrN kaplamalar kötü çevre şartları altında mükemmel korozyon direnci ve 700C°'ye kadar üstün oksidasyon direnci göstermektedir.

Elmas benzeri karbon (DLC-Diamond Like Carbon) kaplamalar düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncini içeren mükemmel tribolojik özelliklere sahiptirler. Son yıllarda araştırmacılar DLC kaplamaların adhezyon dayanımı ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için orijinal a-C veya a-C:H tabakasına ilave metal malzemeler eklenmesi ile a-C;Me veya Me-C;H kaplamalar olarak bilinen DLC kaplamaların yeni bir sınıfını geliştirmişlerdir. Nitrojenin DLC tabakasına eklenmesinin önemli derecede tribolojik, elektronik, optik ve kimyasal faydalar sağladığı görülürken nitrojen katkılı elmas benzeri karbon kaplamalar (örneğin; Zr-C;H;N) literatürde nispeten az yer bulmuştur. M2 çelik disklerin ve mikro matkaplar üzerine %0'dan %25'e kadar aralığında nitrojen içerikli Zr-C;H;N kaplamalar biriktirilmiş ve her bir kaplamanın tribolojik özelliklerini ve yüksek hızlarda işleme performansını araştırmak için bir takım deneysel çalışmalar yapılmıştır. M2 çelik disklerin ve mikro matkaplar üzerine nitrojen içerikli Zr-C;H;N kaplamalar biriktirmek için kapalı alan dengesiz manyetron sıçratma sistemi kullanılmıştır. Kaplanmış mikro matkapların delme performansı baskı devre kart numuneleri kullanılarak yüksek hızlarda boydan boya delik delinerek değerlendirilmiştir. Zr-C;H;N_{17%} kaplamanın optimum işleme performansına sahip olduğunu sonuçlar göstermiştir. Bu matkaplar kaplamasız matkaplar

ile karşılaştırıldığında kaplamalı takımın ömrü en az dört kat artmakta ve işleme kalitesinde önemli iyileşmeler sağlanmaktadır [32].

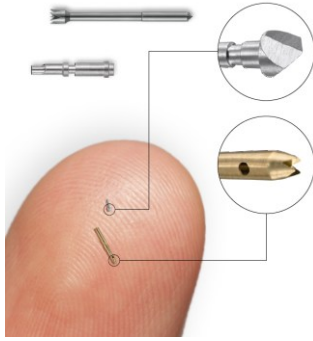
Makro frezelemede uygun PVD kaplamalar, işleme performansını iyileştirmek ve daha yüksek kesme hızlarına ulaşabilmek ve kuru işleme şartlarını sağlayabilmek için tercih edilmektedir. Mikro takımlar frezelemede kullanıldığında deforme olmamış talaş kalınlığı genellikle çok küçük ve kesici kenar radüsü ile karşılaştırılabilir. Bu şart efektif talaş açısını belirler ve dolayısıyla mikro işleme mekanizmasında önemli rol oynamaktadır.

Sıcaklık değerleri, kesme kuvvetleri ve plastik şekil değiştirme hızları; geleneksel işleme ve mikro işlemede farklılık göstermektedir. Makro ve mikro işleme arasındaki farklılık, sıcaklık, kuvvetler, plastik şekil değiştirme ve plastik şekil değiştirme hızları gibi süreç faktörlerini etkiler. Mikro takımların boyutlarından dolayı kesici kenarlar çevresinde uniform kaplama yapmak teknolojik bir sorun oluşturmaktadır. Bu alanda yapılan bir araştırma ile PVD kaplamaların geniş bir aralığı takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve çapak miktarı gibi kriterler açısından değerlendirilmiştir. Kaplamalı takımlarla kaplamasız ultra ince taneli karbür takımlarla karşılaştırıldığında, TiN kaplamaların, takım aşınması ve işlenen yüzeyin kalitesi bakımından en iyi performansı gösterdiğini sonuçlar açık bir şekilde göstermiştir. Deneyler, TiN kaplamanın yanak aşınması, çatlama, kenar radüs aşınması, yüzey kalitesi ve çapak miktarı bakımından H13 takım çeliğinin mikro frezelenmesinde sürekli en iyi performansı gösterdiğini kanıtlamıştır [33].

Mikro frezelemede performans ve verimlilik bakımından önemli bir artış sağlamak için daha yüksek devir sayıları ve artan talaş hacmi gerekmektedir. Bununla birlikte talaş hacmindeki artış, takım çapının doğrudan bir sonucu olarak takımların küçük eğilme direnci ve mukavemeti ile kısıtlanmaktadır. Lazer yardımıyla kesme bölgesinde iş parçası malzemesinin akma dayanımını lokal olarak azaltarak talaş hacmi ve verimliliği artırmak için bir potansiyel vardır. 6061-T6 alüminyum ve 1018 çeliğinin mikro frezelenmesi üzerine lazer ile ön ısıtmanın etkisi araştırılmış ve iki kanallı 300 µm çapında karbür parmak freze çakıları 40.000 dev/dak devir sayılarında 100 µm derinliğinde kanallar açmak için kullanılmıştır. Sonuçlar, 6061-T6 alüminyum ve 1018 çeliğinin ön ısıtma yapılarak kuru işlenmesi esnasında talaş yükü ve verimliliğin önemli derecede artabildiğini göstermiştir [34].

2.2. Mikro Tornalama

Mikro tornalama, mikro ölçekteki unsurları imal etmek için çapı 10 µm'a kadar küçük minyatür tornalama takımları kullanılmaktadır. Şekil 6'da mikro tornalama işlemi sonucu üretilen parçalar gösterilmiştir. Konvansiyonel ve mikro işleme kinematik olarak benzer olmakla beraber, mekaniğinde (yani talaş kaldırma mekanizması) önemli farklar vardır. Bu farklar takım-geometri, takım-malzeme ve iş parçası-malzeme karakteristikleri ile ilişkilendirilen ölçekleme etkilerinden dolayı fiziksel olaylardaki değişimlerden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6. Mikro tornalama ile imalat [35]

Mikro silindirik parçaların üretimi için mikro tornalama sistemleri geliştirilmiştir. 0,3 mm çapındaki iş parçaları, 15.000 dev/dak ve 10 µm kesme derinliğinde işlenebilmektedir. Mikro torna tezgahlarının işleme hassasiyeti, optik mikroskop yardımıyla tespit edilir. [36]. Mikro tornalama ile yüksek hassasiyet değerlerine ulaşılmaktadır. Pirinç malzeme işlenerek, 0,20 µm yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve 0,19 µm dairesellik değerlerine, paslanmaz çelik (AISI 304) malzeme işlenerek, 0,06 µm yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve 0,05 µm dairesellik değerlerine ulaşılmıştır [37,38].

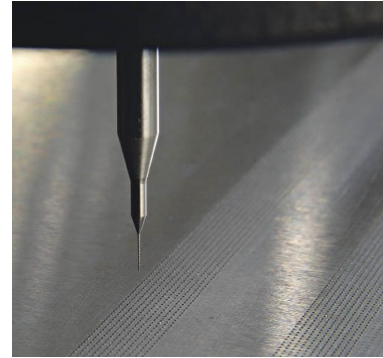
Yüzey pürüzlülüğü değeri kesici takım geometrisi ve ilerleme faktörlerinden önemli derecede etkilenmektedir [39,40]. Mikro takımlar kaplanarak kesme performansları ve aşınma dirençleri artırılmaktadır [41].

2.3. Mikro Delme

Mikro matkaplar genellikle cihazların minyatürleştirilmesi için baskı devre kartlarının imalatında daha küçük çaplı boydan boya deliklerin delinmesinde kullanılmaktadır. Tabaka kalitesini etkileyen önemli faktör delinen deliğin duvarının yüzey pürüzlülüğüdür. Delik duvarlarının yüzey pürüzlülüğü ise kaplama kalitesini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bununla birlikte delme şartları ve baskı devre kartlarının malzeme özellikleri gibi yüzey

pürüzlülüğünü etkileyen birçok faktör vardır. Konvansiyonel kobalt bağlayıcılı sementit tungsten karbür mikro matkaplar genellikle yüksek kesme hızlarında çalıştırıldıklarında düşük kesme verimliliği ve kısa takım ömürlerine sahiptirler.

Bu malzemelerle mikro takımlar imal etmek nispeten pahalı olduğundan takım ömrünü ve servis performansını iyileştirmek oldukça istenen bir durumdur. Bu yüzden mikro matkaplara kaplama işlemi sıklıkla uygulanır [42]. Mikro matkaplarda takım ömrünü etkileyen faktörlerden biri de, delme işlemi sırasında meydana gelen titreşimlerdir [43,44]. Mikro matkapların takım ömürlerini ve performanslarını arttırmak için titreşim değerleri düşürülmeli ve delme işlemi sırasında bu değerler sürekli kontrol edilmelidir. [45,46]. Mikro delme işlemi etkileyen bir diğer önemli faktör kesme sıvılarıdır. Mikro matkaplarda, yüksek hızdan dolayı deliklerde sıkışan talaşı rahat tahliye edebilmek için mineral yağlar ve kimyasal yağlayıcılar kullanılmaktadır[47]. Şekil 7'de mikro delme işlemi gösterilmiştir.

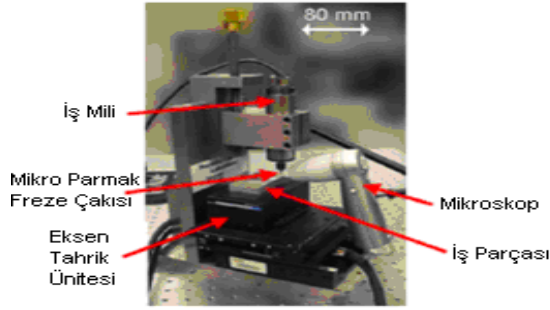


Şekil 7. Mikro delme [48]

2.4. Mikro Mekanik Takım Tezgahları

Mikro ürünlerin boyutu ve kalitesi, bu parçaları imal etmek için kullanılan takım tezgahlarının hassasiyet ve dinamik performansını içeren özelliklerine bağlıdır. Takım tezgahının kabiliyeti ve kalitesi, boyut, hassasiyet, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal tekrarlanabilirlik gibi ürün gereksinimleri için hayati önem taşımaktadır. Mikro işleme uygulamalarında iş milinin dönme hızı küçük takım çapı talaş kaldırma hızını azalttığından kabul edilebilir verimliliği sürdürmek için çok yüksek olmalıdır. Dönme momenti gereksinimleri yüksek olduğunda eğik bilyeli yataklı elektrik motorları kullanılmaktadır. Eğik bilyeli yataktaki sürtünme iş milinin termal genleşmesine neden olduğundan, iş mili motorunu yaklaşık 60.000 dev/dak ile sınırlamaktadır. Daha yüksek devir sayıları gerektiğinde

hava türbinli havalı yataklı iş milleri genellikle kullanılmaktadır. Fakat bu iş milleri ile çok düşük dönme momenti elde edilmektedir. Havalı yataklı iş millerinin 200.000 dev/dak'ı aşmamak suretiyle ticari olarak kullanımı uygundur. Şekil 8'de 3 eksen kontrollü imal edilmiş örnek bir mikro freze tezgahı örneği verilmiştir.



Şekil 8. 3 eksenli bir mikro freze tezgahı [49]

Mikro takım tezgahları mikro parçaları imal etmek için çok yüksek pozisyonlama ve tekrarlamaya hassasiyet değerlerini sağlamalıdır. Ultra hassas takım tezgahlarında genellikle lineer tahrik motorları ve bu motorları kontrol eden bir kontrol sistemi kullanılmaktadır. Bilyeli vidalı miller gibi konvansiyonel tahrik mekanizmaları ile karşılaştırıldığında, lineer motorların sürtünmeden dolayı enerji kaybı ve motor bağlantılarından kaynaklanan hataları, aşınmadan dolayı hassasiyet kaybı ve boşluklu çalışmadan kaynaklanan hataları yoktur. Aynı zamanda bu lineer tahrik sistemlerine sahip olan tezgahlar çok yüksek ivmelenme sağlayabilmektedir. Lineer tahrik sistemleri kullanılarak ultra hassas takım tezgahları için sağlanan tipik hassasiyet $\pm 1\mu\text{m}$ 'dur. Ultra hassas mikro takım tezgahlarının yüksek rijitlik, sönümleme ve hassas sensor ve aktüatörleri hassas bir şekilde çalıştırma yeteneğini içeren bazı avantajları vardır. Sürdürülebilir bir gelecek için, mikro cihazların kullanımı ve üretiminde hızlı bir artış olacağı öngörülmektedir. Mikro işleme sektörünün karşı karşıya kaldığı en önemli sorun, tecrübeli yetişmiş eleman sayısının yetersiz kalmasıdır [50].

3. MİKRO AŞINDIRICILI İŞLEME

3.1. Mikro EDM

Mikro EDM ile işleme, minyatür parçaların ve bunların bileşenlerinin imalatı için geliştirilen bir işleme yöntemidir. Mikro EDM işlemi ve EDM işleme tezgahları, kullanılan

darbe jeneratörü, X,Y,Z eksen hareketlerinin kararlılığı ve kullanılan takım boyutları bakımından farklılaşırlar. Mikro EDM ile işleme tekniğinde, darbe jeneratörü mikro ve nano saniyeler mertebesinde elektriksel darbeler üretebilmektedir. Takım hareketlerinin kararlılığı ise 1 μm seviyelerindedir. Böylelikle, mikro EDM ile işleme tekniğinde, küçük hacimlerde malzeme kaldırılabilen ve takım eksenlerinin hassas ve kararlı hareketi ile birlikte mini ve mikro düzeyde parçalar üretilebilmektedir. Bu işleme tekniğini çok önemli kılınan faktör, malzeme sertliğine bakılmaksızın, iletken ve yarı iletken malzemelerin, yüksek yüzey kalitesi ve hassasiyette işlenebilmesidir. Bu sebeple, yüksek verimlilik ve hassasiyet gerektiren çok sert malzemelerin işlenmesinde tercih edilmektedir [51].

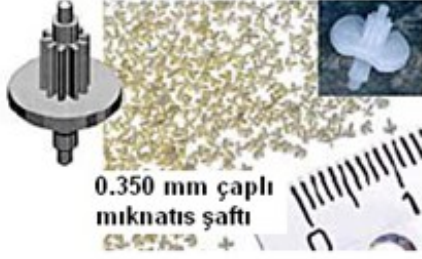
Mikro EDM ile işleme yöntemi, mikro delikler, mikro donanımlar ve mikro dişliler gibi mikro yapıların imalatı için önemli fırsatlar sağlar. İşleme sırasında takım ve iş parçası arasında temas meydana gelmediğinden oluşan kuvvetler oldukça küçüktür. Alışılmış imalat yöntemlerinin aksine, iş parçası ve takım elektrotları üzerinde mekanik gerilme ve titreşim problemleri oluşmadığından, işlem sırasında, çok ince takım elektrotları kullanılabilir. Böylelikle, bu imalat yöntemi ile 10 μm 'den küçük ve %20 boyut hassasiyetinde kör delikler delinebileceği gibi, sayısal kontrollü takım hareketleri kullanılarak, karmaşık şekiller iş parçası üzerine işlenebilmektedir. Mikro ölçekli akış kanallarının delinmesinde, modelleme yapılarak en iyi sonuçlar alınması amaçlanmaktadır [52].

Mikro elektro erozyon yöntemi ile işlemenin birçok avantajına karşın, düşük işleme hızı, takım elektrotunun işleme sırasında aşınması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Aynı zamanda, konik ve kör delik işlemede sorunlarla karşılaşılabilir [53]. Dar işleme boşluğu bulunması ise ayrı bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır [54]. Takım elektrotunun işlem sırasında aşınması, iş parçasının boyutsal deformasyonuna yol açmaktadır. Bu durum, işlem sırasında, iş parçası üzerinde istenilen boyutsal hassasiyete ulaşmak için takım elektrotunun yenilenmesini gerektirmektedir. Mikro EDM ile işlemede çeşitli işleme teknikleri kullanılmaktadır. Bunlara mikro EDM ile delme, mikro EDM ile boşaltma, tel erozyon ile işleme örnek olarak verilebilir. Bu tekniklerin bir bölümü ya da hepsi, günümüz mikro elektro erozyon tezgahlarında bütünleşik olarak kullanılmaktadır [55,56]. Şekil 9'da EDM ile işlenmiş bir parça örneği gösterilmiştir.

3.2. Mikro Aşındırıcı Jet İşleme

Aşındırıcı Jet Mikro İşleme (MAJM)'de katı parçacıklar erozyon etkisi oluşturarak iş parçasına şekil vermekte olup,

hızlı prototipleme ve mikro akışkan cihazların üretiminde kullanılır. Mikro elektronik cihazlarda kanal ve delik işleme için yararlı bir tekniktir. Cam ve diğer sert malzemeler bu yöntemle işlenebilmektedir [58]. Özellikle küçük ölçekli, örneğin 100 µm'den az derinlik ve genişlikteki kanallar için, geleneksel aşındırıcı jet işlemeye göre doğruluk ve tekrarlanabilirliği çok daha iyidir.



Şekil 9. EDM ile imalat [57]

MAJM çok ince parçaların işlenmesine de çözüm sunmaktadır [59]. Diğer mikro işleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında MAJM'nin, yüksek aşındırma oranı, düşük işletme maliyeti ve çok farklı malzemeleri işleme yeteneği gibi birçok avantajı bulunmaktadır. MAJM'nin akışkanlığını ve sıkıştırılabilirliğini tane boyutu ve nem oranı büyük ölçüde etkilemektedir. Nem taneler arasında yapışmaya sebebiyet vermektedir. Nemi önlemek için aşındırıcı tozlar haznedeki uzun süre (bir gece) bırakılmamalıdır [60]. Malzeme kaldırma oranı işleme sürecinin en önemli etkenlerinden biridir. Bu konunun daha iyi anlaşılması için akıllı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Kanal işleme sonucu ortaya çıkan sonuçlarla, oluşturulan modelin uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Sonuçlar arasında sadece %1 oranında sapma belirlenmiştir. Oluşturulan bu model mikro işlemede verimli ve etkili operasyonlar için temel bir optimizasyon sağlamaktadır [61].

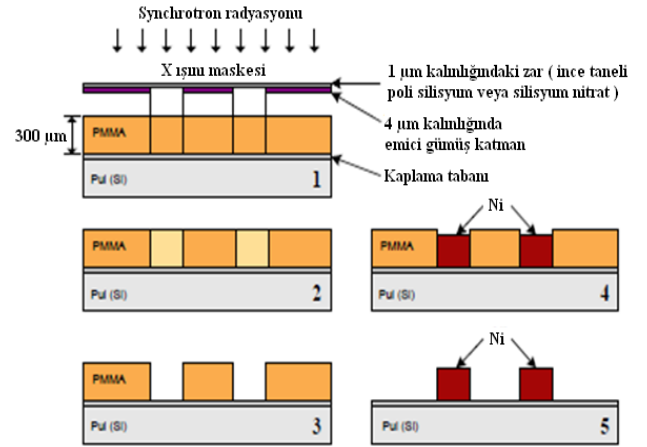
4. DİĞER MİKRO İŞLEME YÖNTEMLERİ

Geleneksel mikro işlemede sabit geometri kesici takımlar ve aşındırıcılar diğer mikro işleme yöntemlerinde ise akışkan aşındırıcılar kullanılmaktadır. Lazer ile işleme, LIGA, iyon ışını ile işleme ve proton demeti ile işleme bu gelişmiş yöntemlere örnek olarak verilebilir [62].

4.1. LIGA

Terim olarak, LIGA Almanca Lithographie (Litografi), Galvanoformung (Elektro-kaplama), Abformung (presle kalıplama) terimlerinin baş harflerinden oluşturulmuştur. Bu

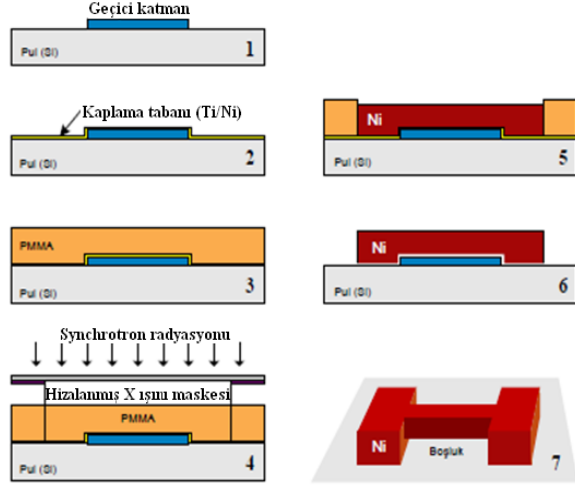
işlemede, pleksi-glasaya benzeyen PMMA (poli-metil-met-akrilit) malzemesi (foto-polimeri) kullanılır [63]. Şekil 10'da gösterildiği gibi, PMMA özel bir maske yardımıyla, nispeten yüksek enerjili bir X-ışını radyasyonuna (synchrotron radiation) maruz bırakılmaktadır. Açıkta kalan PMMA'nın moleküllerinden bazılarının bağları kopar ve kimyasal olarak değişime uğramış PMMA çözülebilir hale gelir. Metil-iso-bütül-keton (MIBK) ya da iso-propil-alkol (IPA) içeren özel bir kimyasal çözelti banyosu aracılığıyla değişime uğramış PMMA çözülür. Bu yöntemde oldukça yüksek duvarlı yapılar (0.3mm) büyük bir hassasiyet (0.1-0.3µm) ile üretilebilir. Daha sonra açıkta kalan kısımlar metal (Cu, Au, Ni) bir tabakayla (elektro-kaplama tekniğiyle) kaplandıktan sonra, kalan PMMA kimyasal yöntemlerle ayrılır. Metal en son yapı olabileceği gibi, gerekirse, enjeksiyon kalıbı olarak kullanılarak değişik tipteki plastik parçalar üretilebilir.



Şekil 10. Temel LIGA tekniği [64]

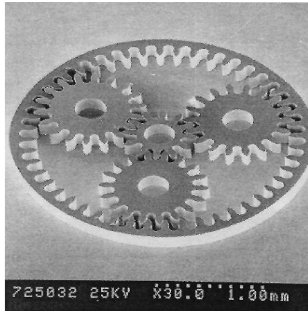
Yukarıda sözü edilen LIGA tekniği tek aşamalı bir işlem olup, prizmatik mikro-yapıların üretilmesi için uygundur. Ancak geçici bir malzeme katmanı yardımıyla, hareketli mikro-ölçekli parçalar da üretilebilmektedir [65]. SLIGA (Sacrificial LIGA) adı verilen bu teknikte, Titanyum (Ti) en çok kullanılan malzemedir. Çünkü Ti elektro-kaplama işleminde kullanılan temel metallere (krom, nikel, bakır, altın vs.) iyi yapışmasının yanında; sözü konusu metallere zarar vermeyen hidroflorik asit yardımıyla da kolayca kazanabilir. Şekil 11, bu işlemin temel adımlarını göstermektedir. Silisyum pulun üzerinde geçici bir katman oluşturulduktan sonra, bunun üstü (elektro-kaplama tabanı işlevini görecek) ince bir Ti katmanı ile kaplanır. Ardından üzerine PMMA dökülüp, fırınladıktan sonra, yeni oluşturulan foto-polimer katmanı uygun olarak

şekillendirilir. Elektro-kaplama tekniği kullanılarak, açığa kalan kaplama tabanının üzeri Nikel (Ni) ile kaplanır. Daha sonra, PMMA ve kaplama tabanı alınır; böylece geçici katmana erişim kolaylaşmaktadır. Geçici katman kimyasal olarak kazındıktan sonra, Nikel yapı serbest kalır.



Şekil 11. Geliştirilmiş LIGA tekniği [65]

Bu yöntem kullanılarak, tek bir entegre devre üzerinde binlerce karmaşık yapı mekanik sistem son derece ekonomik olarak üretilebilir. Mikro- türbinler, dişli çarklar, elektrikli motorlar, ivme ve basınç sensorları bu teknikte üretilebilen mikro-sistemlerin başında gelir. Şekil 12'de Geliştirilmiş LIGA (UW-MEM) tekniğiyle üretilmiş planet dişli mekanizması görülmektedir.



Şekil 12. Geliştirilmiş LIGA tekniğiyle imal edilmiş planet dişli [65]

4.2. Mikro Lazerle İşleme

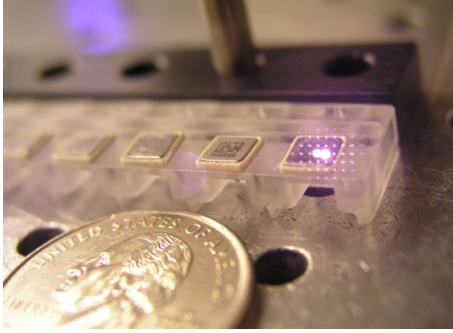
Lazer ışın demetinin mikron seviyesinde bir alana odaklanabilir olması, önceleri imkânsız olarak değerlendirilen birçok konstrüksiyonun imalatını mümkün kılmaktadır. Lazer ile oyma, özellikle dar ve karmaşık şekillerin işlenmesinde, kalıp, model v.b. yapımında kullanılan talaşlı işlemeye alternatif bir yöntem olduğu düşünülmektedir. Lazerle işleme tekniğinde herhangi bir kalıp ve takıma ihtiyaç yoktur. Dolayısıyla takım ve kalıp kaynaklı işleme hataları söz konusu değildir [66,67]. Bu temel avantajlarının yanında lazerle işlemenin temelinde başka avantajlar da vardır ve bunlar bu tekniği alternatif işleme tekniklerine göre öne çıkarmaktadır. Bu avantajlar;

- Alternatif yöntemlere göre ekonomiklik,
- İşlem görmüş yüzeyde daha az deformasyon,
- Çalışma kolaylığı,
- Seri imalata uygunluk.

Lazerle oyma işleminin temelini, bir lazer ışının iş parçası üzerine odaklanması ve iş parçası üzerinde hareketi oluşturmaktadır [68]. Yüksek güç yoğunluğundaki bir lazer ışını doğrudan iş parçasına odaklanır ve bu ışın, belirlenen geometride hareket ederek tabakalar halinde metali buharlaştırır. Bu ışın aracılığıyla iş parçasına enerji aktarımı söz konusudur [69,70]. Lazer ışını, kazıma tepkimesini hızlandırmak için kullanılır.

Mekanik ve optik yöntemler kullanılarak yönlendirilen lazer ışını, taradığı yüzeydeki bir nokta üzerinde biriktirme tepkimesini başlatır. Ardından, arzu edilen bir başka noktada Boron gelişimini sağlamak amacıyla, ışın başka noktalara yönlendirilir.

Bu teknikte, (lazerin gücüne bağlı olarak) amorf ya da kristal yapısında Boron mikro-yapılar üretmek mümkündür. M2 takım çeliğinin 2 ila 450GW/cm² yoğunluk arasında lazerle işlenmesinde maksimum delme oranları 355 ve 532 nm lazer dalga boyunda elde edilmiştir [71]. Yüksek kimyasal kararlılık ve mekanik sertliğinden dolayı SiC elektromekanik sistemlerde yaygın kullanılan bir malzemedir. Katı hal lazeri ile 400 µm kalınlığındaki 3C-SiC malzemesi yüksek delme hızı ile kaliteli olarak işlenebilmektedir [72]. Şekil 13 'te mikro lazerle işleme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 13. Mikro lazerle imalat [73]

4.3. Proton ve İyon Demeti Yazma

Proton Demeti Yazma (PBW-Proton Beam Writing), malzemeye karşı MeV protonlarıyla odaklanmış ışın kullanılarak yapılan yeni, doğrudan bir yazma işlemidir. Yüksek nüfuz oranı mikro/nano işleme için uygundur [74]. Proton Demeti Yazma (PBW) yöntemiyle özellikle silikon malzemeler işlenmektedir [75]. Bu yöntem başlangıçta mikro elektronik endüstrisi için geliştirilmiştir. Son zamanlarda ise biyo uyumlu polimerler, biyo sensorlar gibi biyo malzemelerin imalatı için kullanılmaktadır [76].

5. SONUÇ

Mikro işleme teknolojileri ile mikro ve mezo boyuttaki ürünler kolay taşınıp kullanılmakta, minimum miktarda malzeme ve güç harcanarak, karmaşık yapıli sistemler daha önce olmadıkları kadar küçük boyutta ve yüksek esneklikte üretilebilmektedir. Küçülen ürün boyutlarından dolayı, mikro işleme geleceğın imalat sektöründe, temel bir işleme yöntemi olmaya adaydır.

Mikro işleme yöntemlerinden en yaygın kullanılanı, mikro mekanik işlemedir. Mikro mekanik işleme ile kompleks geometriye sahip parçalar, CAD/CAM paket programları yardımı ile bilgisayar kontrollü tezgahlarda tek işlem basamağında imal edilebilmektedir. Ancak bu tür işleme sırasında kesici takım, sıklıkla titreşimlere ve ani yüklemelere maruz kalarak kırılmaktadır. Bu da işleme maliyetlerini oldukça artırmaktadır.

Bu durumda yapılması gereken kesme parametrelerinin ve işleme şartlarının optimize edilmesidir. Aynı zamanda takım ömrünün artırılması için kesici takımlar üzerine kaplama yapılması takım maliyetleri açısından önem arz etmektedir. Kesici takımlar üzerine yapılan kaplamalar ile takım ömrünün önemli derecede arttığı literatürde bildirilmiştir. Mikro takımlarda kullanılan en etkili kaplama yöntemi CVD ve etkin kaplama malzemeleri ise elmas ve elmas benzeri karbon olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat elmasın

sementit karbür takımlar üzerine yapışma eğilimi düşük olduğu için farklı CVD kaplama yöntemleri kullanılmıştır.

Diğeri bir yaygın kullanılan mikro işleme yöntemi ise mikro elektriksel aşındırma yöntemidir. Bu yöntem biyomedikal uygulamalar için gelecek vaat eden bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel yöntemlere göre takım maliyeti ve işlenen yüzey hassasiyeti bakımından diğeri yöntemlere göre daha iyi sonuç vermektedir. Özellikle sertleştirilmiş parçaların işlenmesinde etkili bir yöntem olduğu bilinmekte olup diğeri yöntemlerden farkı bu açıdan belirginleşmektedir. LIGA mikro işleme yöntemi sayesinde ise elektrokimyasal kalıplama ile istenen karmaşıklığıdaki minyatür parçalar kısa sürede imal edilebilmesine rağmen işleme maliyetlerinin yüksekliği bu yöntemin en büyük dezavantajıdır. Mikro lazerle işleme ile işlenen yüzeyin kalitesini bozmadan, seri bir şekilde imalat yapılabilmektedir. Bu yöntem sadece 2 boyutlu mikro işlemede etkin yöntemdir. Proton ve iyon demeti yazma, mikro işleme teknolojisinin ulaştığı son noktadır. Bu teknolojinin geliştirilmesi biyomalzeme imalatını oldukça kolaylaştırmıştır.

Genel olarak mikro işleme yöntemlerinde, işleme derinliği, eğik yüzeylerin işlenmesi gibi alanlarda sorunlar yaşanabilmektedir. Bu sınırlılıkları aşmak ve daha kaliteli ürünler imal edebilmek için, mikro işleme tekniklerinin karma (hibrid) olarak kullanılacağı teknolojiler üzerinde çalışılmaktadır. Dünya üzerinde kaynakların sürekli tüketilmesiyle birlikte, ortak geleceğımız için; minimum malzeme ve enerji kullanımı sağlayan ve aynı zamanda maksimum verimlilik ve esneklik imkanı sunan mikro işleme tekniklerinden daha fazla yararlanılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Malekian, M., Park, S.S., Jun, M.B.G., Tool wear monitoring of micro-milling operations, Journal of Materials Processing Technology, In Press.
2. Jackson, M.J., Robinson, G.M., Ahmed, W., Micromachining selected metals using diamond coated cutting tools, International Journal of Nanomanufacturing, Vol. 1, 304-317, 2006.
3. Adams, D.P., Vasile, M.J., Benavides, G., Campbell, A.N., Micromilling of metal alloys with focused ion beam-fabricated tools, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol.25, 107-113, 2001.
4. Kaplan H., Dölen, M., MikroElektromekanik sistemler (MEMS):Üretim Teknikleri, 11. Ulusal Makina Teorisi

- Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, 4-6 Eylül 2003.
5. Robinson, G.M., Jackson, M.J., A review of micro and nanomachining from a materials perspective, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, 316–337, 2005.
 6. Chae, J., Park, S.S., Freiheit, T., Investigation of micro-cutting operations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, 313–332, 2006.
 7. Asad A.B.M.A., Masaki T., Rahman M., Lim H.S., Wong Y.S., Tool-based micro-machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 192–193, 204–211, 2007.
 8. Kang, I.S., Kim, J.S., Kim, J.H., Kang, M.C., Seo, Y.W., A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187–188, 250–255, 2007.
 9. Bissacco, G., Hansen, H.N., De Chiffre, L., Micromilling of hardened tool steel for mould making applications, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, 201–207, 2005.
 10. Özel T. Liu X. Dhanorker A., Modelling and simulation of micro-milling process, Çesme, Turkey.
 11. Nakagawa, H., Ogawa, K., Kihara, A., Hirogaki, T., Improvement of micro-drilled hole quality for printed wiring boards, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, 293–296, 2007.
 12. Chae J., Park S.S., High frequency bandwidth measurements of micro cutting forces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, 1433–1441, 2007.
 13. Malekian M., Park S.S., Jun M.B.G., Modeling of dynamic micro-milling cutting forces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, 586–598, 2009.
 14. Demir E., Taylor-based model for micro-machining of single crystal fcc materials including frictional effects—Application to micro-milling process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, 1592–1598, 2008.
 15. Venkatachalam S., Li X., Liang S.Y., Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 3306–3319, 2009.
 16. Son, S.M., Lim, H.L., Ahn, J.H., Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, 529–535, 2005.
 17. Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel, *Precision Engineering*, In Press.
 18. Schmidt, J., Tritschler, H., Micro cutting of steel, *Microsystem Technologies*, Vol. 10, 167–174, 2004.
 19. Ng, C.K., Melkote, S.N., Rahman, M., Kumar, A.S., Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, 929–936, 2006.
 20. Chen W.K., Kuriyagawa T., Huang H., Yosihara N., Machining of micro aspherical mould inserts, *Precision Engineering*, Vol. 29, 315–323, 2005.
 21. Park S.S., Rahmana R., Robust chatter stability in micro-milling operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, In Press.
 22. Creighton E., Honegger A., Tulsian A., Mukhopadhyay D., Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, 386–393, 2010.
 23. Karanth S., Sumesh M.A., Shobha V., Shanbhogue G.H., Nagendra C.L., Infrared detectors based on thin film thermistor of ternary Mn–Ni–Co–O on micro-machined thermal isolation structure, *Sensors and Actuators A*, Vol. 153, 69–75, 2009.
 24. Sein, H., Ahmed, W., Hassan, U., Ali, N., Gracio, J.J., Jackson, M.J., Chemical vapour deposition of microdrill cutting edges for micro- and nanotechnology applications, *Journal of Materials Science*, Vol. 37, 5057 – 5063, 2002.
 25. Gäbler, J., Schäfer, L., Westermann, H., Chemical vapour deposition diamond coated microtools for grinding, milling and drilling, *Diamond and Related Materials*, Vol. 9, 921-924, 2000.
 26. Torres, C.D., Heaney, P.J., Sumant, A.V., Hamilton, M.A., Carpick, R.W., Pfefferkorn, F.E., Analyzing the performance of diamond-coated micro end mills, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, 599–612, 2009.

27. Heaney, P.J., Sumant, A.V., Torres, C.D., Carpick, R.W., Pfefferkorn, F.E., Diamond coatings for micro end mills: enabling the dry machining of aluminum at the micro-scale, *Diamond & Related Materials*, Vol. 17, 223–233, 2008.
28. Sein, H., Ahmed, W., Jackson, M., Woodward, R., Riccardo, P., Performance and characterisation of CVD diamond coated, sintered diamond and WC–Co cutting tools for dental and micromachining applications, *Thin Solid Films*, Vol. 447–448, 455–461, 2004.
29. Park H.K., Onikura H., Ohnishi O., Sharifuddin A., Development of micro-diamond tools through electroless composite plating and investigation into micro-machining characteristics, *Precision Engineering*, Vol. 34, 376–386, 2010.
30. Kao, W.H., High-speed drilling performance of coated micro-drills with Zr–C:H:Nx% coatings, *Wear*, Vol. 267, 1068–1074, 2009.
31. Shin, S.H., Kim, M.W., Kang, M.C., Kim, K.H., Kwon, D.H., Kim, J.S., Cutting performance of CrN and Cr–Si–N coated end-mill deposited by hybrid coating system for ultra-high speed micro machining, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, 5613–5616, 2008.
32. Ueng, H.Y., Guo, C.T., Diamond-like carbon coatings on microdrill using an ECR-CVD system, *Applied Surface Science*, Vol. 249, 246–256, 2005.
33. Weinert K., Petzoldt V., Machining NiTi micro-parts by micro-milling, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 481–482, 672–675, 2008.
34. Filiz, S., Conley, C.M., Wasserman, M.B., Ozdoganlar, O.B., An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-end mills, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, 1088–1100, 2007.
35. <http://www.polydec-inc.com>, 2010.
36. Lu, Z., Yoneyama, T., Micro cutting in the micro lathe turning system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, 1171–1183, 1999.
37. Iijima, D., Ito, S., Hayashi, A., Aoyama, H., Yamanaka, M., Micro turning system: a super small CNC precision lathe for microfactories.
38. Ito S., Iijima, D., Hayashi, A., Aoyama, H., Yamanaka, M., Micro turning system 3: a super small CNC precision lathe for microfactories.
39. Okazaki, Y., Kitahara, T., Development and evaluation of a micro-lathe equipped with numerical control, *Journal of the JSPE* 67, Vol. 11, 1878, 2001.
40. Liu, K., Melkote, S. N., Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process , *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, 1778-1785, 2006.
41. Sabat, A. B., The effect of the tool cutting edge geometry on the quality of machined surface in micro turning operation, *Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference*, Vol. 4b, 295-299, 2005.
42. Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y., Recent advances in mechanical micromachining, *Annals of the CIRP*, Vol. 55, 745-768, 2006.
43. Zhaojun, Y., Wei, L., Yanhong, C., Lijiang, W., Study for increasing micro-drill reliability by vibrating drilling, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 61, 229-233, 1998.
44. Chyan, H. C., Ehmann, K. F., Development of curved helical micro-drill point technology for micro-hole drilling , *Mechatronics*, Vol. 8, 337-358 , 1998.
45. Lin, C., Kang, S.K., Ehmann, K. F., Helical micro-drill point design and grinding, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 117, 277-287, 1995.
46. Paquette, J. L., Goncalves, P., Devouard, B., Nicollet C., Micro-drilling ID-TIMS U-Pb dating of single monazites: A new method to unravel complex poly-metamorphic evolutions. Application to the UHT granulites of Andriamena, *Contrib Mineral Petrol*, Vol. 147, 110-122, 2004.
47. Kagaya, K., Oishi, Y., Yada, K., Micro-electrodischarge machining using water as a working fluid-I: micro-hole drilling, *Precision Engineering*, Vol. 8, 157-162, 1986.
48. <http://www.micromanufacturing.com>, 2010.
49. Newby, G., Venkatachalam, S., Liang, S.Y., Empirical analysis of cutting force constants in micro-end-milling operations, *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 192–193, 41–47, 2007.
50. Liow J.L., Mechanical micromachining: a sustainable micro-device manufacturing approach?, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, 662–667, 2009.
51. Kaminski P.C., Capuano M.N., Micro hole machining by conventional penetration electrical discharge

- machine, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, 1143–1149, 2003.
52. Lee S.J., Lee C.Y., Yang K.T., Kuan F.H., Lai P.H., Simulation and fabrication of micro-scaled flow channels for metallic bipolar plates by the electrochemical micro-machining process, *Journal of Power Sources*, Vol. 185, 1115–1121, 2008.
53. Ahn S.H., Ryu S.H., Choi D.K., Chu C.N., Electrochemical micro drilling using ultra short pulses, *Precision Engineering*, Vol. 28, 129–134, 2004.
54. Bhattacharyya B., Malapati M., Munda J., Sarkar A., Influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micro-machining of copper, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, 335–342, 2007.
55. Han F, Yamada Y, Kawakami T., Kunieda M., Experimental attempts of submicrometer order size machining using micro-EDM, *Precis. Eng.* 30: 123-131, 2006.
56. Wong Y. S, Rahman M, Lim H. S., Han H., Ravi N., Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges. *J. Mater. Process. Technol.* 140: 303-307, 2003.
57. <http://www.sarix.com>, 2010.
58. Park D.S., Cho M.W., Lee H., Cho W.S., Micro-grooving of glass using micro-abrasive jet machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, 234–240, 2004.
59. Ghobeity, A., Papini M., Spelt J.K., Abrasive jet micro-machining of planar areas and transitional slopes in glass using target oscillation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.209, 5123–5132, 2009.
60. Ghobeity A., Getu H., Krajac T., Spelt J.K., Papini M., Process repeatability in abrasive jet micro-machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, 51–60, 2007.
61. Fan J.M., Wang C.Y., Wang J., Modelling the erosion rate in micro abrasive air jet machining of glasses, *Wear*, Vol. 266, 968–974, 2009.
62. Jain V.K., Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 6022–6038, 2009.
63. Menz, W., Bacher, W., Harmening, M., Michel, A., The LIGA technique - a novel concept for microstructures and the combination with Si-Technologies by injection molding, *IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems*, Nara, Japan, 69-73, 1991.
64. Guckel, H., Deep X-Ray lithographies for micromechanics, *Technical Digest of the 1990 Solid State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, 118-122, Haziran 1990.
65. Guckel, H., Micromechanics for microactuators and precision engineering, *Precision Engineering (Seminer Notları)*, University of Wisconsin – Madison, Haziran 1997.
66. Slocombe, A. Li, L., Laser ablation machining of metalrpolymer composite materials, *Applied Surface Science*, vol.154–155, 617–621, 2000.
67. Jebbari, N., Jebari, M., Saadallah, F., Saugnac, A., Bennaceur, R., Longuemard, J., Thermal affected zone obtained in machining steel XC42 by high-power continuous CO2 laser, *Optics & Laser Technology*, Vol. 40, 864–873, 2008.
68. Dubey, A., Yadava, V., Experimental study of Nd:YAG laser beam machining—An overview, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 195, 15–26, 2008.
69. Campanelli, S.L., Ludovico, A.D., Bonserio, C. Cavalluzzi, P., Cinquepalmi, M. Experimental analysis of the laser milling process parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, 220–223, 2007.
70. Pham, D.T., Dimov, S.S., Petkov, P.V., Laser milling of ceramic components, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, 618–626, 2007.
71. Jackson M.J., O'Neill W., Laser micro-drilling of tool steel using Nd:YAG lasers, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, 517–525, 2003.
72. Jeon, Y., Pfefferkorn, F., Effect of laser preheating the workpiece on micro end milling of metals, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130, 2008.
73. <http://www.laserimpressions.com>, 2010.
74. Chatzichristidi M., Valamontes E., Argitis P., Raptis I., van Kan J.A., Zhang F., Watt F., High aspect ratio

micro/nano machining with proton beam writing on aqueous developable – easily stripped negative chemically-amplified resists, Microelectronic Engineering, Vol. 85, 945–948, 2008.

75. Uchiya N., Harada T., Murai M., Nishikawa H., Haga J., Sato T., Ishii Y., Kamiya T., Micro-machining of resists on silicon by proton beam writing, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 260, 405–408, 2007.
76. He W., Poker D.B., Gonsalves K.E., Batina N., Micro/nano machining of polymeric substrates by ion beam techniques, Microelectronic Engineering, Vol. 65, 153–161, 2003.