Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar

8

Hikmet Y. ÇOĞUN
İshak PARLAR
Hasan ÜZMUŞ



Bütün Yayın Hakları Saklıdır

Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

ISBN: 978-625-6925-21-2

1.Baskı

25 Haziran 2023

Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar 8

Türkçe ve İngilizce yayın hakları Bilgin Kültür Sanat Yayın Dağıtım Pazarlama Ltd. Şti.'e aittir. Fikir ve sanat eserleri yasası gereğince yazılı izin alınmadan kısmen ya da tamamen alıntı yapılamaz, hiçbir şekilde kopya edilemez, çoğaltılamaz ve yayımlanamaz.

Editörler

Hikmet Y. ÇOĞUN

İshak PARLAR

Hasan ÜZMUŞ

Yayınlayan
Engin DEVREZ
Bilgin Kültür Sanat Yayınları
Sertifika No: 20193
Selanik Cd. No: 68/10 06640 Kızılay / Ankara
Telefon: 0 (312) 419 85 67 – Fax: 0 (312) 419 85 68
https://www.bilginyayinevi.com



İlgili Makama;

25.01.2023

Bilgin Kültür Sanat Yayınları "Bilgin Kültür Sanat Org. Yay. Basık Dağ. Gıda İnş. San ve Tic. Ltd. Şti. inin yayıncı markası olup 2006'dan beri çeşitli dillerde akademik yayınlar yapmaktadır. Ayrıca;

Alman Arkeoloji Enstitüsü

İngiliz Arkeoloji Araştırma Enstitüsü

Japon Anadolu Arkeoloji Enstitüsü

Alman Arkeoloji Enstitüsü

gibi yabancı enstitülerin yanında birçok enstitünün ve kurumların yayınlarımızı ulaştırmakta olup uluslararası basım yayın dağıtım ve pazarlamasını yapmaktadır.

Yayınlarımızı tüm dünya üniversitesi kütüphaneleri doğrudan, uluslararası web sitemizden (https://www.bilginyayinevi.com) veya anlaşmalı olduğumuz yurt dışı dağıtım firması olan www.amazon.com.tr aracılıyla;

- Avustralya
- Brezilya
- Kanada
- Çin
- Fransa
- Almanya
- Hindistan
- İtalya
- Japonya
- Meksika
- Hollanda
- İspanya
- Birleşik Krallık

ile ulaştırabilmekteyiz.

Tüm bu hususlar göz önüne alındığında yayınevimiz gerek üretim gerekse dağıtım anlamında "**uluslararası"** niteliktedir.

Uluslararası Yayınevi: En az beş yıl uluslararası düzeyde düzenli faaliyet yürüten, yayımladığı kitaplar Yükseköğretim Kurulunca tanınan sıralama kuruluşlarınca belirlenen dünyada ilk 500'e giren üniversite kütüphanelerinde kataloglayan ve aynı alanda farklı yazarlara ait Türkçe dışındaki dillerde en az 20 kitap yayımlamış olan yayınevi statüsündedir.

Bilgin Kültür Sanat Yayınları Adına

Şükrü DEVREZ

Bilgin Kültür Sanat Organizasyon
Yay. Basım Dağ. Paz. Gıda İnş.
San. ve Ticaret Ltd. Şti
Selanik 2 Cad. No: 68/2 Kızılay Çankaya
Tel: 0312 419 85 67 ANKARA
Çankaya V.D. 174 032 3265
Mersis No: 0174032326500014

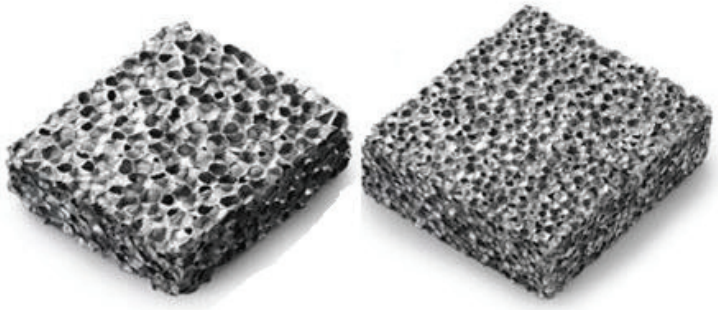
Kara Mürver (*Sambucus Nıgra* L.) Biyolojik Ve Farmakolojik Özellikleri 133
Ahmet BEYATLI 133
Karamürsel İlçesi (Kocaeli) Kıyı Bandı Kentsel Donatı Elemanlarının Kullanıcı Memnuniyetinin Belirlenmesi 145
Önzile AKIN 145
Metin DEMİR 145
Potansiyel Bir Çevre Sorunu Olan Civa'nın Canlılar Üzerine Etkileri 165
Güllü KIRAT 165
Mürşide DARTAY 165
Bor'un (B) Kullanım Alanları Ve Çevresel Etkileri 180
Güllü KIRAT 180
Alaaddin VURAL 180
Feldspatların Jeokimyasal Özellikleri Ve Ekonomik Önemi 191
Hatice KARA 191
Leyla KALENDER 191
Türkiye'de 1994-2020 Yılları Arasındaki Belediye Katı Atık Göstergelerinin Genel Değerlendirmesi 200
Mustafa Hakkı AYDOĞDU 200
Gözenekli Metalik Yapıların Talaşlı İmalat Yöntemleri İle İşlenebilirliği 210
Şakir ALTINSOY 210
Nuray BEKÖZ ÜLLEN 210
Biyomedikal Alanda Kullanılan Biyometaller ve Biyouyumluluk Davranışları 223
Şakir ALTINSOY 223
Nuray BEKÖZ ÜLLEN 223
Tarsus /Mersin İlçesinde Soğuklama ve Meyvecilik 238
Levent SON 238
Atkuyruğu'nun (*Equısetum Arvense*) Botanik Özellikleri, Coğrafi Dağılımı Ve Kullanımları 244
Ahmet BEYATLI 244
Boksit Oluşumlarının Jeokimyasal Özellikleri 254
Leyla KALENDER 254
Hatice KARA 254
Biyoyakıt böcekleri 264
Cemil Koyunoğlu 264
Doğal Gaz Basınç Düşürme ve Ölçüm İstasyonlarındaki Yüksek Akış Enerjisinin Kullanılabilir Enerjiye Dönüştürülmesi 277
Abdulsamed GÜNEŞ 277

Gözenekli Metalik Yapıların Talaşlı İmalat Yöntemleri İle İşlenebilirliği

Şakir ALTINSOY[1]
Nuray BEKÖZ ÜLLEN[2]

Giriş

Son yıllarda ilerleyen teknoloji ile beraber yüksek oranda gözenek içeren malzemeler ile ilgili önemli gelişmeler olmuştur. Bunlar içerisinde metalik köpüklerin birçok mühendislik özellikleri seramik ve polimer tabanlı köpüklere göre üstündür. Metalik köpükler başta alüminyum olmak üzere paslanmaz çelik, demir esaslı alaşımlar, bakır, magnezyum, titanyum, nikel, çinko gibi metallerden oluşur. Gözenekli metaller yapılarında olan yoğun gözenek oranından dolayı düşük yoğunluk özelliği göstermeleri ile hafif malzemelerin kullanım alanlarında yerini almıştır. Yüksek dayanım, iyi enerji, ses ve titreşim sönümleme, yüksek ısıl absorbsiyonu, yüksek yanma direnci, yüksek sıcaklıkta kararlı yapısı, yanma sonucu toksit madde oluşturmaması ve kimyasal olarak filtreleme gibi özellikleri ile otomotiv, havacılık ve uzay sanayinde, demir ve deniz ulaşım alanlarında, inşaat sektöründe hafif konstrüksiyon yapılarda kullanım alanları bulunmaktadır (Bekoz & Oktay, 2013, 2014; Sreenivasa & Shivakumar, 2018; Ullen vd., 2020). Köpük metallerin yapısal ve fonksiyonel kullanım alanını belirleyen temel özelliği hücre yapısına göre açık veya kapalı yapıda olmasıdır. Kapalı gözenekli yapıların yüksek rijitlik, mukavemet ve darbe direnci özelliklerine sahip olduğu; açık gözenekli yapıların rijitliğinin düşük olmasına rağmen yüksek ısı taşınımı ve ses absorbanı özelliklerine sahip oldukları yapılan birçok çalışmada belirtilmiştir (Smith vd., 2012; Ullen, 2021). Şekil 1'de farklı gözenek oranlarında demir esaslı gözenekli metalik yapılara ait görsel verilmiştir.

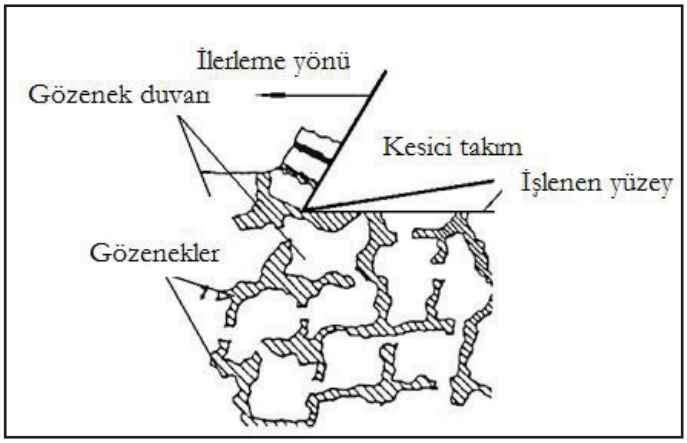


Şekil 1. Demir esaslı gözenekli metalik yapılar (Sığırtmaç, 2010).

Bu derece yoğun kullanım alanına sahip olmasından dolayı metal köpükler bilimsel ve endüstriyel alanda birçok araştırmacının çalışma konusunu oluşturmaktadır (Ahmad vd., 2022; Banhart, 2001; Ullen, 2021). Yapılan bilimsel çalışmalar göstermiştir ki; metalik köpüklerin mevcut mühendislik uygulamalarında çok yönlü olarak kullanılabilmesi için ikincil işlem olarak bilinen talaşlı imalat yöntemlerinin de araştırılması gerekmektedir. Ancak literatürde bu konu ile ilgili kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Mane, 2016; Ullen, 2021; Zou vd., 2016). Karmaşık şekillerin oluşturulmasında yoğun gözenek içeren metalik yapıların kalıptan çıkarılması zorlu ve pahalı bir prosestir. Bu yüzden gözenekli metal parçalara nihai şeklini

[1] Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü,
[2] Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

vermek için talaşlı imalat yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Talaşlı imalat ile farklı geometrilere sahip parçalar kolay ve ekonomik olarak üretilebilir. Talaşlı imalat gözenekli yapıların üretim prosesinde sıklıkla kullanılan kalıp ihtiyacını ortadan kaldırması, karmaşık şekilli yapıların kolay ve ekonomik olarak üretilmesi gibi büyük avantajlara sahiptir. İstenilen şekiller parçaların kesilmesi, delinmesi, cıvata veya kaynakla birleştirilmesi, torna ve freze ile işlenmesi şeklinde gerçekleştirilir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin yanı sıra ileri talaşlı imalat teknikleri olarak bilinen lazerle kesme, tel erozyonla veya plazma ile kesme işlemleri de kullanılmaktadır (Armendia vd., 2012; Šalak vd., 2005; Ullen vd., 2020). Talaşlı imalatta kullanılan işlenebilirlik terimi kesici takım aşınması, işlenen iş parçasının yüzeyi, çıkan talaşların formu ve takım tezgâhının kuvveti gibi faktörlerle değerlendirilir. Tüm bu faktörler işleme sürecinde mekanik, termal ve kimyasal etkileşimlerin sonucudur. Toz metalurjisi (TM) ile üretilmiş olan ürünlere benzer olarak gözenekli metallerin zayıf işlenebilirlikleri yoğun oranda gözenekli yapıya sahip olmaları, makro ve mikrogözenek içeren heterojen bir yapıya sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Gözenekli metallerin işlenebilirliği üzerine gözenek yapısının etkisini diğer tüm faktörlerden bağımsız değerlendirmek ve işleme prosesi üzerine etkisini belirlemek oldukça zordur (Alizadeh, 2008; Hasak, 2018; Šalak vd., 2005). Gözenekli yapının kesici uca etkisini görmek açısından, Şekil 2'de gözenekli yapının talaşlı imalat ile işlenmesinin şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. Gözenekli yapının talaşlı imalat ile işlenmesinin şematik gösterimi (Šalak vd., 2005).

Gözenekli metallerin yapısında bulunan makro gözeneklerin varlığının işlenebilirlik üzerine etkileri şu şekilde özetlenebilir (Blais & L'Espérance, 2002; Campana & Pilone, 2008; Šalak vd., 2005; Sığırtmaç vd., 2012; Ullen, 2021):

- Gözenekler ısıl iletimini azalttığı için kesme bölgesinde ısıyı biriktirerek kesici ucun aşınmasını hızlandırır.
- Kesici takımın ve işlenen yüzeyin temas noktasının gözeneklerden kaynaklı kesintili olmasından dolayı yük dengesizliği, mikro düzeyde şok etkisi ve titreşimler kesici uç aşınmasını hızlandırır
- Kesme sıvısının kullanımının kısıtlı olmasından kaynaklı takım aşınması artar ve gözeneklere dolan kesme sıvısı korozif etkilere sebep olabilir.
- Gözeneklerin varlığı oluşan talaş formunu ve talaş sürekliliğini de olumsuz etkiler.

Gözenekli metallerde kesme işlemini zorlaştıran makro ve mikro gözeneklerin varlığı, kesici uç ömrünü azaltarak talaşlı üretimi zorlaştırır. Makro gözeneklerin işlenebilirlik üzerine etkisi çok daha fazladır. Gözenekli metalik parçaların işlenmesinde gerek bilimsel gerekse teknik yetersizlik, işlenmiş yüzey kalitesinin düşük olmasına neden olmaktadır. Bu malzemelerin daha geniş çevrelerce kullanımı, üretim aşamalarının daha kolay ve ekonomik olması, karmaşık şekilli parçaların üretilmesi ve daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için talaşlı imalat proseslerinin detaylı olarak ele alınması zorunlu hale gelmiştir. Bu bölümde gözenekli

metallerin talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesi, talaşlı imalatın gerekliliği ve işlem esnasında karşılaşılan zorluklar ele alınmıştır.

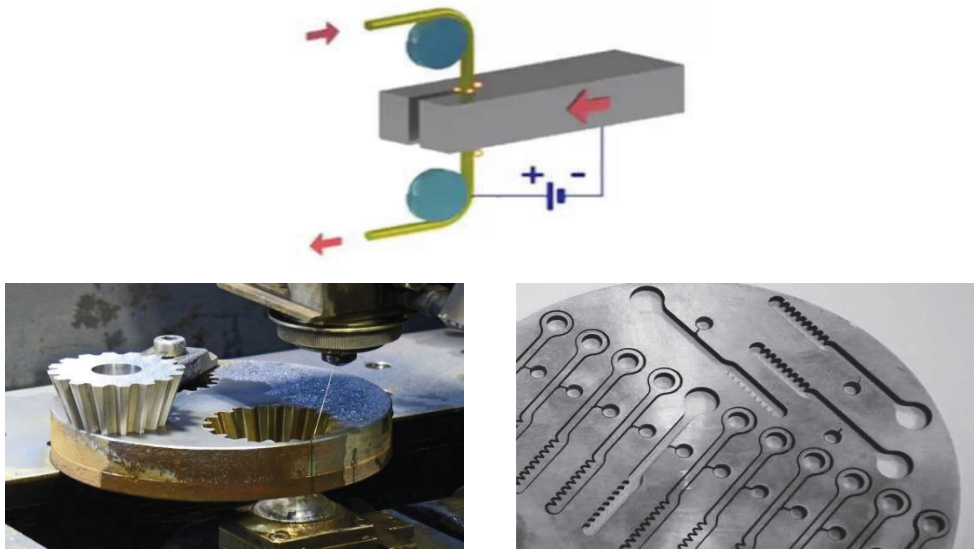
Gözenekli Metallerin Talaşlı İşleme Yöntemleri

Metalik köpüksü yapılar uzun süredir üretilmelerine, birçok farklı alanda fonksiyonel ve yapısal olarak kullanım alanı bulmasına ve bilimsel alarak yoğun şekilde çalışılmalarına rağmen ticari olarak yaygın hale gelememiştir. Bunun en önemli nedenleri, üretilen parçaların tasarım zorluğu, üretim tekniklerinin diğer malzemelere kıyasla pahalı ve karmaşık olmasıdır. Talaşlı imalat ile; üretim yöntemlerinin büyük kısmını oluşturan kalıp gereksinimi ortadan kalkacak, tasarımsal kolaylık sağlanacak, mekanik özellikler iyileşecek ve tüm bunlar üretim sürecini iyileştirecek, maliyeti düşürecek. Sonuç olarak talaşlı imalat yöntemleri ile gözenekli metalik parçalar istenilen boyut ve şekillere getirilerek, yüzey kaliteleri iyileştirilir ve uygulamaya alınır. Ancak köpüksü metaller talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesi zor malzemelerdir. Bunun en önemli nedeni önceki bölümde açıklandığı üzere, yapısındaki makro ölçekteki gözeneklerdir. Gözenek duvarlarını birbirinden ayıran ve yapının gözenekli olmasını sağlayan bu makro gözenekler işlenebilirliği oldukça zorlaştırmaktadır. Gözenek duvarları kesmenin etkisiyle deformasyona uğrayabilir. Gevrek köpüksü metalik yapılarda çatlak ve yırtılmalar, sünek köpüksü metalik yapılarda ezilme ve bükülmeler görülebilir. Gözenekli yapılarda düşük ısı iletiminden dolayı talaşlı işlemler ile işlemede oluşan ısı ortamdan uzaklaşamayarak kesici uç ve iş parçasına zarar verebilir. İnce gözenek duvarları eriyerek kesici uç ve işlenen yüzeye yapışabilir. Kesme kuvvetleri ve ısı etkisiyle meydana gelecek deformasyonun iş parçasının hassasiyetini olumsuz etkileyecektir (Alizadeh, 2008; Beköz Üllen, 2016; Sığırtmaç vd., 2012; Ullen, 2021) Tüm bu olumsuz etkilere rağmen köpüksü metal yapıların kullanılabilirliğini arttırmak için ikincil işlem olarak da bilinen talaşlı imalat yöntemlerinin araştırılması ve geliştirilmesi şattır. Bu bölümde köpüksü metal yapılara uygulanabilecek çeşitli talaşlı imalat yöntemleri ele alınmıştır.

Elektro Erozyon ile İşleme (EDM)

İleri mühendislik malzemelerinin geliştirilmesinde, hassas ve esnek prototip talebini karşılama ihtiyacı ve bunlara ek olarak düşük hacimli parça üretimi, tel elektrik deşarj ile işlemeyi önemli bir üretim süreci haline getirmiştir (Miller, 2003). EDM metal parçanın yüzeyinden yüksek oranda elektrik akımı geçirilen bir tel ile kesme işlemidir. Bu işlem için çapı 0,02-0,40 mm arasında değişen ince, hareketli bakır, pirinç, molibden veya tungsten teller kullanılır. Farklı kutuplara bağlı tel elektrot kesilen metalik ürüne yaklaştığında elektriksel yük boşalımı ile yüksek oranda ısı çıkar ve kısmi metal ergimesi ile işlem gerçekleştirilir. İşlem hızı; oluşan arkın süre ve enerji miktarına göre değişiklik gösterir. EDM'de işlem süreci iki aşamada gerçekleşir. İlk aşamada; iş parçasının şekli koordinatları belli olan parçaya nokta, daire ve çizgi numaraları verilerek şekillendirme yapılır. İkinci aşamada ise kesilme işlemi gerçekleştirilerek esas şekil ortaya çıkarılır. EDM ile işlenen parçanın sonradan taşlanmasına gerek yoktur. Başka talaşlı işlemlerle üretilemeyen parçalar bu yöntemde sadece telin yarıçapı kadar bir tolerans ile parçayı işlemektedir. Sert olan metalik ürünlerin işlenmesi de bu yöntemde mümkündür. İşlenen yüzeyin oldukça temiz ve çapaksız olması da yöntemi üstün kılmaktadır. Tüm bu özellikleri bu yöntemin köpüksü metalik yapılarda kullanımını sağlamıştır. EDM yönteminin dezavantajları ise kesici boyutunun sınırlı kapasitesi ve telin düşük talaş kaldırma hızına sahip olmasıdır. Ayrıca hassas yüzeyler elde edebilmek için uzun süreye ihtiyaç duyması ve proses parametrelerinin sınırlı olmasıdır (Groover, 2020; Heidari, 2018; Krajcarz, 2014; Zou vd., 2016). Şekil 3'de EDM ile kesme prensibi, kesme işlemi ve işlenen parçaların görüntüleri verilmiştir. EDM işleminin çalışma prensibi tel erozyon (Wire Cut EDM), dalma erozyon (Die Sinking EDM) ve hızlı delik delme erozyon (High Speed Drilling EDM) işlemleri gerçekleştiren cihazların çalışma prensiplerine öncülük etmiştir. Bu yöntemde geleneksel talaş kaldırma yöntemlerine göre gerilim, frekans, süre, tel gerilmesi, akım şiddeti, tel çapı, tel türü ve tel ilerleme hızı gibi parametreler daha fazla kontrol edilebilir. Doğrudan kontrol

edilemeyen, iş parçası kalınlığı ve iş parçası malzemesinin ısıl işlem prosesleri de tel erozyon yönteminin başarılı şeklide uygulanmasını sağlar (Çaydaş & Hasçalık, 2004; Esmaeelzadeh vd., 2006).



Şekil 3. EDM kesme prensibi (üstte), kesme işlemi ve işlenen parça (altta) (Makine Eğitim, 2018).

EDM işleminde meydana gelen kesme kuvvetleri küçüktür, bu da işlenen malzemenin yüzey ve mekanik özelliklerini korur. İşleme sırasında yüzeyinin mikro ve makro düzeydeki yüzey kalitesi, işleme şartlarına bağlıdır. EDM ile mikro ölçekte delik delme, keskin iç köşe kesimleri, döner form kesimleri, kavisli delik açılması gibi kalıp ile zor yapılabilecek formlar parçaya verilebilir. Özellikle işlenmesi zor olan gözenek içeren TM ürünler ve köpüksü metal yapıların karmaşık şekilli parçaların işlenmesinde tercih edilmektedir. Kullanımının giderek atması ve taşıdığı özellikler son yıllarda araştırmacılarında dikkatini çekmiştir (Gill & Kumar, 2016; Groover, 2020; Heidari, 2018; Klink vd., 2011; Krajcarz, 2014; Zou vd., 2016). Sığırtmaç yaptığı tez çalışmasında (Sığırtmaç, 2010); alüminyum köpük malzemelerin talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesini incelemiştir. Çalışmalarında kapalı gözenek yapısına sahip sandviç yapılı metal köpüklerin EDM yöntemi ile kesilmesi sorası elde ettikleri yüzeyin görüntüsü Şekil 4'de verilmiştir. Kesilen yüzeyde herhangi bir çatlak, deformasyon veya bozulmanın olmadığını ancak gözenekli yapıdan kaynaklı artan kesme hızlarında tel kopmakları olduğunu rapor etmişler. Gözenekli yapılarda en önemli olan gözenek duvarlarının mekanik olarak herhangi bir yüke maruz kalmadığı için bozulmadığı da belirtilmiştir.

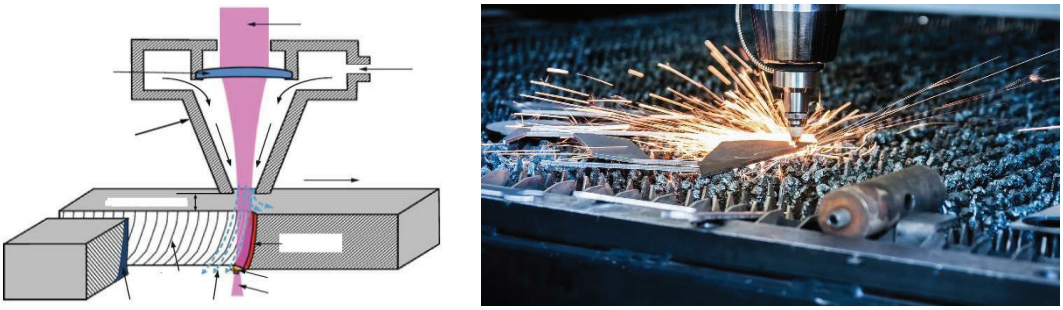


Şekil 4. EDM kesim sonrası köpük alüminyumun yüzey görüntüsü (Sığırtmaç, 2010).

Lazer ile İşleme

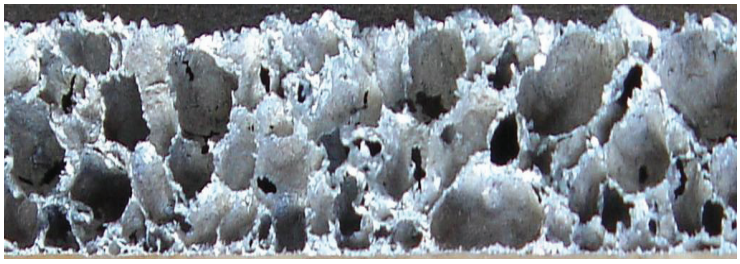
Lazer kesim, yüksek işleme hızı, düşük atık miktarı, çalışma hassasiyeti ve yüksek son ürün kalitesi sayesinde yüksek hacimli metal şekillendirme endüstrisinde üst sıralara yerleşmiştir. Lazer ile işleme kullanım yerlerine ve oluşan ışına göre farklılıklar gösterir. Kaynak işlemleri için oluşturan lazer ışını ile sac kesme ya da tıp alanında kullanılan lazer

operasyonları veya kalıp yüzeylerinde oluşan empürite ve kirliliklerin temizlenmesi için kullanılan lazer işlemleri temel parametreler dışında büyük farklılıklar gösterirler. Yüksek çalışma hassasiyeti ve istenilen son ürün yüzey kalitesi nedeniyle tercih edilmektedir. Lazer ile kesme işlemlerinde yardımcı gaz jetleri de kullanılır. İnert gaz destekli çalışmalarda, yardımcı gaz, yüzeyi yüksek sıcaklıkta oksidasyon reaksiyonlarından korurken, oksijen kullanıldığında ise yüksek sıcaklıkta ekzotermik reaksiyonlar gerçekleşir. Birincisi, plastik ve ahşap gibi metalik olmayan malzemelerin kesilmesinde kullanılırken, ikincisi esas olarak sac şekillendirmede kullanılır (Changdar & Chakraborty, 2021; Krajcarz, 2014). Şekil 4'te lazer ile işleme yönteminin şematik ve gerçek görüntüsü verilmiştir. Lazer kesmede, lazer ışını iş parçası üzerinde yoğunlaştırılır ve lazer ışını ile eş eksenli olarak ekzotermik bir reaksiyonda gaz jeti verilir (Sun & Brandt, 2013). Böylece gaz jeti, iş parçası malzemesine enerji girişini artırarak yüksek sıcaklıkta ekzotermik reaksiyonu başlatır ve gaz jetinin hareketi kesilen malzemeyi dışarı atar. Lazer gaz destekli işlemede, lazer ve kesme parametrelerinin doğru seçilmesi, lazer kesim verimliliğini artırır ve nihai ürün kalitesini iyileştirir. Bu yöntem daha çok paslanmaz çelik, demir, alüminyum ve metal malzemelerinin işlenmesinde tercih edilir. Optik güç aracılığıyla yüksek güç üreten lazerin çıkışını yönlendirerek gerçekleşir. Lazer ile kesme yönteminde; gaz basıncı, gaz tipi, kesme hızı, kesme gücü, nozül-sac arası mesafe, nozül çapı ve odak mesafesi kesme kalitesini etkileyen en önemli parametrelerdir (Sığırtmaç vd., 2012). Bu yöntemin avantajları; kesme hızı yüksektir, kesme kalıp ve aparatı gerektirmez, maliyeti diğer yöntemlere göre düşüktür, kesilen yüzey kalitesi yüksektir. Ayrıca yüksek yoğunlukta ufak bir nokta şeklinde oluşan lazer ışınına rağmen ısınma düşüktür. Temassız işleme olduğundan dolayı iletken veya yalıtkan yumuşak, kesmesi zor, kırılgan, ince malzemelerde hassas ve hızlı bir işleme kabiliyeti sunmaktadır (Ürgüplü & Köksal, 2015).



Şekil 5. Lazer ile kesme işleminin şematik (sol) ve gerçek (sağ) gösterimi (Efor Lazer, 2021).

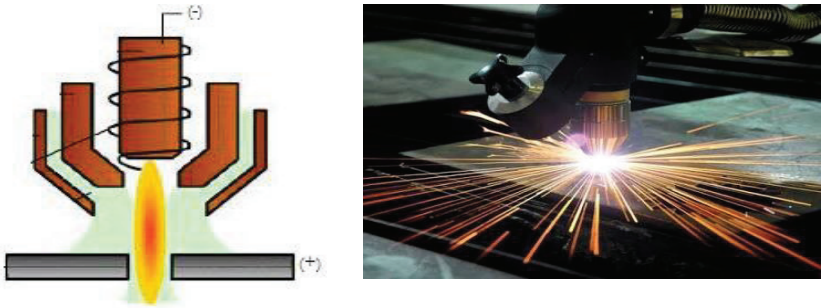
Lazer ile işleme prosesi malzemelerin termal olarak işlenmesi, malzeme yüzeyinin kalitesinin arttırılması, kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilmesi, yüzey kaplama, eritme veya kesim gibi birçok farklı işlemde kullanılmaktadır. Malzemelerin işlenmesinde çok yönlü çözümler sunması, maliyet ve karmaşık işlem süreçlerini kolaylaştırması açısından gözenekli metal malzemelerin kesiminde tercih edilir olmuştur. Sığırtmaç yaptığı çalışmada (Sığırtmaç, 2010); kapalı gözenek yapısına sahip sandviç yapılı alüminyum köpüklerin lazer kesim yöntemi ile kesmiştir. Kullandıkları alüminyum köpüklerin lazer kesim yöntemi ile kesilmesi sonrası elde ettikleri yüzeyin görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir. Çalışmalarında lazer ile kesimde gözenek duvarlarına ve iç kısımlara eriyik metalin yapıştığını ve bu durumun hücresel yapıyı ve bütünlüğünü bozduğunu rapor etmişlerdir. Yaşanan bu problemin parametrelerin optimize edilerek kısmen de olsa yenileceğini belirmişlerdir. Lazer ışını yoğun olarak gözenek içeren yapıdan geçerken karakteristiği değişiyor ve katmanlar arası homojen olmayan bir kesim gerçekleşiyor. Belirlenmesi gereken önemli husus köpüksü yapının kullanılacağı yerdir. Fazla hassasiyet istenmeyen uygulamalarda lazer kesim, daha iyi yüzey kalitesi istenen yerlerde ise tel erozyon kullanımı önerilmektedir.



Şekil 6. Lazer kesim sonrası köpük alüminyumun yüzey görüntüsü (Sığırtmaç, 2010).

Plazma ile İşleme

Plazma arkı ile yapılan kesme işlemi (PAC), gittikçe daraltılarak yoğunlaştırılan ark demetinin kesilecek malzemenin üzerinde bölgesel bir alanı eriterek uzaklaştırmasıdır. Ergiyen metalik parça yüksek hızlarda çıkan iyonize gazlar ile kesilen alandan hızla uzaklaştırılır. PAC iletken metallerin kesilmesinde kullanılan termal bir işleme tekniğidir. Kesilen malzemenin sertliği, ergime sıcaklığı, ısıl ve elektriksel iletkenliği, oksijene olan afinitesi, oksijen ile reaksiyonu sonucu oluşturduğu ısıl enerji bu yöntemin başarı oranın belirleyen temel etkenlerdir. 20-150 mm aralıklarda malzeme kalınlığına sahip metalik parçaların kesiminde geleneksel PAC yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda hassas plazma sistemleri sayesinde 1-12 mm malzeme kalınlığına kadar kesim mümkün olmaktadır (Krajcarz, 2014). Şekil 7'de plazma ile kesme işleminin şematik ve gerçek görüntüsü verilmiştir. PAC tekniği diğer mekanik kesim işlemleri ile kıyaslandığında yüksek oranda ışık, gaz ve duman oluşumu, elektriksel şok, ateş ve ses seviyesinin yüksek oluşu gibi olumsuz etkilere sahiptir. Ayrıca kesim ekipmanları daha pahalıdır ve elektrik enerjisi tüketimi yüksektir. Bunların yanı sıra PAC ile işleme düşük işletme ve yatırım maliyeti, yüksek kesme hızı, otomasyona uygunluğu, üretim hattı uygulamasına ve sürekli iyileştirilen kesme kalitesi ile endüstriyel alanlarda sıkça kullanılmaktadır (Novák, 2020).



Şekil 7. Plazma ile kesme işleminin şematik (sol) ve gerçek (sağ) gösterimi (Edim Mühendislik, 2023).

PAC ile alüminyum, paslanmaz çelik ve demir esaslı köpüksü metaller gibi iletkenliği olan parçalar istenilen ölçü ve şekillerde kesilebilir. Ancak köpüksü yapıların yoğun gözenek formundan dolayı iletkenliğinin düşük olması kesimde bir dezavantaj oluşturmaktadır. PAC işleminde kesim öncesinde bir ön tavlama işlemine ihtiyaç duyulmaması malzemenin kesim öncesinde herhangi bir ısıtma işlemine maruz bırakılmaması anlamına gelmektedir. Isıtma işleminde gözenekli yapının zarar görme olasılığı göz önün alındığında bu istenen bir durumdur. Isıtma işleminde oluşabilecek muhtemel zararlar önlenerek malzeme zayiatı engellenir. Son yıllarda gelişen teknoloji ile PAC makinelerinin kesme torçları çok daha hassas ve temiz işlemeler yapmaktadır. Bu sayede kesim sonrası cüruf gibi istenmeyen ürünlerin temizlenmesi gerekmez. Ayrıca makineler de kullanılan gazın patlayıcı ve yanıcı olmaması iş güvenliği açısından da büyük avantaj sağlamaktadır (Krajcarz, 2014).

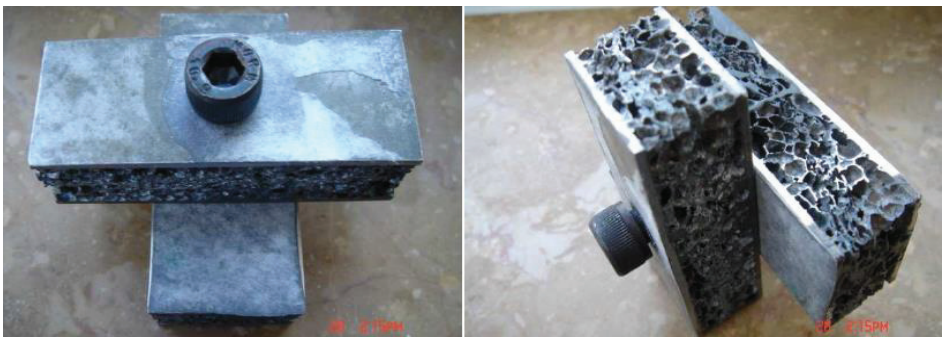
Geleneksel Talaşlı İmalat Yöntemleri ile İşleme

Tornalama, frezeleme ve delme ile talaş kaldırma yöntemleri metalik malzemelerinin son şeklini oluşturmak için kullanılan en fazla yöntemlerdir. Geleneksel talaşlı imalat işlemleri yüzey kalitesi, şekli ve boyutu belirlenmiş parçalara işleme tezgâhlarında kesme işlemi yani talaş kaldırma işlemi ile şekil verilmesi olarak tanımlanabilir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri tornalama, delme, frezeleme, vargelleme, planyalama, testere ile kesme ve taşlama olarak gerçekleştirilebilir. Bütün bu talaşlı imalat işlemlerinde işlenebilirlik kesme parametrelerinin doğru optimisazyonu ile ayarlanmaktadır. Talaşlı imalat prosesleri boyutsal hassasiyet ve iyi yüzey kalitesine ulaşmak için çoğu zaman karmaşık şekilli parçaların üretilmesinde kullanılır. Gerilme ile talaş kaldırma tüm geleneksel talaşlı işlemlerin ortak özelliğidir. Ayrıca kesici takım ile işlenen parçanın arasında sürekli olarak fiziksel temas sürtünme olayı vardır. İşlenen malzemenin mekanik özellikleri geleneksel yöntemleri sınırlandırır. Gözenekli malzemeler gibi yoğun makro gözenek içeren yapılar oldukça gevrek dolayısıyla kırılgan özellik taşırlar (Schoop vd., 2016). Bu malzemeleri geleneksel yöntemlerle işlenmesi oldukça zordur. Ancak geleneksel talaşlı imalat yöntemleri uzun yıllardır endüstride kullanıldıklarından teknolojik birikimi çok üst seviyededir. Problemlere çözüm bulmak, operatör bulmak ve yetiştirmek kolaydır. Şekil 8'de talaşlı imalat işlemi sonrası sensör, emniyet valfi, gaz detektörleri ve çeşitli analiz cihazları olarak kullanılan gözenekli metalik parçaların görüntüsü verilmiştir. Gözenekli metalik parçalar döküm veya TM gibi kalıpların kullanıldığı yöntemlerde kısıtlı şekil ve boyutlarda üretilebilir. En ekonomik ve en iyi yüzey işlemleri büyük oranda ikincil işlem olarak tanımlanan talaşlı işlemlerle gerçekleşir.



Şekil 8. Talaşlı imalat işlemi sonrası gözenekli metalik parçalar (Sintek, 2019).

Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin neredeyse tüm katı metallere uygulanabilmesi, silindirik yüzeyler, dişliler, kanallar gibi karmaşık geometrik şekillerin elde edilmesinin uygun kesici takım seçimiyle mümkün olması, hassas toleranslarda, iyi yüzey kalitesinde ve iyi boyutsal doğrulukta parça işlenmesinin mümkün olması, birçok bilimsel çalışmada yer almasına neden olmuştur. (Sığırtmaç vd., 2012) yaptıkları çalışmada, köpüksü alüminyum kesilme proseslerini incelemiştir. Birçok kesme prosesi ile kesim yapmış birbiriyle kıyaslamıştır. Bunlardan biride mekanik dairesel döner testere ile kesimdir. Bu çalışmada sandviç yapılı alüminyum plakalara cıvata bağlantısına uygun diş açılması için çağı 6,8 mm olan delme işlemi gerçekleştirilmiştir ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Geliştirilen yöntem sayesinde köpüksü alüminyum yapıya cıvata ile bağlantı yapılarak başka malzemeler ile mukavemetini iyileştirerek bağlanabileceğini rapor etmişlerdir.



Şekil 8. Delme işlemi sonrası cıvata bağlantısı yapılan alüminyum köpük (Sığırtmaç vd., 2012).

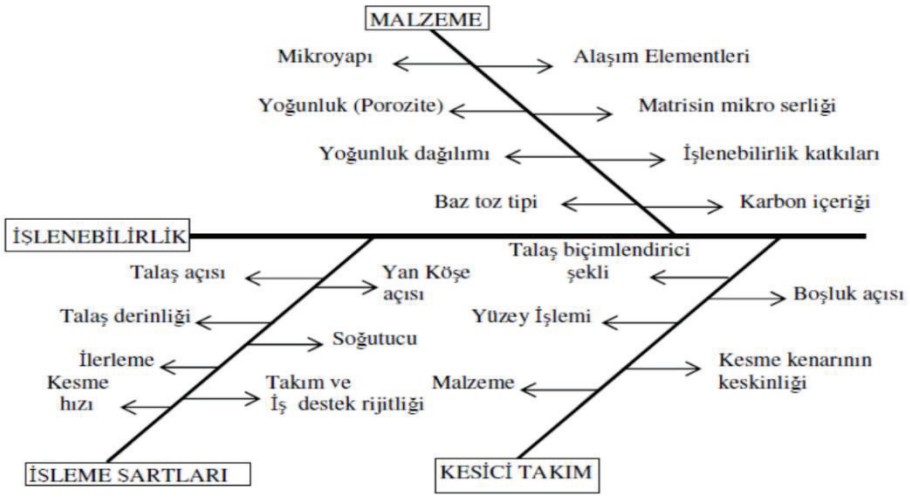
(Ullen, 2021) yaptığı çalışmada, yaklaşık %70 gözenekliliğe sahip demir esaslı köpüksü metalleri HSS ve karbür matkap uçlar ile delmiş ve delinebilirliğini incelemiştir. Delme sonrası gözenekli yapının bozulmadığını, gevrek kırılma gerçekleşerek toz şeklinde talaş oluşumunun gözlendiğini rapor etmişlerdir. Şekil 9'da delme işleminden önce ve sonra köpüksü demir esaslı parçaların görüntüsü verilmektedir.



Şekil 9. Delme işleminden önce ve sonra demir esaslı köpük parçalar (Beköz Üllen, 2021).

Gözenekli Metallerin İşlenebilirliğini Etkileyen Faktörler

Son yıllarda yoğun olarak üzerinde çalışmalar yapılan köpüksü metalik yapıların daha yaygın şekilde kullanılmaları için ikincil işlemlerin incelenmesi gerekmektedir. Bu işlemlerden biride talaşlı işlemlerdir. Oldukça üstün özellikler içeren köpüksü metaller üretilebilirliklerindeki problemler çözülmedikçe kısıtlı alanlarda kullanılacaktır. Karmaşık tasarımların mümkün olabilmesi için kalıplama yetersiz kalmaktadır. İşte bu noktada talaşlı imalat yöntemleri kurtarıcıdır. Ancak talaşlı imalat yöntemlerinde doğru seçilmeyen işleme ve şekillendirme yöntemleri parçaların birçok özelliğini yitirmesine ve kritik süreçlerde fonksiyonlarını yerine getirememesine neden olabilir. İşlenebilirliğin değerlendirilmesi yapılan talaşlı imalat işlemi sonrası işlenen yüzey kalitesi, kesici takım ömrü, talaş formları, işlem kuvveti, gürültü, işlem hızı ve kesme parametreleri gibi birçok unsurun değerlendirilmesi gerekmektedir. İşleme kalitesi birbirine bağlı olan çok sayıda işlenebilirlik faktörüne bağlıdır. Bunlar arasında, iş malzemelerinin işlenebilirliği, ürün tasarımı, süreç planlaması, işleme operasyonları vb. dâhil olmak üzere farklı imalat aşamalarını etkileyebilecek önemli bir faktörler başı çekmektedir. İş malzemelerinin işlenebilirlik yönü, verimli süreç planlaması için büyük önem taşımaktadır. İşlenebilirlik aynı zamanda iş malzemesinin kimyasal özellikleri, mikro yapısı, saflık, işleme yöntemi, ısıl işlem, kesici takım malzemesi, takım geometrisi, iş malzemesiyle takım arasındaki etkileşim, kesme koşulları, kesme tipi, kesme sıvısı, talaş kaldırma sıcaklıkları, talaş özellikleri, takım tezgahı rijitliği gibi çeşitli girdi değişkenlerinin de fonksiyonudur(Hasak, 2018; Heidari, 2018; Šalak vd., 2005; Ullen, 2021; Ullen vd., 2020). Şekil10'da metalik malzemelerin işlenebilirliğini etkileyen çeşitli faktörler balık kılçığı formatında verilmiştir.



Şekil 10. Metalik malzemelerin işlenebilirliğini etkileyen faktörler (Hasak, 2018).

Tüm faktörlerin işlenebilirlik üzerine önemli etkileri bulunmasına karşılık köpüksü metaller için en önemli husus malzemeyi içeren özelliklerden biri olan gözenekliliğin etkisidir. Metalik malzemelerde gözeneklilik değeri işlenebilirlik üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Gözeneklik değeri arttıkça kesici uçta aşınma meydana gelir ve takım ömrü azalır. Sünek malzemelerin işlenmesinde oluşan sıvanma yüzey kalitesini bozar ve takım ömrünü azaltır. Köpüksü metallerin işlenmesinde kesikli kesme durumu ile kesici uç sürekli yük değişimlerine, mikro şoklara ve titreşimlere maruz kaldığından takım aşınması hızlanır. Bu durum işleme tezgâhının titreşimine sebep olarak gürültü şiddetini arttırır. Köpüksü metallerdeki makro gözenekler, TM ile üretilen parçalara göre daha fazladır. Bu fazlalık kesici uç ve işlenen yüzey arasındaki kimyasal ve fiziksel reaksiyon ihtimalini yükseltir ve uç aşınmasını arttırır. Artan gözenek oranı ile azalan ısıl iletkenlik kesme bölgesinde lokal ısıl birikmelere neden olarak takım aşınmasının hızlandırır. Kesme sıvısının özellikle makro gözenekler tarafından infilitre edilmesinden dolayı kirlilik ve korozif etkiler oluşabilir. Yapılan bilimsel çalışmalarda iş parçasının yoğunluğu arttıkça kesme kuvvetinin attığı rapor edilmiştir. Ancak bu ilişki lineer bir ilişki olmayıp belirli yoğunluk aralıklarında farklılıklar göstermektedir. Metalik köpüklerde işlenebilirliği zor kılan sadece malzemenin özellikleri değil, malzemenin özelliklerinden doğan takım ve takım uçlarında yaşanılan problemlerdir (Ahmad vd., 2022; Hasak, 2018; M'Saoubi vd., 2014).

TM malzemelerde gözeneklilik ve heterojen mikroyapı işlenebilirlik için ana bozulma faktörü olarak vurgulanır. Sünek yapıların işlenmesindeki problem, işlem sırasında kesme anında gözeneklerin kapanmasına neden olan yüksek plastik deformasyondur. Kırılgan malzemelerde ise ana problem işlem sırasında gözeneklerin kırılması ve gözeneklerin talaşlarla dolmasıdır (Heidari, 2018). PCD veya sementit karbür gibi kesiciler işlemede gözenek yapılarını bozulup yüzeye açık gözeneklerin kapatarak geçirgenliği azaltacağından kullanımı tercih edilmez. Bozulan gözenek oranı yük taşıma performansını da düşüreceğinden, işlenebilirliği değerlendirirken mikroyapı faktörünün de değerlendirmesi önemlidir. Gözenekli yapılarda, gözenek formunu korumak için monokristal elmas frezeleme gibi hassas işleme teknikleri kullanılmaktadır. Malzemelerin üretimi enasında oluşan gözeneklerin şekli ve boyutu parçaların işlenebilirlik kabiliyeti etkileri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır (Ahmad vd., 2022; Iqbal vd., 2011; Varghese & Mujumdar, 2021; Xu vd., 2022). Bu çalışmalar göstermektedir ki; işlenebilirlik üzerine gözeneklik oranının oldukça önemli etkileri bulunmaktadır.

Sonuçlar

Köpüksü metal yapıların üretiminde talaşlı imalat yöntemleri, kullanım ve uygulama alanlarının artarak endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmasına yardımcı olacaktır. İkincil

işlem olarak bilinen talaşlı işlemlerin köpüksü metal yapılar üzerine işlenebilirlik çalışmalarının yapılarak yaşanan problemlerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Son şekil verilebilirliğin oldukça zor olduğu köpüksü metalik yapılara talaş kaldırma işlemleri uygulanırken gözenek yapısı (gözenek şekli, boyutu, dağılımı ve oranı) tüm detaylarıyla ele alınmalıdır. Doğru seçilen talaşlı imalat yöntemi ve kesme parametreleri ile iyi işlenebilirlik elde edilebilir. Burada önemli husus kesilecek köpüksü metal yapıların kullanım yerlerinin, istenilen yüzey kalitesinin ve ölçüm hassasiyetinin ne olduğudur. Kesme yöntemi bu hususlara göre belirlenmelidir. Literatürde köpüksü metallerin ikincil işlemleri ile ilgili çalışmaların kısıtlı sayıda olması, bu konuyu bilimsel alanda çalışmak için cazip kılmaktadır. Bu araştırma çalışması ile konuya açıklık getirmeye ve çalışma yapacak araştırmacılara yardımcı bir kaynak olmasını hedeflemekteyiz.

KAYNAKÇA

Ahmad, S., Mujumdar, S., & Varghese, V. (2022). Role of porosity in machinability of additively manufactured Ti-6Al-4V. *Precision Engineering*, *76*, 397-406. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.04.010

Alizadeh, E. (2008). Factors influencing the machinability of sintered steels. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, *47*, 304-315.

Armendia, M., Osborne, P., Garay, A., Belloso, J., Turner, S., & Arrazola, P.-J. (2012). Influence of Heat Treatment on the Machinability of Titanium Alloys. *Materials and Manufacturing Processes*, *27*(4), 457-461. https://doi.org/10.1080/10426914.2011.585499

Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in materials science*, *46*(6), 559-632.

Bekoz, N., & Oktay, E. (2013). Mechanical properties of low alloy steel foams: Dependency on porosity and pore size. *Materials Science and Engineering: A*, *576*, 82-90.

Bekoz, N., & Oktay, E. (2014). The role of pore wall microstructure and micropores on the mechanical properties of Cu–Ni–Mo based steel foams. *Materials Science and Engineering: A*, *612*, 387-397.

Beköz Üllen, N. (2016). Machinability with different cutting parameters of sintered steels. *International Metallurgy & Materials Congress*, 1002-1004.

Blais, C., & L'Espérance, G. (2002). Turning and drilling of parts made from sinter hardenable steel powders. *Powder metallurgy*, *45*(1), 39-47.

Campana, F., & Pilone, D. (2008). Effect of wall microstructure and morphometric parameters on the crush behaviour of Al alloy foams. *Materials Science and Engineering: A*, *479*(1-2), 58-64.

Changdar, A., & Chakraborty, S. S. (2021). Laser processing of metal foam-A review. *Journal of Manufacturing Processes*, *61*, 208-225.

Çaydaş, U., & Hasçalık, A. (2004). CNC Tel Erozyon Tezgahlarında Farklı Malzemelerin İşlenebilirliğinin Araştırılması. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, *006*, 201-214.

Edim Mühendislik. (2023). *Edim Mühendislik Ark Ocağı, Paslanmaz, Konveyörler, Filtreler, Kırıcılar, Mikserler İmalatlar*. (01/02/2023 tarihinde http://www.edimmuhendislik.com.tr/Tr/ adresinden ulaşılmıştır)

Efor Lazer. (2021). *Efor Lazer*. (25/02/2023 tarihinde *Anasayfa*. https://www.eforlazer.com/

adresinden ulaşılmıştır).

Esmaeelzadeh, S., Simchi, A., & Lehmhus, D. (2006). Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi7 foam. *Materials Science and Engineering: A*, *424*(1), 290-299. https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.013

Gill, A. S., & Kumar, S. (2016). Surface roughness and microhardness evaluation for EDM with Cu–Mn powder metallurgy tool. *Materials and Manufacturing Processes*, *31*(4), 514-521.

Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons.

Hasak, S. M. A. (2018). *Cu-Ni-Mo Alaşımlı Demir Toz Metal Malzemesinin İşlenebilirlik Performansının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Heidari, M. (2018). *Material Removal Mechanism and Surface Integrity in Ultraprecision Cutting of Porous Materials*. (Doctoral dissertation, Doctoral Thesis, School of Science and Technology, Keio University).

Iqbal, N., Xue, P., Liao, H. J., Wang, B., & Li, Y. L. (2011). Material characterization of porous bronze at high strain rates. *Materials Science and Engineering: A*, *528*(13), 4408-4412. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.043

Klink, A., Guo, Y. B., & Klocke, F. (2011). Surface integrity evolution of powder metallurgical tool steel by main cut and finishing trim cuts in wire-EDM. *Procedia engineering*, *19*, 178-183.

Krajcarz, D. (2014). Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting. *Procedia Engineering*, *69*, 838-843. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.061

Makine Eğitim. (2018). Elektro Erozyon Nedir. Elektro Erozyon ile İşleme. *Makine Eğitimi*. (07/03/2023 tarihinde https://www.makinaegitimi.com/elektro-erozyon-nedir/adresinden ulaşılmıştır).

Mane, V. V. (2016). *An effective method to reduce smearing in machining of metallic foams using ice as an infiltrant* PhD Thesis. Iowa State University.

Miller, S. F. (2003). *Wire Electro-Discharge Machining of Advanced Engineering Materials*. M. Sc. Theses, North Carolina State University. https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/883/etd.pdf?sequence=1&isAllowed=y

M'Saoubi, R., Czotscher, T., Andersson, O., & Meyer, D. (2014). Machinability of powder metallurgy steels using PcBN inserts. *Procedia CIRP*, *14*, 83-88.

Novák, P. (2020). Advanced powder metallurgy technologies. İçinde *Materials* (C. 13, Sayı 7, s. 1742). MDPI.

Šalak, A., Selecká, M., & Danninger, H. (2005). *Machinability of powder metallurgy steels*. Cambridge Int Science Publishing.

Schoop, J., Jawahir, I. S., & Balk, T. J. (2016). Size effects in finish machining of porous powdered metal for engineered surface quality. *Precision Engineering*, *44*, 180-191. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.12.004

Sığırtmaç, T. (2010). *Metal köpük malzemelerin üretim sonrası kesme ve birleştirme işlemlerinin deneysel verilerden yararlanarak modellenmesi*. PhD Thesis, Bursa Uludag University,Turkey.

Sığırtmaç, T., Çakır, M. C., Uğuz, A., & Ensarioğlu, C. (2012). Alüminyum Köpük Malzemelerin İkincil İşlemleri Ve Bu İşlemlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi. *3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi (TİMAK)*, 160-174.

Sintek. (2019). *Sintek Toz Metalurji Sanayi ve Ticaret A.Ş.* (02/04/2023 tarihinde https://sintek.net/adresinden ulaşılmıştır).

Smith, B. H., Szyniszewski, S., Hajjar, J. F., Schafer, B. W., & Arwade, S. R. (2012). Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties. *Journal of Constructional Steel Research*, *71*, 1-10.

Sreenivasa, C. G., & Shivakumar, K. M. (2018). A Review on Prodution of Aluminium Metal Foams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *376*(1), 012081.

Sun, S., & Brandt, M. (2013). *Laser beam machining, nontraditional machining processes*. London: Springer.

Ullen, N. B. (2021). Characterization of machinability of sintered steel foams having different porosities during drilling operations. *Machining Science and Technology*, *25*(4), 527-557.

Ullen, N. B., Hasak, S. M. A., & Dirikolu, M. H. (2020). Factors influencing the machinability during turning sinter-hardened Cu-Ni-Mo based steel: Dependency on cutting speed, feed rate and cutting depth. *Journal of Engineering Research*, *8*(4).

Ürgüplü, M., & Köksal, S. (2015). Lazer ile kesme işlemlerinde kesim kalitesine etki eden parametreler. *3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 865-874.

Varghese, V., & Mujumdar, S. (2021). Micromilling-induced Surface Integrity of Porous Additive Manufactured Ti6Al4V Alloy. *Procedia Manufacturing*, *53*, 387-394. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.041

Xu, J., Zhang, X., & Zhu, F. (2022). Effects of machining parameters on surface morphology of porous bronze during monocrystalline diamond cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, *234*, 107686. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107686

Zou, R., Yu, Z., Li, W., Guo, M., & Li, J. (2016). Influence of porous structure on the machining performance of micro EDM. *Journal of materials processing technology*, *232*, 43-51.