



Derleme / Review

Sürtüneli Delik Delme Prosesi ve Prosesin Başlıca Uygulamaları

Mehmet Yasin DEMİREL¹, İbrahim KARAAĞAÇ²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara.

²Yrd. Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara.

e-posta: yasindemirel@outlook.com, ibrahimkaraagac@gazi.edu.tr

Received/Geliş: 13.02.2017

Revised/Düzeltilme: 02.03.2017

Accepted/Kabul: 02.03.2017

Özet: Sac malzemelerin birbirleriyle sökülebilir bağlantı uygulamaları endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, sac malzeme kalınlıklarının ince olması nedeniyle bu tür bağlantılar çoğu uygulamada bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Vidalı bağlantı uygulamalarında güvenli bağlantı uzunluğunda vida oluşturmak için, şişme somun kullanımı, sac malzemeye somun kaynatma, vidalı perçin vs. gibi farklı yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada; sac malzemelerin vidalı montaj uygulamalarında sac malzemeye vida açmak için kullanılan sürtüneli delme prosesinin temel felsefesi, avantajları, kullanılan ekipman ve takımlar ile prosesin farklı sac malzeme türleri için uygulamaları derlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürtüneli delme; Akıcı delme; Form delme; Talaşsız delme

The Friction Drilling Process and Key Applications of Process

Abstract: Dismountable connection applications of sheet materials are frequently used in the industry. However, due to the thin thickness of the sheet material, these connections are often seen as a problem in practice. Different methods such as the use of swelling nuts, nut welding to sheet material, screwed rivets etc. are frequently used for screw connection applications to form a secure connection screw length. In this study, the basic philosophy of friction drilling process, advantages, the used equipment's, tools and process applications for different types of sheet material are compiled.

Keywords: Friction drilling; Flow drilling; Form drilling; Chipless drilling

1. Giriş

Günümüzde birçok mühendislik uygulamalarında boru biçimli profiller ile ince et kalınlığına sahip sac panellerin montajı çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Sac malzemelerin birbirleriyle birleştirilme operasyonları; ayrıca modern tasarımlı hafif çerçeve yapıları, otomotiv ve ulaşım araçları endüstrisinde de sıkça kullanılmaktadır. Sac metal parçaları birleştirmek için; bağlantı elemanları (cıvata ve somun veya perçinler) ile mekanik birleştirme, kaynaklı birleştirme ve yapıştırma ile birleştirme olmak üzere başlıca üç yöntem bulunmaktadır [1]. Cıvata ile bağlama yöntemi bağlanacak parçalarda sadece bir delik delme ve vida açma işlemini gerektirmesi ve ayrıca standart ve ucuz olmaları sebebiyle, çözülebilen bağlama konstrüksiyonlarında en sık rastlanan bağlama yöntemidir [2].

İnce sac malzemelerin birbirine bağlanmasında sağlamlığın temini sorunu yeterli vidalama uzunluğunun sağlanmasıyla mümkün olmaktadır. Sac plakaların bükülmesi, somun kaynatılması ya

Bu makaleye atıf yapmak için

Demirel M. Y., Karaağaç İ. "Sürtüneli Delik Delme Prosesi ve Prosesin Başlıca Uygulamaları" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2017, 4(2); 234-248.

How to cite this article

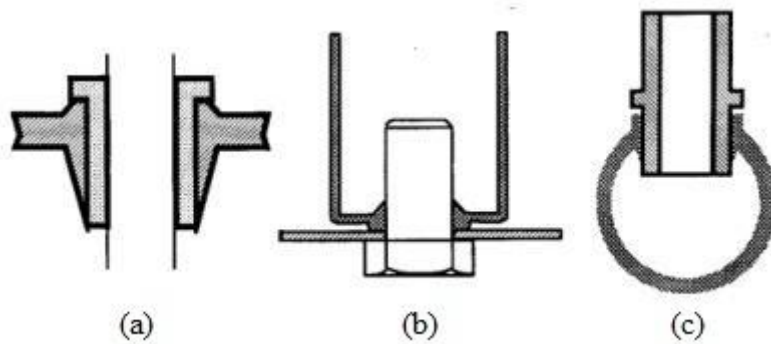
Demirel M. Y., Karaağaç İ. "The Friction Drilling Process and Key Applications of Process" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2017, 4(2); 234-248.

da somun perçin kullanılması vida uzunluğunu artırmak için yapılan en yaygın endüstriyel uygulamalardır. Ancak bütün bu yöntemler ek donanımlar ve operasyonlar gerektirmektedir. Talaş kaldırmadan yeterli vidalama uzunluğu sağlama problemi ancak sürtünmeli delme işlemi ve ovalama kılavuzu ile diş çekme yöntemiyle çözülmektedir [3].

Sürtünmeli delme prosesi, döner konik bir takım ile iş parçasına nüfuz edip talaş üretmeden tek bir aşamada kovan oluşturma olarak da tanımlanabilmektedir [4]. Bu proses, bir delik oluşturmak için dönen bir konik takım ile iş malzemesi arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısıyı kullanmaktadır. Sürtünmeden kaynaklanan bu ısı, deliği oluşturmak için ekstrüzyon uygulanan iş malzemesinin sünekliğinin artmasına sebep olmaktadır [5]. Prosesin daha geniş bir tanımı; konik bir takım ile iş parçasının temas bölgesinde sürtünme sonucu oluşan ısının etkisiyle yumuşamış iş parçasına, takımın dalması ve iş parçasının delinmesi şeklinde meydana gelen, talaşsız, temiz ve geleneksel olmayan bir delik delme yöntemi olarak açıklanmaktadır. Proses ayrıca form delme, akıcı delme ve sürtünmeli karıştırılmalı delme olarak da adlandırılmaktadır. Bu imalat yönteminin amacı; ince cidarlı malzemelerde, form verilen kovan yardımıyla vidalı bağlantı uzunluğunu arttırarak sac parçaları birleştirmeyi sağlamaktır [6].

Proses başlangıçta, 1923 yılında Jan Claude de Valliere tarafından geleneksel delme sürecine alternatif olarak geliştirilmiş olmasına rağmen, pratik uygulamaları ancak altmış yıl sonra tungsten karbür matkap imalatındaki teknik gelişmeler ile yaygın kullanılabilmiştir [7]. Modern endüstriyel uygulamaların gereksinimlerini karşılamak, takım ömrünü ve verimliliğini artırmak, delik yüzey kalitesini iyileştirmek ve kirlilik olmadan delik delme prosesini uygulamak amacıyla özel matkap şekilleri tasarlanmış ve geleneksel olmayan bu delik delme prosesi daha sıklıkla uygulanabilir hale gelmiştir [8].

Sürtünmeli delme yöntemi, farklı kesit ve duvar kalınlıklarında ve çeşitli geometrilerdeki malzemelerde kullanılabilir. Ayrıca, yuvarlak borularda sürtünmeli delme işlemi önemli bir avantaj sağlamaktadır. Sürtünmeli delme yönteminin kullanım alanları; özellikle ince cidarlı parçaların civata bağlantıları, düzgün bir yuvaya ihtiyaç duyan geniş yüzeyli bağlantılar, sızdırmazlık istenen gaz bağlantıları, yüksek mukavemetli kaymalı yataklar, rulman veya kaymalı yatakların ince cidarlı borulara veya profil parçalara oturtulması, su tankları ve basınçlı tanklar, iç içe geçmiş profil ve boru tipi parçalara müşterek delik açma işlemleri, otomotiv endüstrisi ve çelik mobilyalardaki bağlantı operasyonları olarak sıralanabilmektedir [9]. Şekil 1'de sürtünmeli delik delme yönteminin bazı uygulamaları verilmiştir [10].



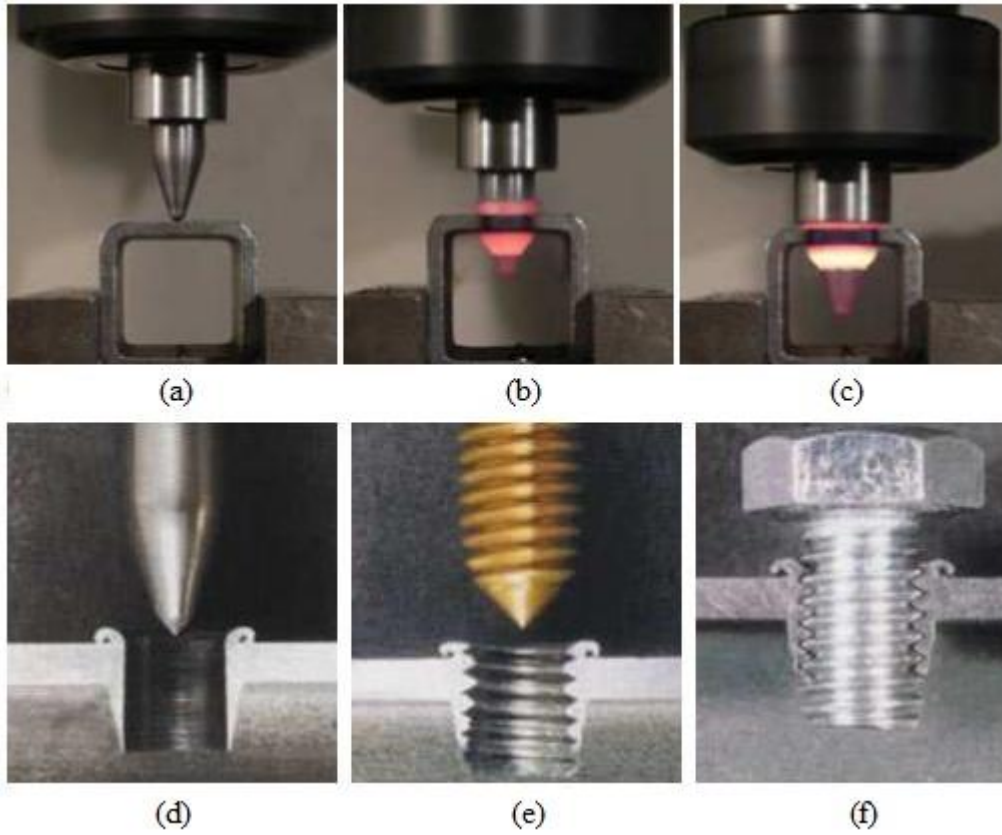
Şekil 1. Sürtünmeli delik delme yönteminin bazı uygulamaları a) Rulmansız mil yatakları
b) Somunsuz bağlantılar c) Contalı veya contasız rakor bağlantıları

Sürtünmeli delme prosesinde, iş malzemesinden kayıp vermeden malzeme yeniden şekillendirildiğinden dolayı, ince malzemelerde malzemenin orijinal kalınlığından yaklaşık üç kat daha uzun kovan ile çok güçlü civata bağlantıları yapmak mümkün olmaktadır. Ayrıca proses için

özel makineler gerekmemekte, gerekli güce sahip matkap tezgahları ve CNC tezgahlar ile bu işlemler tek adımda gerçekleştirilebilmektedir. Küçük yatırım maliyetleri ile yüksek kaliteli delikler elde edilmekte olup ek bileşenler gerektirmemektedir. Daha az üretim adımları ile ince malzemelerde istenen sonuçlar yakalanmaktadır. Proses esnasında talaş ekstrüzyonu olmadığından delinmiş deliğin yüzeyi zarar görmemektedir. Bu nedenle temiz bir operasyon olarak adlandırılmakta ve operasyon esnasında temiz çalışma alanı sağlamaktadır. Ayrıca, geleneksel delme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, bu proses çok hızlı bir şekilde tamamlanmaktadır. Böylece, takım ömrü uzamakta ve işlem maliyetleri azalmaktadır [11-13].

2. Sürtünlü Delme Prosesi ve Kullanılan Takımlar

Sürtünlü delme yöntemi ile şekil verme işlemi beş aşamada gerçekleşmektedir. Bu adımlar Şekil 2'de verilmiştir [14].



Şekil 2. Sürtünlü delme süreci aşamaları a) Birinci b) İkinci c) Üçüncü d) Dördüncü e) Beşinci aşama f) Cıvata bağlantısı

Birinci aşamada; takım iş parçasına yaklaşıp temas etmekte ve bu anda sac malzeme üzerinde itme kuvveti maksimuma ulaşmaktadır.

İkinci aşamada; takımın konik kısmının iş parçasına dalmasıyla birlikte temas bölgesindeki ısı miktarı ve dönme momenti hızlı bir şekilde yükselmektedir.

Üçüncü aşamada; takımın silindirik bölgesi iş parçasına dalmaktadır. Bu aşamada takım yumuşamış malzemeyi aşağıya doğru itmekte ve kovani oluşturmaya başlamaktadır.

Dördüncü aşamada; takımın omuz kısmı takımın ilerleme hareketinin tersi doğrultusunda akan malzemeyi iş parçasının yüzeyine bastırarak sızdırmazlık halkası olarak adlandırılan pulu oluşturmakta ve itme kuvveti tekrar yükselmektedir.

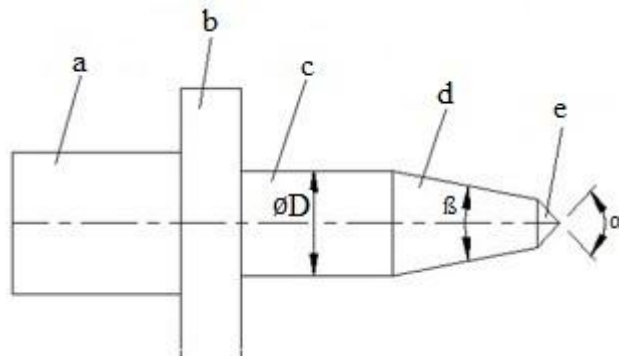
Beşinci aşamada ise delme işlemi tamamlanarak takım geri çekilmektedir [15].

Bu yöntemle oluşturulan kovana kılavuz ile dış çekilebilmektedir. Ancak kovandan talaş kaldırmamak için ovalama kılavuzu ile dış çekmek tercih edilmektedir. Ovalama yöntemiyle dış çekmek soğuk bir şekillendirme veya talaşsız bir işleme operasyonudur. Vidanın ters formuna sahip bir ovalama kılavuzunun, silindirik bir delikte iç vida üretmek için malzeme kaybı olmaksızın malzemeyi yer değiştirmesi olarak tanımlanmaktadır. Ovalama metodu ile açılan vidalarda yüzey kalitesinin daha iyi olduğu ve vidalama sırasında sürtünme kuvvetlerinin daha az olduğu gözlenmektedir. Yapılan çekme testlerinde, ovalanmış vidalı numuneler keserek açılanlara göre daha yüksek kuvvetlerde plastik olarak deforme olmaktadır [16].

Sürtünmeli delme prosesinde sıcaklık önemli bir parametredir. Proses esnasında oluşan bu sıcaklık malzeme yapısına zarar verebildiği gibi, kovan şeklini ve sıcak takımın temas ettiği malzeme yüzeyindeki mikro yapıyı da etkileyebilmektedir [17]. Proses esnasında genellikle iş parçası sıcaklığı 600°C'ye çıkmakta ve takım sıcaklığı da 650-750°C'ye kadar artabilmektedir. Bu sıcaklık değerleri, takımın iş parçasına nüfuz etme gücü, delme sistemi ve takım şekli gibi değişkenlere bağlı olarak çok geniş aralıklar içinde olduğu gözlemlenmiştir [18].

Ayrıca, sürtünmeli delme işleminde kullanılan takımlar, proses esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklara dayanabilecek sinterlenmiş karbür malzemelerden imal edilmektedirler. Takım tutucusunun ve mil yataklarının proses esnasında oluşan bu sıcaklıklardan dolayı aşırı ısınmasını önlemek amacıyla soğutma halkalı bir pens tutucu kullanmak gerekmektedir [19].

Sürtünmeli delme işleminde kullanılan matkabın ömrünü etkileyen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Bu matkaplar çok yüksek sıcaklıklarda bile mukavemet özelliklerini koruyacak şekilde imal edilmelerine rağmen aşırı sıcaklık değişikliklerine karşı hassas olabilmektedirler. Sıvama matkaplarının ani ısınması veya soğuması önlenmeye çalışılmalıdır. Matkap, işlenecek parçaya yumuşakça temas ettirilmeli ve darbelerden korunmalıdır. Matkabın iş parçasına girmesi sırasında çok yüksek burulma kuvvetleri de oluşmaktadır. Eksenel kuvvet ve ilerleme hızı fazla yüksek seçilmiş ise matkap iş parçasını deldikten sonra birden boş kaldığında yorulma kırılmalarına maruz kalmakta veya ilk anda matkabı burulmaya zorlayıp kırılmalara da neden olabilmektedir. Prosesin ara vermeden süreklilik içerisinde tamamlanmasına dikkat edilmelidir. Malzemenin büzüşmesi de matkabın kırılmasına sebep olabilmektedir. Ayrıca bu durum matkabının tam ekseninde dönmemesine ve bunun sonucunda da matkabı kırabilecek kesme kuvvetlerine neden olabilmektedir. Takımın aşınması veya yabancı malzemelerin sıvama matkabına yapışması, sıvanarak açılmış bir kovanın kalitesini de azaltmaktadır. Biriken artık malzemeler düzenli olarak bir eğe ile temizlenmelidir. Yağ ile her birinci ve beşinci delmede yapılacak bir yağlama işlemi, takımların ömrünü belirgin bir şekilde arttırmaktadır. Sıvama matkabının çalışma sıcaklığı mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Proses esnasında kullanılacak bir pens veya soğutma halkalı bir pens tutucu yardımıyla iş parçası ve makine aşırı ısınmaya karşı korunabilmektedir [20]. Sürtünmeli sıvama matkabının genel bir görünüşü ve bu matkabın bölümleri Şekil 3'te verilmiştir [21].



Şekil 3. Sürtünmeli delme matkabı a) Şaft bölgesi b) Omuz bölgesi c) Silindirik bölge
d) Konik bölge e) Merkez bölge

Merkez Bölge: Koni şeklindeki merkez bölgenin açısı (α) ve uzunluğu (H_c) ile gösterilmiştir. Uç kısmının genellikle keskin olmaması nedeniyle delme başlangıcında daha fazla güç gerektirmekte ve bu yüzden ısı artmaktadır. Merkez bölgesi, bir helis matkapta olduğu gibi özel bir forma sahip olup, bu yapı sürtünmeli delme işlemi için radyal yönde destek ve proses başında merkezleme sağlamaktadır.

Konik Bölge: Bu bölge merkez bölgeden daha keskin bir açığa sahiptir. Bu bölge ısı üretmek için iş parçasına sürtünmekte ve kovanı şekillendirmek için malzemeyi yanlamasına itmektedir. Konik bölgenin açısı (β) ve uzunluğu (H_n) olarak gösterilmiştir [21].

Silindirik Bölge: Kovanı ve deliği şekillendirmeye yardımcı olmaktadır. Bu bölgenin uzunluğu ve çapı sırasıyla (H_l) ve (D) olarak belirtilmiştir.

Omuz bölgesi: Takımın omuz kısmı, sürtünmeli delme işlemi sırasında yukarı doğru akan ısı etkisiyle ergimiş ve yumuşamış malzemeyi iş parçası yüzeyine bastırmakta ve pul şeklinde deliğin giriş kısmında sızdırmazlık halkasını oluşturmaktadır. Omuz kısmının çapı silindirik bölgenin çapından büyük olmalı ve bu çap değeri ergiyen malzemenin tamamını altına alarak bastırabilecek büyüklükte seçilmelidir [22].

Şaft bölgesi: Bu bölge, takım tutucu tarafından kavranan alan olarak tanımlanmaktadır [21].

Bu matkaplar müşteri ihtiyaçları doğrultusunda üretildiği gibi; kullanım yerleri, boyutları ve oluşturdukları kovan biçimlerine göre kısa, uzun, kısa düz ve uzun düz olarak dört gruba ayrılmaktadır [23]. Kısa ve uzun formda üretilmiş matkapların konik kısımlarının açıları her iki uzunlukta da aynı olup kullanım yerleri delinecek malzemenin et kalınlığına göre değişmektedir. Bu tip takımlar proses sırasında ilerleme yönünün tersinde parça üzerinde pul oluşturmaktadırlar. Düz tip matkaplar ise prosesin sonunda oluşan pulun kaldırılması için kesici ağıza sahiptirler. Böylece temiz ve düz bir yüzey elde edilebilmektedir [24, 25].

3. Çeşitli Malzemelerde Sürtünmeli Delme Operasyonlarının Uygulamaları

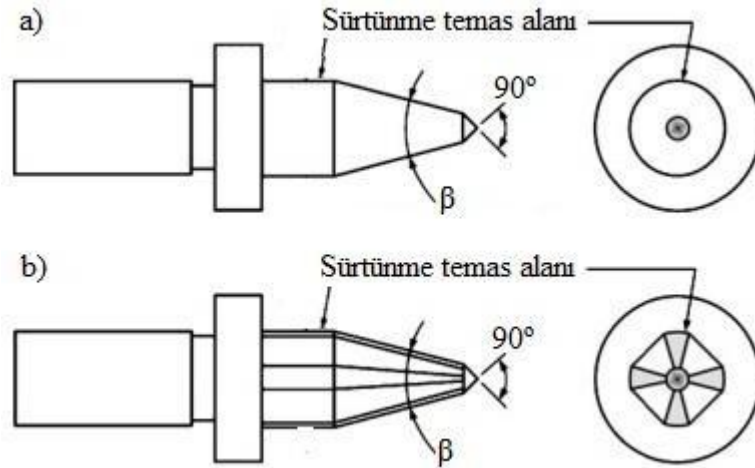
Literatür araştırmalarından sürtünmeli delik delme yönteminin; çelik, paslanmaz çelik, bakır, pirinç, ve alüminyum da dahil olmak üzere çeşitli malzemelerde hassas delikler oluşturmak için uygulanabildiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle bu alanda yapılan çalışmalar malzeme tiplerine göre sınıflandırılarak aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

3.1. Çelik malzemelerde sürtünmeli delme uygulamaları

Üretimde yoğun olarak kullanılan St37-2, CM22NBK ve S460MC sac malzemelerin de sürtünmeli delik delme prosesi deneysel olarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Gemalmayan ve Tunalioglu yaptıkları çalışmada, sıvama işleminden sonra test numunelerine diş açmışlar ve numunelere çatlak testi yapmışlardır. Ardından numunelerin delik dipleri etrafındaki sertlikler incelenmiş ve tüm test numuneleri çekme test cihazına bağlanarak mukavemet değerleri açısından değerlendirilmiştir. Yapılan tüm çalışmalarda, sürtünmeli delik delme işlemi sonrası malzemelerin hiçbir şekilde çatlama uğramadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, malzemelerin sertlik değerlerinin, sıvama sonucu ortaya çıkan sürtünme ve ısı etkisiyle arttığı anlaşılmıştır. Bu durum

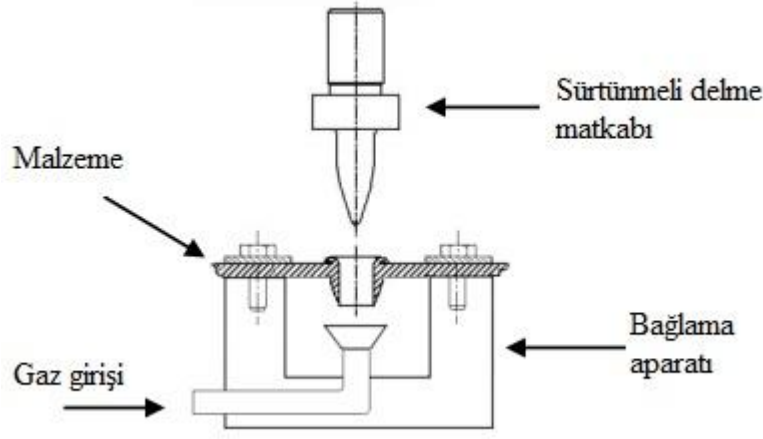
sıvayarak delme ve soğuk şekillendirerek dış açma operasyonlarının sonucunda, malzemelerde mukavemet artışının olduğunu göstermiştir. Ayrıca ortaya çıkan kopma kuvvetlerinin, malzemelerin kullanım yerine göre kabul edilebilir değerlerde olduğu tespit edilmiştir [26]. Özek ve Demir de çalışmalarında, St37 sac malzemeyi tungsten karbür takım ile sürtünmeli delme prosesi ile delerek; yüzey pürüzlülüğü, kovan yüksekliği, kovan biçimi ve kovan çeper kalınlığı gibi kriterlere göre en uygun dönme hızı ve ilerleme oranı parametrelerini araştırmışlardır. Malzeme kalınlığının delik çapına (t/d) olan oranın artmasıyla, kovan oluşumunu sağlayan malzeme miktarı arttığından bu oranın proses sonucu oluşan kovan biçimi ve kovan yüksekliği açısından önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, ilerleme miktarının ve dönme hızının artırılmasının kovan oluşumunda deformasyonu artırdığı ve akan malzemenin radyal doğrultuda deliğin çevresine yayılmasından dolayı kovan yüksekliğinin azaldığı, kovan çeper kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir [27].

St12 sac malzemenin sürtünmeli delme prosesinde; takım sürtünme açısı, sürtünme temas alanı oranı (FCAR), ilerleme hızı ve devir gibi proses parametrelerinin; iş parçasının yüzey sıcaklığına, itme kuvvetine ve torqa etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre; itme kuvveti ve tork değerlerinin, sürtünme açısı, ilerleme oranı ve FCAR değerlerinin artmasıyla dereceli olarak arttığı, diğer yandan da artan delme hızı değeri ile itme kuvveti ve moment değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, delme hızının artması ile iş parçasının yüzey sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir. Artan veya azalan sürtünme açısının ve FCAR'ın sürtünmeli delinecek parçanın yüzey sıcaklığı üzerinde önemli etkisi olmadığı belirtilmiştir [28]. Farklı FCAR oranlarına sahip sürtünmeli delme matkabının genel görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir [29].



Şekil 4. Farklı FCAR oranlarına sahip sürtünmeli delme matkapları a) FCAR %100 b) FCAR %50

Otomobil endüstrisinde oldukça yaygın kullanılan çift fazlı (Dual Phase) çelikler için sürtünmeli delme prosesi incelenmiştir. Nardi ve diğerleri farklı kalınlıklardaki çift fazlı çelikler için optimum işleme koşullarını, farklı devir ve ilerleme hızlarında kontrol testleri ile değerlendirmişlerdir. Gerekli tork ve itme kuvveti hesaplanmış ve delik boyut toleransları incelenmiştir [30]. Ayrıca, Nardi ve diğerleri diğer bir çalışmalarında galvanizli çift fazlı çeliklerde, çatlaklar veya yüzeysel kusur içermeyen bir sürtünmeli delme prosesi geliştirmeye odaklanmışlardır. Yenilikçi bir yöntem olarak delme prosesi esnasında, malzemenin kovan oluşan tarafından saf argon gazı verilmiştir. Oluşturulan deney düzeneği Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi

Bu koşullar altında sürtünlü delinen 60 g/m^2 galvaniz kaplı farklı kalınlıklardaki 600 MPa akma mukavemetine sahip çift fazlı çelik sac malzemede, sürtünlü delme prosesinin çok kararlı olduğu görülmüştür. Farklı dönme ve ilerleme hızlarında kontrollü testler ile tamamen hatasız delikler için en uygun işleme koşulları sağlanmıştır [31].

Hafif çerçeve yapılar, çelik konstrüksiyon imalatlarında ve endüstriyel uygulamalarda oldukça önemli bir yer tutan ince cidarlı profil ve boruların birleştirilmesinde sürtünlü delme prosesinin avantajları araştırılmıştır. Miller ve diğerleri, 1,5 mm et kalınlığındaki AISI 1015 düşük karbonlu iş parçasının sürtünlü delme prosesini ve takım aşınmasını incelemişlerdir. Çalışmada her deliğin delinmesi yaklaşık 2,3 s sürmüş, her delme operasyonu arasında takımdaki ısı dağılımı için 10 s beklenmiştir. Çalışma boyunca, itme kuvveti, tork, takım ağırlığı ve takım profilinin ölçümleri 1, 2, 3, 4, 5, 10, 50, 100, 200, 500, 1000 ve her bin delik sonra gerçekleştirilmiş ve toplamda 11.000 delik sonunda takımın hala problemsiz görevini yaptığı görülmüştür [32]. Pantawane ve diğerleri çalışmalarında 1mm et kalınlığına sahip AISI 1015 kutu profil iş malzemesine sürtünlü delme prosesi uygulamışlardır. Prosesine ait hız, ilerleme gibi girdi parametreleri incelenmiş, işleme koşullarının sonuçları çekicilik fonksiyonu olarak adlandırılan bir amaç fonksiyonu kullanılarak çoklu yanıt yöntemiyle optimum delme koşulları bulunmuştur [33].



Şekil 6. Sürtünlü matkap ile delinmiş AISI 1015 profil a) İzometrik görünüş b) Kesit görünüşü

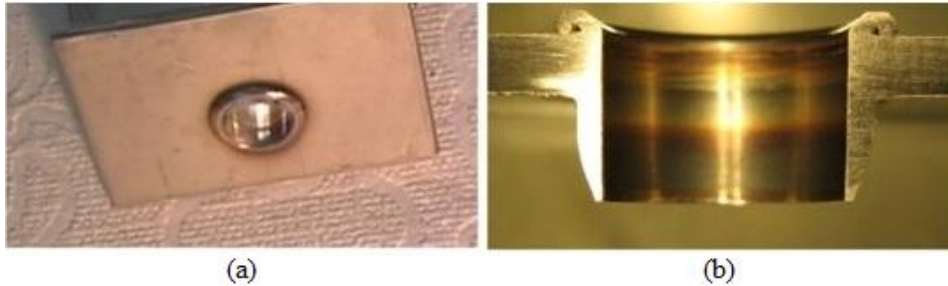
Bir diğer çalışmada da 2 mm et kalınlığındaki AISI 1010 kare profil iş parçası, tungsten karbür takım ile değişik sürtünme açıları ve farklı çaplarla sürtünlü delme prosesiyle delinmiş, işleme parametrelerinin kuvvet ve sıcaklık üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca pul geometrisi, kovan yüksekliği ve delik ağzında oluşan yaprak geometrisi; sürtünme koni açısı, ilerleme oranı ve delme hızı gibi delme koşulları açısından da incelenmiştir. Çalışma sonuçlarından, delinen bölgenin

sıcaklığı delik delme hızının artmasıyla ve ilerleme oranının azalmasıyla yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca pul ve kovan geometrisinin, yüksek ilerleme oranlarında bozuk olduğu tespit edilmiştir [34].

3.2. Paslanmaz çelik malzemelerde sürtünmeli delme uygulamaları

Endüstriyel mutfaklar, eşanjör ve boyler üretimi, gıda, otomotiv, kimya ve petro kimya gibi endüstrilerde sıklıkla kullanılan paslanmaz çeliklerin sürtünmeli delmesi prosesi kullanılarak delik oluşturulması ile ilgili çalışmalar araştırılmıştır. Chow ve diğerleri, bilenebilir bir sinterlenmiş karbür ile yeni bir tür sürtünme matkabı geliştirmişler ve bu takımı AISI 304 paslanmaz çeliği sürtünmeli delmek için kullanmışlardır. Optimum delme koşullarında; ilerleme hızı 100 mm/min ve delme hızı 90 m/min ile sağlanmış, ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) 0.96 μm elde edilmiştir. Özellikle yüksek ilerleme oranlarında kötü yüzey pürüzlülüğü görülmüştür. Bunun nedeni, yüksek aksel ilerleme değerinin malzemenin tam erimemesine sebep olması olarak belirtilmiştir. Tam erimeyen malzemeler matkap üzerine yapışmakta, bu nedenle de kötü yüzey kaliteleri elde edilmiştir. Ayrıca; ilerleme hızı çok düşük olduğu durumlarda ise, erimiş malzemeler farklı soğuma hızlarına sahip olacaklarından dolayı, üst katmandaki malzemeler alt katmandakilere göre daha hızlı soğumuşlardır. Bu malzemeler, sürtünme matkabının dönüşü sırasında takıma yapışmış ve kötü bir delik yüzey kalitesi elde edilmiştir [29].

Paslanmaz çeliklerin sürtünmeli delme prosesi ile oluşan kovan ve pul yapısının incelenmesinin yanı sıra Lee ve arkadaşları, 2 mm kalınlığındaki AISI304 sac malzemesini kaplamasız, TiAlN ve AlCrN kaplamalı olarak üç farklı sürtünmeli matkap ile 2400 rpm, 3600 rpm, 4800 rpm ve 6000 rpm ile delmiş, oluşan matkap yüzey sıcaklığı, takım aşınması ve aksel kuvvetleri incelemişlerdir.



Şekil 7. AISI304 sac malzemede sürtünmeli delik delme uygulaması
a) Genel görüntü b) Kesit görüntüsü

Çalışma sonucunda, delme sürecinde matkapların yüzey sıcaklıklarının devirle beraber arttığı görülmüş ve yüzey sıcaklığı en düşük ölçülen kaplamasız matkap olurken, en yüksek yüzey sıcaklığı AlCrN kaplamalı matkapta ölçülmüştür. Benzer şekilde, tekrarlanan delmeler veya delinen delik sayısının artması ile matkapların yüzey sıcaklığının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, AISI 304 paslanmaz çelik iş parçasının delinme esnasında takıma yapışmasıyla, matkap yüzey pürüzlülüğünü artırması ve sonraki delmelerde sürtünme katsayısının artması olarak tespit edilmiştir. Aynı devir ve aynı sayıda delik delmiş matkaplardan, kaplanmış matkapların, kaplanmamış matkaba göre, daha az aşındığı ve AlCrN kaplamalı matkapta en az takım aşınması olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek devirlerde takım kaplaması büyük aşınmaya uğramış ve kaplanmış ile kaplanmamış matkap arasındaki yüzey sıcaklığı farkının azaldığı tespit edilmiştir. TiAlN ve AlCrN kaplamaların varlığı aksel üretilen itme kuvvetinde ve matkap yüzey sıcaklığında daha az değişime neden olurken, AlCrN kaplamalı matkabın en az değişikliği gösterdiği gözlemlenmiştir [35].

Urbikain ve diğerleri çalışmalarında, AISI 304 ve AISI 1045 kutu profil malzemeler ile AA5754 ve AA6082 alüminyum alaşım sac malzeme çiftlerini eş zamanlı olarak sürtüneli delik delme yöntemiyle delmişler ve ovalama kılavuzu ile dış çekmişlerdir.

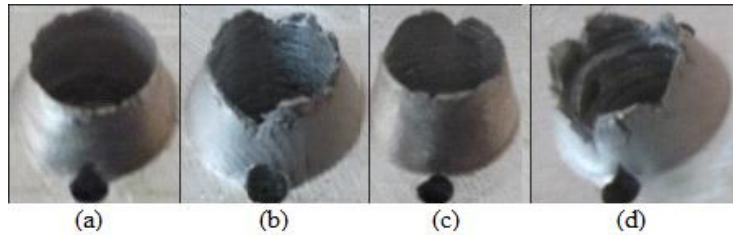


Şekil 8. Eş zamanlı olarak delinmiş sac metal ve kutu profil çiftlerinin kesit görünüşü

Çalışmada, proses parametreleri yüzeyler arasındaki boşluğu azaltmak ve iyi bir kovan üretmek için incelenmiştir. Ayrıca, bazı deney numunelerine çekme testi uygulanmış ve geleneksel cıvatalı bağlantılar ile benzer değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, imal edilen bağlantılar için korozyon testleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, bu yöntemin uygulanmasından zaman ve para tasarrufu elde edilebileceği ve bu yeni yaklaşımın uygulanabileceği hedef pazarlarda, kaynaklı veya somun kullanılarak oluşturulan klasik cıvatalı bağlantıların yerini alabileceği belirtilmiştir [36].

3.3. Alüminyum alaşımlarında sürtüneli delme uygulamaları

Endüstrinin pek çok kolunda farklı ürünlerin imalatında kullanılan alüminyum alaşımları, uzay ve havacılık endüstrisi için de oldukça önemlidir. Farklı ısı iletkenlik katsayısına sahip alüminyum alaşımlarının sürtüneli delinmesini araştıran Demir ve diğerleri; devir, ilerleme ve malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarına göre sürtünme ısıları ile yüzey pürüzlülüğü ve kovan yüksekliğini araştırmışlardır. 4 mm kalınlığındaki AA1050, AA6061, AA5083 ve AA7075-T651 alüminyum alaşımlarının; 25 mm/min, 50 mm/min, 75 mm/min ve 100 mm/min ilerleme hızlarında ve 1200 rpm, 1800 rpm, 2400 rpm, 3000 rpm, 3600 rpm ve 4200 rpm devir değerlerinde sürtüneli delme süreçlerini incelemişlerdir. Uygulama sonucu elde edilen parçalara ait görüntüler Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Sürtüneli delmenin farklı alüminyum malzemelerdeki uygulamaları
a) AA1050 b) AA6061 c) AA5083 d) AA7075-T651

Çalışma sonucunda, yüksek devir ve düşük ilerleme hızlarında yüksek sürtünme sıcaklıkları elde edildiği tespit edilmiştir. Büyük kovan yükseklikleri ancak düşük devir ve yüksek ilerleme hızlarında oluşmuştur. Sürtüneli delme prosesinin AA5083, AA6061 ve AA7075-T651 alüminyum alaşımlarında, 2400 rpm ile kullanılan ilerleme hızlarının hepsinde uygun yüzey pürüzlülük değerlerini verdiği gözlemlenmiştir. AA1050 alüminyum alaşımının sahip olduğu yüksek termal iletkenlik katsayısı nedeniyle, optimum yüzey pürüzlülük değerleri 25 mm/min - 2400 rpm, 50 mm/min - 3000 rpm, 75 mm/min - 3600 rpm ve 100 mm/min - 4200 rpm ilerleme ve devir çiftleriyle elde edilebilmiştir [37].

Hyness ve arkadaşları AA 6061-T6 alüminyum malzemenin sürtünmeli delme prosesi kullanılarak delinmesinde, termal davranışları nümerik analizler ile incelemişler ve ısı akışını sayısal modele uygulayarak sıcaklık dağılımını gözlemlemişlerdir. Sayısal sonuçlardan, ilk birkaç milisaniye içinde takım ve iş parçasının temas noktasının maksimum sıcaklığa ulaştığını gözlemlenmiştir. Sayısal analizler, AA 6061-T6 malzemesinin merkezinin, maksimum sıcaklığını 332,85°C göstermiştir. Bu durumlarda sac malzemenin viskoplastik hale geldiğini ve bir kovan oluşturmak için dışarı aktığını tespit etmişlerdir [38].

Taguchi metodu, AA1100 alüminyum alaşımı malzemesinin üzerinde yüksek hız çeliği (HSS) malzemeli sürtünmeli delme matkabının performansını değerlendirmek için uygulanmıştır. Diwakar ve diğerleri yüksek hız çeliği bir takım ile sürtünmeli delme deneyi düzenegi tasarlamışlardır. Çalışma sonucunda, sürtünmeli delme prosesinin delme ve havşalamalı iki aşamalı prosese bir alternatif olabileceği belirtilmiştir. Düşük ve orta devirlerde delik içerisinde parlak bir yüzey elde edilirken, yüksek devirlerde delik formunun içinde lekeler görülmüştür. Deneyler, takımın, sivri uçlu bir takım ile karşılaştırıldığında daha az tork ve itme kuvveti gerektirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, iş parçası üzerinde rasgele bükülmeler gözlemlenmiştir [39]. Farklı alüminyum alaşım üzerinde benzer metotla çalışan Krishna ve arkadaşları, 1 mm et kalınlığına sahip alüminyum AA6351 iş malzemesine yüksek hız çeliği takımla sürtünmeli delme prosesi uygulamış ve Taguchi yöntemi ile sürtünmeli delme takımının performansı değerlendirmiştir. Takımın koniklik açısının, tork ve itme kuvveti değerlerini etkileyen kritik bir parametre olduğu ve bu işlemin, delme ve havşalamalı iki aşama için bir alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır. Düşük ve orta devirlerde delik içerisinde parlak bir yüzey elde edilirken, yüksek devirlerde delik formunun içinde lekeler görülmüştür. İş parçası üzerinde rasgele bükülmeler gözlemlenmiştir [40].

Gevrek malzemelerde proses sonucu oluşan kovan, çatlak ve kırıklardan dolayı taç yaprağı biçiminde meydana gelebildiğinden bağlantı uzunluğunu artırmamaktadır [41]. Yapılan farklı bir çalışmada bu problem ele alınmış, gevrek bir malzeme olarak bilinen AA7075-T651 alüminyum alaşımının sürtünmeli delmesinde, ön delik derinliğinin ve çapının; kovan şekli, deformasyon ve sürtünme ısısı üzerine etkilerini araştırılmıştır. Sonuçlar, ön delik etkisinin takım ucunun geometrik boyutlarına bağlı olduğunu göstermiştir. Ön delik çapının takımın uç çapına yakın olduğu ve ön delik derinliğinin takımın uzunluğundan büyük olduğu durumlarda, başlangıç deformasyonu azalmış, sürtünme ısısı düzenlenmiş ve kovanın silindirik şeklinde daha az çatlak ve taç yaprağı oluşmuştur [42].

3.4. Diğer işlenebilir malzemelerde sürtünmeli delme uygulamaları

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, sürtünmeli delme prosesinin imalatta kullanılan diğer malzemelerde de uygulanabildiği görülmektedir. Boopathi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada konik tungsten karbür takım kullanarak pirinç, alüminyum ve paslanmaz çelik parçalar üzerinde sürtünmeli delme prosesi uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Proses sonrası takıma ait mikro görüntüler incelenmiş, pirinç malzemenin alüminyum malzemeye göre daha az yapışma özelliği gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, paslanmaz çeliğin sürtünmeli delinme süreci alüminyum ve pirinç malzemelere kıyasla daha akıcı bir süreç olmuştur. Ölçülen itme kuvvetleri karşılaştırıldığında, alüminyum için 1512 N'luk düşük bir itme kuvveti yeterli olurken, pirinç 1798 N'luk bir itme kuvveti gerektirmiştir. Paslanmaz çeliğin sürtünmeli olarak delinebilmesi için 2745 N'luk bir itme kuvveti gerektiği görülmüştür [43].

Sobotová ve arkadaşları 2 mm et kalınlığındaki AlMgSi alüminyum alaşımı, bakır, S2356JR iş parçalarını sürtünmeli delme prosesi kullanarak delmişler ve delinen kovana kılavuz çekmişlerdir. Oluşan deliklerde kovan ve pul şekilleri ile çekilen dişlerin mukavemeti incelenmiştir. Bakır parçada oluşan kovanın ve pulun çok düzgün olmadığı ancak dişlerin mekanik değerlerinin kabul edilebilir değerlerde olduğu görülmüştür [44].

Özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılan dökme metallerde sürtünlü delme prosesinde oluşan malzeme çatlaklarının sebep olduğu bozuk kovan şeklinin üstesinden gelmek için deneysel araştırma çalışmaları yapılmıştır. 4 mm kalınlığında alüminyum-silisyum-bakır alaşımı A1380 ve magnezyum-alüminyum-çinko alaşımı MgAZ91D iş malzemeleri ön ısıtma uygulanarak ve uygulanmadan sürtünlü matkap ile delinmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir [45].



Şekil 10. Sürtünlü delik uygulamaları a) A1380 b) AISI 1020

Yapılan çalışma sonucunda; iş parçasına ön ısıtma uygulamanın ve yüksek iş mili hızının, gevrek döküm metalleri sürtünlü delebilmek için gerekli olan itme kuvvetini, tork, enerji ve güç değerlerini azaltmaya yaradığını kanıtlamışlardır. 100°C, 200°C ve 300°C ön ısıtma uygulanan A1380 malzeme için, yüksek iş parçası sıcaklığında kovan şekli ve kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek iş parçası sıcaklığında kovanların formunda daha az çatlama ve taç yaprağı oluştuğu tespit edilmiştir. Oda sıcaklığındaki malzemelerde yapılan deneylerde, yüksek iş mili hızının A1380 iş parçası için kovan oluşumunu etkilemediği ancak MgAZ91D iş parçası için, oluşan kovan şekline zararı olduğu görülmüştür [45].

Mühendislik ve medikal uygulamalarında giderek artan bir şekilde ilgi duyulan bir malzeme olan titanyum malzemeye, Miller ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada sürtünlü delme prosesi uygulanmıştır. Ticari saf (CP) titanyum malzemenin sürtünlü delme prosesiyle delinmenin bir sonucu olarak malzemede oluşan sertlik değişiklikleri, mikro değişiklikler, yüzey altı mikro çentikler, sıcaklık ve plastik şekil değiştirme etkileri incelenmiştir. Titanyum iş parçasının sürtünlü delme prosesi ile delinmesi oldukça zor olmuştur. Delinmiş titanyumun kovan şeklinin kısa ve kalın olduğu görülmüştür. Ayrıca, malzemenin mikro yapısında çatlak kümeleri ve yüzey tabakasında da geniş bir kırık tanımlanmıştır. Delme işlemi sırasında titanyum yüzey tabakalarında, yüksek sıcaklığa bağlı oluşan termal gerilmelerin bu çatlaklara neden olabileceği belirtilmiştir [46].

Kompleks şekilli magnezyum profiller; havacılık ve uzay, nükleer, otomotiv ve diğer mühendislik alanlarında sıkça kullanılabilir. Biermann ve arkadaşı çalışmalarında iki farklı kalınlıktaki (4 mm ve 5 mm) dövülebilir magnezyum alaşımı AZ31 malzemenin sürtünlü delinmesi esnasında, tork, aksenal kuvvet ve proses sıcaklıklarının incelenmesini amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda, ilerleme arttığında uygulanan tork ve aksenal kuvvetin arttığı, ancak artan et kalınlığı ile aksenal kuvvetin düştüğü görülmüştür. Ayrıca et kalınlığındaki değişimin proses esnasında ortaya çıkan ısı miktarını da değiştirdiği gözlemlenmiştir. 5 mm et kalınlığındaki iş parçasının sürtünlü matkap ile delinmesinde maksimum sıcaklık 420°C ölçülürken, 4 mm et kalınlığındaki iş parçasının sürtünlü matkap ile delinmesinde maksimum sıcaklık 437°C olarak ölçülmüştür [47].

Lee ve diğerleri, uçak motorları, petrokimya ve nükleer endüstri bileşenlerinin üretilmesinde yaygın olarak kullanılan ve nikel bazlı bir süper alaşım olan IN-713LC malzemesinde, farklı devir ve ilerleme hızları altında sürtünlü delme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Bu yöntemle delinmiş olan

deliklerde malzeme sertleşmesi, yuvarlaklık toleransı ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikler incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, sertliğin delik duvarının yakınında yüksek değerlerde olduğunu ve delik kenarından uzaklaştıkça azaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, yüksek devirlerde ve ilerleme hızlarında, daha iyi yuvarlaklık toleransı elde edilmiş ve delik yüzeylerinde pürüzsüz bir yüzey gözlemlenmiştir [48].

4. Sonuçlar

Sürtünmeli delme prosesi, farklı türlerdeki ince sac malzemelerin vidalı bağlantılarında getirdiği avantajlar nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada proses; temel felsefesi, kullanılan takımlar ve uygulanan malzemeler açısından derinlemesine incelenmiş ve bu alanda yapılan çalışmalar derlenmiştir. Prosesinin uygulanmasından elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Sac malzemeden kayıp verilmeden malzeme yeniden şekillendirilmektedir. Bu nedenle; ince malzemelerde, malzemenin orijinal kalınlığından yaklaşık üç kat daha uzun kovan oluşturulabilmektedir.
- Proses özel dizayn edilmiş makineler gerektirmeyip, matkap ve CNC tezgahlar kullanılarak proses tek adımda gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, şişme somun veya somun kaynatma gibi ekstra operasyonlara ihtiyaç duymadığı için daha ekonomik bir yöntemdir.
- Proses, talaşsız üretim yöntemi olduğu için operasyon esnasında çevreyi kirletmemektedir.
- Çelik, paslanmaz çelik, bakır, magnezyum alaşımları, pirinç ve alüminyum da dahil olmak üzere çok sayıda malzemede proses başarıyla uygulanabilmektedir.
- Çelik malzemelerde prosesin uygulandığı yerlerdeki sertlik değerinin sürtünmenin ve ısının etkisiyle arttığı ve bu durumun dayanımı arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Çelik ve paslanmaz çelik malzemelerde, ilerleme miktarının artmasının malzemenin delik çevresinde yığılmasına sebep olduğu ve şekillendirilebilirliği olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.
- Alüminyum malzemelerde düşük devir ve yüksek ilerleme hızlarında kovan yüksekliğinin daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.
- Gevrek malzemelerdeki uygulamalarda, çatlak ve kırıklardan dolayı kovan geometrisi taç yaprağı biçiminde oluşabilmektedir.
- Sac malzemelerde sertliğin artması durumunda malzemenin takıma yapışmasının azaldığı gözlemlenmiştir.

Simgeler ve Kısaltmalar

| | |
|----------|--|
| α | Merkez açısı (derece) |
| H_c | Merkez bölgenin uzunluğu (mm) |
| β | Konik bölgenin açısı (derece) |
| H_n | Konik bölgenin uzunluğu (mm) |
| D | Silindirik bölgenin çapı (mm) |
| H_l | Silindirik bölgenin uzunluğu (mm) |
| t | Malzeme kalınlığı (mm) |
| d | Delik çapı (mm) |
| s | Saniye |
| min | Dakika |
| rpm | Devir / dakika |
| R_a | Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm) |
| FCAR | Sürtünme temas alanı oranı |
| HSS | Yüksek hız çeliği |

Kaynaklar

- [1] Alves L.M., Dias E.J., Martins P.A.F., “Joining sheet panels to thin-walled tubular profiles by tube end forming” *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19: 712-719.
- [2] Solmaz E., Çavdar K., “Vida veriminin deneysel tespiti”, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Konya Şubesi II. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya, Türkiye (2003).
- [3] Shalamova P.V., Kulygina I.A., Yaroslavovab E.N., “ANSYS software-based study of thermal drilling process”, *Procedia Engineering*, 2016, 150: 746-752.
- [4] Raju B.P., Swamy M.K., “Finite element simulation of a friction drilling process using deform-3d”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, 2(6): 716-721.
- [5] Miller S.F., Shih A.J., “Thermo-mechanical finite element modeling of the friction drilling process”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, 129: 531-538.
- [6] Demir Z., “Sürtünlü delmede mikro yapı ve mikro sertliğin araştırılması”, *New World Sciences Academy Technological Applied Sciences*, 2013, 8(1): 54-66.
- [7] France J.E., Davison J.B., Kirby P.A., “Strength and rotational stiffness of simple connections to tubular columns using flowdrill connectors”, *Journal of Constructional Steel Research*, 1990, 50: 15-34.
- [8] Ku W.L., Hung C.L., Lee S.M., Chow H.M., “Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53: 935-944.
- [9] Doğru N., “AISI 1010 Çelik Malzemenin Sürtünlü Delme Yöntemiyle Delinmesinde Delme Karakteristiklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [10] El-Bahloul S.A., El-Shourbagy H.E., Al-Makky M.Y., El-Midany T.T., “Thermal friction drilling: (a review)”, 15th International Conference On Aerospace Sciences & Aviation Technology, Cairo, Egypt (2013).
- [11] Prabhu T., Arulmurugu A., “Experimental and analysis of friction drilling on aluminium and copper”, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2014, 5(5): 130-139.
- [12] El-Bahloul S.A., El-Shourbagy H.E., El-Midany T.T., “Optimization of thermal friction drilling process based on taguchi method and fuzzy logic technique”, *International Journal of Science and Engineering Applications*, 2015, 4(2): 55-59.
- [13] Eliseev A.A., Fortuna S.V., Kolubaev E.A., Kalashnikova T.A., “Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling”, *Materials Science & Engineering A*, 2017, 691: 121–125.
- [14] Sobotová L., Spišák E., “The contribution of evaluation of material joining with new technologies”, *The 11th International Scientific Conference Trends in Business Management Systems*, High Tatras (2008).
- [15] Demir Z., “A7075-T651 Alüminyum Alaşımının ve St37 Çelik Malzemesinin Sürtünlü Delme Yöntemi İle Delinmesinin Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [16] Acıyan A., “Ovalama Yöntemi İle İç Vida Açma”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).
- [17] Matysiak W., Bernat L., “Shaping the edges using flowdrill technology”, *Metalurgija*, 2015, 54(1): 235-238.
- [18] Krasauskas P., “Experimental and statistical investigation of thermo mechanical friction drilling process”, *Mechanika*, 2011, 17(6): 681-686.
- [19] Kals H.J.J., “Flowdrilling: a preliminary analysis of a new bush-making operation”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1983, 32(1): 167–171.
- [20] Sözügüzel D., “İnce Cidarlı CM22NBK Malzemesi İçin Sıvayarak Delme (Flowdrill) Prosesi İle Diş Açma Ve Alternatif Malzeme Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).

- [21] Kanagaraju T., Peter J.S.J., Samuel D.R., Prakash J.P., “Optimization of drilling parameters for thrust force and torque in friction drilling process”, *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2016, 24(4): 1577-1582.
- [22] Demir Z., “A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delinmesinde takım geometrisinin etkisinin araştırılması”, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 2015, 5(1): 13-25.
- [23] Formdrill. “Catalog Formdrill”. <http://www.formdrill.com/english/catalog1.htm> (15.11.2016)
- [24] Flowdrill. “Products”. http://www.flowdrill.com/eu_en/products#category-title (15.11.2016)
- [25] Centerdrill. “Products”. <http://www.centerdrill.de/english/products/centerdrill.html> (15.11.2016)
- [26] Gemalmayan N., Tunalıoğlu M.Ş., “Farklı tip ince cidarlı malzemeler için sıvayarak delik delme prosesi ile diş açma yöntemi”, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası 11. Otomotiv Sempozyumu*, Bursa, Türkiye (2009).
- [27] Özek C., Demir Z., “St 37 çeliğinin sürtünmeli delinmesinde optimum dönme hızı ve ilerleme oranının araştırılması”, 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, Türkiye (2012).
- [28] Kaya M.T., Aktaş A., Beylergil B., Akyıldız H.K., “An experimental study on friction drilling of St12 steel”, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2014, 38(3): 319-329.
- [29] Chow H.M., Lee S.M., Yang L.D., “Machining characteristic study of friction drilling on AISI 304 stainless steel”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 2008, 207: 180-186.
- [30] Nardi D., López de Lacalle L.N., Lamikiz A., “Taladrado por fricción en aceros de doble fase”, *Revista de Metalurgia*, 2012, 48(1): 13-23.
- [31] www.researchgate.net/publication/253980531_Friction_Drilling_of_Stainless_Steels_pipes (21.11.2016)
- [32] Miller S.F., Blau P.J., Shih A.J., “Tool wear in friction drilling”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(10): 1636-1645.
- [33] Pantawane P.D., Ahuja B.B., “Experimental investigations and multi-objective optimization of friction drilling process on AISI 1015”, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2011, 2(2): 448-461.
- [34] Özler L., Doğru N., “An experimental investigation of hole geometry in friction drilling”, *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28(4): 470-475.
- [35] Lee S.M., Chow H.M., Huang F.Y., Yan B.H., “Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN and TiAlN-coated tungsten carbide tools”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, 49(1): 81-88.
- [36] Urbikain G., Perez J.M., Lacalle L.N.L., Andueza A., “Combination of friction drilling and form tapping processes on dissimilar materials for making nutless joints”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture 2016*, 2016: 1-14.
- [37] Özek C., Demir Z., “Investigate the friction drilling of aluminium alloys according to the thermal conductivity”, *TEM Journal*, 2013, 2(1): 93-101.
- [38] Hynes N.R.J., Kumaran M.M., Rakesh N., Gurubaran C.K., “Numerical analysis in friction drilling of AISI1020 steel and AA6061-T6 alloy”, *Recent Advances in Environmental and Earth Sciences and Economics*, Zakynthos Island, Greece (2015).
- [39] Diwakar R.V., Krishnaiah G., Gopi C., Indumathi, “Analysis in form drilling AA1100 using HSS tools”, *International Conference on Trends in Mechanical and Industrial Engineering (ICTMIE'2011)*, Bangkok, Thailand, (2011).
- [40] Krishna P.V.G., Kishore K., Satyanarayana V.V., “Some investigations in friction drilling AA6351 using high speed steel tools”, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2010, 5(3): 11-15.
- [41] Özbek C., Demir Z., “A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delinmesinde kovan yüksekliğinin malzeme kalınlığına göre araştırılması”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 2013, 4(2): 61-67.

- [42] Demir Z., “An experimental investigation of the effect of depth and diameter of pre-drilling on friction drilling of A7075-T651 alloy”, *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2016, 1(2): 46-56.
- [43] Boopathi M., Shankar S., Manikandakumar S., Ramesh R., “Experimental investigation of friction drilling on brass, aluminium and stainless steel”, *Procedia Engineering*, 2013, 64: 1219-1226.
- [44] Sobotová L., Kmec J., Bičejová E., “Thermal drilling – new progressive technology”, *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal Of Engineering*, 2011, IX(3): 371-373.
- [45] Miller S.F., Tao J., Shih A.J., “Friction drilling of cast metals”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(12-13): 1526-1535.
- [46] Miller S.F., Blau P.J., Shih A.J., “Microstructural alterations associated with friction drilling of steel, aluminum, and titanium”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2005, 14(5): 647-653.
- [47] Biermann D., Liu Y., “Innovative flow drilling on magnesium wrought alloy AZ31”, *Procedia CIRP*, 2014, 18: 209-214.
- [48] Lee S.M., Chow H.M., Yan B.H., “Friction drilling of IN-713LC cast superalloy”, *Materials and Manufacturing Processes*, 2007, 22: 893-897.