

## Sürtüneli delme işleminde elde edilen kovanın ve pulun oluşmasına etki eden parametrelerin araştırılması

### Investigation of parameters affecting the formation of the bushing and bushing wall obtained in the friction drilling process

Cebeli ÖZEK<sup>1\*</sup>, Muhammet BAL<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.  
cozek@firat.edu.tr, mbal023@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 02.05.2019  
Kabul Tarihi/Accepted: 24.10.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 12.09.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.65148  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Sürtüneli delme, dönen bir takım ile iş parçası-takım ara yüzeyinde sürtünme sonucu oluşan ısının etkisiyle geleneksel olmayan önemli bir imalat yöntemidir. Bu yöntemin amacı, ince cidarlı saclarda, deliğin alt kısmında meydana gelen kovan aracılığıyla bağlantı uzunluğunun artırılmasıdır. Bu çalışmada, sürtüneli delme yönteminde malzeme kalınlığının ve takım çapının elde edilen kovan yüksekliğine ( $h_a$ ), kovan çeper kalınlığına ( $h_c$ ) ve mikro sertlik değişimine etkilerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Deney çalışmalarında, koniklik açısı  $\varphi=36^\circ$ , çapları  $\varnothing d=5$  mm,  $\varnothing d=10$  mm,  $\varnothing d=15$  mm ve  $\varnothing d=20$  mm olan tungsten karbür (WC) takımlar kullanılmıştır. Sürtüneli delme işlemleri kalınlığı  $t=2$  mm,  $t=4$  mm,  $t=6$  mm,  $t=8$  mm ve  $t=10$  mm olan St37 çeliğine uygulanmıştır. Deney çalışmaları, devir sayısı  $n=1120$  d/dk, ilerleme miktarı  $f=25$  mm/dk şartlarında yapılmıştır. Malzeme kalınlığı ve takım çapının, kovan yüksekliği, kovan dış çapı ve kovan biçimleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve mikro sertlikte meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. En ideal kovan yüksekliği  $h_a=15.30$  mm, en ideal kovan çeper kalınlığı  $h_c=4.25$  mm ve en yüksek mikro sertlik değeri ise 183 HV olarak elde edilmiştir. Malzeme kalınlığı ve takım çapının kovan çeper kalınlığı ve kovan yüksekliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğu, ancak mikro sertlik değerlerinin fazla değişmediği gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtüneli delme, Kovan yüksekliği, Kovan Çeper kalınlığı.

#### Abstract

Friction drilling is an important non-traditional manufacturing method with the effect of heat caused by friction on a work piece-tool interface with a rotating tool. The purpose of this method is to increase the length of the connection through the bushing formed in the lower part of the hole in the thin-walled sheets. In this study, it is aimed to investigate the effects of material thickness and tool diameter on bushing height ( $h_a$ ), bushing wall thickness ( $h_c$ ) and micro hardness change in friction drilling method. In experiment studies, tungsten carbide (WC) tools were used with taper angle of  $\varphi=36^\circ$ , the tool diameters of  $\varnothing d=5$  mm,  $\varnothing d=10$  mm,  $\varnothing d=15$  mm and  $\varnothing d=20$  mm. Friction drilling was applied to St37 steel with a thickness of  $t=2$  mm,  $t=4$  mm,  $t=6$  mm,  $t=8$  mm and  $t=10$  mm. The experiments were carried out at a speed of  $n=1120$  rpm and a feed rate of  $f=25$  mm/min. The effects of material thickness and tool diameter on bushing height, bushing outer diameter, bushing shapes and changes in micro hardness were investigated. The largest bushing height of  $h_a=15.30$  mm, the lowest bushing wall thickness of  $h_c=4.25$  mm and the highest micro hardness of 183 HV was obtained. It was observed that material thickness and tool diameter had a significant effect on bushing wall thickness and bushing height, but micro hardness values did not change much.

**Keywords:** Friction drilling, Bushing height, Bushing Wall thickness.

## 1 Giriş

Sürtüneli delme yöntemi (SDY), ince kesitli malzemelerde bağlantı uzunluğunu artırmak amacıyla inşaat, otomotiv, tesisat vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılan ve geleneksel olmayan önemli bir imalat yöntemidir. Geleneksel delme işlemlerine göre; delme işlemi için iç veya dış soğutma sıvısı kullanılmaması, kaldırılacak malzeme miktarı düşük tutulduğundan, temiz bir işlem olması, üst çeper (pul) söz konusu olduğunda malzemenin iş parçasında kalması ve takımın omuz ile silindirik bölge arasında talaş kırıcı özelliğe sahip olması gibi avantajları vardır. Bu yöntemde, devir sayısı, ilerleme hızı, takım geometrisi, takım malzemesi, işlenecek malzemenin kalınlığı ve cinsi gibi parametrelerin işlem üzerinde önemli etkisi vardır.

SDY'de, kesici ağzı veya ağzları olmayan özel bir takım kullanılmaktadır. Temel olarak, takım geometrisi bir konik yüzey ve birde ikinci silindirik düz bir yüzey olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır. İşlemden önce, konik döner yüzey ile metal

yüzey arasında sürtünme ile oluşturulan ısı takımın ilerlemesi ile parçada delik açma işlemi gerçekleştirilmektedir. Oluşan ısı talaş ve çapak oluşumunu önleyen delme işlemi iyileştiren malzemenin yumuşamasını sağlar [1]. SDY, otomotiv endüstrisi, havacılık ve uzay mühendisliği, aydınlatma endüstrisi, metal konstrüksiyon, galvaniz kaplama, medikal ve fitness alet ve ekipmanları gibi birçok alanlarda, boru veya sac tipi ince cidarlı iş parçalarının delme işleminde yaygın olarak kullanılan bir delme yöntemidir [2]. Sürtüneli delme ile paslanmaz çelik sacların delinmesinde, sürtünme açıları, sürtünme temas alanı oranı, ilerleme hızı ve iş mili hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada işleme sürecini optimize etmek için Taguchi yöntemi kullanılmışlardır. SDY'de üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Ayrıca, farklı malzemelerin, özellikle de işlenmesi zor malzemelerin sürtüneli delme işlemi için farklı tasarımlarda takımlar kullanılarak yapılmıştır [3]. Miller ve Shih [4], sürtüneli delme işlemi sırasında meydana gelen plastik deformasyon sonucu oluşan ısı miktarını, itme ve radyal kuvvetler ile iş parçasının sıcaklığını 3D-FEM modelleme

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

yöntemiyle ölçmüşlerdir. İşlem sırasında iş parçasının sıcaklığının arttığını, parçanın yumuşadığını ve istenilen şekilde bir kovan profilinin oluştuğunu, ısı etkisi ile malzemenin takımın dönme doğrultusunda aktığını ve kovan boyunun artmış olduğunu tespit etmişlerdir. Sheu ve diğ. [5], Östenitik paslanmaz çeliklerin yüksek tokluk ve düşük ısı iletkenliği özelliklerine sahip olduklarından delme işlemlerinde büyük zorluklara neden olmaktadır. Bu nedenle, paslanmaz çeliklerin delinmesi için kullanılacak delme takımının özelliği ve geometrik şeklini iyileştirmek ve yeni bir delme işlemi çeşidi geliştirmişlerdir. Termal sürtünmeli delme teknolojisi ile paslanmaz çeliği delmek için yeni bir yöntem bulmuşlardır. Gerekli geometrik şekle sahip ve paslanmaz çeliğin delinmesinde sinterlenmiş karbürden yeni tip bir termal sürtünme matkabı imal etmişlerdir. Krishna ve diğ. [6], Alüminyum alaşımına HSS takımlar kullanarak sürtünmeli delik delme yöntemi ile delinmesinde, eksenel kuvvet ve momentin tespiti için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. HSS takımın etkisini 1 mm kalınlığındaki AA6351 alüminyum alaşımında Taguchi yöntemi uygulayarak tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre takım koniklik açısının önemli bir parametre olduğunu ve bunun hem takımın dönme momentini hem de itme kuvvetini etkilediğini göstermişlerdir. Krasauskas ve diğ. [7], Yaptıkları çalışmalarda takım konisinin iş parçasına daldığı sırada delme kuvvetinin maksimum değere ulaştığını, iş parçasına daldıktan sonra kademeli olarak delme kuvvetinin azaldığını, ancak momentin maksimum değere ulaştığını göstermişlerdir. Ayrıca sürtünmeli delme işlemi optimizasyonu için bir teorik sürtünmeli delme modeli geliştirerek, yeni teorik modelde, kayma dayanımı ve sürtünme katsayısı, anlık itme kuvveti ve momentin deneysel olarak ölçülen değerlerden hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Chow ve diğ. [8]. Termal sürtünmeli delme işleminde paslanmaz çelik plakaların işlenme sürecini optimize etmek amacıyla Taguchi yöntemi kullanmışlardır. Sürtünme açıları, sürtünme temas alanı oranı, ilerleme hızı ve iş mili hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Raju ve diğ. [9],[10] DEFORM (3D) yazılımını kullanarak AISI4340 malzemesinin tungsten karbür takım ile sürtünmeli delme ile delinmesinde hareket simülasyonunu gözlemleyerek, takım şeklinin oluşan kovan biçimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Oluşan kovanın şeklinin taç yaprağı şeklinde meydana geldiği ve yüzeyde daha az çatlaklar oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek ilerleme hızlarında ve düşük dönme hızlarında itme kuvvetinin ve momentin gözle görülür şekilde azaldığını, gene bir diğer çalışmada, AL6061 malzemesinin sonlu elemanlar modeli ile tungsten karbür takımlar kullanılarak sürtünmeli delme yöntemi ile delinmesinde oluşan gerilmeleri araştırmışlardır. İlerleme hızı ve takım dönme hızları arttığında gerilmelerin azaldığını, çok yüksek devir sayılarında kovanın biçiminde bozulmaların meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Özek ve Demir [11],[12], yapmış oldukları çalışmalarda A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delme işleminde malzeme kalınlığına ve delik çapına bağlı olarak oluşan kovan boyunu araştırmışlardır. 24°, 36°, ve 48° koniklik açısına sahip sürtünmeli delme takımları ile farklı dönme hızları, farklı ilerleme hızlarında 8 ve 10 mm çaplarında delikler delinmiş, malzeme kalınlığının artması ile kovan boyu düzenli artmamıştır. Yaptıkları deneysel çalışmada üç farklı devir sayısı ve üç farklı ilerleme oranı kullanılarak 2 mm, 4 mm, 6 mm kalınlıklardaki Al malzeme HSS sürtünmeli delme takımları kullanılarak delinmiştir. Deneysel devir sayısının kovan yüksekliğine etkisini araştırmışlardır. En yüksek kovan boyunun, 2400 d/d'da 50 mm/min. ilerleme hızında, 6 mm kalınlıktaki malzemede

12 mm delik çapındaki takımın elde edildiğini, artan malzeme kalınlığı ile kovan yüksekliğinin düştüğü ve dolayısıyla malzeme kalınlığının Alüminyum malzemede oluşan kovan yüksekliği üzerinde fazla bir etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir. Bahloul ve diğ. [13], AISI304 paslanmaz çeliğinin Tungsten Karbür uç ile sürtünmeli delme yönteminde deneysel ve analitik olarak bulanık mantık tekniğini kullanarak araştırmışlardır. Seçilen parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. En iyi sonuçların takım çapı 9.2 mm, 30° sürtünme açısında, %50 sürtünme temas alanı oranında, 60 mm/min. ilerleme hızında elde edildiğini ifade etmişlerdir. Sürtünmeli delme işleminin basit bir işlem olduğu ve bu işlemin deneysel ve bulanık mantık ile elde edilen sonuçların kalite özellikleri bakımından birbirleri ile aynı olduğunu vurgulamışlardır. Demir [14], yaptığı çalışmada, sürtünmeli delme ile oluşan kovan hacminin yapısını incelemiştir. Takımların silindirik bölge uzunluğunun, koniklik açısının, dönme hızının ve ilerleme hızının oluşan kovanın hacmi üzerindeki etkisini araştırmış, kovan üst pulunun ve kovanı oluşturan malzemenin hacimindeki değişimi incelemiştir. Eliseev ve diğ. [15], AA204 alüminyum malzemenin sürtünmeli delme işleminde mikro yapı değişimlerini incelemişlerdir. Delik kenarlarının hemen yakınında ince taneli ve kararlı ikinci faz parçacıklarının düşük hacimli parçacıklara sahip olduğunu ve yeniden kristalleşmiş bir malzeme tabakasının meydana geldiğini, yüksek sıcaklık, ısıl dönüşüm ve normal deformasyonun etkisiyle delme işlemi sırasında ikinci faz parçacıklarının çözündüğünü ifade etmişlerdir. Isıdan etkilenmiş bölgedeki büyük ve uzun tane yapıları arasında bölgesel bir plastik akışın varlığından kaynaklanan yeniden kristalleşmiş çeşitli malzeme tabakalarının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bilgin ve diğ. [16], Farklı özellikteki malzemelerin sürtünmeli delinmesini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sayısal olarak Sonlu elemanlar metoduna (FEM), dayanan deform-3D yazılımını kullanmışlardır. Delme sırasında işlem parametrelerine bağlı olarak oluşan moment, eksenel kuvvet ve ısı transfer katsayısını hesaplayan analitik bir model geliştirmişlerdir. Deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen sıcaklık, tork ve eksenel kuvvet sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Moment ve eksenel kuvvet değerleri, iş mili hızının artmasıyla azalırken, iş mili hızının artmasıyla birlikte iş parçasının merkezinde sıcaklık değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Eliseev ve diğ. [17], AA204 alüminyum malzemenin sürtünmeli delme işleminde mikroyapı değişimlerini incelemişlerdir. Delik kenarlarının hemen yakınında ince taneli ve kararlı ikinci faz parçacıklarının düşük hacimli parçacıklara sahip olduğunu ve yeniden kristalleşmiş bir malzeme tabakasının meydana geldiğini, yüksek sıcaklık, ısıl dönüşüm ve normal deformasyonun etkisiyle delme işlemi sırasında ikinci faz parçacıklarının çözündüğünü ifade etmişlerdir. Isıdan etkilenmiş bölgedeki büyük ve uzun tane yapıları arasında bölgesel bir plastik akışın varlığından kaynaklanan yeniden kristalleşmiş çeşitli malzeme tabakalarının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Sara ve diğ. [18], AISI304 paslanmaz çeliğinin sürtünmeli delme işleminde işlem parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi metodu ve bulanık mantık tekniğini kullanarak deneysel sonuçların istatistiksel sonuçlarla uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. İş parçası kalınlığı ve dönme hızının termal sürtünmeli delme işleminde önemli derecede etkili olan işlem parametreleri olduğunu göstermişlerdir. SDY ile ilgili yapılan çalışmalarda, bağlantı uzunluğunu artırmak amacıyla kovan yüksekliği, kovanın kesit kalınlığı, oluşan çeper yüksekliği, kovanın veya pulun dış çapı gibi parametreler hakkında yeterli çalışmaların

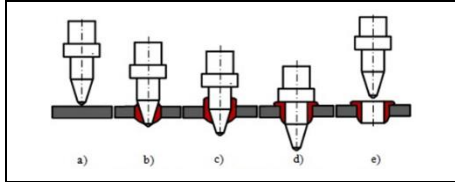
yapılmadığı görülmektedir. Değişken malzeme kalınlığı ve değişken delik çapları ile sonuçların nasıl değişeceği hakkında fazla bilgi bilinmemektedir.

Bu çalışma, St37 çeliğinin sürtünmeli delinmesi işleminde, takım çapı, takım dönme hızı ve takım ilerleme miktarının artan malzeme kalınlığına bağlı olarak oluşan kovan yüksekliği ve kovan çeper kalınlığı üzerinde etkili olan parametrelerin araştırılması amacıyla yapılmıştır.

## 2 Materyal ve metot

SDY, iş parçasının plastik deformasyon işlemidir. İlk olarak, takımın yüksek hızla dönmesi ile sürtünmesi iş parçasının termoplastik deformasyona uğramasına sebep olur. Daha sonra, iş parçası üzerinde bir çukur oluşur ve takım kademeli ilerleyerek sürtünmeli delmeyi işlemi gerçekleştirmiş olur.

Şekil 1'de, sürtünmeli delme yönteminin (SDY) adımları şematik olarak gösterilmiştir. Konik takımın ucu, Şekil 1(a)'da gösterildiği gibi iş parçasına yaklaşır ve nufuz eder. Takım ile iş parçası arasındaki aşılma hız ile oluşturulan eksenel kuvvet temas yüzeyinde sürtünme ısısı üretir ve iş parçası malzemesini yumuşatır. Takım, iş parçasına ekstrüzyonu yaptığı için, Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi, başlangıçta yumuşatılmış iş malzemesini yana ve yukarı doğru iter. İş parçası malzemesi viskoz ve yumuşatılmış halde, iş parçasını delebilir. Takım iş parçasına girdiğinde, Şekil 1(c)'de gösterildiği gibi daha fazla iş parçası malzemesini bir kenara itmek ve takımın silindirik bölümünü kullanarak kovan oluşturmak için aşağı doğru hareket eder. İşlem tamamlandığında, takımın omuzu, Şekil 1(d)'de gösterildiği gibi, malzeme üzerinde üste ekstrüzyon edilmiş çapakları iş parçasına bastırarak çeper oluşumunu sağlar. Ardından Şekil 1(e)'de gösterildiği gibi takım geri çekilir ve iş parçası üzerinde çeper ve malzemede kovan oluşturur.



Şekil 1. Geleneksel sürtünmeli delme işleminin aşamaları.

Figure 1. Stages of the traditional frictional drilling process.

Takım, dönme ve ilerleme hareketi ile iş parçasına temas ettikten sonra malzemeye nüfuz etmeye başlar ve iş parçası-takım arasındaki sürtünme sonucu oluşan ısı ile iş parçası yumuşar. Takım ilerleme hareketi doğrultusunda ilerleyerek çevreye belirli miktarda malzeme yığarak, yumuşamış malzemenin dönme etkisi ile çevrede dairesel bir şekil almasını sağlamaktadır. Delinen malzemenin altında ilerleme yönünde oluşan kovan, takım ucunun delinen iş parçasının kalınlığından daha çok iş parçasına dalması ile malzemenin serbest akmasını kolaylaştırarak kovan boyunu artırmaktadır. Akma sırasında takımın ilerleme hareketinin etkisi ile yumuşamış malzeme aşağı doğru akarken çevreye yayılarak malzemenin üst kısmında çeper (pul), alt kısmında ise kovan oluşturur.

Bu çalışmada deney malzemesi olarak 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm ve 10 mm kalınlıklarında, 70x500 mm boyutlarında ticari olarak piyasadan temin edilen St37 çelik plakalar kullanılmıştır. St37'nin kimyasal analizi Tablo 1'de, WC takımların mekanik özellikleri, Tablo 2'de, deney numunelerinin mekanik özellikleri Tablo 3'te ve kimyasal analizleri Tablo 4'te, verilmiştir.

Tablo 1. St37 kimyasal bileşimi.

Table 1. Chemical composition of St37.

Element	%	Element	%
Karbon (C)	0.17	Kükürt (S)	0.05
Mangan (Mn)	0.2	Silisyum (Si)	0.4
Fosfor (P)	0.025	Azot (N)	0.009
Geriye kalan (Fe)		99.721	

Tablo 2. Takım malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri.

Table 2. Mechanical and physical properties of tool materials.

Malzemenin mekanik özellikleri	Tungsten karbür (WC)
Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	1000
Sertlik Değeri	92 HR <sub>A</sub>
Elastik modülü (kN/mm <sup>2</sup> )	600
Poisson oranı	0.24
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m <sup>2</sup> °K)	84
Erime Sıcaklığı (°C)	2850
Yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	14.5

Tablo 3. Deney numunelerinin mekanik özellikleri.

Table 3. Mechanical properties of test samples.

Malzemenin mekanik özellikleri	Malzeme cinsi ve kesit kalınlığı (mm)
	St37 (10 mm)
Akma dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	235
Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	340
Kayma gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	115
Sertlik değeri	320 HB
(%) Uzama	23
Elastik modülü (kN/mm <sup>2</sup> )	210
Poisson oranı	0.3
Isıl iletkenlik katsayısı (W/m <sup>2</sup> °K)	76
Erime sıcaklığı (°C)	1530
Yaşlandırma sıcaklığı (°C)	-
Yoğunluğu (kg/cm <sup>3</sup> )	7.85

Tablo 4. Kullanılan delme takımının kimyasal bileşimi.

Table 4. Chemical composition of drilling tool used.

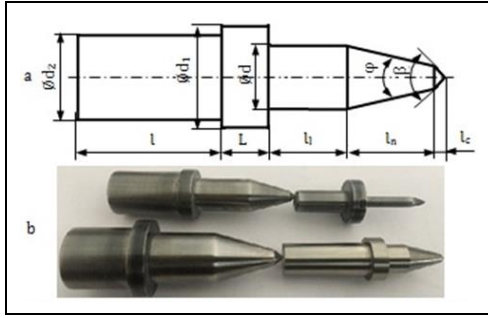
% (Analiz Sonuçları)	
Wolfram Karbür (WC)	90
Kobalt (Co)	10

Deney çalışmalarında WC kesici takımlar kullanılmıştır. WC takımlar Kaya Ticaret AŞ. firması tarafından ince silindirik taşlama yöntemi ile R<sub>a</sub>=0.05-0.2 µm aralığında yüzey pürüzlülüğünde ve %±10 boyut toleranslarında imal edilmişlerdir. Takımların, Ød<sub>2</sub>, Ød<sub>1</sub>, Ød, l<sub>1</sub>, l<sub>n</sub>, l<sub>c</sub>, l, L, φ ve L geometrik boyutları Tablo 5'te, kesici takım şekilleri ise Şekil 2'de verilmiştir. Çalışmalarda toplam 20 adet WC sürtünmeli delme takımı kullanılmıştır.

Tablo 5. Deneysel çalışmada kullanılan takımların boyutları.

Table 5. Dimensions of the tools used in the experimental study.

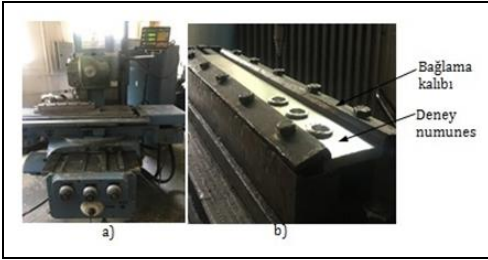
Takım Sıra No:	Ød <sub>2</sub>	Ød <sub>1</sub>	Ød	l <sub>1</sub>	l <sub>n</sub>	l <sub>c</sub>	l	L	φ	Takım Adedi
1	10	12.5	5	20	5	0.9	20	5	36	5
2	14	16	10	20	10	1.8	25	5	36	5
3	20	22.5	15	20	15	2.7	25	5	36	5
4	24	30	20	20	20	3.6	30	5	36	5



Şekil 2. Sürtüneli delme yönteminde kullanılan takımlar.  
(a): Takım geometrisi, (b): WC takımları.

Figure 2. Tools used in frictional drilling method.  
(a): Tool geometry, (b): WC tools.

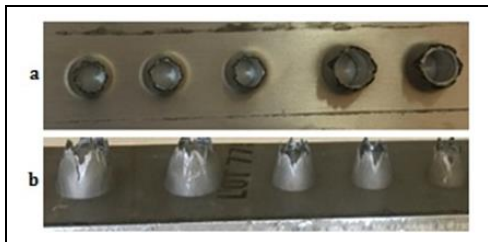
SDY ile  $n=1120$  (d/dk.) devir sayısı,  $f=25$  mm/dk. ilerleme miktarında ve takım koniklik açısı  $\phi=36^\circ$  olan WC takım kullanılarak 60 adet delik delinerek toplam 132 deney yapılmıştır. Deneyler, 70x500 mm boyutlarında hazırlanmış numunelerin, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü CNC atölyesinde bulunan TYT400 tipi universal freze tezgâhında bağlama kalıbı kullanılarak freze tezgâhi tablasına cıvata ve papuçlar ile rijit bir şekilde bağlanmış ve iş parçası sıcaklığının oda sıcaklığına soğuması için gerekli zaman kaybını önlemek amacıyla delikler birbirlerinden 100 mm eşit aralıklı sabit mesafelerde ard arda delinerek yapılmışlardır (Şekil 3a, Şekil 3b).



Şekil 3(a): TYT400 freze tezgâhi, (b): Bağlama kalıbı ve deney numunesi.

Figure 3. (a): TYT400 milling machine, (b): Holding die and experimental sample.

Deneylerde her numuneye dört farklı çapta üçer adet toplam on iki adet delik delinerek, sırasıyla  $t=2$  mm,  $t=4$  mm,  $t=6$  mm,  $t=8$  mm ve  $t=10$  mm kalınlıklardaki deney numuneleriyle devam edilmiştir. Deneyler, deney numuneleri rijit şekilde sabitlendikten sonra delme takımları değiştirilerek yapılmıştır (Şekil 4).

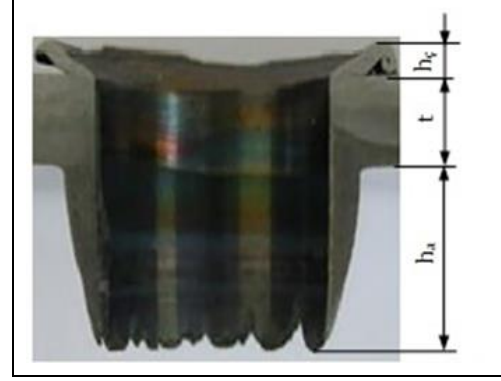


Şekil 4. Sürtüneli delme işlemi sonucunda elde edilen numuneler. (a): Numunenin alttan görünüşü. (b): Numunenin yandan görünüşü.

Figure 4. Samples obtained as a result of frictional drilling.  
(a): Bottom view of the sample. (b): Side view of the sample.

## 2.1 Kovan yüksekliğinin ölçülmesi

Şekil 5'te, deneylerde elde edilen kovanda kovan çeper kalınlığı ve kovan yüksekliği gösterilmiştir. Kovan yüksekliği ( $h_a$ ) ve kovan çeper kalınlığı ( $h_c$ ), iş parçasının yüzeyi referans alınarak ve derinlik mikrometresi ile üç farklı noktadan, kovan dış çapları ise 1/100 dijital kumpas ile kovanın iş parçası yüzeyine yakın ve silindirik bölgesinde dört farklı noktadan ölçülmüş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.



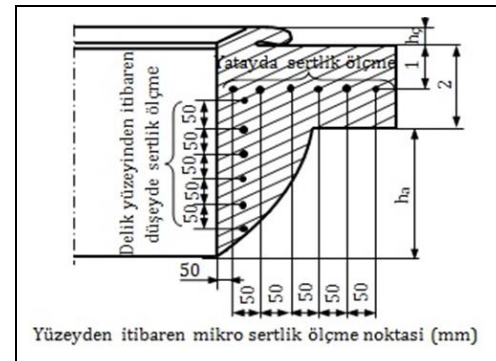
Şekil 5: Kovan yüksekliği ve kovan çeper kalınlığı.

Figure 5. Bushing height and bushing wall thickness.

## 2.2 Mikro sertliğin ölçülmesi

Kalınlıkları  $t=2$ ,  $t=4$ ,  $t=6$ ,  $t=8$  ve  $t=10$  mm olan numuneler,  $n=1120$  d/dk.'da,  $f=25$  mm/dk. ilerleme miktarında ve  $\phi=36^\circ$  koniklik açısına sahip  $\phi d=5$ ,  $\phi d=10$ ,  $\phi d=15$  ve  $\phi d=20$  mm çaplarında WC takımlar kullanılarak delinmiş, mikro sertlik ölçümleri ve SEM fotoğraflarının çekimi için numuneler bozulmayacak şekilde delik ekseninden iki eşit parça olacak şekilde testere ile kesilmişlerdir. Daha sonra iki eşit parçaya bölünerek elde edilen numuneler tekrar testere ile kesilerek ikiye bölünmüş ve ince diş eğe ile yüzeyleri temizlenmiştir. Temizlenen bu numuneler bakalıte alınıp sırasıyla A400, A600, A800 ve A1200 zımpara ile yüzeyleri zımparalandıktan sonra 1  $\mu$ m tane boyutlu elmas pasta ve çuha kullanılarak parlatılmışlardır. Numuneler %10 ml HNO<sub>3</sub> ve %90 ml etil alkol bileşiminden oluşan ve nital olarak adlandırılan dağlayıcı ile yaklaşık olarak 60s dağlandıktan sonra hazır hale getirilmişlerdir.

Mikrosertlik ölçümleri, numuneler delik yüzeyinden itibaren 100  $\mu$ m mesafelerde olmak üzere toplam 10 noktadan ölçüm alınarak yapılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Sürtüneli delinmiş numuneler üzerinde mikro sertlik testinin uygulandığı noktalar.

Figure 6. The points where micro hardness test is applied on frictioned drilled samples.

Delik yüzeyinden itibaren mikro sertlik ölçüm noktaları, sertlik değerinin iş parçası sertlik değerine eşit olduğu ve ısıdan etkilenmiş bölgenin delik yüzeyinden olan uzaklığına göre belirlenmiştir. Ölçümlerin 6 noktada alınması, mikro sertlik değerlerinin esas malzemenin mikro sertlik değerine ulaşma mesafesine göre belirlenmiştir. Mikro sertlik değerine delik yüzeyinden itibaren en fazla 300 µm mesafede ulaşılmıştır.

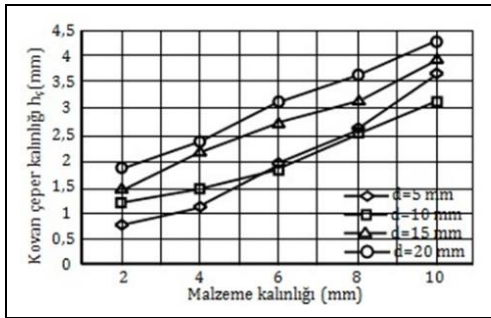
Mikro sertlik ölçümleri, Future-Tech FM-700 marka bir mikro sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür. Her bir numunenin Mikro Yapı (SEM) Fotoğrafları, ZEISS EVO MA10 marka taramalı elektron mikroskobu'nda 5000X büyütmede, termal ve basınç gerilmelerinden dolayı delik yüzeyinde meydana gelen çatlaklar ise 2000X büyütmede çekilmiştir.

### 3 Sonuçlar ve tartışmalar

SDY'de kovan yüksekliğine ( $h_a$ ) ve kovan çeper kalınlığına ( $h_c$ ) etki eden faktörlerin başında malzeme kalınlığı, takım çapı, delme takımının şaft uzunluğu ( $l$ ), sürtünme etkisi ile meydana gelen ısı ve merkezkaç kuvvet etkisi oluşturan takımın dönme hızıdır [2]. Dönme hızının artması ile sürtünme ısısının etkisi ile yumuşayan ve akıcı hale gelmiş olan malzeme çevreye yayılmaktadır. Malzeme kalınlığı arttıkça takım ile delinen malzeme arasındaki temas alanı arttığundan takımın ilerleme doğrultusundaki malzeme akışı takımın şaft uzunluğu boyunca artarak delik üstünde pul biçiminde bir çeper oluşmakta, takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak oluşan pulun kalınlığı da artmaktadır. Kovanı oluşturan malzeme hacmi delinen malzeme kalınlığı ve delik çapına bağlı olarak doğrusal bir değişim göstermektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça takım ile delinen malzeme arasındaki temas alanı ilerleme yönünde akan malzeme miktarı oluşan kovan çeper kalınlığına ve kovan yüksekliğine etki etmektedir.

#### 3.1 Takım çapının ve malzeme kalınlığının kovan çeper kalınlığına ( $h_c$ ) ve kovan Yüksekliğine ( $h_a$ ) etkisi

Şekil 7'de, St37çelik malzemenin sürtünmeli delinmesinde WC takım kullanılarak takım koniklik açısı  $\varphi=36^\circ$ , ilerleme miktarı  $f=25$  mm/dk. ve devir sayısı  $n=1120$  dev/dk.'da elde edilen kovanın çeper kalınlığının farklı takım çapları için malzeme kalınlığına ve delik çapına bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 7. Malzeme kalınlığına bağlı olarak takım çapının kovan çeper kalınlığına etkisi.

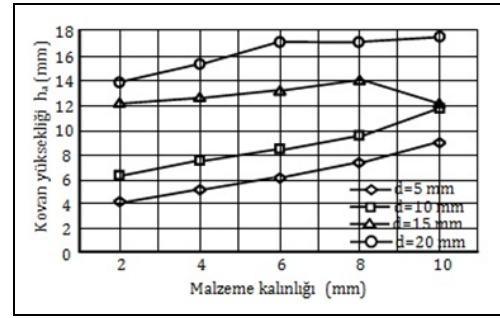
Figure 7. Effect of tool diameter on bushing wall thickness depending on material thickness.

Şekilde görüldüğü gibi malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovan çeper kalınlığı lineer bir şekilde artmaktadır. Çünkü takım çapının artmasına bağlı olarak malzeme temas alanı artmaktadır. Malzeme temas alanı arttıkça sürtünme etkisi ile meydana gelen ısı artmakta ve malzeme ısı etkisiyle yeterli derecede yumuşayarak vizkoz hale gelmektedir [3]. Böylece, takımın ilerleme doğrultusunda akan malzeme miktarı

arttığından dolayı kovan çeper kalınlığıda artmaktadır.  $\varnothing d=5$ ,  $\varnothing d=10$  mm ve  $\varnothing d=15$  mm takım çaplarında malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan çeper kalınlığı düzenli bir biçimde artmıştır. En büyük kovan çeper kalınlığı  $\varnothing d=20$  mm çapındaki takım ile  $t=10$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=4.25$  mm, en düşük kovan çeper kalınlığı  $\varnothing d=5$  mm çapındaki takım ile  $t=2$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=0.75$  mm olarak elde edilmiştir.

SDY'de kovan yüksekliğine etki eden en önemli faktörler malzeme kalınlığı, dönen takımın çapı, takımın silindirik bölge uzunluğu ve sürtünme ile oluşan ısıdır. SDY'de malzeme kalınlığı arttıkça dönen takım ile delinen malzeme arasındaki temas alanı arttığundan takımın ilerleme doğrultusundaki malzeme akışı artmakta ve takımın uzunluğu boyunca daha fazla malzemenin yığılmasını sağlamaktadır. Yığılan malzeme takımın ilerleme doğrultusunda delik boyunca kovan boyunun artmasına etki etmektedir [4].

Şekil 8'de, takım koniklik açısı  $\varphi=36^\circ$ , ilerleme miktarı  $f=25$  mm/dk. ve devir sayısı  $n=1120$  dev/dk.'da WC takım kullanılarak St37 çelik malzemesinin SDY'de elde edilen kovan boyu için takım çapının malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan yüksekliği ( $h_a$ ) üzerindeki etkisinin değişimi verilmiştir.



Şekil 8. Malzeme kalınlığına bağlı olarak takım çapının kovan boyuna etkisi.

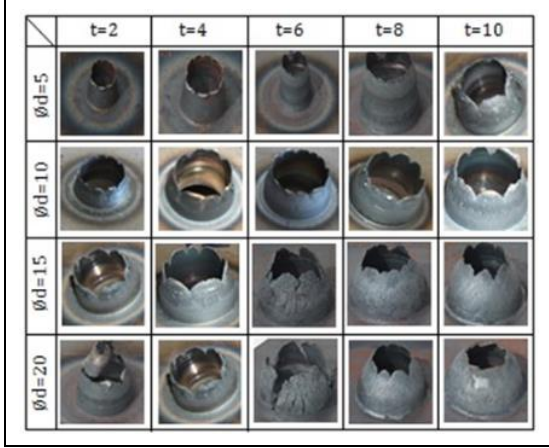
Figure 8. Effect of tool diameter on bushing height depending on material thickness.

Artan malzeme kalınlığına bağlı olarak takım çapı arttıkça kovan boyunun ( $h_a$ ) arttığı görülmüştür. Malzeme kalınlığı ve takım çapının artması ile temas alanının artması ile takım boyunca akan malzeme miktarı artmaktadır. Ancak küçük takım çaplarının kovanın boyuna fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan boyunun artırılması isteniyorsa takım çapının büyük seçilmesi önemlidir. Malzeme kalınlığı sabit alındığında artan takım çapı ile kovan boyu orantılı bir şekilde artmaktadır. Belli değerlerde seçilen malzeme kalınlığı ve takım çapının kovanın boyuna etkisi belirli değerler için sınırlı olmaktadır. En yüksek kovan boyu,  $\varnothing d=20$  mm takım çapında,  $t=10$  mm malzeme kalınlığında ve  $h_a=14.40$  mm, en düşük kovan boyu  $\varnothing d=5$  mm takım çapında,  $t=2$  mm malzeme kalınlığında ve  $h_a=4.16$  mm olarak elde edilmiştir.

Şekil 9'da, St37 malzemesinin SDY'de delme deneyleri sonucu takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan resimleri verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi aynı kalınlıktaki malzeme için artan takım çapına bağlı olarak istenilen şekilde bir kovan biçiminin elde edildiği, belli bir kalınlık ve takım çapından sonra yırtılma ve taç yaprağı şeklindeki istenmeyen şekil bozukluğunda kovanların elde edildiği görülmektedir. Kovanın taç yaprağı biçiminde meydana gelmesi ve kovanın üzerindeki çatlakların

oluşması artan malzeme kalınlığı ve takım çapının artması ile azalmaktadır [9],[10]. Malzeme kalınlığının ve takım çapının artması ile sürtünme sonucu meydana gelen ısının etkisiyle malzeme yumuşayarak dahada vizkoz hale geldiğinden takım itme yönünde kovan boyunu artırmaktadır. Böylece, amacına uygun taç yaprağı şeklinde çatlakların az olduğu ve silindirik biçimde bir kovan elde edilebilmektedir.

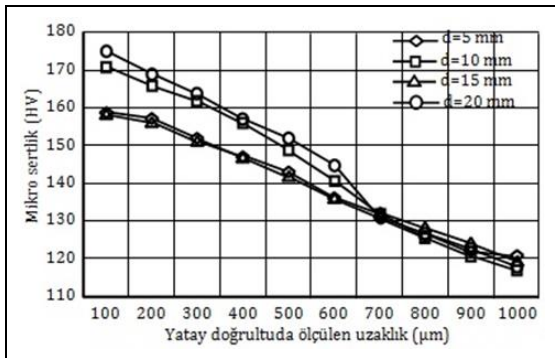


Şekil 9: Takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan resimleri.

Figure 9. Bushing pictures obtained depending on tool diameter and material thickness.

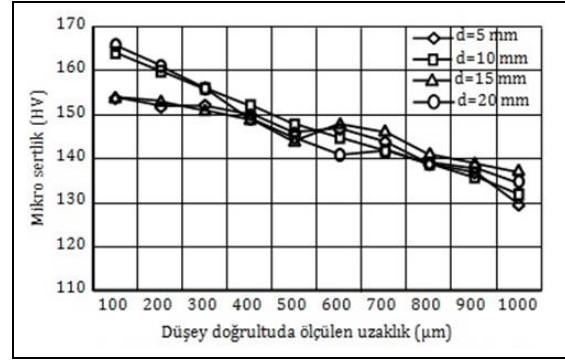
### 3.2 Takım çapının ve malzeme kalınlığının mikrosertlik değişimine etkisi

Sürtümlü delme işleminde yumuşayan malzeme dönen takımın ilerleme yönünde serbest bir şekilde takım ile birlikte ilerleyerek malzemenin akmasını sağlamaktadır. Akma işlemi serbest bir şekilde olduğu için malzemenin mikro yapısında taneler arası boşluklar meydana gelmektedir. Malzeme içerisinde boşluklu yapı, malzemenin mikro sertliğini etkilemektedir [15]. Delme sırasında yumuşayan malzeme dönen takımın ilerleme yönünde serbest bir şekilde ilerleyen takım ile birlikte aşağı doğru akar. Boşluklu yapının artması malzeme sertliğinde yumuşama ve dolayısıyla malzemenin mikro sertliği azalmaktadır. Aşağıda,  $t=10$  mm,  $\varphi=36^\circ$ ,  $n=1120$  dev/dk. ve  $f=25$  mm/dk. ilerleme miktarında St37 çeliğinin WC takım kullanılarak SDY'de elde edilen kovan için Şekil 10'da, delik yüzeyinden yatay doğrultuda ve Şekil 11'de ise delik yüzeyinden düşey doğrultuda 100'er  $\mu\text{m}$  mesafelerde elde edilen mikro sertlik değişimi verilmiştir.



Şekil 10:  $t=10$  mm, kalınlık için delik yüzeyinden yatay doğrultuda elde edilen mikro sertlik değerleri.

Figure 10. Micro hardness values obtained in horizontal direction from the hole surface for thickness of  $t=10$  mm.



Şekil 11:  $t=10$  mm kalınlık için delik yüzeyinden dikey doğrultuda elde edilen mikro sertlik değerleri.

Figure 11. Micro hardness values obtained in vertical direction from the hole surface for thickness of  $t=10$  mm.

Şekil 10 ve 11 birlikte değerlendirildiğinde takım çapı arttıkça elde edilen mikro sertlik değerlerinin arttığı yapılan deneylerde delik merkezinden çevreye doğru uzaklaştıkça ise mikro sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, merkezden çevreye doğru uzaklaştıkça plastik deformasyona uğramış malzeme tabakasından esas malzeme yapısına ulaşılmaktadır. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak mikro sertlikte delik çevresine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede yüksek, delik merkezinden uzaklaştıkça esas malzeme sertliğine yakın olarak artmakta ve esas malzeme sertliğine ulaşmaktadır. Esas malzeme sertliği 305 HV iken, sürtümlü delme yapıldıktan sonra en yüksek sertliğin 183 HV olarak elde edildiği görülmüştür.

## 4 Sonuçlar

Devir sayısının etkisi ile takımın ilerleme yönünde akan malzeme miktarı delik üst kısmında kovan çeper kalınlığını ve alt kısmında ise kovan yüksekliğine etki etmektedir. İşlem sıcaklığı doğrudan takım dönme hızı ile ilişkilidir ve ilerleme hızına göre, daha yüksek takım hızlarının kullanılmasının maksimum sıcaklık artışlarına yol açtığı belirlenmiştir. Aynı parça kalınlığında, takım hızının artırılması, işlem sırasında üretilen ısının artmasına ve bu durumda daha yüksek kovan derinliğinin oluşmasına neden olmuştur. Tablo 6'da deneylerden elde edilen genel sonuçlar verilmiştir.

Yapılan deneylerden görüldüğü gibi takım çapı ve malzeme kalınlığının oluşan kovan çeper kalınlığı ve kovan yüksekliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Buna göre;

1. Malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovan çeper kalınlığının arttığı görülmüştür. En büyük kovan çeper kalınlığı  $\varnothing d=20$  mm çapındaki takım ile  $t=10$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=4.25$  mm, en düşük kovan çeper kalınlığı  $\varnothing d=5$  mm çapındaki takım ile  $t=2$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=0.75$  mm olarak elde edilmiştir,
2. Malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan yüksekliği düzenli bir biçimde artmaktadır. En yüksek kovan boyu,  $\varnothing d=20$  mm takım çapında,  $t=10$  mm malzeme kalınlığında ve  $h_a=14.40$  mm, en düşük kovan boyu  $\varnothing d=5$  mm takım çapında,  $t=2$  mm malzeme kalınlığında ve  $h_a=4.16$  mm olarak elde edilmiştir,

Tablo 6. Elde edilen kovanda çeper kalınlığı ve kovan yüksekliği ve mikro sertlik değerleri.

Table 6. Bushing wall thickness and bushing height and micro hardness values in the resulting bushing.

Malzeme kalınlığı (mm)	Delme ucu çapı Ød (mm)	Ortlama Ød <sub>2</sub> (mm)	Kovan yüksekliği h <sub>a</sub> (mm)	Çeper kalınlığı h <sub>c</sub> (mm)	Mikro sertlik değişimi	
					Yatay ekseninde	Düşey ekseninde
2	5	6.5	4.16	0.75	147	137
2	10	12.32	6.24	1.16	155	151
2	15	17.75	12.10	1.375	154	141
2	20	23.6	13.25	1.8	159	159
4	5	7.16	5.12	1.08	156	144
4	10	12.84	7.5	1.42	163	156
4	15	19.30	12.55	2.15	158	147
4	20	24.70	13.30	2.35	162	153
6	5	8.82	6.06	1.9	158	148
6	10	13.6	8.36	1.8	165	155
6	15	20.4	13.1	2.7	156	149
6	20	26.20	14.00	3.1	168	157
8	5	10.14	7.28	2.57	159	151
8	10	14.98	9.48	2.49	171	160
8	15	21.2	14	3.1	158	153
8	20	27.20	14	3.6	175	162
10	5	12.26	8.66	3.63	161	154
10	10	16.18	11.68	3.09	179	164
10	15	22.8	12	3.9	163	154
10	20	28.50	14.40	4.25	183	166

Yapılan tüm deneylerde delik merkezinden çevreye doğru uzaklaştıkça mikro sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmuştur. Mikro sertlik değerleri delik yüzeyinden yatay doğrultuda delik çevresinden uzaklaştıkça azalmıştır. Takım çapı arttıkça elde edilen mikro sertlik değerlerinin arttığı ve esas malzeme sertliği 305 HV iken, sürtünmeli delme yapıldıktan sonra en yüksek mikro sertlik yatay doğrultuda 183 HV, düşey doğrultuda 166 HV ve en düşük mikro sertlik yatay doğrultuda 147 HV, düşey doğrultuda 137 HV olarak elde edildiği görülmüştür.

## 5 Conclusions

With the effect of the speed, the amount of material flowing in the direction of the tool affects the bushing wall thickness at the top of the hole and the height of the bushing height at the bottom of the hole. The process temperature is directly related to the tool rotation speed, and it has been determined that the use of higher tool speeds results in maximum temperature increases relative to the feed rate. Increasing the tool speed for the same part thickness has caused the heat produced during the process to increase and in this case to create a higher bushing height. General results obtained from experimental studies were given in Table 6.

As can be seen from the experimental studies, it has been determined that the increasing tool diameter and material thickness have an important effect on the resulting bushing wall thickness and bushing height. According to this;

1. It was observed that the bushing wall thickness increased as the material thickness and tool diameter increased. When the tool diameter was Ød=20 mm and Ød=5 mm, and thickness of material t=10 mm and t=2 mm, the largest bushing wall thickness and the lowest bushing wall thickness were obtained as h<sub>c</sub>=4.25 mm and h<sub>c</sub>=0.75 mm.

2. The bushing height increases regularly depending on the material thickness. When the tool diameter was Ød=20 mm and

Ød=5 mm, and thickness of material t=10 mm and t=2 mm, the largest bushing height and the lowest bushing height were obtained as h<sub>a</sub>=14.40 mm and h<sub>c</sub>=4.16 mm.

In all experiments studies, it was found that micro hardness decreases as it moves away from the center of the hole. A fine-grained structure has formed as a result of the deformation hardening in the region under the affected of heat, close to the hole center. Micro hardness values decreased as they moved away from the perimeter of the hole in the horizontal direction from the hole surface.

It was seen that increased micro hardness values obtained as the tool diameter increases. While the main material has 305 HV hardness, after friction drilling processes, the highest micro hardness was obtained as 183 HV in the horizontal direction, 166 HV in the vertical direction. The lowest micro hardness was obtained as 147 HV in the horizontal direction and 137 HV in the vertical direction.

## 6 Kaynaklar

- [1] Geffen JA. "Method and Apparatuses for Forming by Frictional Heat and Pressure Holes Surrounded Each by a Boss in a Metal Plate or the Wall of a Metal Tube". USA, Patent N. 4, 175-413, 1979.
- [2] Miller SF, Wang H, Shih AJ. "Experimental and numerical analysis of the friction drilling process". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(3), 802-810, 2006.
- [3] Miller SF, Tao j, Shih AJ. "Friction drilling of cast metals". *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 46, 1526-1535, 2006.
- [4] Miller SF, Shih AJ. "Thermo-Mechanical Finite Element Modelling of the Friction Drilling Process". *Journal Manuf. Science Engineering* 129(3), 531-538, 2007.

- [5] Sheu TS, Ku WL, Chow HM, Lee SM, Yang LD, Lin YC. "Optimization of machining parameters of a novel friction drilling process". *Journal of Materials Processing Technology*, 207, 180-186, 2008.
- [6] Krishna PVG, Kishore K, Satyanarayana VV. "Some investigation in friction drilling AA6351 using high speed steel tools". *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(3), 11-15, 2010.
- [7] Krasauskas P. "Experimental and statistical investigation of thermo-mechanical friction drilling process". *Mechanika*, 17(6), 681-686, 2011.
- [8] Chow HM, Ku WL, Hung CL, Lee SM. "Optimization in thermal friction drilling for SUS304 stainless steel". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9-12), 935-944, 2011.
- [9] Raju BP, Swamy MK. "Effect of tool material in friction drilling a case study". *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2(4), 51-60, 2012.
- [10] Raju BP, Swamy MK. "Finite element simulation of a friction drilling process using deform-3D". *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2, 716-721, 2012.
- [11] Özek C, Demir Z. "A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delinmesinde kovan yüksekliğinin malzeme kalınlığına göre araştırılması". *Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Dergisi*, 4(2), 61-67, 2013.
- [12] Özek C, Demir Z. "Investigate the friction drilling of aluminium alloys according to the thermal conductivity". *TEM Journal*, 2(1), 93-101, 2013.
- [13] Sara EB, Midany TE, Elshourbagy H. "Optimization of thermal friction drilling process based on taguchi method and fuzzy logic technique". *International Journal of Science and Engineering Applications*, Volume 4(2), 55-59, 2015.
- [14] 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*, 1(2), 46-56, 2016.
- [15] Wu J, Wen JM, Wang ZY. "Study on the predicted model and experiment of drilling forces in drilling Ti6Al4V". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38(2), 1-8, 2016.
- [16] Eliseev AA, Fortuna SV, Kolubaev EA, Kalashnikova TA. "Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling". *Materials Science & Engineering*, 691, 121-125, 2017.
- [17] Bilgin MB, Gök K, Gök A. "Three-dimensional finite element model of friction drilling process in hot forming processes". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(3), 548-554, 2017.
- [18] Sara AEB, Hazem E, Shourbagy E, Ahmed M, Tawfik EB. "Experimental and thermo-mechanical modeling optimization of thermal friction drilling for AISI304 stainless steel". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 20, 84-92, 2018.