



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



AZ31B magnezyum alaşımının sürtünmeli delme işlemi üzerine deneysel çalışma

Experimental study on the friction drilling process of AZ31B magnesium alloy

Yazar(lar) (Author(s)): Musa BİLGİN

ORCID: 0000-0001-8482-8291

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bilgin M., “AZ31B magnezyum alaşımının sürtünmeli delme işlemi üzerine deneysel çalışma”, *Politeknik Dergisi*, 24(4): 1655-1666, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.762945

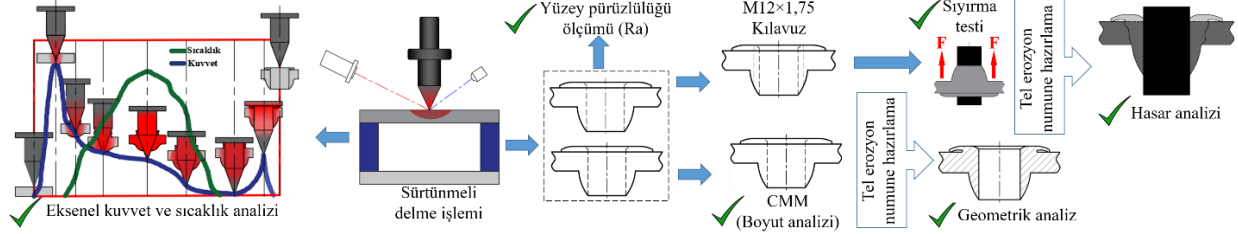
AZ31B Magnezyum Alaşımının Sürtünmeli Delme İşlemi Üzerine Deneysel Çalışma

Experimental Study on the Friction Drilling Process of AZ31B Magnesium Alloy

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Kuru ve MQL şartları altında Mg alaşımının sürtünmeli delme davranışı araştırıldı (Friction drilling behavior of Mg alloy was investigated under dry and MQL environment)
- ❖ MQL delik kovan geometrisi üzerinde önemli bir etki oluşturdu (MQL had a significant impact on the hole bushing geometry)
- ❖ MQL vida sıyrma kuvvetinin iyileşmesini sağladı (MQL provided an increase of thread pull-out strength)
- ❖ MQL yüzey pürüzlülüğünü dikkate değer şekilde iyileştirdi (MQL significantly improved the surface roughness)

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. Deneysel çalışmanın genel akış şeması/Figure. General flow chart of experimental study

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı, sürtünmeli delme işleminde kuru ve farklı zaman aralıklarında minimum miktarda yağlamanın (MQL) delik kovan geometrisi, delik profili, yüzey kalitesi ve vida sıyrma dayanımı üzerindeki etkilerini belirlemektir. (The purpose of the present study is to determine the effects under minimum quantity lubrication (MQL) in different time intervals and dry environments on the hole bushing geometry, hole profile, surface quality and thread pull-out strength in friction drilling.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

AZ31B Mg alaşımı kuru ve MQL şartları altında sabit devir ve ilerleme hızında sürtünmeli delme işlemine tabi tutulmuştur. Delme işlemi sırasında kuvvet sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin yüzey, delik geometrisi ve profil ölçümleri yapılmıştır. Numunelere dış açılarak vida sıyrma dayanım değerleri belirlenmiştir. (AZ31B Mg alloy was subjected to friction drilling at a constant speed and feed rate under MQL and dry environments. During the drilling process, force and temperature measurements were made. Surface, hole geometry, and profile measurements of the samples were performed. The samples were threaded and thread pull-out strength values were determined.)

Özgünlük (Originality)

Sunulmuş olan çalışma, literatürde kuru olarak yapılan sürtünmeli delme işleminden farklı olarak farklı zaman aralıklarında MQL uygulaması yapılarak gerçekleştirilmiştir. (The present study was carried out by applying MQL at different time intervals, unlike friction drilling, which was performed dry in the literature)

Bulgular (Findings)

MQL ile farklı geometriye sahip kovan yapıları elde edilmekte ve işlem verimliliğini artırmaktadır. (With the MQL, bush structures with different geometrical properties are obtained and increase process efficiency.)

Sonuç (Conclusion)

En düşük vida sıyrma dayanımı kuru işleme şartları altında gerçekleşirken en yüksek vida sıyrma dayanımı 10 sn MQL uygulamasında elde edilmiştir. The lowest thread pull-out strength was measured under dry environment while the highest thread pull-out strength was achieved under 10 sn of MQL application.)

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

AZ31B Magnezyum Alaşımının Sürtünmeli Delme İşlemi Üzerine Deneysel Çalışma

Araştırma Makalesi / Research Article

Musa BİLGİN*

Hacettepe ASO 1.OSB Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 02.07.2020 ; Kabul/Accepted : 12.09.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 14.09.2020)

ÖZ

Bu çalışmada sabit devir ve ilerleme hızında minimum miktarda yağlama (MQL) kullanılarak AZ31B Mg alaşımı üzerine sürtünmeli delme yöntemi ile delik delme işlemi yapılmıştır. Deneylerde MQL uygulama sürelerinin aksel kuvvet, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, kovan yapısı ve vida sıyırma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sürtünmeli delme işlemi esnasında aksel kuvvet oluşumu 7 farklı bölgede, sıcaklık oluşumu 2 farklı bölgeden meydana geldiği görülmüştür. Artan MQL uygulama süreleri yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumlu etkili yapmış ve pul duvarına malzeme yapışmasını azaltmıştır. Yapılan işlemlerde elde edilen bütün delik geometrileri kabul edilebilir niteliktedir. MQL uygulama süreleri işlem esnasında ortaya çıkan ısıyı değiştirdiğinden dolayı parabol, lineer ve ikili lineer olmak üzere üç farklı kovan profili elde edilmiştir. Delik yüzey kalitesinin vida sıyırma dayanımı üzerinde bir etkisinin olmadığı, kovan profilinin ve kovan uzunluğunun kombinasyonu belirleyici olduğu görülmüştür. En düşük vida sıyırma dayanımı kuru işleme şartları altında gerçekleşirken en yüksek vida sıyırma dayanımı 10 sn MQL uygulamasının yapıldığı deneylerde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AZ31B, sürtünmeli delme, aksel kuvvet, sıcaklık, sıyırma dayanımı, yüzey pürüzlülüğü.

Experimental Study on the Friction Drilling Process of AZ31B Magnesium Alloy

ABSTRACT

In the present study, hole drilling was performed by using the friction drilling method on AZ31B Mg alloy at a constant speed and feed rate under minimum quantity lubrication (MQL) environment. In the experiments, the effects of MQL application times on axial force, temperature, surface roughness, bushing profile, and thread pull-out strength was investigated. The test results revealed that MQL applications reduced the temperature in the process region and caused an increase in axial force. During the friction drilling process, it was observed that the axial forces occurred in 7 different zones while the temperature consisted of 2 different zones. The increasing MQL application times were positively affected to hole surface quality and reduced the formation of the material adhesion on the hole wall. Three different bushing profiles were obtained as a parabola, linear, and binary linear depending on the generated heat exchange because of the MQL application times. The test results revealed that the hole surface quality has no effect on the thread pull-out strength, and the combination of the bushing profile and bushing length was decisive. The lowest thread pull-out strength was measured under dry drilling conditions, while the highest thread pull-out strength achieved by 10 seconds of MQL application.

Keywords: AZ31B, friction drilling, axial force, temperature, pull-out, surface quality.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık ve otomotiv endüstrisinde; performans, güvenlik ve ekstra donanım taleplerinin artması araçlarda ilave bileşenler kullanılmasını gerektirmekte ve ağırlık artışına neden olmaktadır [1]. Hafifliğin sağlanması için çözüm noktasını düşük özgül ağırlığı ile diğer mühendislik malzemelerinden ayrılan magnezyum alaşımları oluşturmaktadır. Magnezyum alaşımları hafifliği, döküm kabiliyeti, titreşim ve şok emme kabiliyeti, işlenebilirliği ve geri dönüşüm potansiyelinin yüksek olması gibi avantajlarından dolayı havacılık ve otomotiv sektörlerinde ilgi çekici bir mühendislik malzemesi olarak yer almaktadır [2]. Delik delme işlemi genel endüstriyel uygulamaların yanında havacılık ve

otomotiv sektöründe en temel imalat teknolojisidir [3] ve talaşlı imalat yöntemleri içerisinde yaklaşık olarak % 40'lık bir oranı oluşturmaktadır [4]. Fakat matkap ile delme işleminde özellikle ince cidarlı malzemelerin delinmesinden sonra dış açılmak istenildiğinde cidar kalınlığının düşük olmasında dolayı vidalardaki sıyırma kuvveti istenilen mukavemet değerlerinin altında kalmaktadır. İnce cidarlı malzemelerde vida boyunu uzatarak dayanımını artırmak için klasik uygulamalarda vida kaynatılması veya perçin çakılması gibi yöntemler uygulanmaktadır [5]. Bu ilave yöntemlerin uygulanması üretim zamanı ve maliyeti artırmaktadır. Ayrıca uygulama esnasında termal çapılmalar, montaj sırasında burulma ve bükülme nedeniyle sınırlı bir kararlılık yapısına neden olmaktadır [6]. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için işlem doğası gereği kovan oluşumu sağlayarak vidalama boyunun uzaması ve

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : musabilgin@hacettepe.edu.tr

cıvataların sıkma yükünde artış sağlayan tek yöntem sürtünmeli delme işlemidir [7,8]. Bu işlem ayrıca form delme, akıcı delme ve sürtünmeli karıştırmalı delme olarak da adlandırılmaktadır [9]. İşlem sonrası oluşan kovan uzunluğu malzeme kalınlığının 2–3 katı aralığındadır [10]. Sürtünmeli delme işlemi beş aşamada gerçekleşmektedir. Takımın ucu iş parçası ile temas ederek yüksek bir eksenel kuvvet ile dalma işlemine başlar (1. Adım). Takım ile iş parçası ara yüzünde sürtünme kuvvetinin etkisiyle oluşan ısının tesiri ile iş parçası yumuşamaya başlar (2. Adım). Takım iş parçasına nüfuz ederken, yumuşamış malzeme ısı ve kuvvetin etkisi ile aşağı yönde itilerek kovan oluşumunu gerçekleştirir (3. Adım). Takımın iç parçasına dalması esnasında üst yüzeye yönelen malzemeye takımın omuz kısmı temas ederek pul oluşumunu gerçekleştirir (4. Adım). Takım geri çekilerek delme işlemi sonlandırılır (5. Adım) [11]. Sürtünmeli delme işlemi üzerine yapılan çalışmalar; devir, ilerleme hızı, sürtünme temas alanı, takım konik açısı ve takım kaplamasının, eksenel kuvvet, tork, sıcaklık, delik yapısı (yüzey pürüzlülüğü, kovan yapısı, dairesellik ve delik duvarı sertliği), vida dayanımı ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır [3, 8, 11 – 16]. Biermann ve Liu; 5 mm kalınlığındaki AZ31B alaşımına sürtünmeli delme yönemi (SDY) ile kör delik açmışlardır. Artan ilerleme hızı ile tork ve eksenel kuvvet artarken sıcaklığın azaldığını ifade etmişlerdir [17]. Demir ve Özek ön delik işlemlerinin sürtünmeli delmeye etkilerini incelemiştir. Ön delik işleminin pedal ve çatlak oluşumunu önlerken artan ön delik çapının ısı oluşumunu azalttığını belirtmişlerdir [18]. Miller ve ark. Al380 alaşımı ve AZ91D Mg alaşımının işlem öncesi iş parçasının ısıtılması ile sürtünmeli delme işleminde ön ısıtma ve yüksek devirin; eksenel kuvveti, torku, enerjiyi ve gücü azaltmada yararlı olduğu ve burç şeklinin olumlu etkilendiğini belirtmişlerdir [9]. Wittke ve ark. AZ91 alaşımına SDY ile kör delik açarak oluşturulan vidaların dayanımlarını incelemiştir. Delik açma işlemi için ön ısıtmalı ve normal olmak üzere iki farklı takım kullanılmıştır. Takımın ön ısıtılmasının vidaların yarı statik ve yorulma dayanımına bir etkisi olmamıştır. [19] Biermann ve ark. AlSi10Mg Al alaşımının farklı devir ve ilerleme hızlarında, iş parçası malzemesinin şekillendirilebilirliğini ve işlem stabilitesini arttırmak için takıma bir ön ısıtma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Ön ısıtma işlemi delik özelliklerinde olumlu bir sonuç vermesinin yanında eksenel kuvvetin az miktarda düşmesine neden olmuştur [20]. Sürtünmeli delme işlemi klasik delme işlemi ile kıyaslandığında; kovan oluşumunu sağlamanın yanı sıra; talaşsız olması nedeniyle delik yüzeyinin zarar görmemesi, işlem maliyetinin düşük olması ve takım ömrünün yüksek olması en önemli avantajlarıdır [12, 21, 22]. Ayrıca geleneksel yöntem ile delme işleminde işlem verimliliğini arttırmak için soğutma sıvısı kullanılmaktadır. Soğutma sıvısının hem insan sağlığına hem de çevreye verdiği zararların yanı sıra ek işlem maliyetine neden olması temel sorunlarıdır [21, 23].

Geleneksel delme işleminde soğutma sıvısının olumsuzluklarını ortadan kaldırmak için kuru delme tercih edilmektedir. Fakat geleneksel delme işleminin kuru şekilde gerçekleştirilmesinde; delik kalitesini (yüzey pürüzlülüğü, dairesellik ve diklik) [24] ve oluşan termal yüklerin fazla olması işlem kararlılığı ile takım aşınmasını olumsuz etkilemesi [25] delik delmede kuru işlemin uygulanabilirliğini azaltmaktadır. Geleneksel işlemde minimum miktarda yağlama (MQL) kullanımı ve soğutma sıvısı kullanımı ile kuru işlemin dezavantajları azaltılabilir [26 – 28]. Sürtünmeli delme işlemi için takım tedarikçileri; çelikler için 4-5 delikte, paslanmaz çelik için her delikte takımın yağlanmasını önermektedir [29]. Sürtünmeli delme işleminde az miktarda yağlama işlemi malzeme transferi ve takıma malzeme yapışmasını (BUE) engellemek için kullanılabilir [29, 30]. Ayrıca yağlama işlemi ile deliklerin yüzey kalitesi artırılarak mekanik birleştirmelerin yorulma ömrü artırılabilir [31]. Fakat delme işlemi öncesi takımın yağlanması oluşan yüksek ısıdan dolayı yağın buharlaşması ile etkisinin kaybolmasına neden olacaktır.

Literatür taramasında sürtünmeli delme işlemine araştırmacılar genel olarak bağımsız değişkenlerin işlem karakteristiğine etkisini incelemiştir. İşlem verimliliğini arttırmak için farklı yöntem ve tekniklerin kullanıldığı çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada literatür çalışmalarından farklı olarak sürtünmeli delme işlemi sırasında farklı zaman aralıklarında uygulanan MQL yağlama işleminin delik kalitesi ve vida sıyrma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sürtünmeli delme yönteminde MQL yağlama ile işlem verimliliğinin artırılması farklı bir bakış açısının oluşmasını sağlayacaktır. Deneyler sabit devir ve ilerleme hızı kullanılarak kuru, sürekli olarak ve farklı zaman aralıklarında MQL uygulanarak gerçekleştirilmiş elde edilen sonuçların kıyaslaması yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneylerde kullanılan AZ31B magnezyum alaşımı Magnesium-Elektron firmasından ticari olarak temin edilerek 30 × 30 × 5 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. AZ31B'nin kimyasal özellikleri Çizelge 1.'de verilmiştir.

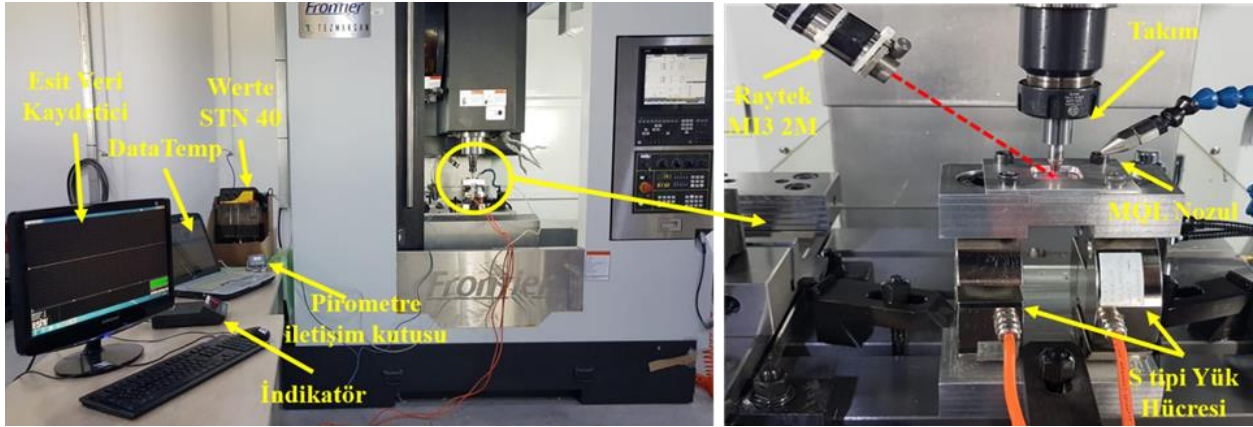
Çizelge 1. AZ31B Kimyasal bileşimi (The chemical composition of AZ31B)

Mal.	Alaşım Elementleri (% Ağırlık)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Ca	Al	Mg	Diğ.
AZ31B	0,01	0,004	<0,0005	0,29	0,0013	0,75	<0,005	2,9	Kal.	<0,3

Sürtünmeli delme işlemleri ve delinmiş yüzeylere kılavuz çekme işlemleri Frontier Marka MCV-866 model CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de sürtünmeli delme işlemlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği görülmektedir. İşlem esnasında oluşan

kuvvet değişimlerin ölçülmesi, özel olarak üretilen bağlama kalıbına monte edilen 2 adet 49,050 kN kapasiteli PLUSElectronic marka S tipi ST serisi yük hücresi ile gerçekleştirilmiştir. Yük hücrelerinden alınan verilerin anlık olarak okunması ve bilgisayara aktarılması

için ESİT marka PWI D model masaüstü indikatör kullanılmıştır. İndikatörden alınan değerlerin senkronize şekilde bilgisayara kaydedilmesi, ESİT firması tarafından geliştirilen veri kaydedici yazılım ile yapılmıştır.



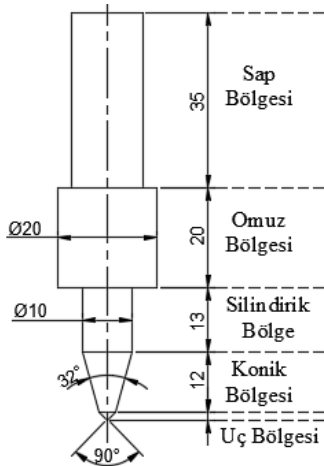
Şekil 1. Sürtünmeli delme deney düzeneği (Overview of the friction drilling setup)

Deneyler esnasında oluşan sıcaklık değişimlerinin ölçüm işlemi; \pm (% 0.5 okuma + 2 °C) hassasiyetinde, Raytek MI3 2M dijital pirometre ile yapılmıştır. Kuvvet ve sıcaklık ölçümlerin işlem esnasında saniyelik değişimler esas alınarak gerçekleştirilmiştir. MQL uygulaması potansiyometre kontrollü Werte STN 40 ile gerçekleştirilmiştir. MQL uygulanmasında işleminde demir dışı metallerin işlenmesinde tercih edilen Viscol marka Viscut serisi saf kesme yağı kullanılmıştır. Sürtünmeli delme işleminde kullanılan takım (Şekil 2) DIN 1.3343 yüksek hız çeliğinden imal edilmiş ve ısıl işlem ile sertliği 62 HRC'ye çıkarılmıştır. Takımdaki BUE oluşumunun etkilerini ortadan kaldırmak için deneyler farklı takımlar ile gerçekleştirilmiştir.

20 mm/dak sabit ilerleme hızında; kuru, sürekli MQL ve değişik zaman aralıkları ile MQL yağlama uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Takımın delme işlemine başlaması ile iş parçasını terk etme süresi 80 sn olarak gerçekleştirilmiştir. Takımın Z ekseninde delme derinliği 25,06 mm'dır Deneylerde kullanılan parametreler Çizelge 2'de sunulmuştur. Çizelge 2'de verilen deneyler veri doğruluğunun teyidi etmek için iki tekrarlı olarak yapılmıştır.

Çizelge 2. Sürtünmeli delme parametreleri (Friction drilling parameters)

Den. No	Devir (Dev/dak)	Takım ilerleme hızı (mm/dak)	MQL uygulama süresi (Sn)	MQL bekleme süresi (Sn)	İşlem süresi (Sn)
Y0	1850	20	-----	-----	80
Y2	1850	20	2	10	80
Y4	1850	20	4	10	80
Y6	1850	20	6	10	80
Y8	1850	20	8	10	80
Y10	1850	20	10	10	80
YS	1850	20	10	0.1	80



Şekil 2. Sürtünmeli delme takımı (Friction drilling tool)

Deneyler gerçekleştirilmeden önce işlem parametrelerinin belirlenmesi için bir dizi ön deney yapılmıştır. Ön deneyler sonucu elde edilen veriler değerlendirilerek çalışma kapsamında kullanılacak sabit devir ve ilerleme hızı değerlerine karar verilmiştir. Sürtünmeli delme işlemleri 1850 dev/dak sabit devir ve

Deneyler sonucu elde edilen aksel kuvvet ve sıcaklık verileri her iki işlemde elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülük (Ra) ölçümleri; Mitutoyo SJ-210 ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde kuvvet dalgalanmalarının etkisinin en aza indirgenmesi için plakanın üst yüzeyinin 0,5 mm iç kısmından başlanarak ölçülmüştür ve her bir delik yüzeyinden 90° döndürülerek dört ölçüm gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülükleri iki numuneden alınan toplam sekiz değerden en düşük ve en yüksek değerlerin çıkarılmasından sonra kalan altı değer aritmetik ortalamasının alınması ile elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü sonrası numuneler random

olarak 2 gruba ayrılmıştır. 1. grup numuneler geometrik ve kesit analizlerinde, 2. grup numuneler vida sıyırma testinde kullanılmıştır. Vida sıyırma testi için deliklere 760 dev/dak devirde YAMAWA marka M12×1,75 HSS takım kılavuzu kullanılarak vida açma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kovan yapılarının kesit görünümünü incelemek için numuneler Sodick marka AG600L tel erozyon tezgâhında delik ekseninde kesilmiştir. Deliklerin kovan çapı, kovan yüksekliği HEXAGON marka 7.10.7 SF model imalat sahası CMM tezgâhında HEXAGON HP-THD dokunma tetiklemeli prob ile yapılmıştır. Sıyırma testleri Alşa Marka 60 kN kapasiteli çekme cihazında yapılmıştır. Sıyırma testleri 3 mm /dak çekme hızında ve çeneler arası mesafe 100 mm olarak gerçekleştirilmiştir. Sıyırma testlerinde kullanılan cıvatalar ticari olarak temin edilebilen DIN 912 standardına uygun 120 mm boyunda M 12×1,75 imbus 12.9 özelliğindedir.

3. DENEYSSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

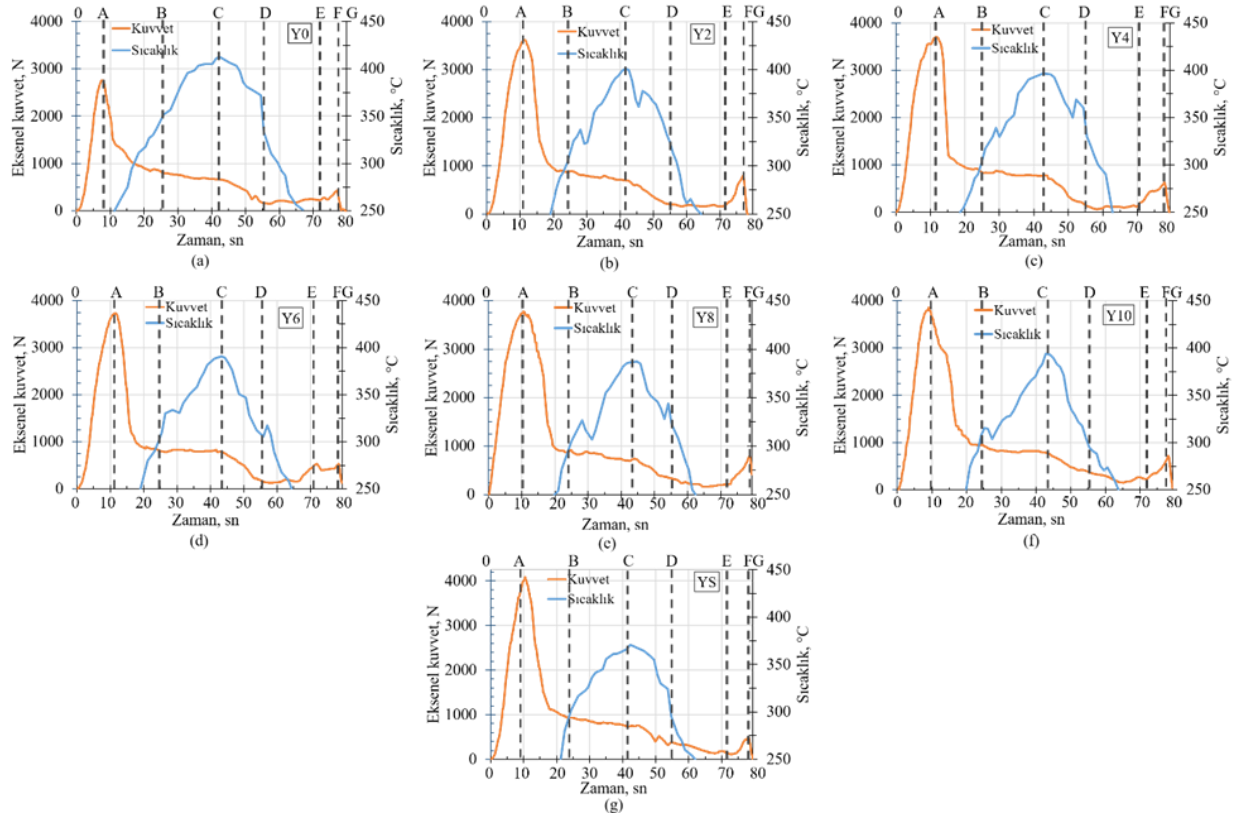
Bu çalışmada 5 mm kalınlığındaki AZ31B Mg alaşımının sürtünmeli delme işleminde kuru işleme ve farklı zaman aralıklarında uygulanan MQL yağlama sisteminin, delik yüzey kalitesine, delik geometrisine ve vida sıyırma dayanımına etkileri araştırılmıştır. Deneyler sırasında aksel kuvvet ve sıcaklık oluşumları kayıt altına alınmış ve numuneler üzerindeki etkileri incelenerek yorumlanmıştır.

3.1. Aksel kuvvet ve sıcaklık (Axial forces and temperature)

Sürtünmeli delme işlemi için kullanılan parametreler sıcaklık, aksel kuvvet ve delik özelliklerini değiştirmektedir. Bu nedenle sürtünmeli delme delme esnasında oluşan kuvvetin izlenmesi; sürtünme mekanizmasının, kovan yapısının oluşturulması ve kopma mekanizmalarının anlaşılması için önemlidir [9, 22, 32]. Takım ve iş parçası arasında ortaya çıkan ısı, malzemenin erime sıcaklığının bir fonksiyonudur ve işlem esnasında sıcaklık ergime sıcaklığının 1/2–2/3 arasında gerçekleşmektedir [9, 33]. Sürtünmeli delme işleminde açığa çıkan ısı malzemenin yumuşamasına ve kovan oluşumunun gerçekleşmesine katkıda bulunduğundan dolayı ısının kontrol edilmesi delik kalitesinin artırılması için büyük önem arz etmektedir. Deneyler sırasında elde edilen kuvvet ve sıcaklık verileri Şekil 3'de sunulmuştur. Her bir deney sonucunda elde edilmiş verilerle hazırlanmış olan grafikler incelendiğinde; kuvvet ve sıcaklık grafiklerinin değişim noktaları dikkate alındığında kuvvet aralığının yedi bölgede, sıcaklığın ise iki bölgede gerçekleştiği görülmüştür. Kuvvet ve sıcaklık grafiklerinin değişim noktaları yük hücrelerinden ve pirometreden alınan sayısal verilerdeki sapmalar esas alınarak belirlenmiştir. Aksel kuvvette bölge oluşumlarının belirlenmesi düşük ilerleme hızlarında mümkündür. Yüksek ilerleme

hızlarında bölgeler arası mesafenin az olması nedeniyle özellikle ara geçiş bölgelerinin ayırt edilmesi mümkün değildir. Kuru ve MQL ile gerçekleştirilen deneylerde kuvvet ve sıcaklık oluşumları incelendiğine işlemlerin aynı takım ile gerçekleştirilmesinden dolayı değişim bölgeleri benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Deneyler sabit devir ve sabit ilerleme hızı kullanılarak yapıldığı için kuru ve MQL ile yapılan deneylerin aksel kuvvet ve sıcaklık oluşumu üzerindeki etkileri grafik üzerinde net bir şekilde görülebilmektedir.

Deneylerin tamamında, takımın uç kısmı malzemeye dalmaya başlarken, takımın konik uç yapısı ve ilerleme hızına bağlı olarak aksel kuvvet maksimum değere ulaşmıştır. Aksel kuvvetin en yüksek değere ulaştığı zaman aralığında işlem bölgesindeki sıcaklığın ise henüz minimum düzeyde (<250 °C) olduğu görülmektedir. Dolayısı ile bu bölgede sıcaklığın düşük olması nedeniyle malzeme istenilen plastik deformasyon seviyesine tam olarak ulaşamadığı için aksel kuvvette artış meydana gelmektedir (0 – A bölgesi). Şekil 3'deki grafikten görüleceği üzere, kuru olarak yapılan delik delme işleminde (Y0) maksimum aksel kuvvet 2756 N olarak gerçekleşirken sıcaklık değeri de 414 °C'nin üzerine çıkmıştır. Diğer taraftan MQL ile yapılan deneylerde yağlama süresine bağlı olarak aksel kuvvet artış gösterirken, sıcaklık değerinin de azaldığı görülmüştür. Takımın malzemeye dalmasıyla artan sürtünme yüzey alanı sürtünmeyle oluşan ısı miktarını artırarak işlem bölgesinde sıcaklığın artmasına neden olmuştur. Artan sıcaklığa bağlı olarak takımın malzemeye daha kolay nüfuz etmesiyle aksel kuvvette hızlı bir azalma meydana gelmiştir. MQL ile yapılan deneylerde yağlama işlemi takım ile malzeme arasındaki sürtünmeyi azaltarak işlem bölgesinde sıcaklık artışının daha yavaş ve daha düşük değerlerde gerçekleşmesine neden olmuştur (A – B bölgesi). A – B bölgesi MQL uygulanan işlemlerde daha kararlı bir davranış sergilerken kuru işlemede aynı davranışı göstermemesi delik delme işlemi başlamadan önce sıcaklığın 250 °C'ye ulaşması ile plastik deformasyon özelliğinin değişmesine bağlanabilir. Delik delme işleminin devamında takımın malzemeye tam nüfuz etmesiyle; takım sürtünme alanının artması ile işlem sıcaklığı maksimum noktaya ulaşmaktadır. Kovan yapısının oluşmaya başlaması ile malzeme delik kenarlarına yönelmekte ve takımın deforme edeceği malzeme hacmi azalmaktadır. İşlem sırasında sıcaklığında artışa devam etmesi ile aksel kuvvetin yataya yakın azalma eğilimi göstermesine neden vermektedir (B – C bölgesi). Takımın uç kısmının malzemenin çıkması ile birlikte sürtünme yüzey alanının azalmasına bağlı olarak işlem bölgesindeki sıcaklık değeri düşmeye başlamıştır. Aksel kuvvet ise sabit hızda azalarak minimum değere yaklaşmıştır. Takımın konik bölgesinin kovan yapısından çıkması ile takım önünde deformasyona uğraması gereken malzeme hacminin azalması ile kuvvette azalma başladığı görülmektedir. (C – D bölgesi).



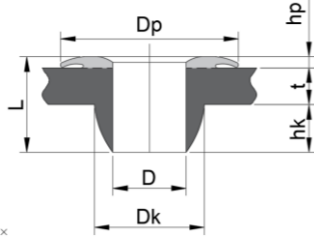
Şekil 3. Kuru ve MQL altında yapılan delik delme işleminde eksenel kuvvet ve sıcaklık oluşumları a) Y0, b) Y2, c) Y4, d) Y6, e) Y8, f) Y10, g)YS (Axial force and temperature formation in drilling process under dry and MQL environment a) Y0, b) Y2, c) Y4, d) Y6, e) Y8, f) Y10, g)YS)

Takım malzemenin alt yüzeyinden tamamen çıkmasıyla delik kovan yapısı oluşmuş, sıcaklık minimum değere ulaşmış eksenel kuvvet ise delik içi yüzeyindeki sürtünmeden dolayı minimum değerinde stabil olarak gerçekleşmiştir. E noktasında delik ve kovan geometrisinin tamamen oluşmasıyla kuvvetin teorik olarak sıfır olması gerekmektedir. Ancak, grafikler incelendiğinde (Şekil 3) kuvvetin sıfıra yaklaşmasına rağmen sıfır olmadığı görülmektedir. Bu durumun takıma yapışan malzemenin (BUE) radyal kuvveti artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (D – E bölgesi). Grafik üzerinde E – F bölgesi incelendiğinde, delik delme işlemi tamamlandıktan sonra kuvvette ikinci bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bu durum delik kovan yapısında sızdırmazlık görevi gören pul kısmını oluşturmak için delme işlemi sırasında numunenin üst yüzeyine taşan malzemeye takımın omuz yüzeyinin temas etmesinden kaynaklanmaktadır. Kuru yapılan işlemlerde bu artış dikkate alınmayacak düzeyde gerçekleşirken MQL ile yapılan deneylerde yağlama süresine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Son olarak takımın malzemeden ayrıldığı bölgede eksenel kuvvet değeri düşme eğilimi gösterirken hem E – F hem de F – G bölgesinde sıcaklık değerleri 250 °C'nin altına düşmüştür. Eksenel kuvvet değişimleri incelendiğinde MQL takım ile iş parçası arasındaki sürtünme etkisini azaltması kuvvet değişimlerinin daha kararlı ve stabil olmasını sağlamıştır. Ayrıca MQL'in soğutma etkisi takımın malzemeye dalması sırasında ilk pik oluşum süresini uzatmıştır. MQL süresinin artırılması ile oluşan

maksimum sıcaklık azalırken eksenel kuvvet artmaktadır. AZ31B alaşımının ısıl iletim katsayısının yüksek olması sıcaklığın yükselen eğrisi ile alçalan eğrisinin benzer olmasına neden olmaktadır. Kuru işlemede sıcaklığının maksimum seviyeden minimum seviyeye düşmesi daha uzun sürerken MQL süresi arttıkça bu süre daha da kısalmaktadır. MQL malzemesinin soğuma bölümünde daha etkin bir rol oynamaktadır. Takım delik içerisinden ayrılmadan yeterince soğuma sağlanması ve delik yüzeyinin yağ katmanı ile kaplanması; delik çeperinin hava ile ani soğumasını engellemektedir.

3.2. Kovan ve pul geometrisi (Bushing and washer geometry)

Sürtüneli delme yönteminde takımın iş parçasına dalması esnasında malzemenin bir kısmı iş parçasının üst yüzeyine ters yönde ekstrüze olarak pul kısmını oluştururken, kalan malzeme takım dönme ve ilerleme hareketi ile iş parçasının alt yüzeyine ekstrüze olarak kovan kısmını oluşturmaktadır [9, 34, 35]. Oluşturulan kovan ve pul yapısı sürtüneli delme işleminin temelini oluşturmaktadır ve mekanik bağlantı dayanımını artırılması için vidalama boyunun uzamasını sağlamaktadır. Sürtüneli delme işleminde oluşturulan delik geometrisi Şekil 4 de verilmiştir. Şekil 4'de L: delik boyu (mm); Dp: pul çapı (mm), Dk: kovan çapı (mm); D: delik çapı (mm) hp: pul yüksekliği ve hk: kovan yüksekliğini ifade etmektedir.



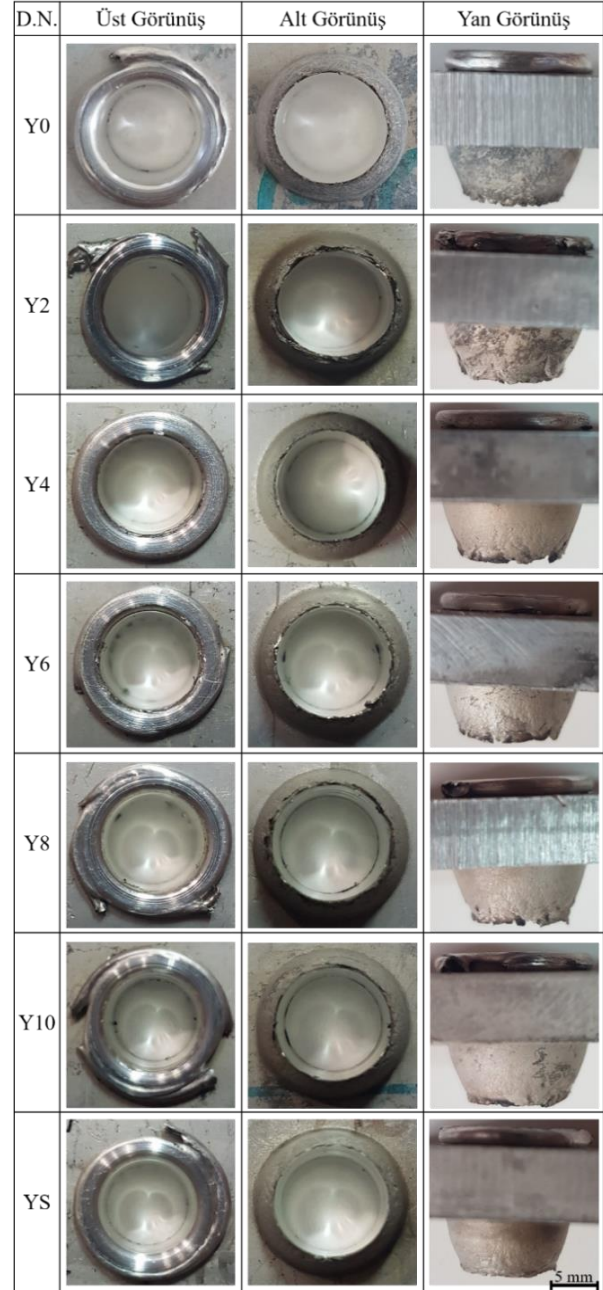
Şekil 4. Sürtünmeli delme işleminde oluşturulan delik geometrisi (The hole geometry formed during friction drilling process)

Kovan yapısının oluşturulmasında en önemli kısıtların başında kovanda meydana gelebilecek çatlak ya da taç yaprağı oluşumudur. Taç yaprağı işlem esnasında kovandaki zorlanma kritik değere ulaştığında kovanın eksenel yönde kırılması ile 5 ya da 8 yaprak şeklinde ayrılması ile oluşmaktadır. Taç yaprağı oluşumu için t/d oranı ve malzemenin mekanik özellikleri kritik öneme sahiptir [35]. Çatlak ve taç yaprağı oluşumunda belirleyici mekanik özellik ise sünekliktir [9]. Mg alaşımlarının hekzagonal sıkı paket yapısına sahip olmaları ve yüksek sıcaklıklarda sertliği yüksek ikinci fazların oluşumu plastik deformasyonu zorlaştırmaktadır [36]. Bu durum Mg alaşımlarının sürtünmeli delme işleminde taç yaprağı oluşum riskini artırmaktadır. Deneylerin düşük ilerleme hızında gerçekleştirilmesi ile hekzagonal sıkı paket yapıya sahip Mg alaşımının plastik deformasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilerek taç yaprağı oluşmadan kabul edilebilir nitelikte kovan yapıları elde edilmiştir. Deneylerde elde edilen kovan geometrileri Şekil 5’de verilmiştir

Şekil 5’de verilen pul yapıları incelendiğinde kovanın ana geometrisine kıyasla MQL’in iş parçasının üst yüzeyinden yapılmasından dolayı daha çok etkilendiği görülmektedir. Y4 ve Y6 nolu deneylerde en iyi pul yapıları elde edilmiştir. MQL uygulanmayan işlemde (Y0) tek noktadan makro çatlak oluşumu görülmektedir. Bu durum artan sıcaklıktan dolayı malzemenin daha fazla iş parçasının üst yüzeyine ekstrüze etmesi ile pul oluşumunu sağlayan malzeme miktarının artmasından dolayıdır. Y2 nolu deneyde ise işlemde en düzensiz pul yapısı görülmektedir. MQL hem iş parçasının üst yüzeyinden hem de kısa süreli yapılmasından dolayı termal değişkenliğin neden olduğu termal yorulma çatlaklarının oluşmasına yol açmıştır.

Sürekli ve uzun süreli yağlamanın gerçekleştirildiği Y8 – Y10 ve YS işlemlerinde oluşan çatlaklar ise azalan ısı ile malzemenin plastik deformasyonun zorlanmasına bağlı olarak eksenel kuvvetin artmasından kaynaklanmaktadır. Artan eksenel kuvvetin radyal kuvveti artırması çatlak oluşumun temel nedenlerindedir [15]. Malzeme katmanları arasındaki soğuma hızı farklılıkları pul geometrisini etkileyerek bozabilmektedir [15]. Kovan profilinin oluşumunda proses sıcaklığı belirleyici niteliktedir. Proses sıcaklığına göre malzemenin plastik deformasyon davranışı değişerek kovan profili değişmektedir. Artan sıcaklık malzemenin daha viskoplastik hale gelmesini sağlayarak daha kolay

ekstrüzyona uğramasını ve kovan boyunun uzamasına neden olur [8, 15, 37]. Ancak sıcaklığın çok fazla olması kovan yapısını oluşturan malzemenin boylamasına şekillendirilebilirliğini azaltarak kovan boyunun kışalmasına ve taç yaprağı oluşumuna neden olmaktadır [37]. Kovan yüksekliğinin fazla olması; kovan sonunda şekillendirilen malzeme miktarının azalmasına neden olarak taç yaprak oluşumuna neden olabilmektedir [8].

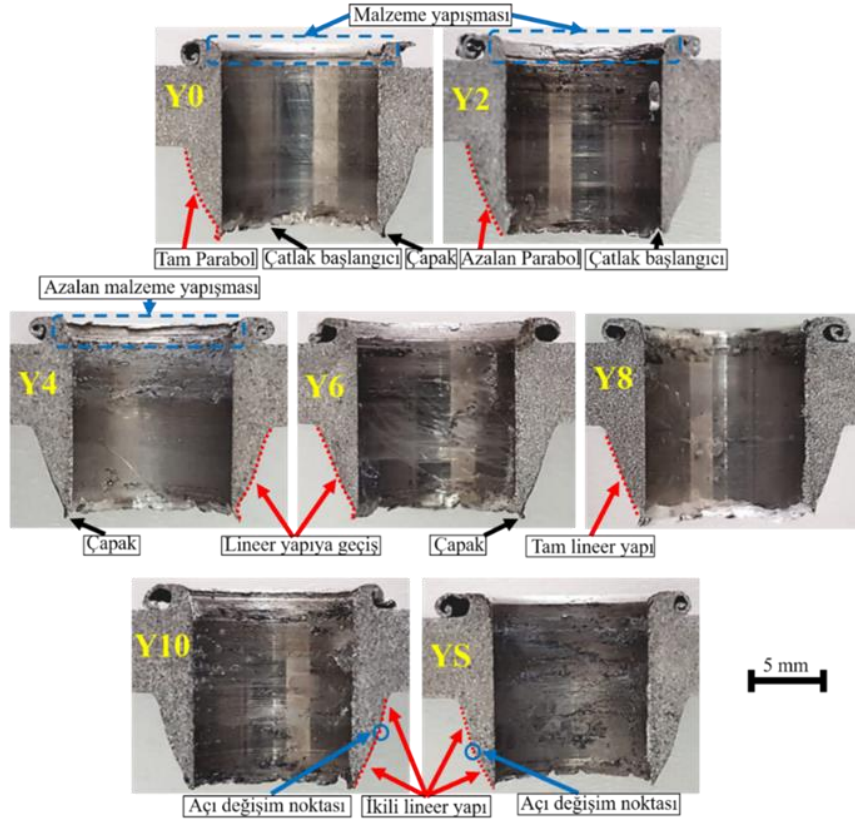


Şekil 5. Kovan yapılarının üst, alt ve yan görüşleri (Top, bottom and side views of the bushing profiles)

Şekli 5’de kovan profilleri incelendiğinde Y4, Y6 ve Y8 numaralı deneylerde diğer deneylere kıyasla kovan bitiş kısımlarında düzensizlik izlenmektedir. Bu düzensizliklerin kısa süreli yağlamada ya da uzun süreli yağlamada oluşmaması kısa süreli yağlamada yağın işlem ısı ile hemen buharlaşması, uzun süreli yağlamada bir sonraki yağlama süresine kadar yağın

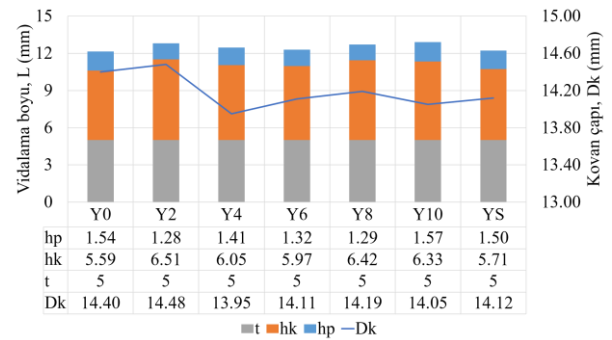
işlem bölgesinde bulunmasından dolayı ısı dengelinin daha stabil seyretmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. MQL'in kovan profiline etkisinin daha iyi anlaşılır olması için numuneler delik ekseninde tel erozyon tezgâhında kesilmiştir. Numunelerin kesit görünüşleri Şekil 6'da verilmiştir. Kuru işlemede (Y0) pul yapısında malzeme yapışması (BUE) meydana gelmiştir. BUE malzemenin ters ekstrüzyona uğraması ve işlem sonunda takımın omuz kısmına teması ile

basmaya maruz kalmasıyla oluşan yüksek sıcaklık ve basınçtan dolayı oluşmaktadır. MQL'in işleminin gerçekleştirilmesi ile Y2 ve Y4'te malzeme yapışması azalmış; MQL süresinin artması ile sürtünmenin ve sıcaklığın azalması sonucu diğer işlemlerin pul yapılarında malzeme yapışması ortadan kalkmıştır. İşlemlerde ara geçiş yapıları dikkate alınmadığında üç farklı profil yapısı dikkat çekmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Delik geometrilerinin tam kesit görünüşleri (The full section views of hole geometries)

Kovan yapıları kuru işlemede (Y0 ve Y2) parabol yapı, lineer yapı (Y8) ve ikili lineer (Y10 ve YS) yapı olarak sınıflandırılabilir. İşlemlerde plastik deformasyona uğrayan malzeme hacminin aynı olmasına rağmen MQL'in kovan yapısında bu kadar belirleyici bir etkiye sahip olması, yağlama işleminin aksel kuvveti ve sıcaklığı değiştirmesinin yanı sıra AZ31B alaşımının yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasına atfedilebilir. Şekil 6'da kesit görünüşleri sunulmuş kovan profilleri bilgisayarlı koordinat ölçme cihazı (CMM) ile ölçülmüştür. Şekil 7'de verilmiş olan grafik'ten MQL'in kovan yapısına etkisi daha net olarak görülebilmektedir. Şekil 7 de verilen grafik incelendiğinde en kısa kovan boyları (hk) sırasıyla parabol kovan yapısının olduğu kuru işlemede (Y0) ($L=12,31$ mm) ve ikili lineer kovan yapısının olduğu sürekli MQL (YS) ($L=12,21$ mm) uygulanan işlemede gerçekleşmiştir. Bu durum işlemlerde oluşan sıcaklıklar göz önüne alındığında Y0'da artan işlem sıcaklığı malzemenin takımın ilerleme yönü yerine delik duvarına yayılmasına neden olarak kovan boyunda azalma meydana getirmiştir.



Şekil 7. Kovan ve pul boyutları (The bushing and washer dimensions)

Y0'ın en yüksek ikinci kovan çapına sahip olması bunun bir göstergesidir. Y0'da kovan sonunda çapak oluşumu gözlemlenmiştir. Kovan boyunu artırmasına rağmen oluşan bu çapak deliğe açılacak vida dişini işlevsiz hale getirecektir. Çapak oluşumu iş parçası – takım ara yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı malzemenin aksel kuvvet yönünde akmasından kaynaklanmaktadır.

YS'de ikili lineer kovan yapısı oluşması ve çapak oluşumunun ortadan kalkması azalan işlem sıcaklığına bağlıdır. YS'de azalan işlem sıcaklığı malzemenin plastik deformasyon kabiliyetinin azalmasına ve devamında delik kovan boyunun azalmasına neden olmuştur. İkili lineer yapının oluşmasının temelinde ise takım – iş parçası ara yüzeyinde oluşan sıcaklık ve AZ31B Mg alaşımının yüksek ısı iletim katsayısı etkili olmuştur. Belli bir noktaya kadar lineer devam eden plastik deformasyon açısı değişim noktasına geldiğinde kovanın çeper kalınlığının azalmasına bağlı olarak azalan malzeme miktarının etkisiyle birim alana düşen ısı miktarı artmaktadır ve malzeme boylamasına plastik deformasyondan daha çok enlemesine plastik deformasyona uğramaktadır. Oluşan lineer doğruların açıları bunun bir göstergesidir ve ikincil lineer yapı daha büyük bir açığa sahip olduğundan çapak oluşumunu da engellemektedir. En uzun kovan yapılarının oluştuğu işlemler incelendiğinde sırasıyla Y2, Y8 ve Y10 olduğu gözlemlenmektedir. Y2'de kovan çapının Y0'a çok yakın olmasına rağmen kovan boyundaki artış kısa süreli MQL işlemi sonucu azalan işlem sıcaklığı sayesinde takımın ilerleme hareketi ile malzemenin daha fazla yan yüzeylere yayılmasının önleyerek enine deformasyon yerine boyuna deformasyonu artırmasındandır. Y2 deki oluşan parabol kovan yapısı yapısını Y0 a göre lineere daha yakın olması plastik deformasyonun boyuna gerçekleştirdiğinin göstergesidir. Ayrıca Y0 ve Y2 aynı kovan yapısına sahip olmalarına karşın Y2 çapak oluşumunun ortadan kalkması Y0 a göre azalan takım – iş parçası ara yüzey sıcaklığındandır. Y10 da oluşan kovan boyunun YS'ye göre daha uzun olması aralıklı MQL uygulaması ile artan işlem sıcaklığına bağlı olarak plastik deformasyonun daha verimli gerçekleşmesindedir. Y10 işleminde açı değişim noktasının YS ye göre daha önce gerçekleşmesi Y10'un yüksek işlem sıcaklığından dolayı takım iş parçası ara yüzeyinden kovan dış çapına doğru transfer edilen ısının daha yüksek olmasına bağlı olarak plastik deformasyon davranışının daha önce değişmesindedir. İşlemler arasında tek lineer yapı Y8'de oluşmuştur. Y8 de artan MQL süresi işlem sıcaklığını düşürdüğünden parabol yapı oluşumu gerçekleşmemiştir. Y10'daki gibi ikili lineer yapı oluşmaması ise işlem sıcaklığının Y10'a kıyasla yüksek olmasında dolayı kovan oluşumuna başladığı andan itibaren malzemenin sabit bir şekilde plastik deformasyona uğramasından kaynaklıdır. Y8 de tek lineer kovan yapısının oluşması ile işlem esnasında birim hacme düşen ısı miktarının artması çapak oluşumuna neden olarak kovan boyunu uzatmaktadır. Fakat kovanın son kısmındaki çeper kalınlığının incelenmesi ve oluşan çaptan dolayı Y8 deki kovan boyundaki artış pasif bir artış olmaktadır. Y4 ve Y6 ise parabolde lineere geçiş yapılarının oluşumları dikkat çekmektedir. Elde edilen kovan yapıları ile sıcaklık değeri bunu doğrulamaktadır. Y4 de sıcaklık daha fazla iken kovan yapısı parabole yakın kararsız bir yapı sergilemektedir. Y6 da azalan sıcaklık ile kovan yapısı lineere yakın bir özellik göstermektedir. Y4 ve Y6 da

kovan boyunda azalma gözlemlenmektedir. Kovan boyundaki bu azalma kovan yapılarında geçiş geometrisi oluşturarak kararlı bir yapı göstermemesinden kaynaklanmaktadır. Deneylede t/d oranı sabit olduğundan aynı hacimdeki malzemenin plastik deformasyonu gerçekleşmektedir. Kovan yapıları ve kovan boyları işlemler sırasında uygulanan MQL ile işlem sıcaklığının değişimine bağlı olarak farklılık göstermiştir. Aynı tip kovan yapısı oluşumunda sabit malzeme hacminden dolayı Y10 ve YS deki gibi artan kovan boyu azalan kovan çapına neden olabilmektedir. Fakat Y0 ile Y2 arasındaki benzer kovan yapısına rağmen artan kovan boyu ile kovan çapında da artış gözükmemektedir. Bu durum, Y2 deki parabol yapının daha lineere yakın olması ve Y0 da yüksek işlem sıcaklığında dolayı dalma esnasında iş parçasının üst yüzeyine ters ekstrüze olan malzeme miktarı artarak kovan oluşumdaki malzeme hacmi azalmasından kaynaklanmaktadır. Kovan boyu ve kovan yapısının; kovan çapı üzerine tek başlarına direkt bir bağlantısı olmamasına rağmen bu iki parametrenin kombinasyonu kovan çapının değişimine etkilemektedir.

Yapılan işlemlerin hepsinde çapak oluşumu gözlemlenmemiştir. Çapak oluşumu işlem verimliliğini dolaylı olarak etkilemektedir. Çünkü çapak oluşumu ile kovan boyunun artmasına rağmen kovana açılacak vidanın dış yüksekliği kovan boyunda pasif bir artışa neden olmaktadır. Çapak oluşumuna neden olan malzeme hacmi aktif kovan yapısında kalabildiği takdirde kovanın çeper kalınlığı artırılarak vida sıyırma dayanımının artmasını sağlayabilir. Çapak oluşumu Y0, Y4, Y6 ve Y8 de gözlemlenebilmektedirler. Çapak oluşumu AZ31B'nin yüksek termal iletkenliği ve azalan kovan çeper kalınlığının bir kombinasyonudur. Çapak oluşumunu gösteren işlemlerden farkı kovan yapısına sahip Y0 da çapak oluşumu kuru işlemeden dolayı artan işlem sıcaklığıdır. Y4, Y6 ve Y8'de MQL ile azalan sıcaklığa rağmen çapak oluşumu kovan yapısındanadır. Kovan yapısının lineer olarak azalması kovan sonunda delik duvarı ve kovan dış yüzeyinin cidar kalınlığını azaltmakta ve AZ31B'nin yüksek ısı iletim katsayısı ile ince cidarlı yapının birim alanına düşen ısı miktarı artmaktadır. Yapılan işlemlerde kovanın son kısmında ya da çapak bölgesinde çatlak başlangıçları gözlemlenmiştir. Bütün işlemlerde görülen bu çatlak başlangıçları proses esnasında delik duvarında oluşan yüksek sıcaklık, azalan çeper kalınlığı ve dış ortam sıcaklığının kombinasyonudur. Delik duvarının yüksek sıcaklığı ve kovan dış çapının temasta olduğu düşük ortam sıcaklığı termal yorulmalara neden olarak çatlak oluşumu meydana gelmektedir. İşlem sıcaklığının düşmesi ile artan eksenel kuvvet iş parçasında deformasyon sertleşmesine neden olur ayrıca AZ31B'nin hegzagonal sıkı paket yapısı düşük sıcaklıklarda deformasyonun daha zor olması çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Kovan yapılarındaki değişimlerde sıcaklık ve eksenel kuvvet değişimleri ile birlikte çatlak oluşumunun bir diğer nedeni olarak gösterilebilir. Oluşan çatlaklar Y4 işlemi dışında boylarının kısa olması pasif

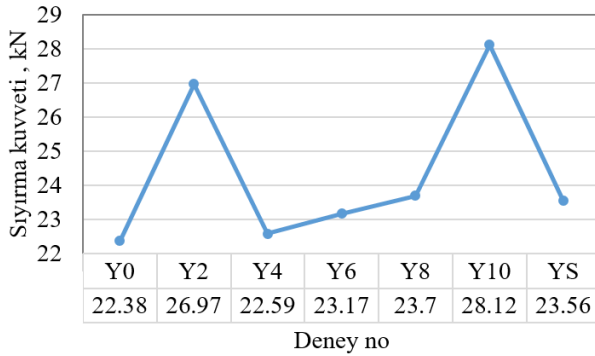
kovan boyunda kalmasına neden olmaktadır. Pasif kovan boyu; kovanın azalan çeper kalınlığından dolayı kovana açılacak vidanın dış yüksekliği ile çeper kalınlığı aynı olduğu noktadan itibaren kılavuz çekme işleminin talaş kaldırma yerine kesme işlemi yapısına neden olmaktadır. Kovan yapısında oluşan çapak kovan boyunda sıyırma dayanımı için pasif bir artışa neden olmaktadır. Ø 10 mm deliğe açılacak M12×1,75 iç vidanın dış yüksekliği (h) [38];

$$h = 0,5413 \times P = 0,5413 \times 1,75 = 0,9472 \quad (1)$$

Çeper kalınlığının 0,9472 mm ve sonrasında vidalar kesme işlemi yaparak kovan boyunun kışalmasına neden olmaktadır. Bu durum deliğe vida açıldığında dış yüksekliği ile çeper kalınlığının birbirine eşit olduğu noktadan sonra kovan boyunun işlevini yitirmesine neden olmaktadır.

3.3. Vida sıyırma dayanımı (Thread pull-out strength)

Deneylerde kuru ve MQL işlemi ile farklı kovan boyları ve kovan yapılarına M12×1,75 vida açılarak gerçekleştirilen sıyırma testi sonuçları Şekil 8' de verilmiştir.

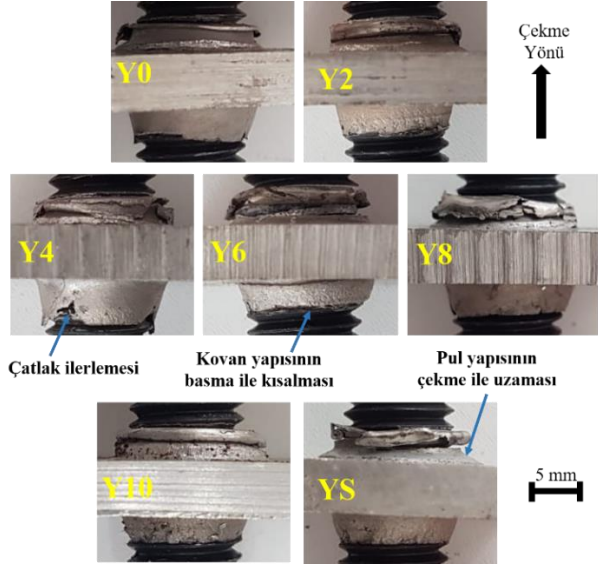


Şekil 8. Deney numunelerinin vida sıyırma dayanımı (Threading pull-out of test specimens)

İşlemlerde en düşük sıyırma dayanımı kuru işleminin gerçekleştirdiği Y0 deneyinde gerçekleşmiştir. Y0 da sıyırma dayanımının düşük çıkması yüksek işlem sıcaklığı ve ısı tesir süresinin daha uzun olmasındandır. Yüksek işlem sıcaklığı malzemenin boyuna deformasyon yerine delik duvarına doğru deformasyon olmasını sağlayarak en düşük kovan boyunun (5,59 mm) oluşmasına neden olmuştur. Bu durum deliğe açılacak hatve sayısının azalmasına ve devamında vida dayanımının düşmesine neden olmuştur. Ayrıca literatürde yüksek işlem sıcaklığından sonra delik duvarlarının hava ile teması sonucu hızlı soğumasına bağlı olarak mikroyapı değişimi ve delik duvarının sertleşmesine neden olduğu belirtilmektedir [13, 22, 31, 39]. Kuru işlem nedeniyle işlemlerde oluşan en yüksek sıcaklık değerinin oluştuğu Y0 deneyinde delik duvarlarının daha sert olacağı öngörülmektedir. Bu durum Y0 deneyinde oluşturulan vida uçlarının gevrek yapıda oluşmasına neden olarak sıyırma kuvvetinin düşük çıkmasına sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklık dağılımlarının oluşturduğu termal gerilmeler delik yüzeyinde çatlak oluşumuna neden

olabilmektedir [30]. Şekil 8'deki grafik incelendiğinde en yüksek sıyırma dayanımları Y10 için 28,12 kN, Y2 için 26,97 kN'dur. Her iki delikte sıyırma dayanımının yüksek çıkması deliklerde oluşan yüksek kovan boyları en önemli etkidir. Şekil 6'da Y2 ve Y10'un kesit görünüşü incelendiğinde kovanın bitiş noktasında çeper kalınlığının sıfırdan büyük olması aktif kovan boyunca daha uzun olmasını sağlayarak sıyırma dayanımının yüksek çıkmasının temel etkeni olarak gösterilebilir. Ayrıca her ikisinde de gereksiz çapak oluşumu gerçekleşmediğinden çapak oluşumu için harcanacak malzeme hacmi aktif kovan yapısında çeper kalınlığını artırarak sıyırma dayanımını yükseltmiştir. Benzer bir şekilde kovan boyunun yüksek çıktığı Y8 de sıyırma dayanımı 23,7 kN olarak gerçekleşmiştir. Y8'in sıyırma dayanımının Y2 ve Y10'a göre düşük çıkması tekli lineer kovan yapısından dolayı kovan sonunda oluşan çapağın kovan boyunda pasif artışa neden olmasından dolayıdır. Y10 de sıyırma dayanımının daha yüksek çıkması işlem sıcaklığının düşmesi ve yağlamanın etkisiyle kontrollü soğuma sağlanmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde sıcaklık artması ile delik duvarında sertliğin arttığı belirtilmiştir [13, 22, 31, 39]. Sıcaklığın düşmesi ve kontrollü soğuma nedeniyle sertlik değerinde azalma olacağı ön görülmektedir. Bu durumun kovan yapısının daha sünek bir davranış göstermesini sağlayarak Y10'un sıyırma dayanımının daha yüksek oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Y4 ve Y6 numaralı deneylerde en düşük sıyırma kuvvetleri gerçekleşmiştir. Her iki kovan yapısının da lineer yapılı bir davranış sergilenmesine karşın tam kararlı bir kovan yapısının elde edilememesi ve kovan sonunda oluşan çapak malzeme kaybına neden olarak sıyırma dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Lineer yapı sergileyen Y4, Y6 ve Y8 incelendiğinde dikkat çeken bir diğer özellik ise kovan yapısının kararlı bir hale gelmesi ile sıyırma dayanımını olumlu yönde etkilediği görülmektedir. YS deki sıyırma dayanımının azalması azalan kovan boyu ve işlem sıcaklığının azalması ile plastik deformasyon sırasında oluşan kalıntı gerilmelerin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıyırma testi sonucunda elde edilen numuneler Şekil 9'da görülmektedir.

Numuneler incelendiğinde sıyırma testinin tahribat etkisinin vida dişlerinde değil kovan yapısında olduğu görülmektedir. Dış yüksekliğinin ve hatve mesafesinin fazla olmasından dolayı civataların kovan yapısında sıyrılmadığı görülmektedir. Pul kısmı çekme etkisine maruz kalırken, kovan kısmı basma etkisine maruz kalarak kopmalar oluşmuştur. Sıyırma testinde en farklı davranış Y4'de gözlemlenmiştir. Y4 oluşan kararsız kovan yapısı ve çatlak oluşumundan dolayı sıyırma testinde çatlak ilerlemesi meydana gelmiştir. Bu durum MQL ile yapılan işlemlerde Y4'de en düşük sıyırma kuvvetinin oluşmasının temel etkenlerindedir. Benzer şekilde kararsız kovan yapısına sahip Y6'da sıyırma dayanımının düşük çıkması sıyırma testinde kovan yapısının en çok şekil değişimine uğramasındandır.



Şekil 9. Vida sıyırma testi deney numuneleri (Threading pull-out test specimens)

Sıyırma testi sonrası malzeme davranışını gözlemek için en yüksek sıyırma mukavemetine sahip Y10 numunenin kesit görünüşü alınmıştır (Şekil 10). Y10'un kesit görünüşünün incelenmesinde pul kısmının başlangıç ve kovan kısmının sonunda oluşan açılma dışında vida dişlerinde herhangi bir deformasyon gerçekleşmediği görülmektedir. Oluşan bu açılmalar düşük çeper kalınlığının olduğu bölgede gerçekleşmiştir.

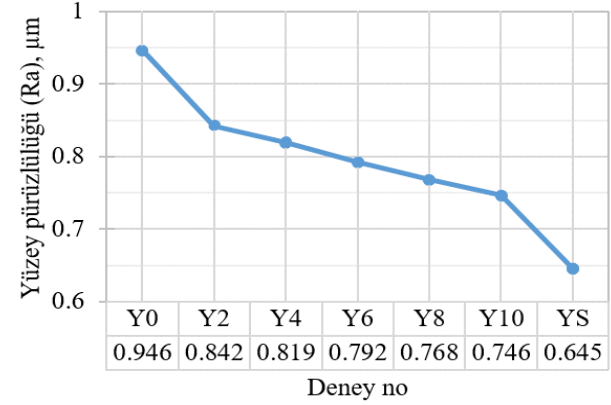


Şekil 10. Y10 vida sıyırma testi sonu kesit görünüşü (Full Section view of Y10 threading pull-out test specimen)

Vidanın başarısızlığa uğraması Şekil 10 gösterilen malzeme içi çatlak ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. Oluşan çatlakın konumu dikkat alındığında ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) bittiği bölgede gerçekleştiği ön görülmüştür. Sürtünmeli delme işleminde yüksek ısı ve kuvvetin etkisi ile sürtünme karıştırma kaynağına benzer bölgeler oluşmaktadır [40]. Çatlakın bu bölgede oluşması ısının tesiri altında AZ31B alaşımın mikro yapısının değişiminde [1] ve Mg alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda yüksek ikinci fazların oluşumundan [36] dolayı gerçekleşmiş olduğu düşünülmektedir. Y10'da kovan yapısının geometrik başarısının yanı sıra oluşan düşük ısı girdisi ile ısıdan etkilenen bölgenin daha düzenli olması en yüksek sıyırma mukavemetinin oluşumuna katkıda bulunmuştur.

3.4 Yüzey Pürüzlülüğü (Surface quality)

Yüzey pürüzlülüğü imalat işlemlerinde verimliliğin belirlenmesi için kullanılan en önemli değişkenlerden biridir. Klasik delme işleminin kuru gerçekleştirilmesinde yüzey pürüzlülüğü olumsuz etkilenmektedir [41]. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için yağlama işleminin yapılması yüzey kalitesi artırılabilir [31]. Deneylerde elde edilen yüzey pürüzlülükleri Şekil 11'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 11. İşlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (The effect of process parameters on the surface roughness)

Şekil 11 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğündeki değişimin, kuru işleme, zaman aralıklı MQL ve sürekli MQL uygulanan işlemler olmak üzere üç bölgede olduğu görülmektedir. Kuru işlemeden (Y0), 2 sn süreli MQL uygulamasına (Y2) geçişte yağlamanın sürtünmeyi ve takıma malzeme yapışmasını azaltması ile yüzey pürüzlülüğünde hızlı bir azalma olmuştur. Farklı zaman kombinasyonlarının uygulandığı deneylerde yüzey pürüzlülüğü sabit azalan bir eğim iyi düşmeye devam etmektedir. Bu durum azalan yağlama sürecinde işlem bölgesine uygulanan yağ miktarının azalması ve yüksek işlem sıcaklığı ile daha önce buharlaşması sonucu yağlama etkisinin daha erken ortadan kalkmasındadır.

Sürekli MQL uygulamada (YS) buharlaşmayla yağ katmanının kaybolmaması ve işlem esnasında oluşan yüzey sıcaklığının (Şekil 3) daha kararlı bir şekilde olmasından dolayı yüzey pürüzlük değerinde daha net bir azalma meydana gelmektedir. Yağlamanın bu olumlu etkisi deneylerin gerçekleştirildiği işlem sıcaklığı aralığından kaynaklandığının bir göstergesidir. Sürtünmeli delmede, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre, takım – iş parçası yüzey temas alanında meydana gelen ısıdır [42]. Düşük ısı girdisi BUE oluşumuna neden olarak yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilerken [12, 22, 43], yüksek ısı girdisi özellikle düşük ilerleme hızları malzemenin üst yüzeyinin, malzemenin alt yüzeyine kıyasla daha hızlı soğumasına neden olduğundan takımın dönüşü sırasında metal talaşa yapışarak kötü bir delik yüzey kalitesine sebebiyet vermektedir [18, 22, 43].

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada AZ31B alaşımının sürtünmeli delme işleminde farklı zaman aralıklarında MQL uygulaması yapılarak kuru olarak gerçekleştirilen işleme göre etkisi araştırılmıştır. Farklı MQL zaman kombinasyonlarının eksenel kuvvet, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, kovan yapısı ve sıyırma dayanımına etkileri incelenerek aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur;

- Sürtünmeli delme işleminin gerçekleşmesi esnasında eksenel kuvvet oluşumunun 7 farklı bölgede, sıcaklık oluşumunun 2 farklı bölgede olduğu görülmüştür.

- MQL işleminin soğutma ve yağlama ile sürtünmeyi azaltma etkisinden dolayı işlem sıcaklığı düşerken eksenel kuvvet değerlerinde artış meydana gelmektedir.

- En düşük eksenel kuvvet en yüksek sıcaklığın olduğu kuru işlemede (Y0) gerçekleşirken, en yüksek eksenel kuvvet ise en düşük sıcaklığın ölçüldüğü sürekli MQL altında yapılan (YS) deneyde gerçekleşmiştir.

- En düşük yüzey pürüzlülük değeri 0,645 μm ile YS'de, en yüksek yüzey pürüzlülük değeri ise 0,946 μm ile Y0'da ölçülmüştür. Deneyler sonucunda yüzey pürüzlülük değeri ile sıyırma dayanımı arasında doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür.

- Artan MQL sürelerinde pul yapısının duvarında oluşan malzeme yapışmasını azaldığı görülmüştür.

- İşlemlerde ısı, eksenel kuvvet ve sürtünmenin değişimi ile ara geçiş yapıları dikkate alınmadığında parabol, lineer ve ikili lineer yapı olmak üzere üç farklı kovan profili oluşmuştur. En kararsız kovan profili geçiş yapısının oluşturulduğu Y4'deneyinde elde edilmiştir.

- En yüksek sıyırma dayanımları ve kovan boyları benzerlik göstererek Y2 ve Y10 da gerçekleşmiştir. Y2 ve Y10'daki sıyırma dayanımları sırasıyla 26,97 kN ve 28,12 kN'dur.

- Sıyırma dayanımını üzerinde kovan profili ve kovan boyu kombinasyonları etkili olurken, kovan boyu yerine aktif kovan boyları daha belirleyici nitelikte olduğu görülmüştür.

- İlgili çalışma kapsamında MQL uygulamasının sürtünmeli delme işleminde etkisi göz önüne alındığında; farklı metal alaşımlarına MQL uygulanarak, farklı MQL uygulama süreleri esas alınarak ve farklı kesme yağları uygulanması gelecekte yapılacak çalışmaların farklı yönlerini oluşturacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çekme testlerini gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı KALELİLER Bağlantı Elemanları ve Metal Kapl. İml. İth. İhr. Mak. San. Tic. Ltd. Şti ve Isıl İşlem Müdürü Ozan TUZLACI' ya teşekkürlerimi sunarım.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Musa BİLGİN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bilgin M., Karabulut Ş. and Özdemir A., "Investigation of Heat-Assisted Dissimilar Friction Stir Welding of AA7075-T6 Aluminum and AZ31B Magnesium Alloys", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(2): 1081–1095, (2020).
2. Kainer, K. U. (Ed.). "Magnesium alloys and technology", **John Wiley and Sons**, (2003).
3. Urbikain G., Perez J. M., López de Lacalle L. N. and Andueza A., "Combination of friction drilling and form tapping processes on dissimilar materials for making nutless joints", *Proc. of the Inst. of Mec. Eng. Part B: J. of Eng. Man.*, 232(6): 1007–1020, (2018).
4. Brinksmeier E., "Prediction of Tool Fracture in Drilling", *CIRP annals*, 39 (1): 97 - 100, (1990).
5. <https://thermadrill.com/threaded-bushing-flowing-drill-instead-of-rivet-nut/>, (20 Nisan 2020)
6. Kumar R. and Jesudoss Hynes N. R., "Thermal drilling processing on sheet metals: A review. *Int. J. of Lightweight Mat. and Man.*, 2(3):193-205, (2019).
7. Shalamov P. V., Kulygina I. A. and Yaroslavova E. N., "ANSYS software-based study of thermal drilling process", *Procedia Eng.*, 150: 746-752, (2016).
8. Özler L., "The influence of variable feed rate on bushing and surface roughness in friction drilling", *Journal of the Brazilian Soc. of Mec. Sci. and Eng.*, 41(8), 308, (2019).
9. Miller S. F., Tao J. and Shih A. J., "Friction drilling of cast metals", *Int. Journal of Mac. Tools and Man.*, 46(12–13): 1526–1535, (2006).
10. Rao K. H., Gopichand A., Kumar N. P. and Jitendra K., "Optimization of machining parameters in friction drilling process", *Int. J. of Mec. Eng. and Technology*, 8(4): 242–254, (2017).
11. Lee S. M., Chow H. M., Huang F. Y. and Yan B. H., "Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools", *Int. J. of Mac. Tools and Man.*, 49(1): 81–88, (2009).
12. Ku W. L., Hung C. L., Lee S. M. and Chow H. M.,

- “Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel”, *Int. J. of Adv. Manufacturing Technology*, 53(9–12): 935–944, (2011).
13. Lee S. M., Chow H. M. and Yan B. H., “Friction drilling of IN-713LC cast superalloy”, *Mat. and Man. Processes*, 22(7): 893–897, (2007).
 14. Kaya M. T., Aktas A., Beylergil B. and Akyildiz H. K., “An experimental study on friction drilling of ST12 steel”, *Trans. of the Canadian Soc. for Mec. Eng.*, 38(3): 319–329, (2014).
 15. Ozler L. and Dogru N., “An experimental investigation of hole geometry in friction drilling”, *Mat. and Man. Processes*, 28(4): 470–475, (2013).
 16. Demir Z. and Özek C., “Sürtünmeli delme işleminde vida sıyrırma kuvvetinin araştırılması”, *UTİS 2013*. Kuşadası, (2013).
 17. Biermann D. and Liu Y., “Innovative flow drilling on magnesium wrought alloy AZ31”, *Procedia CIRP*, 18: 209–214, (2014).
 18. Demir Z. and Özek C., “Investigate the effect of pre-drilling in friction drilling of A7075-T651”, *Mat. and Manufacturing Processes*, 29(5): 593–599, (2014).
 19. Wittke P., Teschke M. and Walther F., “Mechanical characterization of friction drilled internal threads in AZ91 profiles”, *Int. Journal of Adv. Manufacturing Technology*, 99(9–12): 3111–3122, (2018).
 20. Biermann D., Walther F., Hannich S. and Wittke P., “Front face flow drilling of lightweight cast materials”, *Procedia Eng.*, 207: 956–961, (2017).
 21. Pereira O., Urbikain G., Rodríguez A., Calleja A., Ayesta I. and López de Lacalle L. N., “Process performance and life cycle assessment of friction drilling on dual-phase steel”, *Journal of Cleaner Production*, 213: 1147–1156, (2019).
 22. Chow H. M., Lee S. M. and Yang L. D., “Machining characteristic study of friction drilling on AISI 304 stainless steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 207(1–3): 180–186, (2008).
 23. Dudzinski D., Devillez A., Moufki A., Larrouquère D., Zerrouki V. and Vigneau J., “A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy”, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(4): 439–456, (2004).
 24. Haan D. M., Batzer S. A., Olson W. W. and Sutherland J. W., “An experimental study of cutting fluid effects in drilling”, *Journal of Materials Processing Technology*, 71(2): 305–313, (1997).
 25. Klocke F. and Gerschwiler K., “Trockenbearbeitung Grundlagen Grenzen, Perspektiven”, *Vdt Berichte*, 1339: 1–50, (1997).
 26. Heinemann R., Hinduja S., Barrow G. and Petuelli G., “Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling”, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(1): 1–6, (2006).
 27. Rahim E. A. and Sasahara H., “A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys”, *Tribology Int.*, 44(3): 309–317, (2011).
 28. Tai B. L., Stephenson D. A., Furness R. J. and Shih A. J., “Minimum quantity lubrication (MQL) in automotive powertrain machining”, *Procedia CIRP*, 14: 523–528, (2014).
 29. <http://www.fdrill.com/en/faq.asp>. 2020-05-22.
 30. Miller S. F., Blau P. J. and Shih A. J., “Microstructural alterations associated with friction drilling of steel, aluminum, and titanium”, *Journal of Mat. Eng. and Perfor.*, 14(5): 647–653, (2005).
 31. Boopathi M., Shankar S., Manikandakumar S. and Ramesh R., “Experimental investigation of friction drilling on brass, aluminium and stainless steel”, *Procedia Engineering*, 64: 1219–1226, (2013).
 32. Jun Q. and Blau P. J., “A new model to calculate friction coefficients and shear stresses in thermal drilling”, *J. of man. science and eng.*, 130 (1), (2008).
 33. Miller S. F., Li R., Wang H. and Shih A. J., “Experimental and numerical analysis of the friction drilling process”, *J. of Man. Sci. and Engineering, Transactions of the ASME*, 128(3): 802–810, (2006).
 34. Van Geffen J. A., “Piercing Tools, US Patent 3.939.683.”, (1976).
 35. Van Geffen J. A., “Rotatable Piercing Tools for Forming Bossed Holes, US Patent 4.185.486.”, (1980).
 36. Polmear I. J., “Magnesium alloys and applications”, *Materials sci. and technology*, 10(1): 1–16, (1994).
 37. Dehghan S., Ismail M. I. S., Ariffin M. K. A. and Baharudin B. T. H. T., “Experimental investigation on friction drilling of titanium alloy”, *Engineering Solid Mechanics*, 6(2): 135–142, (2018).
 38. BS ISO 68 - 1, “ISO general purpose screw threads - Basic profile Part 1: Metric screw threads”, (1998)
 39. Dehghan S., Ismail M. I. S. B., Mohd Ariffin M. K. A. B. and Baharudin B. T. H. T. B., “Friction drilling of difficult-to-machine materials: Workpiece microstructural alterations and tool wear”, *Metals*, 9(9): (2019).
 40. Eliseev A. A., Fortuna S. V., Kolubaev E. A. and Kalashnikova T. A., “Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling”, *Mat. Sci. and Engineering A*, 691: 121–125, (2017).
 41. Bono M. and Ni J., “The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(15): 2261–2270, (2001).
 42. Demir, Z., “Sürtünmeli Delmede En Uygun Devir Sayısı ve İlerleme Hızının Araştırılması”, *Tech. Applied Sciences*, 8(1): 7–17, (2013).
 43. Özek C. and Demir Z., “Investigate the Friction Drilling of Aluminium Alloys According to the Thermal Conductivity”, *TEM J.*, 2(1):93–101,(2013).