

Araştırma Makalesi

Hardox 500 Çeliğinin Delinmesinde Minimum Miktarda Yağlama Yönteminin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığına Olan Etkisinin İncelenmesi

Aybars MAHMAT 

Gönderim: 22.07.2024

Kabul: 01.10.2024

Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye; aybarsmahmat@munzur.edu.tr

Özet: Hardox 500 aşınma ve kırılmalara karşı dirençli, yüksek sertlik ve mekanik mukavemete sahip sertleştirilmiş bir çeliktir. Bu yüksek mekanik özellikler bu malzemenin işlenebilirliğini sınırlamaktadır. Bu çalışmanın amacı işlenmesi zor olan Hardox 500 çeliğine farklı soğutma yöntemleri ve işleme parametrelerinin uygulanmasıyla işlenebilirliğini artırmaktır. Endüstriyel açıdan önemli bir malzeme olan Hardox 500 çeliğinin çeşitli kesme ortamları kullanılarak işlenebilirliğini artırmak amaçlanmıştır. Farklı ilerleme hızları, kesme hızları ve soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğüne, kesme sıcaklıklarına, takım aşınmasına olan etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre Minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemi yüzey kalitesini artırdığı ve yan yüzey aşınması ile kesme sıcaklıklarını düşürdüğü görülmüştür. Kuru koşullara göre MMY yöntemi kullanılarak yüzey pürüzlülüğünde yaklaşık %20-30, kesme sıcaklığında yaklaşık %15-35 yan yüzey aşınmasında %22-30 oranında iyileşme elde edilmiştir. Yüzey kalitesini optimize etmek için yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızlarının seçilmesi gerektiği görülmüştür. Yüksek kesme hızı ve ilerleme hızı sürünmeyi artırarak sıcaklığı artırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Delme; Hardox 500; kesme sıcaklığı; MMY; yüzey pürüzlülüğü

Investigation of the Effect of Minimum Amount of Lubrication Method on Surface Roughness and Cutting Temperature in Drilling Hardox 500 Steel

Abstract: Hardox 500 is a hardened steel that is resistant to wear and breakage, has high hardness and mechanical strength. These high mechanical properties limit the processability of this material. The aim of this study is to increase the machinability of Hardox 500 steel, which is difficult to process, by applying different cooling methods and processing parameters. A new approach has been applied using various cutting media to increase the machinability of Hardox 500 steel, an industrially important material. The effects of different feed rates, cutting speeds and cooling methods on surface roughness, cutting temperatures and tool wear were examined. According to experimental results, it has been observed that the minimum amount of lubrication (MMY) method improves the surface quality and reduces flank wear and cutting temperatures. Compared to dry conditions, by using the MMY method, approximately 20-30% improvement in surface roughness, approximately 15-35% improvement in cutting temperature, 22-30% improvement in flank wear was achieved. It has been observed that high cutting speed and low feed rates should be selected to optimize surface quality. High cutting speed and feed rate increased the temperature by increasing the friction.

Keywords: Cutting temperature; drilling; Hardox 500; MQL; surface roughness

1. Giriş

Yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip olan malzemelerin endüstride kullanımı yaygındır ve kullanım ömrü önemlidir [1]. Yüksek tokluk ve sertliğe sahip olan Hardox çeliği karbon ve alaşım elementlerinin (Mn, Cr, Ni, Mo, B) birleşiminden dolayı martenzit yapı oluşturmak için özel bileşime sahip bir levhadan elde edilir [2–4]. Yüksek mekanik özelliklerinden dolayı kırıcıların ve dişlilerin çalışma ömrünü artırmak için kullanılmaktadır [5,6]. Yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk Hardox çeliklerinin işlenebilirliğini etkilemektedir [7]. İşleme esnasında yüksek kesme kuvvetleri oluştururken kesme sıcaklığını artırarak takım aşınmasını artırır [8]. Talaş yüzeyinde birikme tabakasının oluşması nedeniyle Hardox çeliklerinin işlenmesinde zorluklar yaşanmaktadır [9].

İşleme, bir iş parçasının teknik gerekliliklere uygun olarak son şekil ve boyuta getirildiği çeşitli süreçlerden biridir. Bunlar arasında, delme işlemi delik oluşturmada önemli bir rol oynar. Kesme bölgesindeki sürtünme ve kesme bölgesi sıcaklığı delmede işleme performansını etkiler [10]. Kesme bölgesi sıcaklığının artması takım ömrünün azalmasını ve yüzey kalitesinin bozulmasına yol açar [11]. Bu olumsuz durum kesme sıvısı kullanılarak giderilebilir. Delme işleminde talaşlı imalatta kesme sıvılarıyla soğutma sıvısı uygulanmaktadır. Ancak modern endüstride kullanılan kesme sıvıları çevre üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu sebeple çevre üzerindeki bu olumsuz etkileri önlemek için farklı soğutma yöntemlerine yönelik çalışmalar geliştirilmiştir. Metal kesme sıvısının azaltılması bu sorunlara çözüm yolu olarak kabul edilmiştir [12]. Önerilen alternatif yöntemler arasında kuru, basınçlı ve minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemleri delme işlemlerine uygulanmaya başlanmıştır. MMY yönteminde kesme bölgesine soğutma sıvısının ulaşması için yüksek hava basıncı uygulanır. Bu sayede az miktarda soğutma sıvısı kesme bölgesine ulaşarak bir yağ filmi oluşturulur. Bu yağ filmi kesme bölgesindeki talaşların atılması esnasında tekrarlanan yükü azaltarak kesme kuvvetini düşürür [13]. MMY tekniği kesme sıvısı tüketimini en aza indirdiği, çevre ve operatör sağlığı üzerine etkileri azalttığı için sürdürülebilir ve çevre dostu bir soğutma tekniği kabul edilir [14]. MMY yönteminin işlenebilirlik üzerindeki etkileri üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bhowmick vd.[15] magnezyum alaşımlarının mikro delmesinde MMY ve kuru işleminin takım aşınmasına ve itme kuvvetine olan etkisini incelemişlerdir. MMY yönteminin kuru işlemeye göre takım aşınmasını ve itme kuvvetini azalttığını belirlemişlerdir. Nam ve Lee [16] MMY yönteminin titanyum alaşımlarının delinmesinde itme kuvvetlerini ve delme torklarını minimuma indirdiği sonucuna varmışlardır. Sun vd. [17] MMY yönteminin takım ömrünü kuru işlemeye göre %80 oranında artırdığını belirlemişlerdir. Chatha vd. [18] yüksek hızlı çelik takımını kullanarak MMY yöntemiyle Al 6063'ün delme performansını incelediler. MMY yönteminin sürtünme kuvvetini azalttığı ve böylece kesme sıcaklığını azaltarak takım ömrünü artırdığını gözlemlemişlerdir.

Kesme sıcaklığı ve kesici takım aşınması Hardox çelikleri gibi işlenmesi zor olan malzemelerin işlenmesinde önemli kriterlerdir. Yapılan incelemelerde Hardox 500 çeliğinin delme ile işlenmesinde MMY yönteminin uygulandığı çok az çalışma olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada Hardox 500 çeliğinin delinmesinde iki farklı soğutma yöntemi (kuru, MMY) ve farklı kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme hızı) kesme sıcaklığı ve takım ömrüne olan etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metod

Delme deneyleri için kurulum modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Deneyler CNC frezede (Jetco 3 axis CNC- Çin) gerçekleştirildi. Kesme sıcaklığını ölçmek için termal kamera (Testo 883; Almanya), iş parçasında oluşan ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri profilometre (MİTUTOYO-SJ-20, Japonya) yardımıyla ölçülmüştür. Soğutma sisteminde WERTE marka STN 40 model minimum miktarda yağlama ünitesi kullanılmıştır. Sistemde ayrıca soğutma sıvısının kesme bölgesine aktarılması için basıncı sağlayan kompresör kullanılmıştır. Kesme sıvısında hazırlama 1/20 oranında boraks-etilen glikol karışımı içerisine hacimce % 1 oranında nano boyutlu Al₂O₃ partikül eklenmiştir. Karışımdaki Al₂O₃ nano partiküller 50-100 nm boyutlarındadır. Delme deneylerinde 100x90x10 mm boyutlarında iş

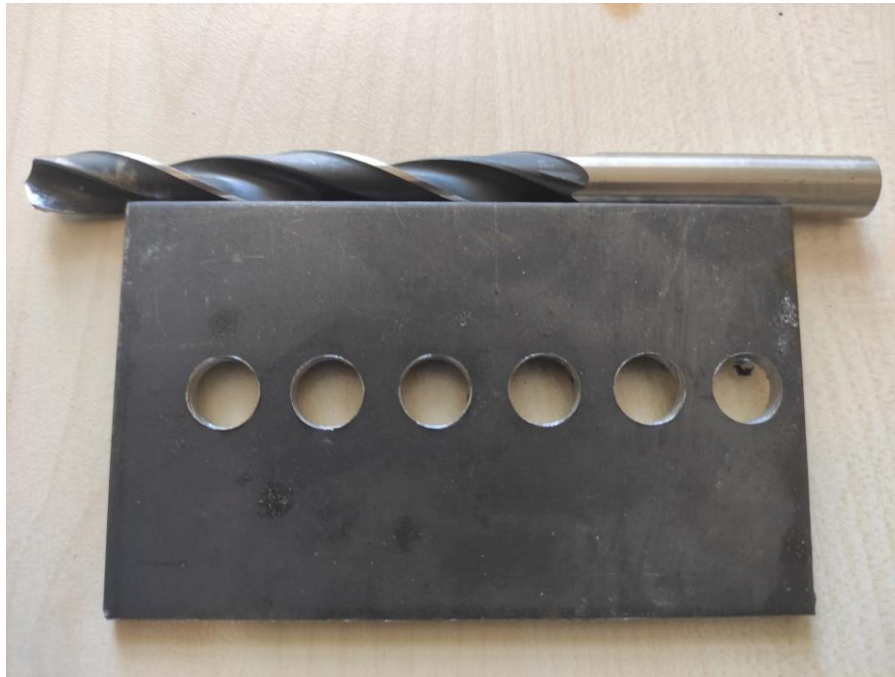
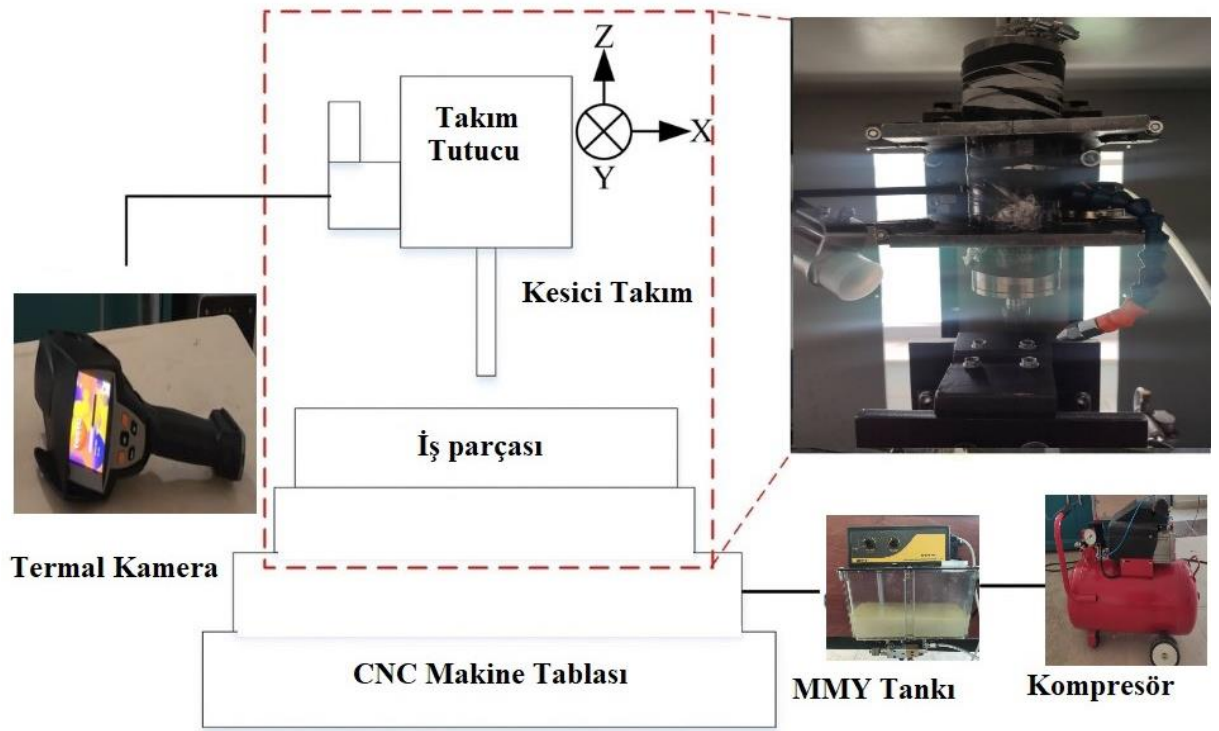
parçaları kullanılmıştır. Hardox 500 çeliğinin kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Net gözlemler yapmak için her deneyde kullanılmamış 10 mm çapında HSS kesici takımlar kullanılmıştır. Kesme parametrelerinin etkilerinin değerlendirilmesi için üç farklı kesme hızı (25, 35, 45 m/dak), üç ilerleme hızı (0,03, 0,06, 0,09 mm/dev) ve iki soğutma yöntemi (kuru, MMY) olmak üzere 18 adet deney gerçekleştirilmiştir. Her deney numunesinde 6 adet delme yapılmıştır. Kesici takımların takım aşınma değeri ölçülürken 5 adet ölçüm sonundaki aşınma değerleri optik mikroskop (Nikon Eclipse MA100; Japonya) ile ölçülmüştür. Deneysel parametreler Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 2’de kesici takım ve delme sonrasındaki iş parçasının fotoğrafı verilmiştir.

Tablo 1. *Hardox 500 çeliğinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi*

Element	Ağırlıkça	Parametre	Değer
Fe	93,765	Akma dayanımı (MPa)	1250
C	0,3	Çekme dayanımı (MPa)	1400
Si	0,7	Uzama (%)	10
Mn	1,6	Sertlik aralığı (HBW)	470-530
P	0,02	Sertlik aralığı (HRC)	49-50
S	0,01		
Cr	1,5		
Ni	1,5		
Mo	0,6		
B	0,005		

Tablo 2. *Deneysel parametreler*

Parametre	Birimler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme hızı	(m/dak)	25	35	45
Soğutma yöntemi	-	Kuru	MMY	
İşleme yöntemi	-	Geleneksel		
İlerleme hızı	(mm/dev)	0,03	0,06	0,09



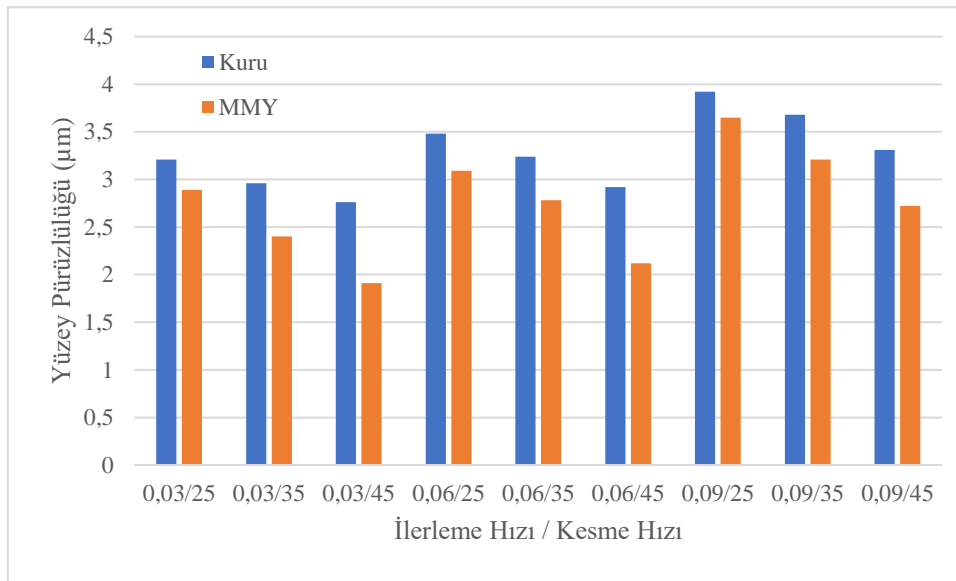
Şekil 2. Kesici takım ve iş parçası

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü iş parçası yüzey kalitesi değerlendirmesi için önemli bir parametredir. Yüzey pürüzlülüğü iş parçasının yorulma mukavemetini, temas sertliğini ve korozyon direncini etkileyebilir

[19,20]. Düşük yüzey kalitesi iş parçası performansını bozar ve iş parçası beklenen ömründen önce bozulur [21]. Çeşitli işleme parametrelerinin delme performansını değerlendirmek için farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi incelenmiştir. Olası yüzey pürüzlülük ölçüm hatalarını minimize etmek amacıyla her bir test numunesinin 5 farklı bölgesinden alınan ölçümlerin ortalaması dikkate alınmıştır. Şekil 3'e göre yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde kesme hızının artmasıyla ve ilerleme hızlarının azalmasıyla yüzey kalitesinin arttığı görülmektedir. Bu Hardox 500 çeliğinin yüzey kalitesini optimize etmek için yüksek kesme hızı düşük ilerleme hızlarının seçilmesi gerektiği anlamına gelmektedir. İlerleme hızlarının artması kesici takımın iş parçasından hızla talaş alması nedeniyle iş parçası yüzeyinde oluklar ve tepecikler oluşturmasıyla açıklanabilir [22]. Kesme hızının artması kesici takım üzerinde talaş yığılmasını önleyerek yüzey kalitesini iyileştirir [23]. Şekil 3'de görüldüğü gibi 0.03 mm/dev ilerleme hızı ve 45 m/dak kesme hızı değerlerinde 1,91 μm yüzey pürüzlülük değeriyle en düşük değer elde edilmiştir. Bu değer MMY işleme koşullarındadır. Her ilerleme hızı ve kesme hızı değerlerinde MMY ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri kuru ile işlemeye göre düşüktür. MMY yönteminin yağlama ve soğutma etkisi nedeniyle kesme bölgesinde sıcaklığı, takım aşınmasını ve sürtünmeyi azalmasından dolayı yüzey kalitesi artar [24]. Ayrıca MMY'nin iş parçası üzerinde oluşturduğu koruyucu filmin yüzeyde yapışma ve kimyasal reaksiyonları engeller [25]. Bundan dolayı kesme bölgesindeki kuru ortama kıyasla titreşim eğilimini, termal etkileri ve sürtünme kuvvetlerini engeller. Yüzey pürüzlülük değerleri kıyaslandığında kuru-MMY arasında yaklaşık %20-%30 oranında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir.

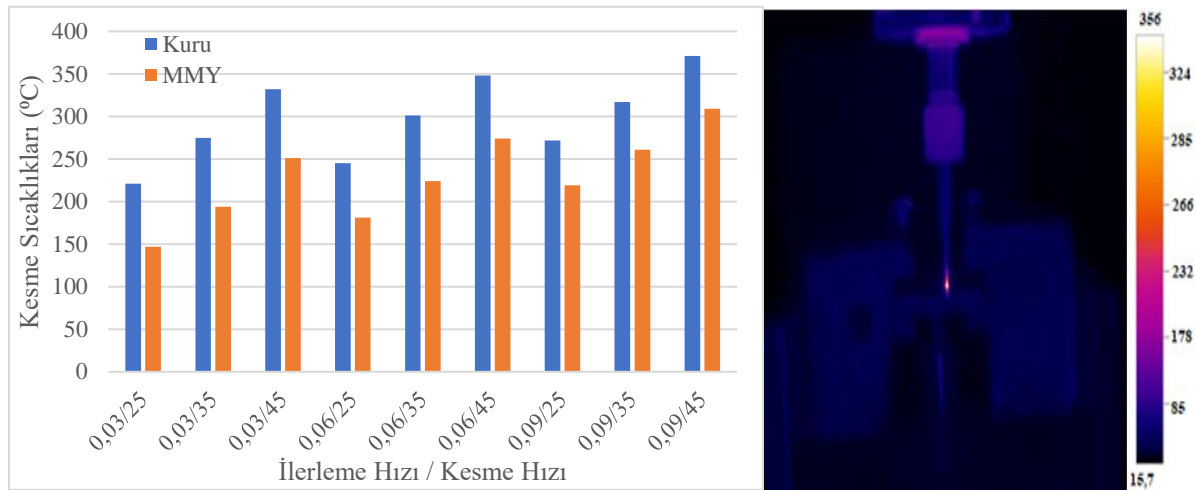


Şekil 3. Farklı soğutma ve işleme koşullarındaki yüzey pürüzlülük değerleri

3.2. Kesme sıcaklıkları

Talaşlı imalatta kesici takımın iş parçasından talaş kaldırması esnasında kesme bölgesindeki iş parçası-kesici takım arasında oluşan sürtünme nedeniyle sıcaklık artmaktadır [26]. Kesme bölgesi sıcaklığının artışı takım ömrünü ve aşınmasını önemli bir şekilde etkilemesinden dolayı talaşlı imalatta önemlidir [27]. Kesme sıcaklıkları ayrıca yüzey kalitesinde etki eder. Bu nedenle yüzey kalitesini artırmak ve takım aşınmasını azaltmak için sürtünmeyi ve kesme bölgesi sıcaklığını azaltmak gerekir [28]. İşlenebilirliğin artırılması için kesici takımın iş parçasına temas ettiği bölgedeki sıcaklığın azalması gerekmektedir [29]. Etkili soğutma ve işleme yöntemlerinin kullanılması işleme performansını ve kesme sıcaklıklarını önemli ölçüde iyileştirebilir [30]. Bu yöntemlerden biri olan MMY soğutma yön-

temi çevre dostu olma, takım ömrünü iyileştirme, kesme sıcaklığını azaltma, yüzey kalitesini iyileştirme ve maliyetleri düşürme gibi avantajları olan bir yöntemdir [31]. Literatürdeki araştırmalar sonucunda elde edilen bilgiler dikkate alındığında yapılan çalışma, minimum sıcaklığı ölçmek için hangi kesme parametreleri ve soğutma yöntemlerinin kullanılması gerektiğini amaçlamaktadır. Şekil 4'e göre kesme sıcaklıklar incelendiğinde ilerleme hızının ve kesme hızının artması sonucunda sürtünme katsayısının artması nedeniyle daha yüksek kesme sıcaklıkları elde edilmiştir. Kesme hızının artmasıyla kaldırılan talaş miktarının artması ve kesme bölgesindeki iş parçası-kesici takım temasının artmasıyla sıcaklığın ve sürtünmenin arttığı görülmüştür [32]. İlerleme hızının artması kesici takımın talaşla temas alanı artması sonucunda yüksek sürtünme ve sıcaklığa sebep olmuştur [33]. Kuru işleme ile delmede sıcaklıkları düşürmek etkili bir soğutma yöntemi değildir. En yüksek kesme sıcaklıkları kuru işlemede 371 °C ile 0.09 mm/dev ilerleme hızı ve 45 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. MMY yönteminin uygulanmasıyla tüm işleme parametrelerinde kuru işlemeye göre sıcaklığı azaltmıştır. Sıcaklığın düşme sebebi kesme sıvısında yer alan nano partiküller ve diğer katkı maddeleri termal iletkenliği, ısı transfer katsayısını ve yağlama özelliklerini iyileştirmesidir [34]. Ayrıca kesme sıvısının kesme bölgesine basınçlı bir şekilde iletilmesi nedeniyle ara yüzlere daha iyi nüfuz etmesinin de etkisi vardır. Kesme sıcaklık değerleri kıyaslandığında kuru-MMY arasında yaklaşık %15-%35 oranında daha iyi kesme sıcaklıkları elde edilmiştir.

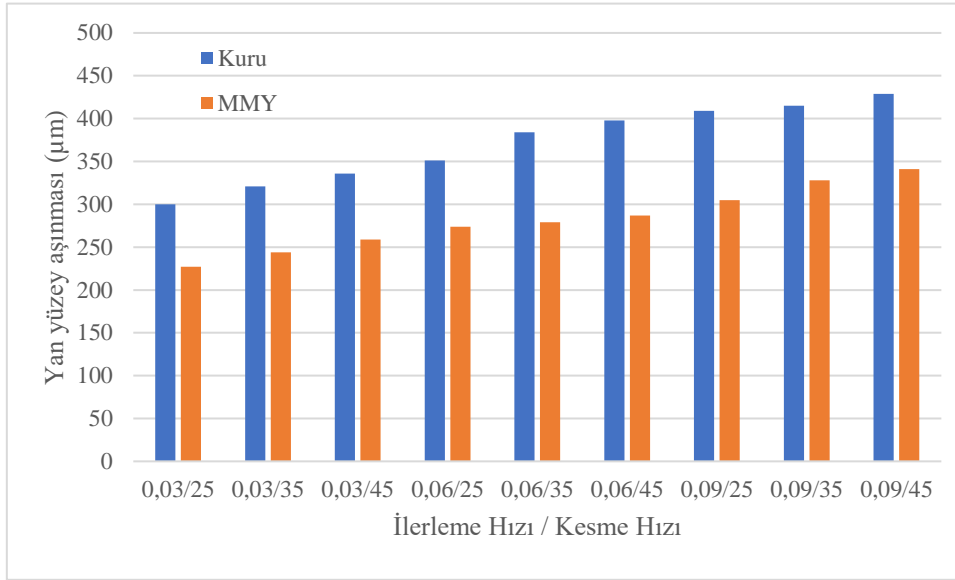


Şekil 4. Farklı soğutma ve işleme koşullarındaki kesme sıcaklık değerleri

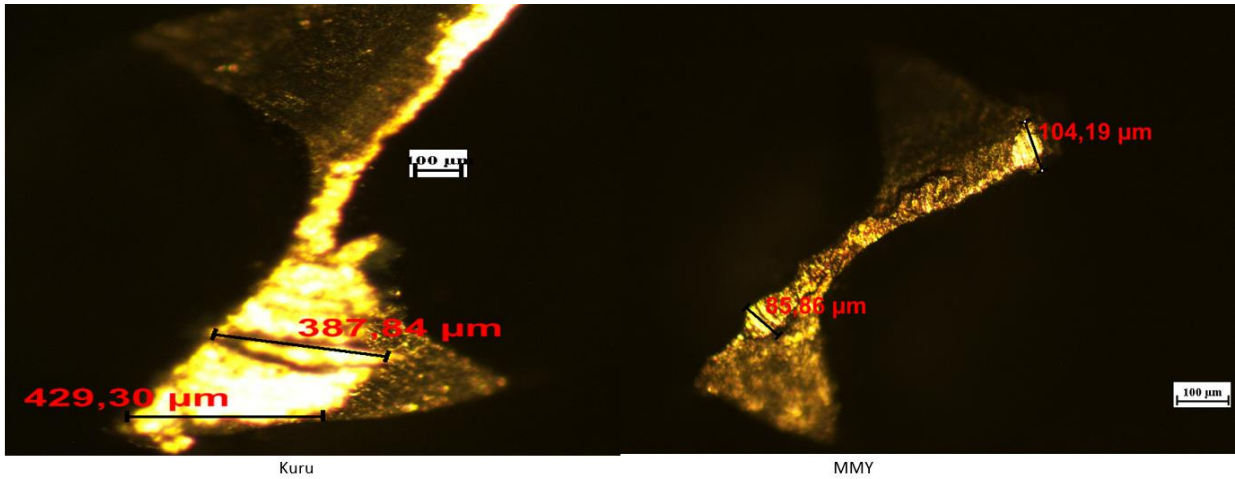
3.2. Takım aşınması

Takım aşınması talaşlı imalatta işlenebilirliğe büyük bir etkisi vardır. Talaş kaldırma işleminde sürekliliği sağlamak için başlangıç takım geometrisini korumak kritik bir görevdir. Bu nedenle takımdaki aşınma durumu üretkenliğin yanı sıra işleme verimliliğini artırmada önemli bir rol oynar [35]. Takım aşınması tek başına bir işleme süreci olarak görülse de yüzey pürüzlülüğü ve yüzey bütünlüğü gibi ürün kalitesi üzerinde de büyük etkiye sahiptir [36]. Şekil 5'de farklı kesme koşulları ve soğutma yöntemleri için takım aşınma değerleri verilmiştir. İlerleme hızı ve kesme hızının artmasıyla takım yüzey aşınma değerlerinin arttığı görülmüştür. Artan kesme hızları ve ilerleme hızları sıcaklık dahil tüm üretim enerjilerini teşvik eder ve bu durum aşınma mekanizmalarını artırarak şiddetli takım aşınmalara sebep olur [37]. Ayrıca yüksek ilerleme hızı ve kesme hızı kaldırılan talaş kesici takım-iş parçası arasında sıkıştırarak kesici takımı aşındırır. Aynı kesme parametrelerinde MMY işleme ile elde edilen takım aşınma değerleri kuru işlemeye göre düşük elde edilmiştir. MMY yönteminde kullanılan nano partiküller ve karışımdaki diğer maddeler kesme bölgesi sıcaklığını azaltarak sürtünmeyi azaltır [38]. Aynı zamanda MMY yönteminde basınçlı olarak gönderilen soğutma sıvısı kesme bölgesine daha iyi nüfuz ederek

termal gerilmeleri azaltarak takım aşınmasını azaltır. Şekil 5’de görüldüğü gibi 0.03 mm/dev ilerleme hızı ve 25 m/dak kesme hızı değerlerinde MMY ile işlemede 227 μm yan yüzey aşınma değeriyle en düşük değer elde edilmiştir. Grafikten elde edilen değerler göz önüne alındığında MMY ile işleme ile kesme bölgesindeki sürtünme ve sıcaklık azaltılarak hem aşınma ve korozyon gibi etkiler ortadan kaldırılmış hem de iş parçası yüzey kalitesini artmıştır. Hardox 500 çeliğinin delinmesinde MMY, takım yüzey aşınmasını kuru işlemeye göre yaklaşık %22-%30 oranında azaltmıştır. Şekil 6’da farklı soğutma yöntemine göre kesici takım üzerinde oluşan aşınma bölgeleri görülmektedir.



Şekil 5. Farklı soğutma ve işleme koşullarındaki takım aşınma değerleri



Şekil 6. Farklı soğutma koşullarındaki takım aşınma bölgeleri

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada Hardox 500 çeliğinin delinmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıklarının elde edilmesinde farklı kesme parametreleri ve soğutma yöntemlerinin performansı incelenmiştir. Temel sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Kuru işlemeye göre MMY ile daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülükleri kıyaslandığında kuru-MMY arasında yaklaşık %20-%30 oranında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir.

- Hardox 500 çeliğinin yüzey kalitesini optimize etmek için yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızlarının seçilmesi gerektiği görülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri MMY ile işleme koşulları altında 0.03 mm/dev ilerleme hızı ve 45 m/dak kesme hızı değerlerinde 1.91 µm olarak ölçülmüştür.
- Kuru ortamda daha yüksek kesme sıcaklıkları görülmüştür. MMY yöntemiyle elde edilen kesme sıcaklıkları her deney parametresinde kuruya göre daha düşük elde edilmiştir. Kesme sıcaklık değerleri kıyaslandığında kuru-MMY arasında yaklaşık %15-%35 oranında daha iyi kesme sıcaklıkları elde edilmiştir.
- İlerleme hızı ve kesme hızı arttıkça kesme sıcaklık değerlerinin arttığı görülmüştür. En yüksek ölçülen kesme sıcaklığı kuru işlemede 371 °C ile 0.09 mm/dev ilerleme hızı ve 45 m/dak kesme hızında elde edilmiştir.
- Takım aşınması ilişkin değerler incelendiğinde kuru ortamda kesme sıcaklıklarını artırması nedeniyle takım aşınma değerlerini artırdığı görülmüştür. MMY yöntemi takım yüzey aşınmasını kuru işlemeye göre yaklaşık %22-%30 oranında azaltmıştır. Bu nedenle kuru ortam Hardox 500 çeliğinin delinmesinde takım aşınmasını azaltmak için en kötü seçenek olarak görülmüştür.
- Düşük ilerleme hızı ve kesme hızı takım aşınması için ideal kesme parametresi olarak belirlenmiştir. 0.03 mm/dev ilerleme hızı ve 25 m/dak kesme hızı değerlerinde MMY ile işlemede 227 µm yan yüzey aşınma değeriyle en düşük değer elde edilmiştir. İlerleme hızı ve kesme hızı soğutma yönteminden sonra ikinci etkili kesme parametresi olduğu görülmüştür.

Çıkar Çatışması

Yazar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Bensaïd, K., & Fredj, N. B. (2021). Influence of sliding speed and normal loads on the wear resistance of Hardox 500 steel ground surfaces. In *Advances in Mechanical Engineering, Materials and Mechanics: Selected contributions from the 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, ICAMEM 2019, December 16-18, 2019, Hammamet, Tunisia* (pp. 84-90). Springer International Publishing.
- [2] dos Santos Passari, É., de Souza, A. J., & Vilanova, A. M. (2023). Surface roughness analysis in finishing end milling of Hardox® 450 steel using multilayer graphene-based nanofluid. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(3), 147.
- [3] Ivanov, Y., Gromov, V., Konovalov, S., Kormyshev, V., Aksenova, K., & Teresov, A. (2017). Structure and properties of strengthening layer on Hardox 450 steel. *Materials Science and Technology*, 33(17), 2040-2045.
- [4] Gallina, B., Biehl, L. V., Medeiros, J. L. B., & de Souza, J. (2020). The influence of different heat treatment cycles on the properties of the steels HARDOX® 500 and STRENGTH® 700. *Revista Liberato*, 21(35), 67-74.

- [5] Duc, T. M., Long, T. T., & Van Thanh, D. (2020). Evaluation of minimum quantity lubrication and minimum quantity cooling lubrication performance in hard drilling of Hardox 500 steel using Al₂O₃ nanofluid. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(2), 1687814019888404.
- [6] Kirik, I., Balalan, Z., Imak, A., & Yaz, M. (2020). Properties of different TIG coatings of Stellite on the Hardox 450 and St 52 steel. *Materials Testing*, 62(11), 1089-1093.
- [7] Filip, A. C., Mihail, L. A., & Vasiloni, M. A. (2017). An experimental study on the dimensional accuracy of holes made by abrasive waterjet machining of Hardox steels. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 137, p. 02003). EDP Sciences.
- [8] Klocke, F., & Kuchle, A. (2009). *Manufacturing processes* (Vol. 2, p. 433). Berlin: Springer.
- [9] Salur, E. (2022). Understandings the tribological mechanism of Inconel 718 alloy machined under different cooling/lubrication conditions. *Tribology International*, 174, 107677.
- [10] Tasdelen, B., Wikblom, T., & Ekered, S. (2008). Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, 200(1-3), 339-346.
- [11] Alves, S. M., Barros, B. S., Trajano, M. F., Ribeiro, K. S. B., & Moura, E. J. T. I. (2013). Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions. *Tribology international*, 65, 28-36.
- [12] Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Demirsöz, R., Boy, M., Yaşar, N., Günay, M., & Ross, N. S. (2022). On tribological characteristics of TiC rollers machined under hybrid lubrication/cooling conditions. *Tribology International*, 174, 107745.
- [13] Salur, E., Aslan, A., Kuntoglu, M., Gunes, A., & Sahin, O. S. (2019). Experimental study and analysis of machinability characteristics of metal matrix composites during drilling. *Composites Part B: Engineering*, 166, 401-413.
- [14] Eltaggaz, A., Zawada, P., Hegab, H. A., Deiab, I., & Kishawy, H. A. (2018). Coolant strategy influence on tool life and surface roughness when machining ADI. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3875-3887.
- [15] Bhowmick, S., Lukitsch, M. J., & Alpas, A. T. (2010). Dry and minimum quantity lubrication drilling of cast magnesium alloy (AM60). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(5), 444-457.
- [16] Nam, J., & Lee, S. W. (2018). Machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V) in environmentally-friendly micro-drilling process with nanofluid minimum quantity lubrication using nanodiamond particles. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5, 29-35.
- [17] Sun, J., Wong, Y. S., Rahman, M., Wang, Z. G., Neo, K. S., Tan, C. H., & Onozuka, H. (2006). Effects of coolant supply methods and cutting conditions on tool life in end milling titanium alloy. *Machining Science and Technology*, 10(3), 355-370.
- [18] Chatha, S. S., Pal, A., & Singh, T. (2016). Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*, 137, 537-545.
- [19] Yin, Q., Li, C., Dong, L., Bai, X., Zhang, Y., Yang, M., ... & Liu, Z. (2021). Effects of physicochemical properties of different base oils on friction coefficient and surface roughness in MQL

- milling AISI 1045. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-19.
- [20] Gupta, M. K., Boy, M., Korkmaz, M. E., Yaşar, N., Günay, M., & Krolczyk, G. M. (2022). Measurement and analysis of machining induced tribological characteristics in dual jet minimum quantity lubrication assisted turning of duplex stainless steel. *Measurement*, 187, 110353.
- [21] Khunt, C. P., Makhesana, M. A., Patel, K. M., & Mawandiya, B. K. (2021). Performance assessment of vegetable oil-based minimum quantity lubrication (MQL) in drilling. *Materials Today: Proceedings*, 44, 341-345.
- [22] Aslan, A. (2024). Machine learning models and machinability analysis for comparison of various cooling and lubricating mediums during milling of Hardox 400 steel. *Tribology International*, 109860.
- [23] Ercetin, A., Aslantaş, K., Özgün, Ö., Perçin, M., & Chandrashekarappa, M. P. G. (2023). Optimization of machining parameters to minimize cutting forces and surface roughness in micro-milling of Mg13Sn alloy. *Micromachines*, 14(8), 1590.
- [24] Saha, S., Deb, S., & Bandyopadhyay, P. P. (2021). Progressive wear based tool failure analysis during dry and MQL assisted sustainable micro-milling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 212, 106844.
- [25] Cristino, V. A. M., Rosa, P. A. R., & Martins, P. A. F. (2010). Cutting under active and inert gas shields: A contribution to the mechanics of chip flow. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(10), 892-900.
- [26] Wang, Y., Li, C., Zhang, Y., Yang, M., Li, B., Jia, D., ... & Mao, C. (2016). Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. *Journal of Cleaner Production*, 127, 487-499.
- [27] Abd Halim, N. F. H., Ascroft, H., & Barnes, S. (2017). Analysis of tool wear, cutting force, surface roughness and machining temperature during finishing operation of ultrasonic assisted milling (UAM) of carbon fibre reinforced plastic (CFRP). *Procedia Engineering*, 184, 185-191.
- [28] Ni, C., & Zhu, L. (2020). Investigation on machining characteristics of TC4 alloy by simultaneous application of ultrasonic vibration assisted milling (UVAM) and economical-environmental MQL technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 278, 116518.
- [29] Binali, R., Demirpolat, H., Kuntoğlu, M., & Salur, E. (2023). Different aspects of machinability in turning of AISI 304 stainless steel: a sustainable approach with MQL technology. *Metals*, 13(6), 1088.
- [30] Mahdavinejad, R. A., & Saeedy, S. (2011). Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel. *Sadhana*, 36, 963-970.
- [31] Xavior, M. A., & Adithan, M. (2009). Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of materials processing technology*, 209(2), 900-909.
- [32] Singh, T., Sharma, V. K., Rana, M., Saini, A., Rooprai, R. S., & Singh, M. (2021). Multi response optimization of process variables in MQL assisted face milling of EN31 alloy steel using grey relational analysis. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4062-4066.

- [33] Zha, X., Qin, H., Yuan, Z., Xi, L., Zhang, T., & Jiang, F. (2024). Effect of cutting feed rate on machining performance and surface integrity in cutting process of Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(5), 2791-2809.
- [34] Saidur, R., Leong, K. Y., & Mohammed, H. A. (2011). A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1646-1668.
- [35] Gupta, M. K., Niesłony, P., Sarikaya, M., Korkmaz, M. E., Kuntoğlu, M., & Królczyk, G. M. (2023). Studies on geometrical features of tool wear and other important machining characteristics in sustainable turning of aluminium alloys. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10(4), 943-957.
- [36] Rosnan, R., Murad, M. N., Azmi, A. I., & Shyha, I. (2019). Effects of minimal quantity lubricants reinforced with nano-particles on the performance of carbide drills for drilling nickel-titanium alloys. *Tribology International*, 136, 58-66.
- [37] Ezugwu, E. O., & Okeke, C. I. (2001). Tool life and wear mechanisms of TiN coated tools in an intermittent cutting operation. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(1), 10-15.
- [38] Khaliq, W., Zhang, C., Jamil, M., & Khan, A. M. (2020). Tool wear, surface quality, and residual stresses analysis of micro-machined additive manufactured Ti-6Al-4V under dry and MQL conditions. *Tribology International*, 151, 106408.