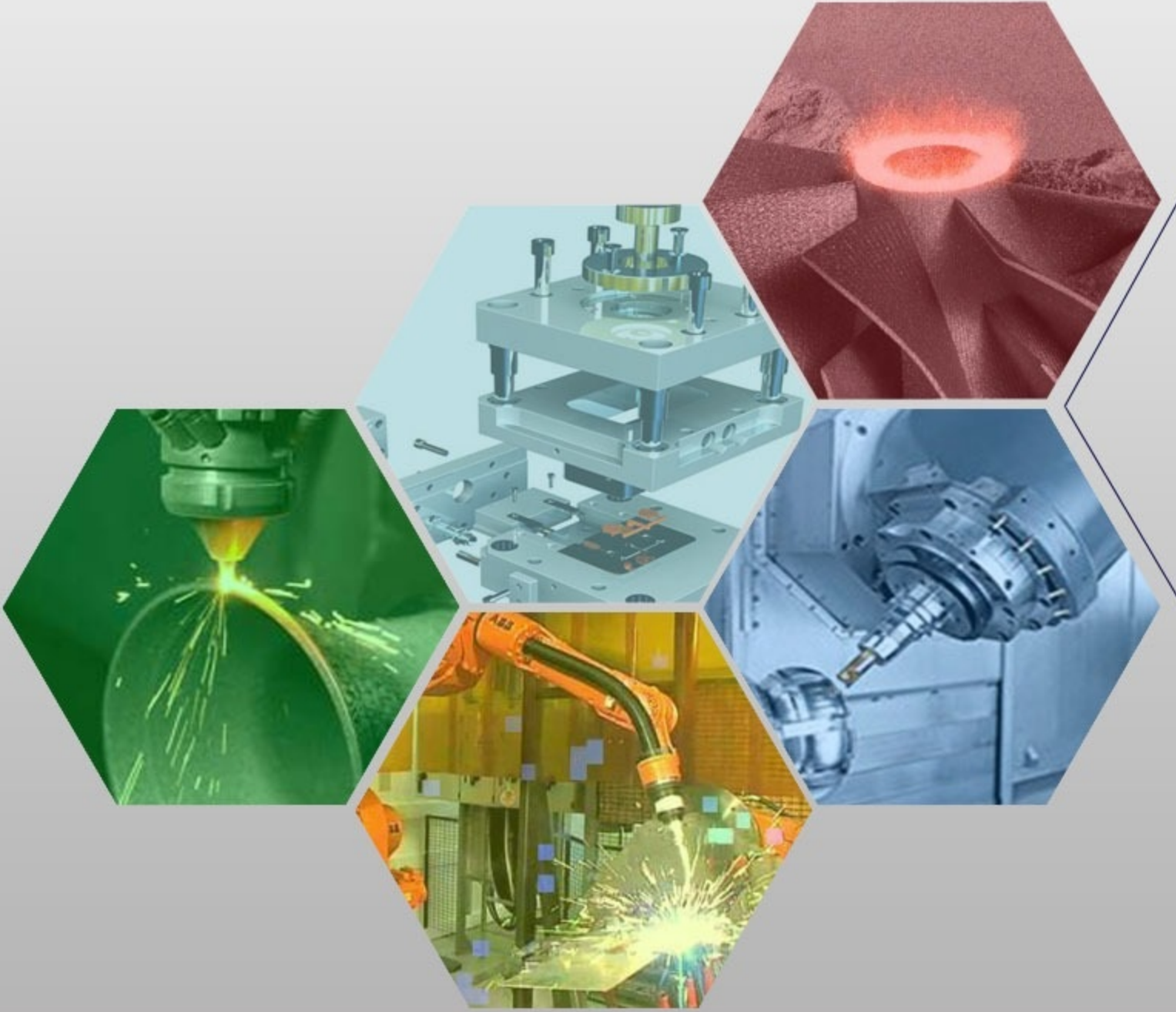




İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:1 SAYI:2 YIL: 2020

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:1 ISSUE:2 YEAR: 2020



İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları Manufacturing Technologies and Applications (MATECA)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca>

Editörler (*Editor in Chief*)

Prof. Dr. Ulvi Şeker, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa Günay, Karabük Üniversitesi

Alan Editörleri (*Field Editors*)

Prof. Dr. Süleyman Gündüz, Karabük Üniversitesi
Prof. Dr. Alaattin Kaçal, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Doç. Dr. Yakup Turgut, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Murat Sarıkaya, Sinop Üniversitesi
Doç. Dr. Turgay Kıvak, Düzce Üniversitesi

Yayın veya Danışma Kurulu (*Editorial or Advisory Board*)

Prof. Dr. Can Çoğun, Çankaya Üniversitesi
Prof. Dr. Serdar Salman, Marmara Üniversitesi
Prof. Dr. Muammer Koç, Hamad bin Khalifa University
Prof. Dr. M. Cemal Çakır, Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. Yusuf Özçatalbaş, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ali Oral, Balıkesir Üniversitesi
Prof. Dr. Ömer Eyercioğlu, Gaziantep Üniversitesi
Prof. Dr. Oğuzhan Yılmaz, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ramazan Kaçar, Karabük Üniversitesi
Prof. Dr. Teyfik Demir, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa Kurt, Marmara Üniversitesi
Prof. Dr. Adem Çiçek, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Prof. Dr. Hacı Sağlam, Selçuk Üniversitesi
Prof. Dr. Ulaş Çaydaş, Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Dursun Özyürek, Karabük Üniversitesi
Prof. Dr. Ayhan Erol, Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Hasan Erdem Çamurlu, Akdeniz Üniversitesi
Prof. Dr. İhsan Korkut, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Okan Ünal, Karabük Üniversitesi
Doç. Dr. Kadir Gök, İzmir Bakırçay Üniversitesi
Doç. Dr. Süleyman Neşeli, Selçuk Üniversitesi
Doç. Dr. Gültekin Uzun, Gazi Üniversitesi
Dr. Munish Kumar Gupta, Shandong University
Dr. Mozammel Mia, Imperial College London
Dr. Danil Yu. Pimenov, South Ural State University
Dr. Nafiz Yaşar, Karabük Üniversitesi
Dr. Mehmet Erdi Korkmaz, Karabük Üniversitesi
Dr. Ramazan Özmen, Karabük Üniversitesi
Dr. Çağrı Vakkas Yıldırım, Erciyes Üniversitesi
Dr. Selçuk Yağmur, Gazi Üniversitesi



Cilt (Volume) : 1
Sayı (Issue) : 2
Yıl (Year) : 2020
e-ISSN: 2717-7475

Yayıncı (Publisher)
Mustafa GÜNAY

Web Sayfası (Web Page)
<http://dergipark.gov.tr/pub/mateca>

Yayın Tarihi (Publication Date)
Ağustos 2020 (August 2020)

Yayın Dili (Publication Language)
Türkçe / İngilizce (Turkish/English)

Yayın Aralığı (Publication Frequency)
Yılda üç kez yayınlanır (Tri-annual)

Yayın Türü (Publication Type)
Sürekli yayın (Periodical)

Kapak Tasarımı (Cover Design)
Ozan YETKİN

İletişim

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editör)
Telefon: +90 370 4187400
E-posta: matecajournal@gmail.com, mgunay@karabuk.edu.tr

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca> adresinden dergiye ilişkin bilgilere ve makalelerin tam metnine ulaşılabilir.

Contact

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editor)
Phone: +90 370 4187400

E-mail: matecajournal@gmail.com, mgunay@karabuk.edu.tr

Instructions for authors and all articles in this journal can be reached at
<https://dergipark.org.tr/en/pub/mateca>

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

Sayfa (Page)

- [The Effect of Different Cooling Methods to Hole Quality and Tool Life in the Drilling of AA7075 and AA2024 Aluminum Alloys \(AA7075 ve AA2024 Alüminyum Malzemelerine Delik Delinmesinde Farklı Soğutma Yöntemlerinin Delik Kalitesine ve Takım Ömrüne Etkisi\)](#)
Ayşegül ÇAKIR ŞENCAN , Abdullah DURAN , Ulvi ŞEKER 1-13
- [HEA 240 Profilinin Sıcak Haddelenmesinde Deneysel ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması \(Comparison of Experimental and Simulation Results for Hot Rolling of HEA 240 Profile\)](#)
Gazi KURT , Nafiz YAŞAR 25-31
- [Modelling and Optimization of Burr Height in Fiber Laser Drilling of Ferritic Stainless Steel \(Ferritik Paslanmaz Çeliğin Fiber Lazerle Delinmesinde Çapak Yüksekliğinin Modellenmesi ve Optimizasyonu\)](#)
Hüseyin UZUN , Tolga MERAL , Mustafa GÜNAY 32-39
- [Sertleştirilmiş AISI 4340 Çeliğin Isı-Destekli İşlenmesinde TIG Tekniğinin Uygulanabilirliği \(Feasibility of TIG Technique in Heat-Assisted Machining of Hardened AISI 4340 Steel\)](#)
Atakan UĞRAŞ , Fırat KAFKAS 40-48

Derleme Makale (Review Article)

- [AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezelenmesi Üzerine Bir Derleme \(A Review on Milling of AISI D2 Cold Work Tool Steel\)](#)
Şenol ŞİRİN , Emine ŞİRİN 14-24

The Effect of Different Cooling Methods to Hole Quality and Tool Life in the Drilling of AA7075 and AA2024 Aluminum Alloys

Ayşegül ÇAKIR ŞENCAN^{1,*}, Abdullah DURAN², Ulvi ŞEKER²

¹Bulent Ecevit University, Engineering Faculty, Zonguldak, Turkey

²Gazi University, Technology Faculty, Ankara, Turkey

ARTICLE INFO

Received: 27.04.2020

Accepted: 10.07.2020

Keywords:

Drilling

Hole quality

Cutting tool wear

MQL

Taguchi

ABSTRACT

Controlling the amount of the cutting fluid used in machining processes is important in terms of its effects on the environment, human health, and also on the total cost of production. In this study, the AA7075 and AA2024 aluminum alloys were subjected to drilling process using four different cooling conditions (internal MQL, external MQL, conventional cooling and compressed air cooling), four different cutting speeds (100, 125, 150, 175 m/min) and four different feed rates (0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mm/rev). At the end of experiments which have been performed with respect to Taguchi experimental design method, in addition to the hole quality such as surface roughness of hole, diametrical deviation, ovality and axial deviation, wear/build-up edge on cutting tools were investigated. The obtained data were evaluated by performing ANOVA and Signal/Noise (S/N) tests. At the end of experiments, it was determined that cooling method has the most effect on output parameters. It was observed that while the lowest values were found at conventional cooling application, the results from the application of internal MQL were very similar to conventional cooling method. While increased feed rate generally caused increase in all the output parameters, the cutting speed has unclear effect on the test results. The results of the hole quality obtained from the AA7075 alloy were found to be better than the results obtained from the AA2024 alloy, especially in poor cooling conditions such as compressed air cooling and external MQL application.

AA7075 ve AA2024 Alüminyum Malzemelerine Delik Delinmesinde Farklı Soğutma Yöntemlerinin Delik Kalitesine ve Takım Ömrüne Etkisi

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 27.04.2020

Kabul: 10.07.2020

Anahtar Kelimeler:

Delme

Delik kalitesi

Kesici takım aşınması

MMY

Taguchi

ÖZET

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesme sıvısı miktarının kontrolü, hem doğaya ve insan sağlığına olan etkisi açısından hem de toplam üretim maliyeti açısından çok önemlidir. Bu çalışmada, AA7075 ve AA2024 alüminyum alaşımları dört farklı soğutma yöntemi (içten MMY, dıştan MMY, geleneksel soğutma ve basınçlı havayla soğutma), dört farklı kesme hızı (100, 125, 150, 175 m/dk) ve dört farklı ilerleme (0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mm/dev) kullanılarak delik delme işlemine tabi tutulmuştur. Taguchi deney tasarımına göre yapılan deneyler sonunda deliklerin yüzey pürüzlüğü, çaptan sapma, dairesellikten sapma ve silindiriklikten sapma olmak üzere delik kalitesi ve takımlarda meydana gelen aşınma/sıvanmalar incelenmiştir. Elde edilen veriler ANOVA ve Sinyal/Gürültü (S/N) testleri yapılarak değerlendirilmiştir. Deneyler sonunda çıktı parametrelerini en çok soğutma yönteminin etkilediği tespit edilmiştir. En düşük değerler geleneksel soğutma uygulamasında gözlenirken, içten MMY uygulamasında elde edilen sonuçların geleneksel soğutma yöntemine çok yakın olduğu görülmüştür. İlerlemedeki artış tüm çıktı parametrelerinde genelde artışa neden olurken, kesme hızının çıktı parametreleri üzerindeki etkisi daha belirsiz olmuştur. Özellikle basınçlı havayla soğutma ve dıştan MMY uygulaması gibi yetersiz soğutma şartlarında AA7075 alaşımından elde edilen delik kalitesi sonuçlarının AA2024 alaşımından elde edilen sonuçlara göre daha iyi olduğu görülmüştür.

* Corresponding author, e-mail: aysegulcakil@beun.edu.tr

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In recent years, the rapidly increasing use of aluminum in industrial areas, has become one of the most versatile engineering materials with a unique combination of properties and structures. With various combinations of features on the behavior of these materials in the processing duration it is done a lot of work to this day and still continuing research on this subject [1]. When these studies examined, it is seen that processing conditions and the metallurgical structure of the material modify the workability of aluminum [2-5]. The main problem of workability of Aluminum is in the control of chips. Also due to the ductility of the material adheres to the cutting tool, it causes the other processing problems [6-7].

In machining, especially the removal of chips from the cutting zone is the most common problems in the processing type of drilling operation. In drilling process, the chip formation occurs in a closed area and cannot be seen. The chip evacuation and injection of cutting fluid is more difficult. Friction between the chip and the helix channels and between the drill and worked surfaces is much greater. Rake angle varies over the cutting edge and therefore exists in different cutting conditions over the cutting edge. Therefore, removal of chips in drilling process occur in a much more complex and severe conditions according to the machining process with a single-edge cutting tool [8-9]. There have been many studies for solving such problems encountered in the drilling process to this day. Researchers have investigated chip formation (geometry and movement), hole quality, the force acting on the cutting tool and cutting tool life in order to monitor performance of machining during drilling process. They have examined the optimum cutting parameters and have tried to estimate the best machining performance by experimental methods and mathematical analysis [10-13].

As with all machining process, cutting fluid application is important in the drilling process in the solution on the problems. Because in this process, cutting fluid lowers the heat generated in the cutting zone and reduces friction of the cutting tool-chip interface with lubricating effect. It also helps to move away chips from the cutting zone. Thus, the cutting fluid helps to increase tool life and improved product quality [14]. In drilling operation, the positive effect of the cutting fluid application to machining performance has been demonstrated in many studies [16-19]. However, a successful manufacturing process, cannot be expressed only by production economics including product quality, product amount and time. It is also directly related to the impact of the environment and human health [20]. Thus, reducing the amount of cutting fluid used in machining process, arises a requirement as a result of aforementioned issues. Another important points here is that, while reducing the amount of cutting fluids used in machining process is to adversely affect the product quality and cutting tool life [21]. In recent years Minimum Quantity Lubrication (MQL) method has been used to eliminate the adverse effect of cutting fluids, to reduce production cost and improve product quality [14-15]. Some researchers have investigated the effect of this method, which can be applied to the cutting zone as an oil mist inside or outside the tool, on the machining performance by comparing it with the conventional cooling method. [22-25]. In some of these studies, MQL method yielded results close to conventional cooling, while in some others insufficient performance was observed.

In order to investigate the reasons of the different results obtained in the current studies on MQL, it is aimed to determine the effect of oil mist and compressed air separately as well as the application of MQL method internally and externally. Therefore, some experiments were carried out with four different cooling methods: compressed air cooling, external MQL method, internal MQL method and conventional cooling method. In addition, two different aluminum materials were used in the experiments and the effect of the material factor changed by the cooling method was investigated.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERYAL VE YÖNTEM)

In this study, the effects of different cutting parameters and different cooling conditions on hole quality (Surface roughness-Ra, circular deviation D_{XY} , cylindrical deflection- D_z , diametral deviation-D) and cutting tool life in drilling of AA7075 and AA2024 aluminum alloys were investigated.

Using the Taguchi experimental design method, four different cutting speeds, four different feeds and four different cooling conditions were selected as the test input. Hole quality and cutting

tool wear is defined as output parameters. Four-level 4x4x4 L16 experimental design was formed using the Taguchi experimental design method. In this way, the number of 64 experiments was reduced to 16. The same design was repeated for both materials (AA7075 and AA2024), thus reducing the total number of experiments from 128 to 32. Control factors and levels of the experimental design are given in Table 1.

Table 1. Control factors and levels for the experiments (Deneyler için kontrol faktörleri ve seviyeleri)

	Factors	Unit	1. Level	2. Level	3. Level	4. Level
1	Cooling method (A)		Internal MQL	External MQL	Conventional Cooling	Compressed Air cooling
2	Cutting speed (B)	<i>m/min</i>	100	125	150	175
3	Feed rate (C)	<i>mm/rev</i>	0.10	0.15	0.20	0.25

Considering the factors in Table 2.1, the most suitable design for the experimental study Taguchi L16 orthogonal sequence was selected. Table 2 shows the experimental design determined with the help of Minitab statistical software.

Table 2. Taguchi L16 orthogonal experimental design for AA7075 (AA7075 için Taguchi L16 dikey dizimli deney tasarımı)

Test No	Variables	A	B	C
		Cooling Method	Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm/rev)
T1	A1B1C1	Internal MQL	100	0.10
T2	A1B2C2	Internal MQL	125	0.15
T3	A1B3C3	Internal MQL	150	0.20
T4	A1B4C4	Internal MQL	175	0.25
T5	A2B1C2	External MQL	100	0.15
T6	A2B2C1	External MQL	125	0.10
T7	A2B3C4	External MQL	150	0.25
T8	A2B4C3	External MQL	175	0.20
T9	A3B1C3	Conventional Cooling	100	0.20
T10	A3B2C4	Conventional Cooling	125	0.25
T11	A3B3C1	Conventional Cooling	150	0.10
T12	A3B4C2	Conventional Cooling	175	0.15
T13	A4B1C4	Compressed Air Cooling	100	0.25
T14	A4B2C3	Compressed Air Cooling	125	0.20
T15	A4B3C2	Compressed Air Cooling	150	0.15
T16	A4B4C1	Compressed Air Cooling	175	0.10

The same operations were carried out in the drilling of AA2024 alloy and 16 different cutting conditions were numbered in the range T26-T41. A new cutting tool is used for each cutting conditions. The cutting tools used are two-edged, helical, 8 mm diameter, internal cooling groove, uncoated carbide drills.

In order to examine the wear occurring in the tools, 30 different holes are repeated for each different cutting conditions. Using the arithmetic mean of the results obtained from repetition experiments, an average value was obtained for each different cut and the results were examined according to these values. The experimental setup is shown schematically in Figure 1.

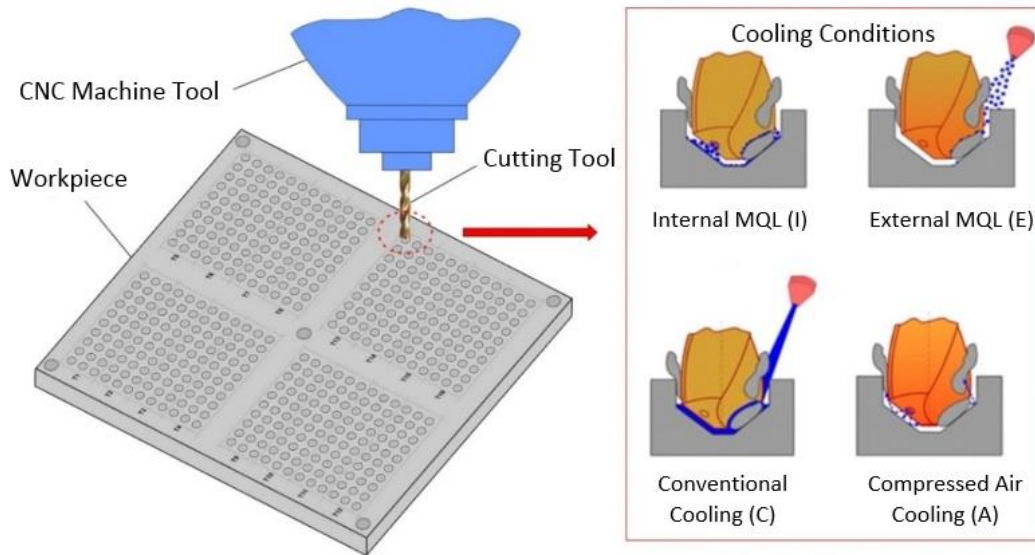


Figure 1. Schematic representation of the experimental setup (Deney düzeneğinin şematik görünümü)

Two different aluminum alloys were used as the workpiece material in the experiments. These are AA 7075 and AA 2024 aluminum alloys. These 25 mm-thick aluminum workpieces are drilled through the length. The chemical and mechanical properties of the AA2024 and AA7075 alloys are given in Table 3.

Table 3. Chemical and mechanical properties of AA7075 and AA2024 aluminum alloys (AA7075 ve AA2024 alüminyum alaşımlarının kimyasal ve mekanik özellikleri)

	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Heat treatment	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Brinell)	Elasticity (GPa)
AA 2024	0.5	4.5	0.6	1.5	0.1	0.2	T4	315-330	440-465	20.0	120	73.1
AA 7075	0.4	1.6	0.3	2.5	0.3	5.6	T6	460-505	530-570	10.0	150	72

The experiments were performed at the ECOSPEED 2600 (HSM) high speed machining center. Technical information about the machine tool is given in Table 4.

Table 4. Technical properties of ECOSPEED 2600 CNC machine (ECOSPEED 2600 CNC tezgahının teknik özellikleri)

Name of Machine	ECOSPEED 2600 (HSM) high-speed machining center	
Control Unit	SIEMENS 840D	
Maximum spindle speed	30 000	rev/min
Machining table	2500x7000	mm
Feeds in Axis	X:65 000, Y ve Z:50.000	mm/min
Movements in Axis	X: 6800, Y: 2600, Z: 670 A:±40°, B: ±40°	mm

Cooling system of the ECOSPEED machine is the Digital-Super VOGEL MQL system. This system is capable of both internal and external cooling. Constant flow rate and pressure were used in the experiments. Haughton CDT-ML MAX 200 brand cutting fluid was used in MQL system. For internal MQL and external MQL applications, this coolant is applied at a constant pressure of 5 bar. “Opet Fuchs Ecocool S PT 45”, which is used in the traditional cooling method, was applied to the cutting zone at a pressure of 10 bar from the outside of the tool. In the compressed air cooling method, the air sent to the cutting zone was again applied through the tool at a pressure of 10 bar.

Circularity, cylindricality and dimensional accuracy of the holes were measured with DUE Global Performance brand coordinate measuring machine (CMM). The accuracy of the bench was 0.002 mm and measurements were carried out in a room with constant ambient temperature (21-24 °C). In order to obtain a reliable result, four measurements were made for each hole measured and the arithmetic mean of these measurements were taken.

Mahr brand Perthometer M1 type of tabletop surface roughness measuring device was used for surface roughness measurements of the holes. For the reliability of the measurements, four measurements were made for each hole measured from separate points. The mean surface roughness (Ra) values were determined for each hole by taking the arithmetic mean of the values obtained as a result of the measurements.

3. EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS (DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI)

In the drilling process for AA7075 and AA2024 alloys, the change according to cooling conditions and the feed parameters of the average values calculated by taking the arithmetic average of the hole quality values (Surface roughness-Ra, Deviation from diameter-D, Deviation from Circularity-D_{X,Y} and Deviation from Axial / Cylindrical- D_Z) measured in the 30 drilling tests repeated for each cutting condition are shown in the graphs in Figure 2.

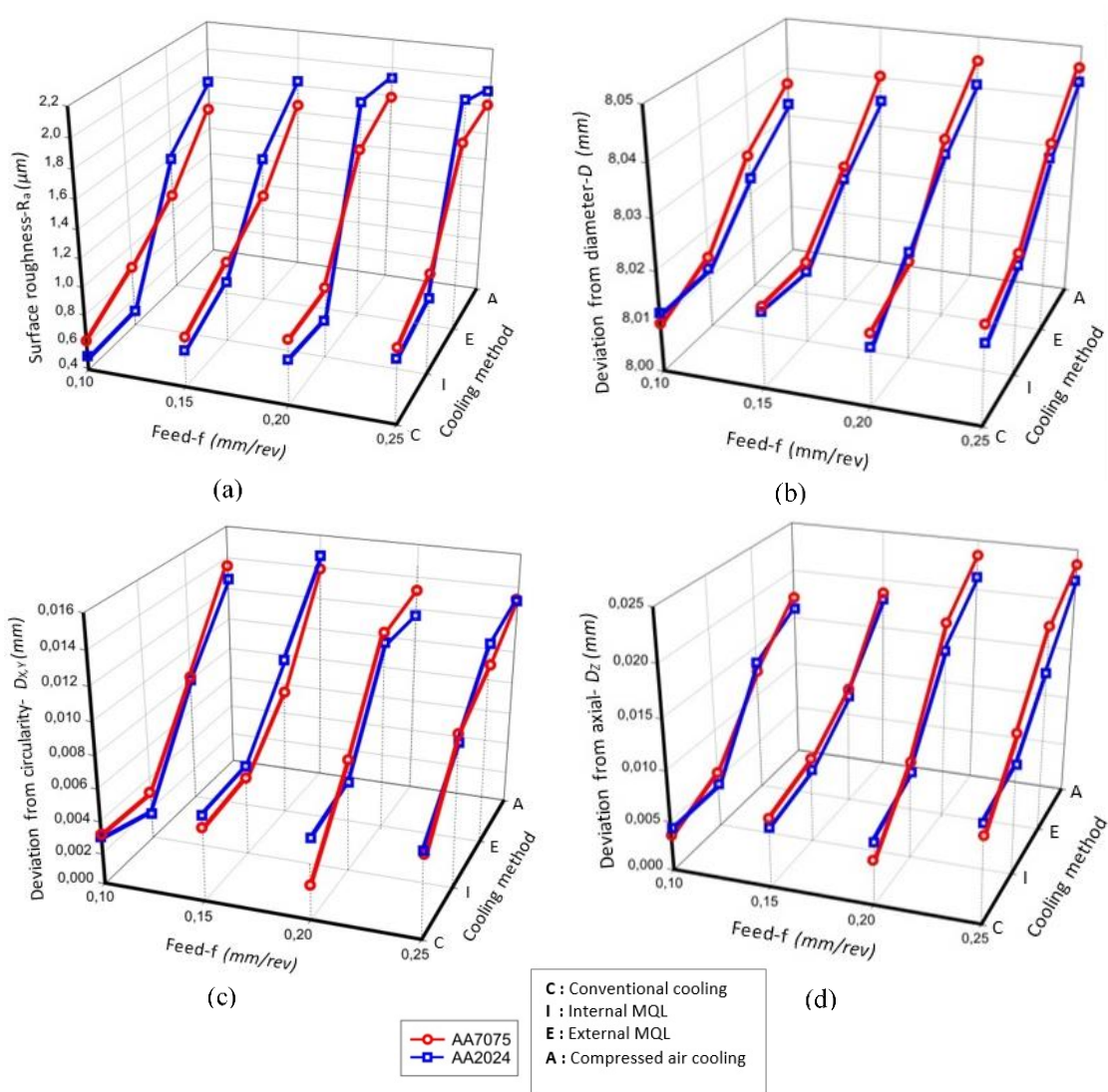


Figure 2. Variation of hole quality according to feed and cooling conditions (a): Surface roughness -Ra, (b): Deviation from diameter -D, (c): Deviation from Circularity -D_{X,Y}, (d): Axial deviation -D_Z

(Delik kalitesinin ilerleme ve soğutma şartlarına göre değişimi) (a):Yüzey pürüzlüğü-Ra, (b):Çaptan sapma-D, (c):Dairesellikten sapma-D_{X,Y}, (d):Eksenel sapma-D_Z)

In the graphs shown in Figure 3, the variation of arithmetic average of the hole quality values measured in 30 drilling tests repeated for each cutting condition in AA7075 and AA2024 alloys is shown according to the cutting speed (V_c) and cooling conditions.

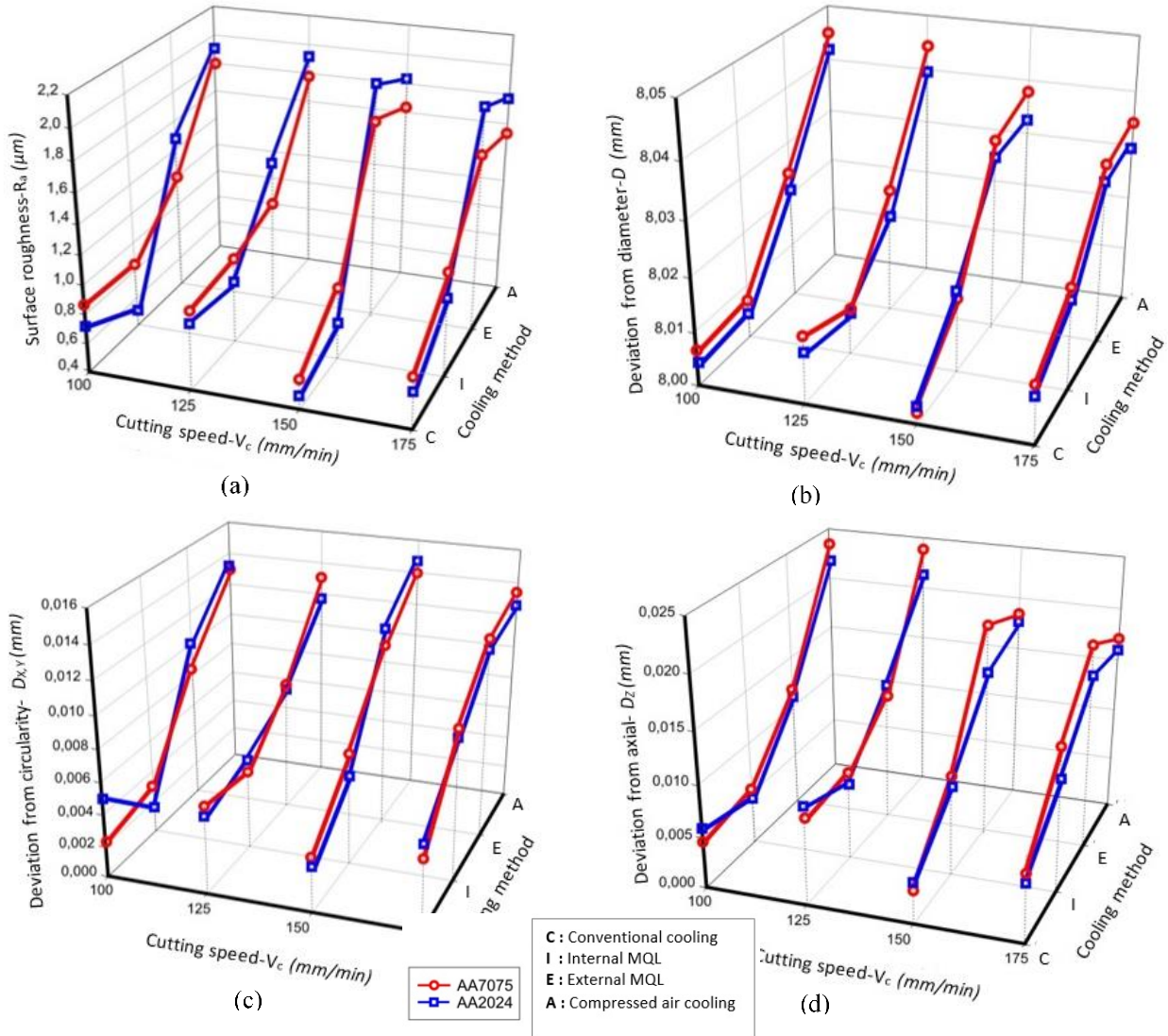


Figure 3. Variation of hole quality according to cutting speed parameters and cooling conditions (a): Surface roughness - R_a , (b): Deviation from diameter - D , (c): Deviation from Circularity - $D_{X,Y}$, (d): Axial deviation - D_Z (Delik kalitesinin kesme hızı parametresi ve soğutma şartlarına göre değişimi (a):Yüzey pürüzlüğü- R_a , (b):Çaptan sapma- D , (c):Dairesellikten sapma- $D_{X,Y}$, (d):Eksenel sapma- D_Z)

When the graphs in Figure 2 and Figure 3 are examined, it is clear that the most effective factor on hole quality is the cooling method. When the results of surface roughness (R_a), deviation from diameter (D), deviation from circularity ($D_{X,Y}$) and axial deviation (D_Z) are examined under the same cutting conditions in both figures, the worst hole quality was obtained with compressed air cooling method (A), and the best hole quality was obtained with conventional cooling method (C). The conventional cooling method is followed by internal MQL (I) and external MQL (E) methods, respectively.

When the results are examined, it is seen that the material factor changes the effect of cooling methods on hole quality. This was clearly observed especially in surface roughness results. In Figure 2 (a) and Figure 3 (a) graphs, the conventional cooling and internal MQL method showed lower surface roughness in AA2024 alloy under all conditions, while compressed air cooling and external MQL method showed lower surface roughness in AA7075 alloy under all conditions. One of the most important factors that negatively affect the hole quality factors such as surface quality, deviation from circularity and deviation from diameter is the accumulation of chips. The large and unstable

accumulation of chips on the cutting edge deteriorates the quality and precision of the surface being machined [26]. Build-up edge (BUE) of ductile aluminum alloys in the cutting edge triggers chip formation. It is known that the film layer formed at the tool-chip interface by a good cooling method prevents the BEU formed on the cutting edge of the tool and ensures the preservation of the tool geometry and thus the intact tool geometry affects the hole quality positively [6, 27]. In the researches, it has been observed that the internal MQL application is as effective as the conventional cooling application in lubrication of tool-workpiece interface [28, 2]. When the graphs of Figures 2 and 3 are examined in the light of this information, it is thought that the BUE formed on the tool with the AA2024 alloy which is more ductile than AA7075 alloy is less to the conventional cooling and internal MQL application where lubrication is good. Where, it is thought to be much higher in compressed air cooling and external MQL application where lubrication is poor. Therefore, it can be said that the cooling methods change the effect of the workpiece material on the hole quality. It is considered that the inner MQL method for ductile materials such as AA2024 may be an alternative to conventional cooling method in terms of hole quality when the results of measured surface roughness (R_a), deviation from diameter (D), deviation from circularity ($D_{X,Y}$) and axial deviation (D_z) are examined.

When the changes in cutting parameters were examined, it was observed that especially the effect of external MQL application on the hole quality was changed. While the difference between the hole quality results measured in external MQL application and the hole quality results measured in compressed air cooling application is higher in low cutting parameters, it is seen that this difference decreases considerably in high cutting parameters. From these results, it can be said that the external MQL application is relatively effective at low cutting parameters while preventing friction with lubrication, whereas it is said that the lubrication feature is inadequate because the increasing loads affecting the tool and increasing chip volume make the cutting conditions difficult at high cutting parameters. In addition, it is observed that the results obtained with the conventional cooling method and the internal MQL method are very close to each other at low cutting speeds and feed rates.

Looking at the graphs, it is seen that the increase in the feed rates parameter generally affects the hole quality negatively. The increase in cutting speed has a more unstable effect on hole quality. The increase in cutting speed reduced surface roughness, but caused an increase in geometric results, including deviation from diameter, deviation from circularity and deviation from cylindricality. It is known that the increased cutting speed facilitates cutting by increasing the temperature in the cutting zone. It is considered that the reduction of friction due to the reduced contact area at the tool-workpiece interface with increasing temperature improves the surface quality [29]. However, it should not be underestimated that cutting parameters that cause excessive temperature increase will accelerate the deformation of the cutting tool and reduce its life. Furthermore, unlike other types of machining, chip evacuation is a major problem in drilling. With the increase in cutting speed, the increase in chip volume per unit time makes the discharge of the chip difficult. It is thought that chip jamming increases the vibration by increasing the loads coming to the tool and adversely affects the cutting edges and hole quality of the tool (Figure 4).

3.1. Analysis of Variance (Varyans Analizi)

The data were subjected to ANOVA test in order to determine the degree of effect of the process parameters which are material type, cooling method and cutting parameters on hole quality (surface roughness (R_a), deviation from diameter (D), deviation from circularity (D_{XY}) and axial deviation (D_z), which is the quality characteristic. ANOVA tests also showed that the most effective factor on the process parameters was the cooling method. The most effective parameter after cooling was feed rate. It has been observed that the material factor is not an effective parameter especially for geometric tolerance results. It has been seen that the cooling methods applied reduced the effect of the material factor on the results. In the ANOVA tests, the results of surface roughness, deviation from diameter, deviation from circularity and deviation from cylindricality are given in Tables 5, 6, 7 and 8, respectively.

Table 5. ANOVA results for surface roughness of AA7075 and AA2024 (AA7075 ve AA2024 ile ilgili yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları)

Source	DF	SS'	SS	MS	F	P	PD (%)
Material type	1	0.00839	0.00839	0.00839	0.31	0.584	0.4
Cooling method	3	6.36370	6.36370	2.12123	78.12	0.000	88.0
Cutting speed (V _c)	3	0.06532	0.06532	0.02177	0.80	0.508	0.9
Feed (f)	3	0.69579	0.69579	0.23193	8.54	0.001	9.6
Error	21	0.57020	0.57020	0.02715	-	-	1.1
Total	31	7.70341	-	-	-	-	100.0

DF: Degree of freedom, SS': Pure sum of squares, SS: Sum of squares, MS: Mean square, PD : Percentage distribution, F: F-Test statistics, P: Significance values

Table 6. ANOVA results for deviation from diameter of AA7075 and AA2024 (AA7075 ve AA2024 ile ilgili çaptan sapma için ANOVA sonuçları)

Source	DF	SS'	SS	MS	F	P	PD (%)
Material type	1	0.0000543	0.0000543	0.0000543	13.95	0.001	1.0
Cooling method	3	0.0049058	0.0049058	0.0016353	420.55	0.000	86.2
Cutting speed (V _c)	3	0.0000487	0.0000487	0.0000162	4.18	0.018	0.9
Feed (f)	3	0.0005969	0.0005969	0.0001990	51.17	0.000	10.5
Error	21	0.0000817	0.0000817	0.0000039	-	-	1.4
Total	31	0.0056873	-	-	-	-	100.0

DF: Degree of freedom, SS': Pure sum of squares, SS: Sum of squares, MS: Mean square, PD : Percentage distribution, F: F-Test statistics, P: Significance values

Table 7. ANOVA results for deviation from circularity of AA7075 and AA2024 (AA7075 ve AA2024 ile ilgili dairesellikten sapma için ANOVA sonuçları)

Source	DF	SS'	SS	MS	F	P	PD (%)
Material type	1	0.0000002	0.0000002	0.0000002	0.26	0.615	0.1
Cooling method	3	0.0004068	0.0004068	0.0001356	208.12	0.000	81.3
Cutting speed (V _c)	3	0.0000381	0.0000381	0.0000127	19.50	0.000	7.6
Feed (f)	3	0.0000413	0.0000413	0.0000138	21.12	0.000	8.3
Error	21	0.0000137	0.0000137	0.0000007	-	-	2.7
Total	31	0.0005001	-	-	-	-	100.00

DF: Degree of freedom, SS': Pure sum of squares, SS: Sum of squares, MS: Mean square, PD : Percentage distribution, F: F-Test statistics, P: Significance values

Table 8. ANOVA results for deviation from cylindricity of AA7075 and AA2024 (AA7075 ve AA2024 ile ilgili eksenel sapma için ANOVA sonuçları)

Source	DF	SS'	SS	MS	F	P	PD (%)
Material type	1	0.0000058	0.0000058	0.0000058	3.83	0.064	0.5
Cooling method	3	0.0009549	0.0009549	0.0003183	209.13	0.000	80.3
Cutting speed (V _c)	3	0.0000236	0.0000236	0.0000079	5.17	0.008	2.0
Feed (f)	3	0.0001724	0.0001724	0.0000575	37.75	0.000	14.5
Error	21	0.0000320	0.0000320	0.0000015	-	-	2.7
Total	31	0.0011887	-	-	-	-	100.0

DF: Degree of freedom, SS': Pure sum of squares, SS: Sum of squares, MS: Mean square, PD : Percentage distribution, F: F-Test statistics, P: Significance values

3.2. Investigation of Wear on Cutting Tools (Kesici Takımlardaki Aşınmanın İncelenmesi)

At the end of 30 drilling, the drills used in MQL application (a), external MQL application (b), conventional cooling (c) and compressed air cooling (d) conditions are given with SEM photographs in Figure 4.

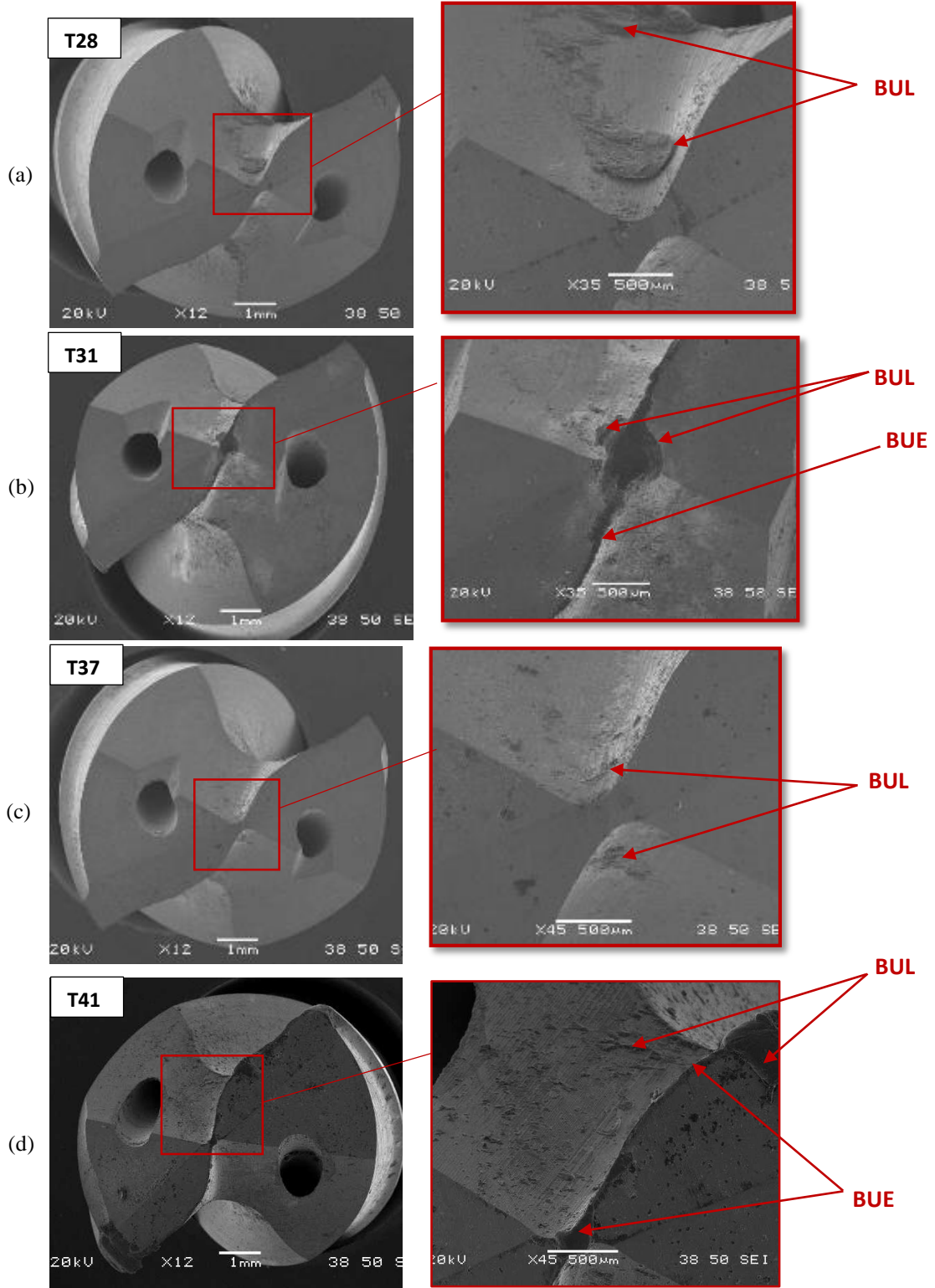


Figure 4. SEM photos of drills used in 30 hole drill repeat on AA 2024 alloy. Result obtained in: (a) Internal MQL condition, (b) External MQL condition, (c) Conventional cooling condition, (d) Compressed air cooling condition (AA2024 alaşımına 30 delik delme tekrarında kullanılan matkapların SEM fotoğrafları: (a) İçten MMY şartı, (b) Dıştan MMY şartı, (c) Geleneksel soğutma şartı ve (d) Basınçlı havayla soğutma şartı)

It is clearly seen in Figure 4 that the built-up edge (BUE) formation on the cutting edges and the built-up layer (BUL) formation on the chip flow surfaces along with the plastering is higher in compressed air cooling (d) and external MQL application (b). These two cooling conditions are much more inadequate than the internal MQL (a) and conventional cooling (c) conditions for reducing the heat generated in the cutting zone and reducing the friction by the lubricating effect. Therefore, it can be said that it is insufficient to prevent the plastering (BUE-BUL) due to temperature and pressure on

cutting edges and flow surfaces. This is thought to cause increases in average surface roughness (Ra) results.

In terms of average surface roughness, the highest roughness values were obtained in compressed air cooling application. Especially in conditions where high cutting parameters are used, the increase in Ra values measured from the first hole to the last hole at the end of 30 drilling repetitions in external MQL application is seen to be higher than the increase amount measured in the application of cooling with compressed air, unlike the average Ra values.

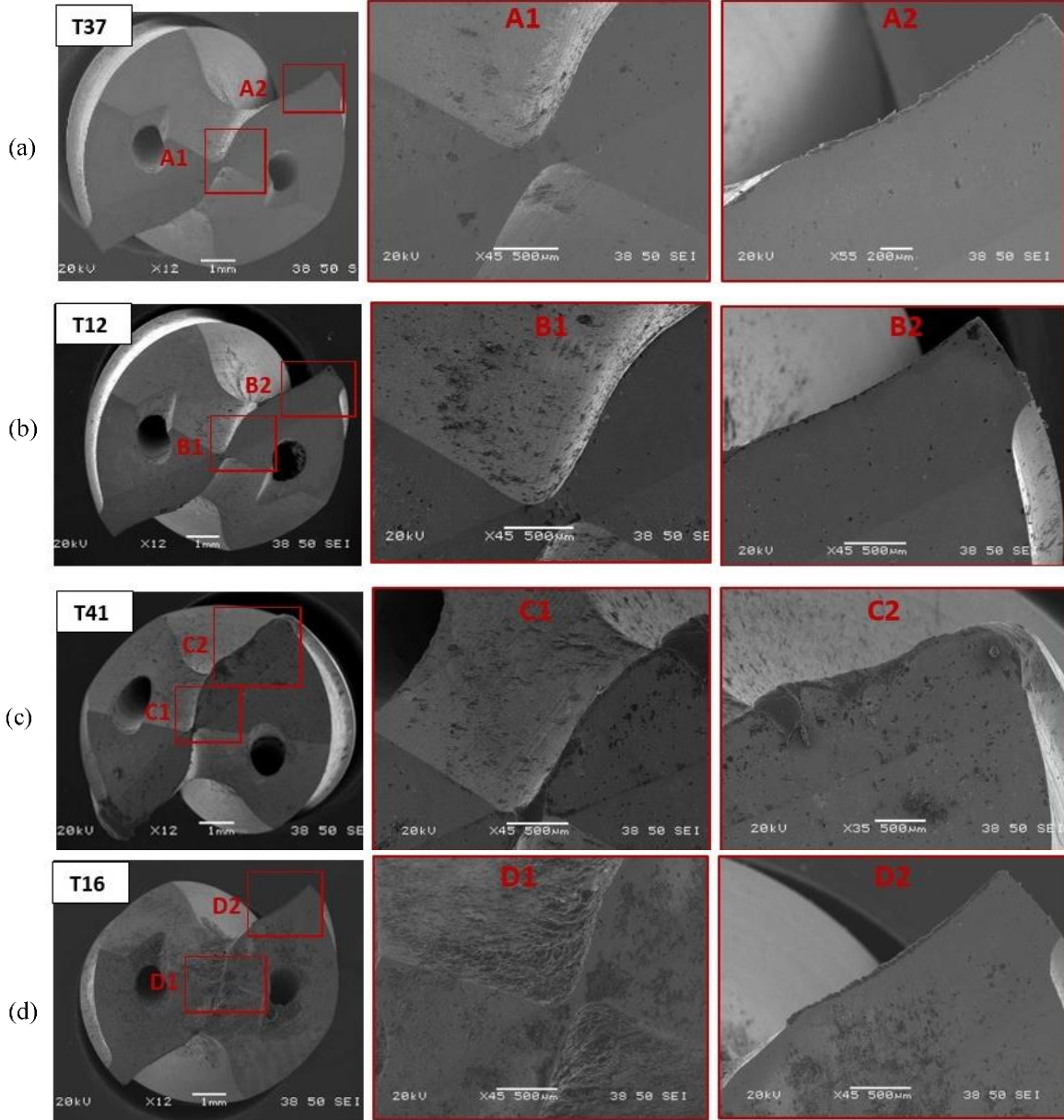


Figure 5. SEM photos of drills used in 30 hole drilling repeats on AA2024 and AA7075 alloys. Results obtained in: (a) Conventional cooling condition for AA2024 alloy, (b) Conventional cooling condition for AA7075 alloy, (c) Compressed air cooling condition for AA2024 alloy, (d) Compressed air cooling conditions for AA7075 alloy. (AA2024 ve AA7075 alaşımlarına 30 delik delme tekrarı sonunda matkapların SEM fotoğrafları: (a) AA2024 alaşımı için geleneksel soğutma, (b) AA7075 alaşımı için geleneksel soğutma, (c) AA2024 alaşımı için basınçlı havayla soğutma ve (d) AA7075 alaşımı için basınçlı havayla soğutma şartlarında elde edilen sonuçlar)

In compressed air method, air is applied through the cutting tool, while in external MQL method, application of air and coolant by nozzles externally is thought to cause in this result. It can be said that in the external MQL application a small amount of externally injected coolant cannot penetrate into the hole and reach the end of the cutting tool. On the other hand, in the application of compressed

air cooling, it is assumed that the air is supplied through the tool at a pressure of 10 bar, resulting in faster discharge of the chips.

In order to examine the effect of the workpiece material factor on the results, SEM photographs are shown in Figure 5 where the cutting tool wear can be observed in the drilling of holes in AA7075 and AA2024 alloys under the same conditions. Figure 5 shows the tools used to drill AA2024 (a) and AA7075 (b) alloys using conventional cooling application, where the best hole quality results are obtained at the end of 30 holes drilling. In addition, cutting wear and plastering of the tools (BUE/BUL) used for drilling AA2024 (c) and AA7075 (d) alloys are clearly seen in Figure 5, using the compressed air cooling application where the worst hole quality results are obtained.

In Figure 5-c and Figure 5-d show that the tools have more deformations in the conditions of cooling with compressed air, where the quality of the poor holes is obtained in both materials drilling. Under the conditions where conventional cooling is applied, the tools are seen to have less deformation (Figure 5-a and Figure 5-b). Compared to the AA7075 alloy and the AA2024 alloy in terms of the measured amount of Ra from the first hole to the last hole, and even in terms of the average Ra value, it is generally seen that the value of Ra obtained from the AA2024 alloy is higher under the inadequate cooling and lubrication conditions. This is in line with the deformation images of the tools used in the conditions mentioned in Figure 5-c and Figure 5-d. It is thought that the tool will be exposed to BUE rather than cutting wear when drilling the aluminum alloy. Since the AA2024 alloy is more ductile than the AA7075 alloy, this is considered to be the case because the AA2024 alloy is more plastered to the cutting tool [14, 30].

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, drilling experiments were performed with uncoated carbide tools on AA7075 and AA2024 aluminum alloys by using Taguchi experiment design and applying different cooling conditions with different cutting parameters. At the end of the experiments, the hole quality (average surface roughness, deviation from diameter, deviation from circularity, deviation from cylindricality) and tool wear were examined and the results obtained are summarized below:

At the end of the experiments, it was seen that cooling parameters had the most effect on output parameters. This is clearly seen in the graphs and SEM images of the cutting tools.

- ✓ While the lowest tool deformation and lowest drill quality deviation values were observed in conventional cooling application, the results obtained in internal MQL application were found to be very close to the conventional cooling method. The highest tool deformation and the highest deviation values in hole quality were observed in compressed air cooling.
- ✓ It has been observed that the difference between the results obtained in external MQL and compressed air cooling applications from outside is reduced under conditions where high cutting parameters are used. It has been observed that the difference between the results obtained in internal MQL and conventional cooling applications is reduced under conditions where low cutting parameters are used. While the increase in feed rates led to an increase in all test results, the effect of the cutting speed on the test results was more uncertain.
- ✓ Hole quality results obtained from AA7075 alloy were found to be better than AA2024 alloy, especially under inadequate cooling conditions such as compressed air cooling and external MQL application. This situation was observed more clearly especially in surface roughness.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The authors would like to thank the Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) for this study supports under the program 1002-115M106 coded project finance. Also, the authors would like to thank the Turkish Aerospace Industries Corporation (TAI) for the possibility of using machines and equipment in their experiments.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. A. Çakır, AA7075 ve AA6013 Investigation of cutting parameter on aluminium alloys during drilling operations, Master Thesis, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Turkey, 2009.

2. H.A. Kishawy, M. Dumitrescu, E.G. Ng, M.A. Elbestawi, Effect of cutting fluid strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45: 219–227, 2005.
3. P.S. Sreejith, Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions, *Materials Letters*, 62: 276–278, 2008.
4. L.N. L'opez de Lacalle, C. Angulo, A. Lamikiz, J. A. S'anchez, Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling, *Journal of Materials Processing Technology*, 172(1), 11-15, 2006.
5. W. Zhong, D. Zhao, X. Wang, A comparative study on dry milling and little quantity lubricant milling based on vibration signals, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50: 1057-1064, 2010.
6. R. Cobden, Aluminium: Physical properties, characteristics and alloys. European Aluminium Association, Training in Aluminium Application Technologies (TALAT-1501), 36–252, 1994.
7. B. Mills, A. H. Redford, Machinability of Engineering Materials, Applied Sci. Publishers Ltd., New York, USA, 1983.
8. M. Akkurt, Metal Cutting Methods and Machine Tools, Birsen Press, 23-90, 117-181, Ankara, Turkey, 1998.
9. H.L. Tonshoff, W. Spintig, W. Konig, A. Neises, Machining of holes developments in drilling technology, *Annals of the CIRP*, 43 (2): 551-561, 1994.
10. C. Sanjay, C. Jyothi, A study of surface roughness in drilling using mathematical analysis and neural networks, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29:846-852, 2006.
11. M. Pirtini, I. Lazoglu, Forces and hole quality in drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(11): 1271-1281, 2005.
12. A. Thangaraj, P.K. Wright, Computer-assisted predicted of drill-failure using in-process measurements of thrust force, *Journal of Engineering for Industry*, 110(4): 192-200, 1988.
13. N. Tosun, M. Huseyinoglu, Effect of MQL on surface roughness in milling of AA7075-T6, *Materials and Manufacturing Process*, 25:793–798, 2010.
14. A. Çakır, Investigation of the effect of cooling conditions on cutting performance in drilling AA 7075 and AA 2024 aluminum materials, Ph.D Thesis, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Turkey, 2015.
15. A. Çakır, S. Yağmur, N. Kavak, G. Küçüktürk, U. Şeker, The effect of minimum quantity lubrication under different parameters in the turning of AA7075 and AA2024 aluminium alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81: 1-4, 2015.
16. D.U. Braga, A.E. Diniz, G.W.A. Miranda, N.L. Coppini, Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicon alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 122(1):127–138, 2002.
17. E. Lugscheider, O. Knotek, C. Barimani, T. Leyendecker, O. Lemmer, R. Wenke, Investigations on hard coated reamers in different lubricant free cutting operations, *Surface and Coatings Technology*, 90(1-2): 172-177, 1997.
18. E.A. Rahim, H.A. Sasahara, A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys, *Tribology International*, 44: 309–317, 2011.
19. S. Bhowmick, A.T. Alpas, Minimum quantity lubrication drilling of aluminium– silicon alloys in water using diamond-like carbon coated drills, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48: 1429– 1443, 2008.
20. R. Autret, S.Y. Liang, Minimum quantity lubrication in finish hard turning. In: Proceedings of International Conference on Humanoid, Nano Technology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM'03), Manila, Republic of the Philippines, 1–9, 2003.
21. N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed, Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 172: 299–304, 2006.
22. G. Le Coz, M. Marinescu, A. Davillez, D. Dudzinski, L. Velnom, Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys, *Applied Thermal Engineering*, 36: 434-441, 2012.
23. G. Fox-Rabinovich, J.M. Dasch, T. Wagg, K. Yamamoto, S. Veldhuis, G.K. Dospaeva, Cutting performance of different coatings during minimum quantity lubrication drilling of aluminum silicon B319 cast alloy, *Surface and Coatings Technology*, 205: 4107–4116, 2011.
24. A. Meena, M. El Mansori, Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications, *Wear*, 271: 2412– 2416, 2011.

- 25.A.E. Diniz, J.R. Ferreira, F.T. Filho, Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(3): 317-326, 2003.
- 26.U, Şeker, Design cutting tool in machining, Gazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Training Notes, 39–45, Ankara, Turkey, 2000.
- 27.Y.S. Liao, H.M. Lin, Y.C. Chen, Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47: 1667–1676, 2007.
- 28.V.S. Sharma, M. Dogra, N.M. Suri, Cooling techniques for improved productivity in turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49: 435–453, 2009.
- 29.E.M. Trent, *Metal cutting*, Page 1-171, Butterworths Press, London, 1989.
- 30.V.A. Rogov, G. Siamak, Optimization of surface roughness and vibration in turning of aluminum alloy AA2024 using Taguchi technique, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, 7: 10-11, 2013.

AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezelenmesi Üzerine Bir Derleme

Şenol ŞİRİN^{1,*}, Emine ŞİRİN¹

¹ Düzce Üniversitesi, Gümüşova MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 10.07.2020

Kabul: 27.07.2020

Anahtar Kelimeler:

AISI D2

Frezeleme

Soğuk iş takım çelikleri

ÖZET

Takım çelikleri, kullanım alanları bakımından diğer çelik gruplarına göre endüstriyel uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Takım çelikleri farklı sıcaklıklar altında şekillendirme ve işleme uygulamalarında aşınmaya karşı dayanacak şekilde geliştirilmişlerdir. Soğuk iş takım çeliği grubunda yer alan AISI D2 içeriğinde karbon elementinin az olması nedeniyle işlenebilirliği ve şekillendirilebilirliği daha kolay olarak bilinmektedir. Kolay işlenebilirliği, yüksek çatlama direnci, yüksek tokluk ve sertleşebilme özellikleri sayesinde AISI D2 imalat endüstrisinde daha çok tercih edilmektedir. Diğer yandan, AISI D2 çeliğine krom veya krom-karbür ilave edildiğinde malzemenin sertliği artmakla beraber mekanik özellikleri de iyileşmektedir. Bu bağlamda, bu çeliklerin işlenmesinde optimum işleme parametrelerinin kullanılması istenilen yüzey bütünlüğü ve ölçü tamlığının elde edilmesini kolaylaştırmakla birlikte sürdürülebilir işleme katkı sağlamaktadır. AISI D2 soğuk iş takım çeliği, plastik enjeksiyon kalıpları, kesme ve delme takımları, derin çekme ve ekstrüzyon takımları, ölçme takımları, soğuk çekme makaraları, makas bıçakları, ağaç bıçakları, kesme bıçakları, diş tarakları, çapak alma kalıpları gibi kırılmaya maruz kalan makine ekipmanlarının imalatında yaygın olarak kullanılır. Bu çalışmada, yüksek mekanik özelliklerine rağmen iyi işlenebilirlik sergileyen AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesi üzerine yapılan çalışmalar derlenmiştir.

A Review on Milling of AISI D2 Cold Work Tool Steel

ARTICLE INFO

Received: 10.07.2020

Accepted: 27.07.2020

Keywords:

AISI D2

Milling

Cold work tool steels

ABSTRACT

Tool steels are more widely used in industrial applications than other steel groups in terms of their usage applications. Tool steels are developed to resist wear in shaping and machining applications under temperatures. Due to the low carbon element in the composition of AISI D2 in the cold work tool steel group, its machinability and formability are known to be easier. Thanks to its easy machinability, high cracking resistance, high toughness and hardenability, AISI D2 more preferred in the manufacturing industry. On the other hand, when chromium and chromium-carbide are added to AISI D2 steel, the hardness of material increases and its mechanical properties also improve. In this context, the use of optimum machining parameters in the processing of these steels facilitates the achievement of the desired surface integrity and dimensional accuracy and contributes to sustainable machining. AISI D2 cold work tool steel is used commonly in the manufacturing of plastic injection molds, cutting and punching tools, deep and extrusion tools, measuring tools, cold drawing rollers, scissors blades, wood blades, cutting blades, tooth combs, deburring molds. In this study, studies on the milling of AISI D2 cold work tool steel, which exhibits good machinability despite its high mechanical properties, are reviewed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Takım çelikleri; kimyasal kompozisyonları, özellikleri, uygulama alanları ve çalışma şartları nedeniyle diğer çelik gruplarına göre çok daha zengin içeriklidir. Takım çelikleri; kesme takımları, sıcak ve soğuk deformasyon kalıpları, ölçme cihazları gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Takım çeliklerinde arzu edilen mekanik özellikleri yapısında bulunan Cr, V, Mo

gibi karbür yapıcı alaşım elementlerinin bulunmasına bağlıdır. Bu elementler kafes içerisinde çözünerek ve MC, M7C, M23C6, M2C, M6C tipi karbürler oluşturarak, çeliğin daha yüksek dayanıma, yüksek sertliğe, yüksek aşınma direncine ve daha iyi meneviş dayanımına sahip olmasını sağlarlar. Oluşan karbürlerin sayısı, dağılımı, tipi ve yüzde miktarı malzemenin termo-mekanik işlem geçmişi ve çalışılan sıcaklık aralığı ile birlikte, çeliğin nihai özelliklerini belirlemektedir [1]. Takım çelikleri kullanım alanına göre; soğuk iş takım çelikleri, sıcak iş takım çelikleri, yüksek hız takım çelikleri, plastik kalıp çelikleri olarak gruplandırılmaktadır.

Yüksek basma dayanımı, yüksek sertlik, yüksek çekme dayanımı, yüksek aşınma dayanımı gibi özelliklerinden dolayı soğuk iş takım çelikleri oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. AISI D2 soğuk iş takım çeliği ise istenilen şekilde malzeme sertliğine, sertleştirme işlemi sonrası düşük deformasyon ve yüksek yüzey aşınma direncine sahip olmasından dolayı; kalınlığı 6 mm'ye kadar soğuk sac kesme kalıpları, sac kesme makinalarının kesici bıçakları, şekillendirme kalıpları, delme, zımbalama, kıvrırma, bükme, ezme, şişirme, bağlantı elemanlarının soğuk şekil verme ve diş çekme kalıpları, boru ve profil haddeleme makaraları, ilaç, aşındırıcı tozların sıkıştırma kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları, tel çekme haddeleri ve soğuk ekstrüzyon takımları, hassas kesme kalıpları, dilme bıçakları, kabartma takımları gibi kalıpların imalatında kullanılmaktadırlar [3-5].

Ayrıca AISI D2 çeliği fiyat/performans özellikleri sayesinde en sık kullanılan soğuk iş takım çeliklerinden biridir. AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de, fiziksel özellikleri Tablo 2'de ve standart gösterimleri ise Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 1. AISI D2'nin kimyasal kompozisyonu (%) (Chemical composition of AISI D2 %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe
1.55	0.34	0.22	0.018	0.001	11.68	0.73	0.95	Diğer

Tablo 2. AISI D2'nin fiziksel özellikleri (Physical properties of AISI D2)

Yoğunluk	Elastikiyet Modülü	Termal İletkenlik	Özgül Isı
Kg/m ³	MPa	W/m °C	J/kg °C
7.7	210	20	460

Tablo 3. AISI D2 malzemenin standart gösterimleri (Standard definitions of AISI D2 material)

AISI	DIN	ASSAB	JIS	GB
D2	1.2379	8407	SKD 11	Cr12Mo1V1

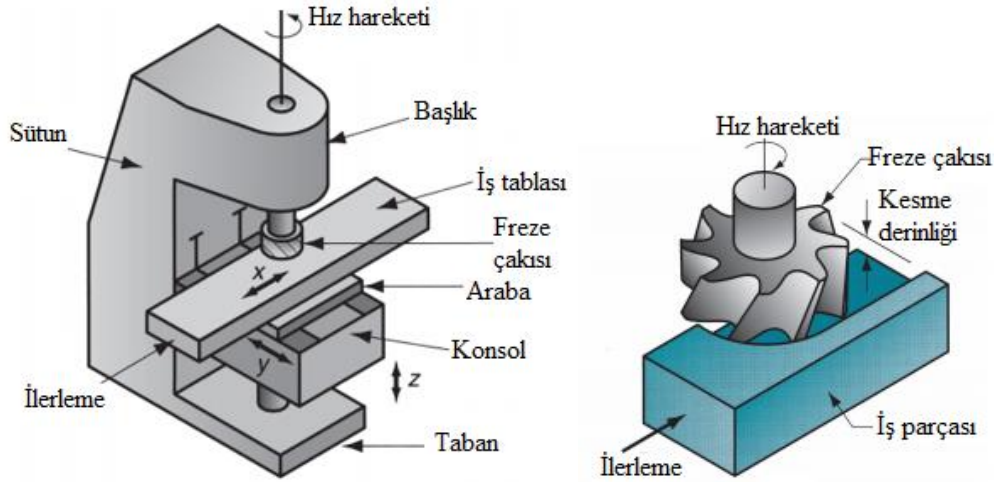
Teknolojinin ve endüstrinin gelişimiyle yüksek verimlilik, güvenlik ve daha az ağırlık gibi özelliklerin ön plana çıkmasıyla, bu takım ve kalıp çeliklerine farklı yüzey işleme çeşitleri uygulanmış ve araştırmalar bu doğrultuda hız kazanmıştır [6, 7].

AISI D2 soğuk iş takım çeliği endüstriyel uygulamalarda geniş bir yer bulmasına rağmen, literatürde frezeleme üzerine yapılan çalışmalar yeteri miktarda bulunmamaktadır. Yapılan bu çalışmada, yüksek aşınma direncine, yüksek tokluğa sahip, kesme ve ezme işlemlerinde yaygın olarak tercih edilen farklı sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezeleme yöntemi ile işlenmesi üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve sonuçları derlenmiştir. Bu çalışma ile AISI D2 malzemenin farklı şartlarda ve takımlarla işlenmesiyle elde edilen veriler derlenerek sanayi uygulamalarına referans olması ve sonuçların bir bütün haline getirilmesi amaçlanmıştır.

2. FREZELEME ÇALIŞMALARI (MILLING STUDIES)

Frezeleme, üzerinde kesici dişler bulunan kesici takımın dönme hareketiyle, iş parçasının bağlı olduğu tablanın X, Y, Z eksenlerinde ilerlemesi sonucunda meydana gelen talaş kaldırma işlemi olarak tanımlanabilir. Frezeleme diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre (tornalama, delme vb.)

kesicideki diş sayısına bağlı olarak işleme kapasitesi yüksek olan bir yöntemdir [8]. Frezeleme işlemlerinde, sütunlu ve konsollu, yataklı tip, planya tip, kopya ve CNC freze tezgahları kullanılmaktadır. Şekil 1a'da dikey bir freze tezgahı kısımları ve iş tablası hareketleri gösterilmiştir. Frezelemede kullanılan kesici takım, freze çakısı olarak bilinir. Freze çakısının her dönüşünde kesici dişler iş parçasına girer ve çıkar. Buna kesintili kesme adı verilmekte olup, kesici dişler her dönüşte bir çarpma kuvveti ve ısıl şok çevrimine maruz kalır. Şekil 1b'de gösterilen alın frezeleme işleminde bu süreç açık bir şekilde görülebilmektedir [9]. Bu nedenle, özellikle takım malzemesi karbür ve seramik olduğunda veya yüksek sertliğe sahip iş parçalarının işlenmesinde, freze çakısı dişleri küçük pozitif veya negatif talaş açısına sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır.



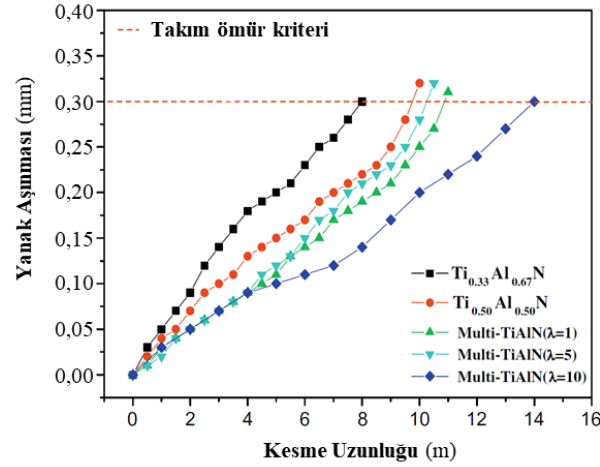
Şekil 1. a) Dikey freze tezgahı, b) Alın frezeleme [9] (a) Vertical milling machine, b) Face milling)

Soğuk iş takım çeliklerinin frezelenmesi üzerine yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Şirin vd., AISI D2 soğuk iş takım çeliğini, kuru işleme şartlarında simetrik yüzey frezeleme yöntemiyle işleyerek, kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerini araştırmışlardır. Ayrıca Taguchi yöntemiyle optimum işleme şartlarını tespit etmişlerdir. Varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrelerin sırasıyla kesme hızı ve ilerleme miktarı olduğunu tespit etmişlerdir. Doğrulama deneyleri yaparak, optimizasyon işleminin başarıyla uygulandığı belirtilmiştir [10].

Koshy vd., sertleştirilmiş AISI D2 (58 HRC) çeliğini ve AISI H13 (52 HRC) yüksek hızda PCBN ve karbür freze takımları ile işleyerek takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak takım aşınmasında sertlik ve mikro yapının etkili olduğu ve PCBN freze takımların karbür freze takımlarına göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Kimyasal yapısından dolayı sertleştirilmiş AISI D2 malzemeyi işlerken kullanılan takım ömrü, AISI H13 malzemeyi işlerken elde edilen takım ömründen daha yüksek çıkmıştır [11].

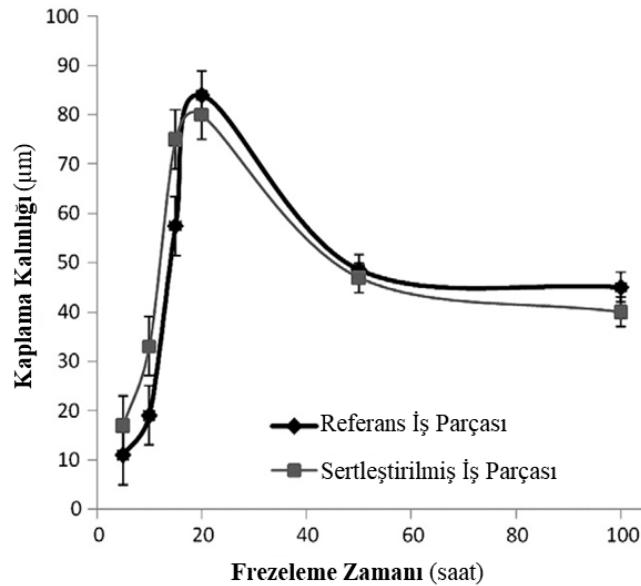
Jeong vd., AISI D2 soğuk iş takım çeliğini beş farklı kaplamaya sahip kesici takımlarla frezelemişlerdir. Sertliği 60 HRC olan AISI D2 malzemeyi 12000 dev/dak ile 0.06 mm/dev ilerleme, 10 mm aksel kesme derinliği ve 0.06 mm radyal kesme derinliği ile kuru kesme şartlarında işlemişlerdir. Elde edilen verilere göre, çok katmanlı TiAlN kaplamalı takımla en iyi takım aşınma değeri (Şekil 2) elde edildiği vurgulanmıştır [12].



Şekil 2. Kesme uzunluğuna bağlı kaplamalı takım yanak aşınması [12] (Coated tool flank wear depending on cutting length)

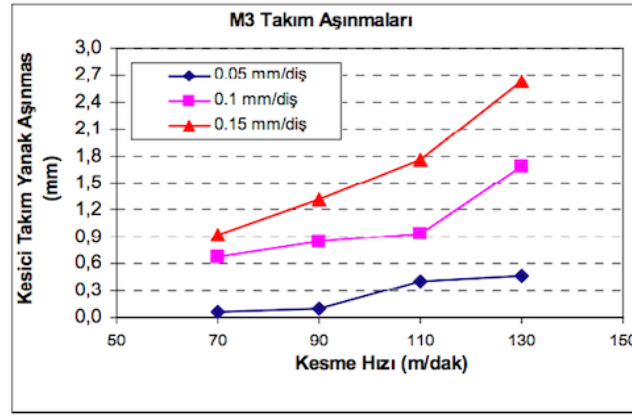
AISI D2 soğuk iş takım çeliği, freze tezgâhında kaplamalı kesici takımlarla işlenerek işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım sehimlerine etkileri incelenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin oluşumuna en etkili parametrenin kesici takım diş başına ilerlemesi, ikinci etken parametrenin ise kesme hızı olduğu tespit edilmiştir. Bunları sırasıyla kesme derinliği, talaş açısı, kesici takım ağız sayısı ve kesici takım çapı izlediği belirtilmiştir [13].

Saba vd., AISI D2 çelik numuneleri üzerinde titanyum karbür (TiC) kaplamalı kesiciler kullanarak, kaplama kalınlığının etkisini belirlemek amacıyla 100 saate kadar frezeleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Frezeleme sırasında TiC kaplamalı kesici takım üzerinde aşınma, yapışma ve kırılmaların olduğu görülmüştür. Kesici takımdaki kaplamaların yapısı X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Çalışma sonunda, kaplamaların yapısal ve morfolojik özelliklerinin işleme süresinden etkilendiği ve alt tabakanın sertliğinin kaplama sertliğini de artırdığını gözlemlenmiştir (Şekil 3) [14].



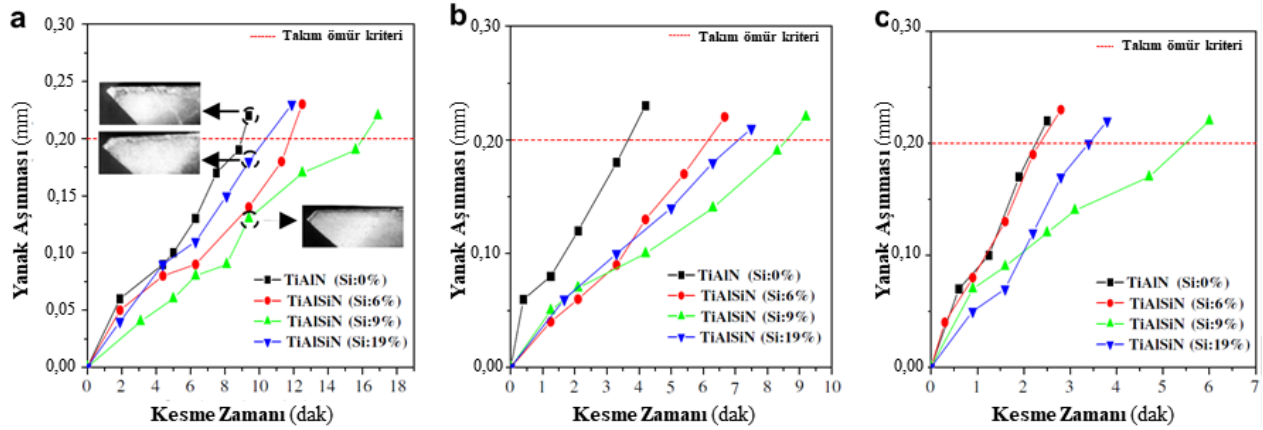
Şekil 3. Normal ve sertleştirilmiş malzemenin işlenmesinde takım kaplama kalınlığına göre frezeleme zamanı değişimi (Milling time variation according to tool coating thickness in machining of the normal and hardened material)

Şirin vd., üç farklı sertlik değerine sahip M1 (21 HRC), M2 (48 HRC) ve M3 (56 HRC) AISI D2 soğuk iş takım çelik malzemeleri, CNC dik işleme merkezinde sementit karbür kaplamalı kesici takımlarla işleyerek işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerleri ve takım aşınmalarına etkilerini incelemiştir. Kesme hızının ve ilerleme değerinin artışıyla kesici takım yanak aşınmasının artış eğilimi gösterdiği belirtilmiştir (Şekil 4) [15].



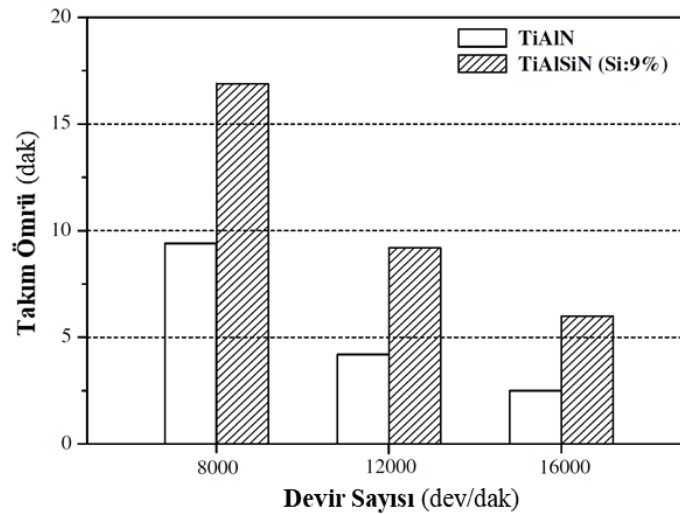
Şekil 4. Sertleştirilmiş AISI D2 malzemenin frezelenmesinde kesme parametrelerine bağlı kesici takım aşınması (Cutting tool wear depending on cutting parameters when milling hardened AISI D2 material)

Jeong vd., sertliği 62 HRC olan AISI D2 çelik malzemeyi Ti-Al-Si-N kaplı kesici takımlarla işleyerek kaplama malzemesinin takım ömrü üzerine etkilerini araştırmışlardır. İşleme parametresi olarak 8000 dev/dak (Şekil 5a), 12000 dev/dak (Şekil 5b) ve 16000 dev/dak (Şekil 5c) olmak üzere 3 farklı devir sayısı kullanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Ti-Al-Si-N kaplı takımın Si içeriğine göre takım aşınma değerleri [16] (Tool wear values according to Si content of Ti-Al-Si-N coated tool)

Şekil 5 incelendiğinde, TiAlSiN (%9) kaplamanın daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır. TiAlN ve TiAlSiN (%9) takımlarla yapılan ömür deneyleri Şekil 6'da verilmiştir.

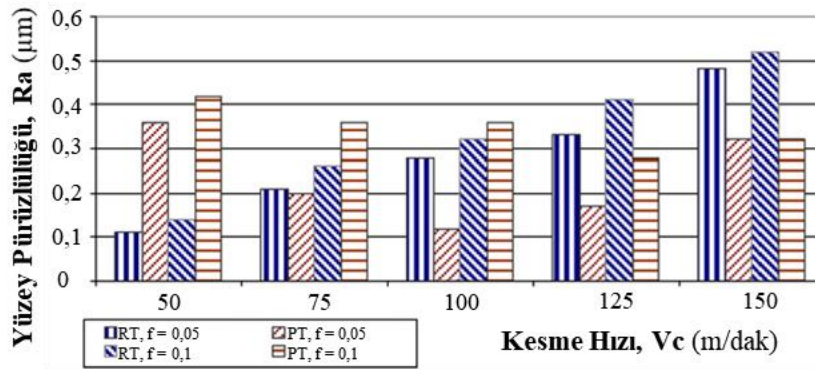


Şekil 6. Si içeriğine göre takım ömrünün karşılaştırılması [16] (Comparison of tool life by Si content)

Şekil 6 incelendiğinde, 16000 dev/dak'da Ti-Al-Si kaplı kesici takım Ti-Al-N kaplamalı kesici takımdan oldukça üstün performans gösterdiği anlaşılmaktadır.

Saedon vd., 62 HRC sertliğe sahip AISI D2 soğuk iş takım çeliğini, mikro frezeleme işlemine tabi tutarak, kesici takım ömrünü optimize etmişlerdir. Mikro frezeleme işleminde deneyler 0.5 mm çaplı TiAlN kesici takımla kuru şartlarda gerçekleştirilmiştir. Takım ömrü için kesme hızı en etkili faktör olurken ilerleme ve kesme derinliği de takım ömrünü etkileyen faktörler arasındadır [17].

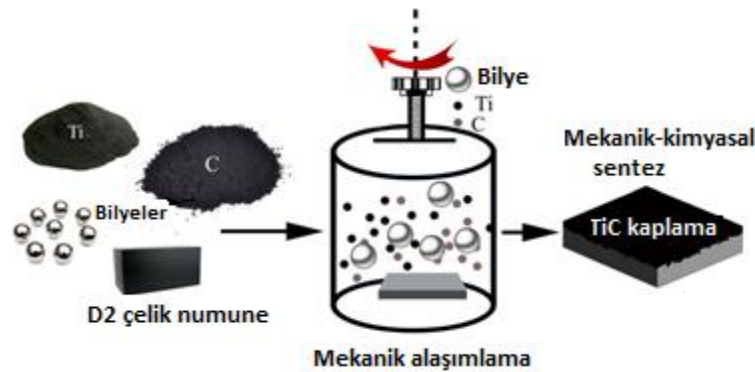
Amin ve arkadaşları sertleştirilmiş AISI D2 soğuk iş takım çeliği malzemeyi PCBN kesici takımla dik işleme merkezinde işleyerek talaş oluşumu, talaş miktarı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından incelemiştir (Şekil 7). Takımda oluşan ana takım aşınma mekanizmaları plastik deformasyon, çentik aşınması ve difüzyon olarak belirlenmiştir. Kesme hızı ve ön ısıtma tekniği yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasında etkili parametreler olmuştur. Oda sıcaklığı, RT ve ön ısıtma PT olarak ifade edilmektedir [18].



Şekil 7. Oda sıcaklığında ve ön ısıtma yapılmış işleme şartlarında yüzey pürüzlülük değerleri [18] (Surface roughness values at room temperature and preheated machining conditions)

Şekil 7 incelendiğinde, kesme hızı arttıkça oda sıcaklığında yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı, ön ısıtmalı işleme şartlarında ise yüzey pürüzlülük değerlerinin düştüğü görülmüştür. İlerleme değerinin artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı görülmüştür.

Saba vd., AISI D2 soğuk iş takım çeliğini bilyeler yardımıyla Ti ve C tozlarıyla mekanokimyasal yöntemle kaplayarak, kaplanmış AISI D2 malzemenin işleme özelliklerini incelemiştir. Kullanılan taşlama bilyeleri 10, 12 ve 14 mm çapında paslanmaz çelik malzemeden imal etmişlerdir. Mekanokimyasal yöntemi Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Mekanokimyasal kaplama yöntemi prosesi [19] (Mechanochemical coating method process)

İşleme sonunda frezeleme zamanına göre mikrosertlik, çizilme sertliği ve yüzey pürüzlülüğü değerleri incelenmiştir. Kaplamalar TiC kaplama tabakası ve TiC-çelik bileşik alt katmanı olarak 2 farklı şekilde yapılandırılmıştır. Bu çalışmada, güçlü alt tabakaya yapıştırılan yoğun ve düzgün bir TiC kaplamasının optimal şartlarda başarılı sonuçlar verdiği iddia edilmiştir. Optimum şartlar, 35 saat frezeleme zamanı, sertleştirilmiş alt tabaka ve 50:1 bilye kütle toz oranı olarak belirlenmiştir [19].

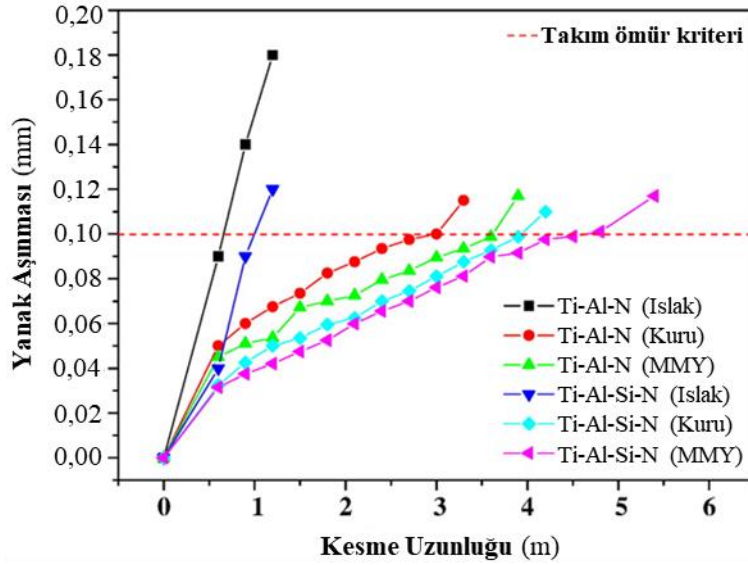
Patel ve Bhavsar, 60 HRC sert AISI D2 soğuk iş takım çeliğini AlCrN kaplamalı kesici takımla frezeleyerek kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini incelemiştir. Kuru şartlarda yapılan deney sonuçlarından kesme kuvveti üzerinde kesme hızının daha etkili olduğunu, yüzey kalitesi

üzerinde ise ilerlemenin daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. İdeal kesme hızı 125 m/dak ve ilerleme değeri 425 mm/dak olarak tespit edilmiştir [20].

Lima vd., 180 HV sertliğe sahip AISI D2 malzemeyi TiN+TiCN kaplamalı kesici takım ile kuru şartlarda frezeleyerek takım talaş arasındaki sıcaklık değerlerini deneysel olarak ve sonlu elemanlar analizi yöntemiyle ölçmüşlerdir. Deney sonuçlarından kesme hızı, ilerleme, aksel ve radyal kesme derinliğinin artmasıyla takım talaş arasındaki sıcaklığın artış gösterdiği tespit edilmiştir [21].

Gaitonde vd., 225 HBN sertliğe sahip AISI D2 soğuk iş takım çelik malzemeyi TiAlN kaplı kesici takım ile frezeleyerek kesme kuvveti, kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini incelemişlerdir. Kuru şartlarda gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre en düşük sıcaklık değeri düşük kesme hızı ve kesme derinliğinde ve orta ilerleme değerinde; en iyi yüzey kalitesi düşük ilerleme ve kesme derinliğinde ve orta kesme hızında elde edilmiştir [22].

Kang vd., 62 HRC sertliğe sahip malzemeyi Ti-Al-N ve Ti-Al-Si-N kaplamalı kesici takım ile işleyerek takım aşınmasını incelemişlerdir. Kesme şartları olarak kuru, ıslak ve Minimum Miktarla Yağlama (MMY) tekniklerini kullanmışlardır. MMY tekniği kullanarak geleneksel yağlama tekniğinin çevreye olumsuz etkilerini azalttığı, çalışmada ayrıca vurgulanmıştır [23]. Şekil 9'da kuru, ıslak ve MMY şartlarında kesici takım ömürleri verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde, kesme uzunluğunun artmasıyla orantılı olarak takım aşınmasının da artış gösterdiği bildirilmiştir. Ti-Al-Si-N kaplamalı kesici takımın ve MMY kesme şartının takım aşınmasını azaltması yönünden iyi performans gösterdiği belirlenmiştir [23].



Şekil 9. Kuru, ıslak ve MMY şartlarında $Ti_{0,75}, Al_{0,25}, N$ ve $Ti_{0,69}, Al_{0,23}, Si_{0,08}, N$ kaplamalı takımın kesme uzunluğuna bağlı yan kenar aşınması [23] (Flank wear depending on the cutting length of $Ti_{0,75}, Al_{0,25}, N$ and $Ti_{0,69}, Al_{0,23}, Si_{0,08}, N$ coated tools under dry, wet and MQL conditions)

Iqbal vd., 62 HRC sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliği malzemeyi kuru ve MMY kesme şartlarında TiAlN kaplamalı kesici takım ile frezeleyerek takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme hızının en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir [24].

Ravi ve Gurusamy, 60 HRC sertliğe sahip AISI D2 soğuk iş takım çeliği malzemeyi TiN ve TiAlN kaplı kesici takım ile kuru, ıslak ve kriyojenik (LN_2) kesme şartları altında frezelemişlerdir. LN_2 soğutma şartları altında, TiAlN kaplı takım ile frezelenmesi sonucunda, TiN kaplamalı takıma göre kesme sıcaklığında %18, kesme kuvvetlerinde %13 oranında azalma olduğu belirlenmiştir [25].

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesi üzerine yapılan çalışmalar derlenmiştir. Frezeleme diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre (tornalama, delme vb.) kesicideki diş sayısına bağlı olarak işleme kabiliyeti yüksek bir prosestir. Kesici takım talaş kaldırma esnasında iş parçasını aralıklı olarak kavradığından,

frezeleme yönteminde parametrelerin optimize edilmesi ve dikkate alınması önemlidir. Bu derleme çalışmasıyla, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin, farklı sertlik, soğutma şartı ve kesici takımlar ile frezelenmesi esnasında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Araştırmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 4'te özet olarak verilmiştir.

Tablo 4. AISI D2 malzemenin frezelenmesi üzerine araştırmaların özeti (Summary of researches on milling of AISI D2 material)

Yazar/lar Yıl	Kesme Şartları	Kesici Takım	Kesme Parametreleri	Sonuç
Şirin vd. [10] (2015)	Kuru	ADMT 120408R- F56 kodlu, WSP45	V=70-90-110 m/dak f=0.05-0.10-0.15 mm/dev Kesme derinliği=0.5 mm	ANOVA sonuçlarına göre; yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrelerin sırasıyla kesme hızı ve ilerleme miktarı olduğu tespit edilmiştir.
Koshy vd. [11] (2002)	Kuru	PCBN takım	V=50-100-150-200 m/dak f=0.05-0.10 mm/dış Kesme derinliği=1 mm	Takım aşınmasında sertlik ve mikro yapının etkili olduğu ve PCBN freze takımların karbür freze takımlarına göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.
Jeong vd. [12] (2009)	Kuru	Çok katmanlı TiAlN kaplı takım	N=12000 dev/dak f=0.05-0.10 mm/dış Kesme derinliği=0.06 mm (radyal), 10 mm (eksenel)	Çok katmanlı TiAlN kaplamalı takımla en iyi işleme değerleri elde edilmiştir.
Bakır vd. [13] (2012)	Kuru	Ti (C, N) + (Ti, Al)N + Ti 3 katman kaplamalı kesici	V=120-150-180 m/dak f=0.025-0.050-0.075 mm/dış Kesme derinliği=1.5-2- 2.5 mm	Ortalama yüzey pürüzlülüğünün oluşumunda en etkili parametrenin dış başına ilerleme, ikinci etken parametrenin ise kesme hızı olduğunu tespit etmişlerdir.
Saba vd. [14] (2013)	Kuru	TiC kaplamalı bilye	N=300 dev/dak 20:1 toz/ağırlık oranı	Kaplamaların yapısal ve morfolojik özelliklerinin işleme süresinden etkilendiği ve alt tabakanın sertliğinin kaplama sertliğini artırdığını gözlemlemişlerdir.
Şirin vd. [15] (2012)	Kuru	PVD yöntemiyle TiAl+Al ₂ O ₃ +ZrN kaplı karbür kesici takım	V=70-90-110-130 m/dak f=0.05-0.1-0.15 mm/dış Kesme derinliği=0.5 mm	Kesme hızının ve ilerleme değerinin artışıyla kesici takımdaki aşınmanın da arttığını gözlemlemişlerdir.
Jeong vd. [16] (2009)	Kuru	Ti-Al-Si-N kaplı kesici takım	N=8000-12000-16000 dev/dak, f=0.05 mm/dış Kesme derinliği=0.06 mm (radyal), 10 mm (eksenel)	Ti-Al-Si kaplamalı takım, Ti-Al-N kaplamalı takıma göre oldukça üstün performans göstermiştir.
Saedon vd. [17] (2012)	Kuru	TiAlN kaplı kesici takım	V=14-20-32-50-68 m/dak f=0.78-1-1.42-2 mm/dış	Takım ömrü için kesme hızı en etkili faktör olurken ilerleme ve kesme derinliğinin takım ömrünü etkileyen diğer faktörlerden olduğu tespit edilmiştir.

Amin vd. [18] (2008)	Kuru, Oda sıcaklığında ve ön ısıtmalı	PCBN takım	V=50-75-100-125-150 m/dak f=0.05-0.1 mm/diş Kesme derinliği=1 mm	Kesme hızı arttıkça oda sıcaklığında yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı, ön ısıtmalı işleme şartında yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmüştür.
Saba vd. [19] (2016)	Kuru	TiC kaplamalı bilye	N=300 dev/dak toz/ağırlık oranı 30:1-40:1-50:1 Frezeleme zamanı :20-35-50 saat	Uygun şartlar; 35 saat frezeleme zamanı sertleştirilmiş alt tabaka ve 50:1 bilye kütle toz oranı olarak belirlenmiştir.
Patel ve Bhavsar [20] (2020)	Kuru	AlCrN kaplamalı takım	V=50-200 m/dak f=50-800 mm/min Kesme derinliği=0.06 mm, kesme genişliği 2-10 mm	İdeal kesme hızının 125 m/dak ve ilerleme değerinin 425 mm/dak olduğu tespit edilmiştir.
Lima vd. [21] (2018)	Kuru	TiN+TiCN kaplamalı takım	V=60-90-180 m/dak f=0.05-0.01-0.015 mm/dev Kesme derinliği: 12.5-25 mm (radyal), 1-2 mm (eksenel)	Kesme hızı, ilerleme, ekstenel ve radyal kesme derinliğinin artmasıyla takım talaş arasındaki sıcaklığın arttığı görülmüştür.
Gaitonde vd. [22] (2016)	Kuru	TiAlN kaplamalı takım	V=90-135-180 m/dak f=0.1-0.2-0.3 mm/dev Kesme derinliği: 4-8-12 mm	En düşük sıcaklık değeri 90 m/dak kesme hızı ve 4 mm kesme derinliği ve 0.2 mm/dev ilerlemede; en iyi yüzey kalitesi 0.1mm/dev ilerleme ve 4 mm kesme derinliği ve 135 m/dak kesme hızında elde edilmiştir.
Kang vd. [23] (2008)	Kuru-Isalak- Minimum Miktarda Yağlama	Ti-Al-N ve Ti-Al-Si-N kaplamalı takım	N=12.000 dev/dak f=0.01 mm/diş Kesme derinliği: 0.02 mm (radyal), 2 mm (eksenel)	Ti-Al-Si-N kaplamalı kesici takımın ve MMY tekniğinin takım aşınmasını azaltması yönünden iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.
Iqbal vd. [24] (2011)	Kuru, MMY	TiAlN kaplamalı takım	V=175-275 m/dak f=0.08-0.12 mm/dev Kesme derinliği: 0.15-0.4 mm	Deney sonuçlarından takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkili parametrenin kesme hızı olduğu belirlenmiştir.
Ravi ve Gurusamy [25] (2020)	Kuru, MMY, Kriyojenik	TiN, TiAlN kaplamalı takım	V=75-100-125 m/dak f=0.02 mm/dev Kesme derinliği: 0.5 mm	LN ₂ soğutma şartında, TiAlN kaplı takımla işlemede TiN kaplamalı takıma göre kesme sıcaklığında %18, kesme kuvvetlerinde %13 azalma görülmüştür.

Bu çalışma ile AISI D2 malzemenin frezelenmesi esnasında tercih edilecek kesici takım, işleme şartları vb. parametrelerin belirlenmesinde referans olunması amaçlanmıştır. AISI D2 takım çeliğinin frezelenmesi üzerine yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. 58 HRc sertlikteki AISI D2'nin frezelenmesinde PCBN kesici takımlar, karbür kaplı kesici takımlara göre daha iyi performans göstermiştir.
2. 60 HRc sertlikteki AISI D2'nin kuru şartlarda frezelenmesinde çok katmanlı TiAlN kaplamalı takımlar daha iyi performans göstermiştir.

3. Genel olarak, AISI D2'nin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkili parametrelerin sırasıyla, diş başına ilerleme, kesme hızı, kesme derinliği, talaş açısı, kesici takım sayısı ve takım çapı olduğu bildirilmiştir.
4. AISI D2'nin TiC takımlarla frezelenmesinde kesici takım kaplama kalınlığının değişimiyle frezeleme zamanının da değiştiği bildirilmiştir. Ortalama 50 µm kaplama kalınlığına sahip TiC takımlarla daha uzun frezeleme sürelerine ulaşıldığı belirlenmiştir.
5. Ticari (21 HRc) ve farklı sürelerde sertleştirilmiş (48 ve 56 HRc) AISI D2'nin kuru şartlarda frezelenmesinde kesme hızı ve ilerlemenin artmasıyla, takım yanak aşınmasında artışın olduğu bildirilmiştir.
6. 62 HRc sertlikteki AISI D2'nin frezelenmesinde Ti-Al-Si-N (Si %9) kaplamalı takımın TiAlN kaplamalı takıma göre tüm kesme parametrelerinde daha uzun ömürlü olduğu ifade edilmiştir.
7. 62 HRc sertlikteki AISI D2'nin frezelenmesinde takım ömrü üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği olduğu ifade edilmiştir.
8. Ticari AISI D2'nin TiN+TiCN kaplamalı kesici takımlarla frezelenmesinde takım/talaş arasındaki sıcaklık üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla kesme hızı, ilerleme, eksenel ve radyal kesme derinliği olduğu belirtilmiştir.
9. 62 HRc sertlikteki AISI D2'nin Ti-Al-Si-N kaplamalı kesici takımla frezelenmesinde MMY kesme şartının kuru, ıslak kesme şartlarına göre takım aşınmasını azaltmada daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir.
10. 62 HRc sertlikteki AISI D2'nin TiAlN kaplı takımlarla frezelenmesinde LN₂ kesme şartının kuru ve ıslak kesme şartına göre daha iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. T.V. Pirtovšek, G. Kugler, M. Terčelj, The behaviour of the carbides of ledeburitic AISI D2 tool steel during multiple hot deformation cycles, *Materials characterization*, 83: 97-108, 2013.
2. M. Tisza, Z. Lukács, G. Gál, Integrated process simulation and die-design in sheet metal forming, *International Journal of Material Forming*, 1(1): 185-188, 2008.
3. M.D. Conci, A.C. Bozzi, A.R. Franco Jr, Effect of plasma nitriding potential on tribological behaviour of AISI D2 cold-worked tool steel, *Wear*, 317(1-2): 188-193, 2014.
4. C.K.N. Oliveira, L.C. Casteletti, A.L. Neto, G.E. Totten, S.C. Heck, Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel, *Vacuum*, 84(6): 792-796, 2010.
5. E. Şirin, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezede işlenebilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2010.
6. K.T. Cho, K. Song, S.H. Oh, Y.K. Lee, W.B. Lee, Enhanced surface hardening of AISI D2 steel by atomic attrition during ion nitriding, *Surface and Coatings Technology*, 251: 115-121, 2014.
7. P. Hein, J. Wilsius, Status and innovation trends in hot stamping of USIBOR 1500 P, *Steel Research International*, 79(2): 85-91, 2008.
8. Ç.V. Yıldırım, Waspaloy süper alaşımının farklı soğutma teknikleri kullanarak frezeleme yöntemi ile işlenebilirliğinin incelenmesi, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye, 2017.
9. M.P. Groover, *Principles of Modern Manufacturing*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
10. E. Şirin, Y. Turgut, İ. Korkut, Ş. Şirin, Frezelemede farklı sertlikteki AISI d2 soğuk iş takım çeliğinin taguchi metoduyla yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, 132-144, 2015.
11. P. Koshy, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~ 58 HRC), *Journal of Materials Processing Technology*, 127(2): 266-273, 2002.
12. Y.G. Jeong, M.C. Kang, J.S. Kim, K.H. Kim, W.G. Kim, I.D. Park, Y.H. Jun, Mechanical behavior and cutting performance of nano-multi-layer TiAlN-xN coated tools for high-speed machining of AISI D2 die steel, *Current Applied Physics*, 9(3): 272-275, 2009.
13. B. Bakir, M. Kurt, G. Basmacı, O. Girit, Frezelemede kesici takım çapı, ağız sayısı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sehimlerine etkileri, 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir-Türkiye, 138, 2012.
14. F. Saba, S. Raygan, H. Abdizadeh, A. Dolatmoradi, Preparing TiC coating on AISI D2 steel using mechanical milling technique, *Powder technology*, 246: 229-234, 2013.

- 15.E. Şirin, Y. Turgut, İ. Korkut, Farklı sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisi, Politeknik Dergisi, 15(1): 9-14, 2012.
- 16.Y.K. Jeong, M.C. Kang, S.H. Kwon, K.H. Kim, H.G. Kim, J.S. Kim, Tool life of nanocomposite Ti–Al–Si–N coated end-mill by hybrid coating system in high speed machining of hardened AISI D2 steel, Current Applied Physics, 9(1): 141-144, 2009.
- 17.J.B. Saedon, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, A. Barnacle, N. H. Saad, Prediction and optimization of tool life in micromilling AISI D2 (~62 HRC) hardened steel, Procedia Engineering, 41: 1674-1683, 2012.
- 18.A.N. Amin, S.B. Dolah, M.B. Mahmud, M.A. Lajis, Effects of workpiece preheating on surface roughness, chatter and tool performance during end milling of hardened steel D2, Journal of Materials Processing Technology, 201(1-3): 466-470, 2008.
- 19.F. Saba, E. Kabiri, J.V. Khaki, M.H. Sabzevar, Fabrication of nanocrystalline TiC coating on AISI D2 steel substrate via high-energy mechanical alloying of Ti and C, Powder Technology, 288: 76-86, 2016.
- 20.R.D. Patel, S.N. Bhavsar, Experimental investigation during end milling of AISI D2 tool steel using AlCrN coated tool, Materials Today: Proceedings, 22: 2647-2656, 2020.
- 21.H.V. Lima, A.F. Campidelli, A.A. Maia, A.M. Abrão, Temperature assessment when milling AISI D2 cold work die steel using tool-chip thermocouple, implanted thermocouple and finite element simulation, Applied Thermal Engineering, 143: 532-541, 2018.
- 22.V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, C.H.A. Maciel, J.C.C. Rubio, A.M. Abrão, Machinability evaluation in hard milling of AISI D2 steel, Materials Research, 19(2): 360-369, 2016.
- 23.M.C. Kang, K.H. Kim, S.H. Shin, S.H. Jang, J.H. Park, C. Kim, Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISI D2 cold-worked die steel (62 HRC) by coated carbide tools, Surface and Coatings Technology, 202(22-23): 5621-5624, 2008.
- 24.A. Iqbal, N. He, L. Li, Empirical modeling the effects of cutting parameters in high-speed end milling of hardened AISI D2 under MQL environment, In Proceedings of the World Congress on Engineering, London, UK , 6-8, 2011.
- 25.S. Ravi, P. Gurusamy, Experimental investigations on performance of TiN and TiAlN coated tools in cryogenic milling of AISI D2 hardened steel. Materials Today: Proceedings, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.664>

HEA 240 Profilinin Sıcak Haddelenmesinde Deneysel ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Gazi KURT¹, Nafiz YAŞAR^{2*}

¹ Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, Türkiye

² Karabük Üniversitesi, Yenice Meslek Yüksekokulu, Karabük, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 12.07.2020

Kabul: 13.08.2020

Anahtar Kelimeler:

Haddelenme

HEA 240

FE analizi

ÖZET

Sıcak haddelenme, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı olan 0.5 Tm üzeri sıcaklıklarda olması nedeniyle farklı adımlarda peş peşe şekillendirebilme olanağı sağlamakta ve büyük deformasyon oranlarıyla şekil değiştirme imkânı vermektedir. Endüstride, Doğrudan gerçekleştirilen uygulamalar zaman ve maliyet açısından olumsuzluklar göstermektedir. Deneyerek pratikleştirme süreçleri bazı simetrik profil kesitli ürünlerde kısa sürelerde tamamlanabildiği gibi bazı asimetrik profil kesitli ürünlerde ise uzun süreler alabilmektedir. Tasarlanan kalibrelerin haddehanede denenmeden önce bilgisayar ortamında simülasyonu yapılarak ne gibi sonuçlar çıkacağı tahmin edilebilmek için Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) uygulanabilir. Bu çalışma kapsamında öncelikli olarak S 275 JR (EN 10025) kalitede beam blank (profil taslağı) yarı mamulün haddelenmesi ile 21 pasoda oluşacak HEA 240 yapı profilinin ilk 3 pasoluk kaba haddesi sonunda elde edilen gerçek üretim parametreleri ile aynı yarı mamulün 3D FEM analizi sonuçlarının uyumluluğu karşılaştırılmış olup %95 ila %99.1 oranında geometrik benzerlik bulunmuştur. Kabul edilebilir küçük farkların olduğu bu simülasyonun, üretim proseslerinde oluşan kayıpları minimize etme ve verimli üretim hedeflerine ulaşmada önemli bir etkiye sahip olduğunu söylemek mümkündür.

Comparison of Experimental and Simulation Results for Hot Rolling of HEA 240 Profile

ARTICLE INFO

Received: 12.07.2020

Accepted: 13.08.2020

Keywords:

Rolling

HEA 240

FE analysis

ABSTRACT

Hot rolling allows the material to be shaped in successive steps in different steps since the material is at a temperature above 0.5 Tm which is the recrystallization temperature and gives the possibility of deformation with large deformation rates. In the industry, direct applications show negative effects on time and cost. Practical processes by experimenting can be completed in short periods in some symmetrical profile section products and long periods in some asymmetric profile section products. Finite element method (FEM) can be applied in order to predict the results obtained by simulating the designed calibrations in the computer environment before testing in the rolling mill. In this study, the production of HEA 240 profile in S275JR quality is experimentally made in 21 passes and the geometric dimensions of the first three passes of this structure was compared with 3D FEM analysis results. The comparison results are compatible and high similarity ratio as 95-99.1% was found. It is possible to say that this simulation, which has small acceptable differences, has a significant effect on minimizing losses in production processes and achieving production targets.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde küresel rekabet, firmaları ürettikleri ürünü daha kaliteli ve daha düşük maliyetle nasıl üretebileceklerini bulmaya zorlamaktadır. Simülasyon, gerçek dünya süreçlerinin taklit edilmesi (benzetimi) olarak tanımlanır, alternatif şartların ve davranış şekillerinin gerçek etkilerini göstermek için kullanılabilir. Ayrıca ulaşılamayan, erişilemeyen, tehlikeli olan, çalıştırılması mümkün olmayan veya tasarım aşamasında olup henüz inşa edilmemiş ya da hiç mevcut olmayan sistemlerinde simülasyonu yapılabilir [1,2]. Genellikle simülasyon yapmanın temel nedeni düşük maliyettir.

* Sorumlu yazar, e-posta: nafizyasar@karabuk.edu.tr

Simülasyon sayesinde yapılacak bir işin doğru olup olmadığını oldukça hızlı ve ucuz bir şekilde anlamak mümkündür. Bu sayede yüksek maliyet ve zaman kaybı olmadan denemelerin yapılmasına fırsat tanıyacaktır. Ayrıca mevcut üretim süreçlerinin hızının artırılmasına ve ürün kalitesine olumlu katkıda bulunacaktır.

Haddeleme, birbirine zıt yönde dönen iki merdane arasında sürtünme kuvveti etkisiyle haddelenecek metal malzemenin çekilerek, hadde boşluğundan geçirilip istenilen şeklin elde edildiği bir plastik şekil verme yöntemidir [3,4]. Haddeleme yöntemi, şekillendirme işlem sıcaklığına bağlı olarak, soğuk haddeleme ve sıcak haddeleme olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Sıcak haddeleme, mamul veya yarı mamul dökme ürünlerin üretimi için en önemli endüstriyel proseslerden biridir [5-7].

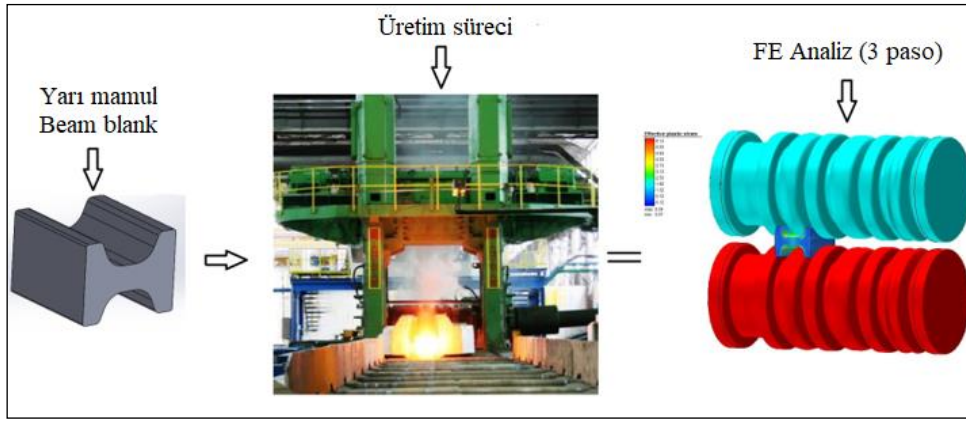
Hanoğlu ve ark. [8], FEM kullanarak asimetrik kesitli bir profilin haddelenmesinin analizi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında haddeleme yönüne dik yönde belirli sayıda dilimleme modeli kullanarak elde ettikleri sonuçların, analiz ettikleri asimetrik kesitli profilin gerçek üretim sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğunu tespit etmişlerdir. Nalawade ve ark. [9], FEM tabanlı FORGE yazılımını kullanarak, mikro alaşımlı 38MnVS6 kalite çelik blumun termo-mekanik haddelenmesinin simülasyonunu yapmışlardır. Haddeleme parametrelerinin deformasyon davranışı üzerine etkilerini incelemişler ve haddeleme yükü, tork, sıcaklık dağılımı, gerilme dağılımı, tane büyüklüğü ve haddeleme aşamasındaki yapı fazı tahminlerini deneysel olarak doğrulamışlardır. Milenin ve ark. [10], iki pasolu oval yuvarlak haddeleme ile 6 pasolu eşit kenar olmayan köşebent haddeleme analizi yapmışlardır. Dislokasyon teorisine dayanan bir model üzerinden yaptıkları çalışmada FE tabanlı SortRoll bilgisayar yazılımını kullanmışlar ve her bir pasodaki malzeme akışlarının analizini yaparak gerçek değerler ile uyum halinde olduğunu açıklamışlardır. Xiong Shangwu ve arkadaşları [11], sıcak şerit profil haddelemede dikey-yatay haddeleme prosesinin simülasyonunu yapmak için üç boyutlu rijit-plastik Sonlu Elemanlar Yöntemiyle (FEM) ile termal kuplaj analizi yapmışlardır. Oluşturdukları teorik modelin sonuçları ile deneysel veriler arasında kabul edilebilir küçük farklar olduğunu bulmuşlardır. Shahani ve arkadaşları [12], AA5083 alüminyum alaşımının sıcak haddeleme prosesinde FEM kullanarak termomekanik analizini odaklamışlardır. Prosesin analizlerinde merdane ve kütükteki sıcaklık dağılımı, gerilim, uzama ve uzama oranı alanlarını çıkararak sistemin matematiksel ve geometrik modelini oluşturarak haddeleme prosesini niteleyen ana değişkenleri bir parametrik bir formda ifade etmişlerdir. Iankov, tel haddeleme prosesini iki ve üç boyutlu olarak simüle etmiştir. Simülasyon sonuçlarının deneysel veriler ile karşılaştırmasını yapmıştır [10].

Bu çalışma, 280x360 mm ölçü ve S 275 JR kaliteye sahip beam blank (profil taslağı) yarı mamulün kaba haddelenmesi (3 paso) ile oluşacak HEA 240 yapı profilinin numune üretim sonuçları aynı parametre ve yarı mamul ile 3D FE analizi kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını içermektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

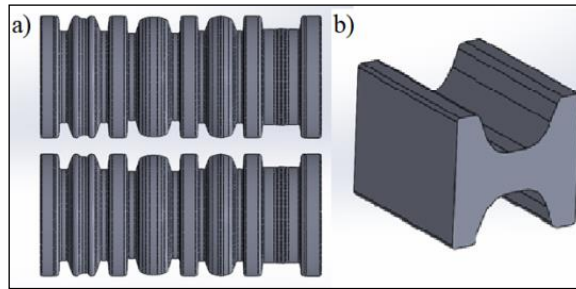
Bu çalışma 3D Finite Element (FE) analizi içermektedir. Gerçek üretim ile 21 pasoda elde edilen HEA 240 profilin ilk 3 pasosunun FE analizi yapılmış ve gerçek üretimden alınan numune sonuçları ile simülasyonun doğruluğu ispatlanmıştır. Şekil 1, çalışmada izlenen yöntemi şematik olarak göstermektedir.



Şekil 1. Şematik diyagram (Schematic diagram)

2.2. Malzeme ve Ekipman (Material and Equipment)

HEA 240 profil üretiminde yarı mamul olarak S275JR kalite profil taslağı (Beam Blank) kullanılmıştır. 1200 °C ye tavlanan profil taslağının, alaşımlı çelik merdanelerin kullanıldığı reversible hadde tezgahında, 3 pasuluk kaba haddeleme işleminden sonra numune alınmıştır. Üretimde kullanılan merdane seti ve yarı mamul Şekil 2’de gösterilmektedir. Yarı mamulün malzeme özellikleri Tablo 1-3’te verilmiştir.



Şekil 2. 3 pasuluk kaba haddeleme, a- merdane, b- yarı mamul (3-pass rough rolling process, a-roll, b- beam blank)

Tablo 1. S275JR yarı mamul için kimyasal bileşim (Chemical composition for grade S275JR) [13]

Kısa Gösteriliş	Anma Mamul Kalınlığı (mm) için %C (en çok)	% Mn (en çok)	% P (en çok)	% S (en çok)	% N (en çok)			
						≤ 16	> 16.40 ≤	> 40
TS EN 10025-2	DIN 17100							
S275JR	St44-2	0.21	0.21	0.22	1.5	0.035	0.035	0.012

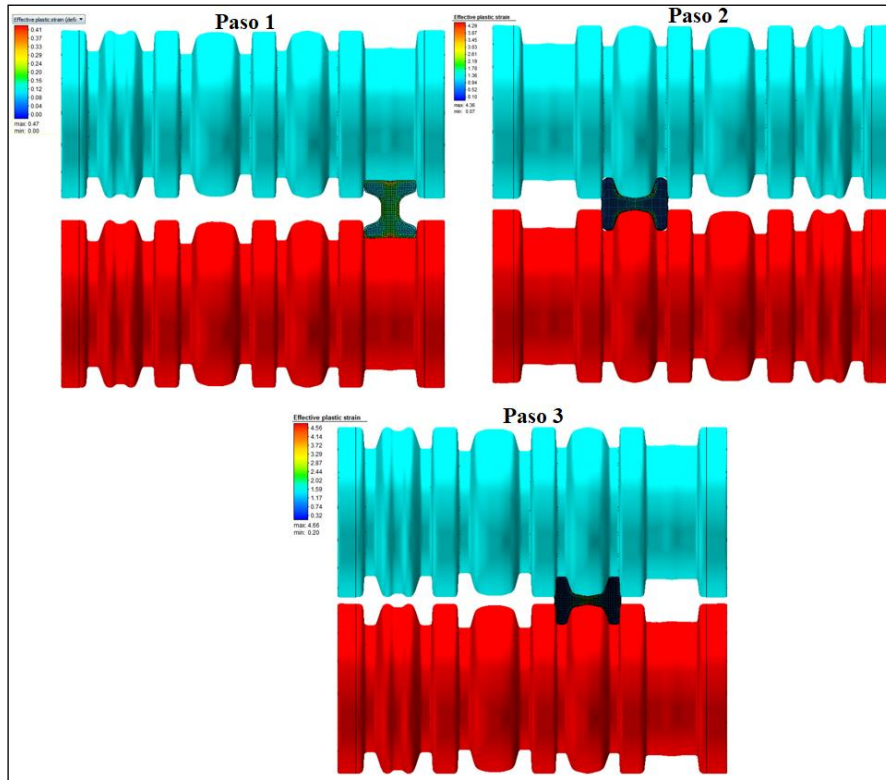
Tablo 2. S275JR çeliğinin ortam sıcaklığında mekanik özellikleri (Mechanical properties of grade S275JR steel at ambient temperature) [13]

TS EN	DIN	Asgari Akma Dayanımı, MPa								Çekme Dayanımı, MPa				
		Anma Kalınlığı, mm								Anma Kalınlığı, mm				
		≤1	>1 < 4	>4 < 6	>6 < 8	>8 < 10	>10 < 15	>15 < 20	>20 < 25	>25	<3	≥3	>100	>150
10025-2	17100	6	6	0	3	≤10	0	0	0	0	≤100	≤150	≤250	≤40
	0	6	≤4	≤6	≤8	0	≤15	≤20	≤25	≤40				0
		0	0	3	0	0	0	0	0	0				0
S275JR	St44-2	27	26	25	25	235	225	215	205	-	430-580	410-560	400-540	380-540
	2	5	5	5	5									-

Tablo 3. Yarı mamul için malzeme parametreleri (Material parameters for beam blank) [14,15]

Malzeme	Yoğunluk (kg/dm ³)	Poisson Oranı	Elastikiyet Modülü (MPa)	Termal İletkenlik (W/m.K)	Özgül Isı (J/kg°K)	Termal Uzama (10 ⁻⁶ °K ⁻¹)
Alaşimsız yapı çeliği	7.85	0.3	210	48-58	490	12

Çalışmada, simülasyonlar için ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan Simufact Forming programı kullanılmıştır. 3D FE analizlerinde; Profil taslağından (Beam Blank) üretimi yapılan HEA 240 ürününün ilk 3 pasosunun kaba haddeleme simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te HEA 240 profil için yapılan simülasyonların dizilimleri gösterilmiştir.



Şekil 3. FE simülasyonunun şematik gösterimi (Schematic view of FE simulation)

Analizlerde kullanılan düzener, alt ve üst merdane, beam blank ve kütük, itici ve tutucu geometrilerinden oluşmaktadır. Merdane, beam blank ve kütük geometrileri katı model olarak CAD programında oluşturulduktan sonra analiz için programa import edilerek analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan merdaneler ısı iletimsiz ve rijit kalıp olarak tanımlanmıştır. Analizlerde beam blank ve kütüğün malzeme kalitesi olarak program kütüphanesinde bulunan St44-3_h kalitesi seçilmiştir. Analizlerde 1200 °C'de Heating prosesi uygulanmış olup 1. paso için bu prosten elde edilen geometriler kullanılmıştır. Diğer pasolarda ise her biri için bir önceki paso sonucu oluşan geometriler kullanılmıştır.

Analizlerde mesh tipi olarak Hexahedral seçilmiş olup her bir pasoda kullanılan eleman boyutu Tablo 4'te verilmiştir. Analiz çalışması ev tipi kişisel bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, eleman boyutunun belirlenmesinde analiz süreci ve analiz sonucu elde edilen yüzey kalitesi etkili olmuştur. Çok küçük eleman boyutlarında analiz sürecinin uzaması, çok büyük eleman boyutlarında ise yüzey hassasiyetinin azaldığı çeşitli denemelerde görülmüştür.

Analizlerde, pres türü olarak Tabular Motion seçilmiştir. Ayrıca zamana bağlı olarak merdane dönme devri tanımlanmıştır. HEA 240 ve IPE 140 profilinin simülasyonlarında kullanılan bazı parametreler Tablo 4'te verilmiştir. Ayrıca, analizlerde mesh eleman boyutuna bağlı olarak step sayısı belirlenmiş olup her bir paso için step sayıları da verilmiştir.

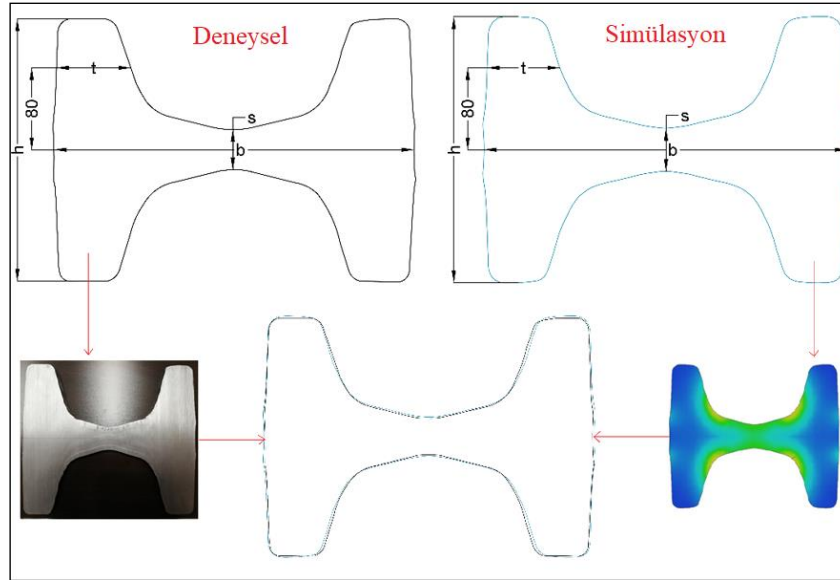
Tablo 4. Analizde kullanılan parametreler (Parameters used in analysis)

	HEA 240		
	Paso 1	Paso 2	Paso 3
Mesh (mm)	8	5	4
Dönme (dev/dak)	66	47	70
Süre (saniye)	0.35	0.5	0.4
Adım	330	670	1000

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

HEA 240 profilin 3. Paso analiz sonucuna göre elde edilen kesit geometrisi ve numunenin kesit geometrisi Şekil 5'te gösterilmiştir. Ölçüler kesit geometrisinin temel ölçüleri olup değerler ise Tablo 5'te verilmiştir.

Simülasyon sonucu elde edilen geometri ve ölçüler, gerçek üretim sonucu alınan numunedeki geometri ve ölçülere %95 ile %99.1 aralığında benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik, simülasyon sonuçları ile gerçek üretim verilerini tahmin edebilme imkanının olduğunu göstermektedir. Mesh eleman boyutunun azaltılarak yapılacak daha hassas analizlerde her iki kesit arasındaki ölçü farklılıklarının, örneğin s ve t ile belirtilen ölçülerde daha da azalacağı düşünülebilir.



Şekil 5. HEA 240 için deneysel ve simülasyon sonuçların karşılaştırılması (Comparison between experimental and simulation results for HEA240)

Tablo 6'da ise üretim esnasında hadde verisi olarak alınan haddeleme kuvvetleri ile analiz sonucu elde edilen haddeleme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Haddeleme kuvvetleri arasındaki fark, %10 ile %23 arasında değişmektedir. Gerçek üretim şartlarının tespitinin daha sağlıklı yapılması ile (sürtünme katsayısı, malzemenin haddeleme sıcaklığı vb.) aradaki bu farkın daha da azalacağı düşünülmelidir. Yine de %10.3 ile %17.1 lik fark sıcak haddeleme proseslerinde belirli bir ölçüde kabul edilebilir. Çünkü, deneysel üretimde üst ve alt merdanelerin dönmesi ile ileriye doğru hareket ederken, simülasyonlarda belirli bir yönde verilen itme kuvveti ile hareket elde edilmektedir. Bu durumun kuvvet sapmalarında etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, imalat yönteminin kaba haddeleme durumunda bu farkı etkileyebileceği söylenebilir.

Tablo 5. HEA 240 için deneysel ve simülasyon sonuçları (Experimental and simulation results for HEA240)

Sembol	Ölçü (mm)		% Fark
	Deneysel	Simülasyon	
h	256	260	1.6
b	352	355	0.9
s	40	42	5.0
t	73	71	2.7
Alan (mm²)	49485	50033	1.1

Tablo 6. HEA 240 için deneysel veri ve simülasyondan elde edilen haddeleme kuvveti değerleri (Rolling force values for HEA 240 calculated from experimental data and obtained from simulation)

	Paso 1		Paso 2		Paso 3	
	Deneysel	Simülasyon	Deneysel	Simülasyon	Deneysel	Simülasyon
Kuvvet (kN)	1450	1300	3000	3500	3500	4100
% Fark	10.3		16.6		17.1	

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada gerçek üretimi yapılmış bir yapı çeliğinin (HEA 240) ilk 3 pasosunun analizi yapılarak, üretim tesisinden alınan numune ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Kesit geometrileri karşılaştırıldığında, analiz sonucu elde edilen geometrik şekil ve ölçüler ile üretim tesisinden alınan numunenin şekil ve ölçüleri yüksek oranda benzerlik (%95-99.1) elde edilmiştir.
- Haddeleme kuvvetleri karşılaştırıldığında gerçek üretim verileri ile simülasyon arasında %82.1 - %89.7 benzerlik elde edilmiştir. Bu sonuçlar hem analitik hesaplamalarda hemde simülasyon parametrelerinde yapılacak iyileştirmelerle daha da geliştirilebilir.
- Genel olarak gerçek üretim verileri ile simülasyon sonucu elde edilen veriler incelendiğinde geometrik şekil hassasiyeti yüksek oranda yakalanmaktadır. Haddeleme kuvveti verilerinde ise bazı farklılıklar olmasına rağmen belirli bir ölçüde tatmin edici ve referans sayılabilir değerler elde edilmektedir. Bu durum simülasyon analizlerinin haddeleme prosesine uygulanabilirliğinin açık göstergesidir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. J. Banks, J. Carson, B. Nelson, D. Nicol, Discrete-event system simulation, Prentice Hall, US, 3 2001.
2. J.A. Sokolowski, C.M. Banks, Principles of modeling and simulation, Wiley, Hoboken, NJ, ISBN 978-0-470-28943-3, 6, 2009.
3. Z. Wusatowski, Fundamentals of rolling, Wistreich, J. G., Pergamon Press, London, Edinburgh, New York, Toronto, Sydney, Paris, 63, 71, 229-237, 267-270, 309-310, 372-375, 391-400, 494-500, 1969.
4. L. Esteban, M.R. Elizalde, I. Ocaña, Mechanical characterization and finite element modelling of lateral spread in rolling of low carbon steels, Journal of Materials Processing Technology 183, 2–3, 390-398, 2007.
5. X. Cheng, Z. Jiang, D. Wei, L. Hao, H. Wu, W. Xia, X. Zhang, S. Luo, L. Jiang, Effects of surface preparation on tribological behavior of a ferritic stainless steel in hot rolling, Wear 376-377, 1804–1813, 2017.
6. G.Y. Deng, Q. Zhu, K. Tieu, H.T. Zhu, M. Reid, A.A. Saleh, L.H. Su, T.D. Ta. Zhang, C. Lu, Q. Wu, D.L. Evolution of microstructure, temperature and stress in a high speedsteel work roll during hot rolling: Experiment and modelling, Journal of Materials Processing Technology 240, 200–208, 2017.
7. Y. Jiang, H. Tang, X. Zhang, Rotation mechanics and numerical simulation of hot rolling process under asymmetric rolls, International Journal of Mechanical Sciences 151, 785–796, 2019.

8. U. Hanoğlu, B. Sarler, Rolling simulation system for non-symmetric Groove types, *Procedia Manufacturing*, 15: 121-128, 2018.
9. R.S. Nalawade, A.J. Puranik, G. Balachandran, K.N. Mahadik, V. Balasubramanian, Simulation of hot rolling deformation at intermediate passes and its industrial validity, *International Journal of Mechanical Sciences*, 77: 8-16, 2013.
10. A.A. Milenin, H. Dyja, S. Mroz, Simulation of metal forming during multi-pass rolling of shape bars, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154: 108-114, 2004.
11. X. Shangwu, L. Xianghua, W. Guodong, Z. Qiang, A three-dimensional finite element simulation of the vertical-horizontal rolling process in the with reduction of slab, *Journal of Materials Processing Technology*, 101: 146-151, 2000.
12. A.R. Shalani, S.A. Nodamaie, I. Salehinia, Parametric study of hot rolling process by the finite element method, *Transaction B: Mechanical Engineering Sharif University of Techonology*, 16 (2): 130-139, 2009.
13. Türk Standardları Enstitüsü, TS EN 10025-2, Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri Bölüm2, Alaşimsız Yapı Çeliklerinin Genel Teknik Teslim Şartları, Nisan 2006.
14. European Standard, EN 1993-1-1, Design of steel structures Part 1-1, General rules and rules for buildings, May 2005.
15. U. Fischer, R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, F. Nahler, S. Oesterle., H. Paetzold, A. Stephan, *Metal ve Makina Tabloları El Kitabı*, Kurt R., Koçak H., Bolokur Teknik Yayıncılık, 113, 2015.

Modelling and Optimization of Burr Height in Fiber Laser Drilling of Ferritic Stainless Steel

Hüseyin UZUN¹, Tolga MERAL^{2,*}, Mustafa GÜNAY³

¹Yaşar Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Samsun, Turkey

²Bursa Uludağ University, Vocational School of Technical Sciences, Bursa, Turkey

³Karabük University, Faculty of Engineering, Karabük, Turkey

ARTICLE INFORMATION

Received: 06.08.2020
Accepted: 18.08.2020

Keywords:

Laser drilling
Stainless steel
Burr height
Mathematical model

ABSTRACT

Laser drilling is the nontraditional machining methods that provides the machining of sheet metal parts with high precision and complex geometry. In laser drilling, the main parameters such as the focal point, gas pressure and feed rate directly affecting the cutting process play important role on the quality characteristics of the part. These parameters significantly influence the main machining outputs or responses such as burr formation and hole quality as well as the machining productivity. Thus, it is important to determine the ideal machining parameters during laser drilling, especially in terms of minimum burr formation. In this study, burr formation during laser drilling of ferritic stainless steel was analyzed in detail and mathematical model of burr height (Bh) was developed. Drilling operations were performed at three different focal point, gas pressure and feed rate. According to the experimental results, the smallest Bh value was obtained with focal point of -5, feed rate of 1200 mm/min and gas pressure of 12 bar. Based on analysis of variance, the most important parameter for burr height was found as the feed speed with 38.71%. The cutting parameters, statistically, were evaluated for the burr height. The R² value of Bh model obtained by response surface method indicated a robust relationship in high level between the machining parameters and response.

Ferritik Paslanmaz Çeliğin Fiber Lazerle Delinmesinde Çapak Yüksekliğinin Modellenmesi ve Optimizasyonu

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 06.08.2020
Kabul: 18.08.2020

Anahtar Kelimeler:

Lazer delme
Paslanmaz çelik
Çapak yüksekliği
Matematiksel model

ÖZET

Lazer delme, sac metal parçaların yüksek hassasiyet ve karmaşık geometri ile işlenmesini sağlayan geleneksel olmayan işleme yöntemidir. Lazer delmede, kesme işlemi doğrudan etkileyen odak noktası, gaz basıncı ve ilerleme hızı gibi ana parametreler parçanın kalite özellikleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu parametreler, çapak oluşumu ve delik kalitesi gibi ana işleme çıktılarına veya tepkilerini ve işleme verimliliğini önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, özellikle minimum çapak oluşumu açısından uygun işleme parametrelerini belirlemek lazerle delme işleminde önemlidir. Bu çalışmada, ferritik paslanmaz çeliğin lazerle delinmesi sırasında çapak oluşumu ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve çapak yüksekliğinin (Bh) matematiksel modeli geliştirilmiştir. Delme işlemleri üç farklı odak noktası, gaz basıncı ve ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, en küçük Bh değeri -5 odak noktası, 1200 mm/dak ilerleme hızı ve 12 bar gaz basıncı ile elde edilmiştir. Varyans analizine göre, çapak yüksekliği için en önemli parametre % 38.71 ile ilerleme hızı bulunmuştur. Kesme parametreleri, çapak yüksekliği için istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Tepki yüzeyi metoduyla elde edilen Bh modelinin R² değeri, işleme parametreleri ve çıktı arasında yüksek düzeyde güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Laser drilling is known one of the improved machining processes in the manufacturing fields due to their precision, low cost, and high speed of operation. Therefore, it is used in industrial area for produce small hole such as aerospace components [1]. In this method, a laser beam is used as a heat

*Corresponding author, e-mail: tolgameral@uludag.edu.tr

source and provides increasing temperature rapidly to the melting. Desired hole quality with highest accuracy can be obtained by controlling the laser machining parameters [2]. At the same time, there are many basic parameters that affect this situation such as laser type and power, cutting speed, assist gas type, gas pressure and workpiece material in laser drilling [3]. In addition to this, ferritic stainless steels are used in numerous industrial areas such as hot water tanks, kitchen utensils, architecture and decorative applications as well as food, automotive and chemical industries due to the good toughness, ductility and outstanding stress-corrosion cracking resistance according to austenitic stainless steels [4-5]. However, because of the low welding capacity of stainless steels, mechanical connections are required for the assembly of some parts made from these materials. In this case, it becomes inevitable to create holes with machining methods such as drill or laser drilling processes. In these processes, it is important to choose the machining parameters that affect the machining outputs such as surface quality, burr formation, dimensional accuracy. Aurich et al. stated that burr formation requires additional processing such as deburring and this increases processing costs [6]. At this point, optimization of the machining parameters is very important for the control of burr formation varying according to the machining method. In this context, some of the studies carried out to understand the effects of machining parameters in laser drilling are summarized below.

Pak and Moradi investigated the parameters of laser percussion drilling process of nickel-base superalloy Inconel 718 with thickness of 1 mm in the study. Laser power, laser pulse frequency and assist gas pressure has been selected as the laser drilling process parameters. They found that laser pulse frequency has a direct influence on the diameter of the entrance hole. Also, it has been understood that entrance, exit hole diameter and hole taper increases with increasing laser power [1]. Jarosz et al. studied effect of the cutting speed on heat-affected zone (HAZ) and surface roughness in laser cutting of AISI 316L stainless steel. It has been determined that cutting speed has a significant effect on surface roughness, width of the heat-affected zone and presence of macro irregularities, such as presence of dross, molten and burnt material [3]. Ozaki et al. examined cutting properties of SUS304 stainless steel by using AGF laser cutting 2. Laser power and cutting speed were varied in order to study the effect of these parameters on cutting properties. They found that when laser power was 2.0 kW, cutting speed could be increased up to 100 mm/s, and kerf width at specimen surface was 0.28 mm [7]. Kotadiya and Pandya optimized the laser power, cutting speed and gas pressure using response surface method (RSM) and analysis of variance (ANOVA) in laser cutting of stainless steel in terms of the surface roughness. They found that the most important parameter was laser power [8]. Wandera and Kujanpaa researched optimization of the fiber laser cutting parameters taking into account cutting speed, focal point and focal length. They indicated that dross-free cut edges with lower surface roughness and lower deviation could be obtained by decreasing cutting speed, using longer focal length, and with focal position located on the bottom workpiece surface. It has been determined that this dross-free cut edge, lower surface roughness and lower deviation were found at the 254 mm focal length, cutting speed of 1.0 m/min, and focal position located on the bottom workpiece surface [9]. Chatterjee et al., statistically examined the effects of parameters on hole surface quality in laser drilling. According to ANOVA, they have been found that important machining parameters are pressure and laser frequency [10]. Petru et al. studied influence of cutting parameters on heated-affected zone after laser cutting process. It has been stated that in case of using continuous CO₂ laser, the degree of thermal influence on the workpiece does not related to only feed rate, but also other parameters. They also indicated that suitable chosen parameters are provides good results in terms of the quality of cutting surface and the size of heat-affected zone [11]. Moradi and Golchin examined effects of process parameters on Inconel 718 workpiece using finite elements method (FEM) and statistical modelling optimization in fiber laser drilling operation. At the statistical analysis conducted, it has been found that the entrance and exit hole diameters, the hole taper angle, and the weight of mass removed from the hole increase, by an increase in each of the input variables (laser pulse frequency, laser power, laser focal plane position and duty cycle). They determined that good agreement between simulation and optimization results [12]. Satpute et al. investigated the effects of machining parameters on hole inlet-exit circularity and HAZ in laser drilling of 1.2 mm thick soft steel. They stated that both the inlet and exit circularities were significantly affected by

laser power and gas pressure. Also, it has been determined that HAZ is influenced by laser power and scanning speed [13]. Yüce researched effects of the laser power, cutting speed and focal length on surface roughness and kerf width in fiber laser cutting of AISI 304 stainless steel. He optimized the process parameters using RSM. It has been determined that focal length has an important effect on surface roughness and kerf width [14].

It is determined from the literature studies that there is no research on the laser drilling of ferritic stainless steels. On the other hand, in the manufacturing industry, the removal of burrs that emerge from after machined part can be caused negative consequences in terms of both cost and time. Also, it can be caused deformation for precision parts. Therefore, it is necessary to analyze the effect of drilling parameters on the burr formation. In this study, the effects of laser machining parameters in fiber laser drilling of the AISI 430 ferritic stainless steel was investigated as experimentally and statistically. Three different gas pressure, focal point and feed speed were used in the experiments. Effects of the machining parameters on burr height were evaluated by analysis of variance (ANOVA) in laser drilling of the stainless steel. Also, a mathematical model was developed for the burr height by means of experimental data.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERYAL VE YÖNTEM)

AISI 430 ferritic stainless steel has been used as workpiece material with thickness of 5 mm. Nitrogen gas has been selected in order to avoid carbon dioxide and vaporization in the beam path during fiber laser drilling. The chemical composition of the AISI 430 stainless steel material are shown in Table 1 [15].

Table 1. Chemical composition of the workpiece material (wt.%) (İş parçası malzemesinin kimyasal bileşimi)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
0.12	1.0	0.045	0.03	1.0	16.0-18.0	0.75

All laser drilling experiments were carried out in Nukon laser machine with 2.4 kW power. Machining parameters were chosen feed rate, gas pressure and focal point. Experiments were carried out with three different levels of machining parameters selected according to the recommendations of the laser machine manufacturer and the data obtained from the literature (Table 2). According to Taguchi L_{27} orthogonal array, 27 holes have been obtained in fiber laser drilling operations. Design of experiments and statistical analysis have been performed by using MINITAB software. The experiments were repeated twice and evaluations were made by taking the arithmetic average of the burr height. The burr heights formed at the hole exit were measured with a micro camera as named CLEMEX. A mathematical model was developed for predicting the burr height via response surface method (RSM). Investigation procedure is shown in Figure 1 with sample burr height and drilled part.

Table 2. Parameters and levels (Parametreler ve seviyeleri)

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
Focal point (Fp , mm)	-5	-4	-3
Feed rate (f , mm/min)	1200	1600	2000
Gas pressure (P , bar)	12	15	18

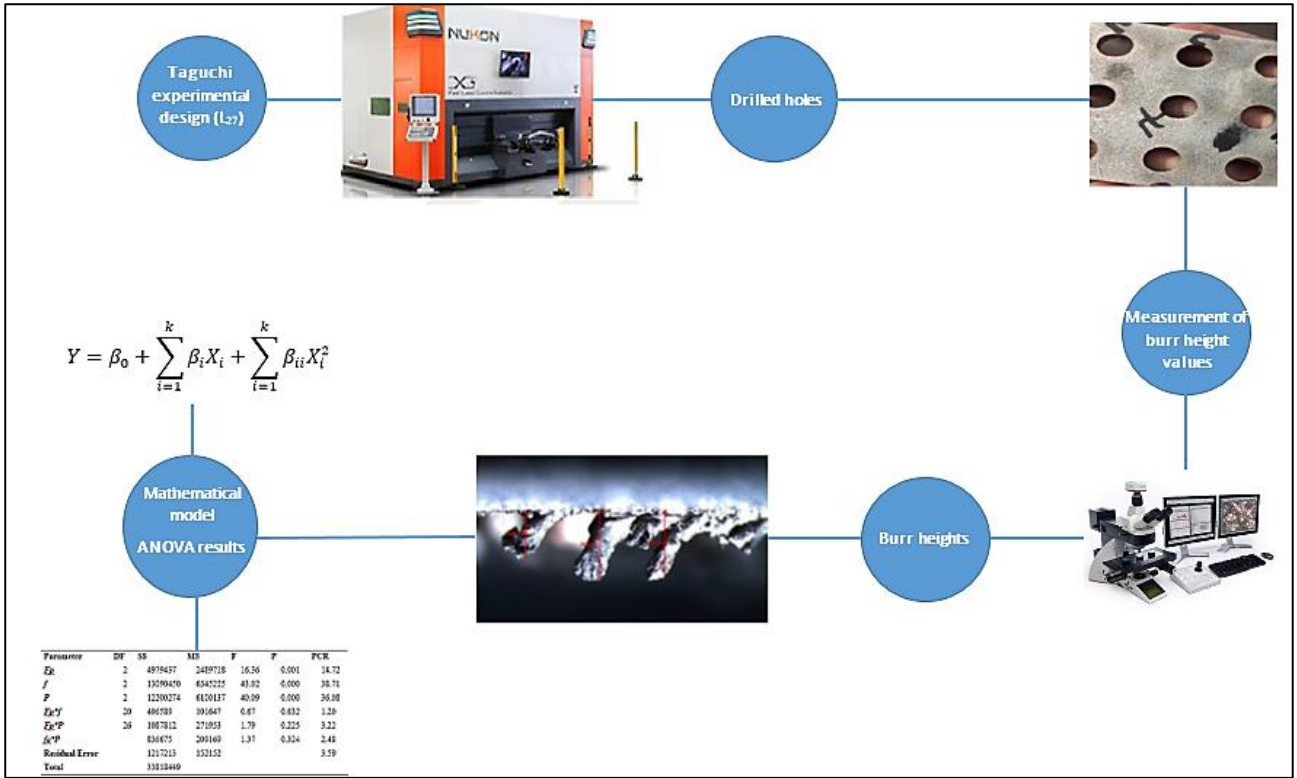


Figure 1. Investigation procedure (Araştırma prosedürü)

3. EXPERIMENTAL AND STATISTICAL RESULTS (DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL SONUÇLAR)

3.1. Evaluation of Burr Height (Çapak Yüksekliğinin Değerlendirilmesi)

Another important machining output that should be focused in the drilling process is the formation of burr. The burr height is influenced by many conditions such as on the machining parameters, material type and laser type. Understanding of burr formation is quite difficult in the laser drilling. Because the molten material formed in the laser drilling process cannot be totally eliminated, after resolidification at the entry, side wall and/or exit of the hole, it creates splash, recast-layer and burr, respectively. However, burr formation depending on machining parameters can be controlled and minimized. Also, it is very important to obtain the needed product quality by using controllable machining parameters within the framework of sustainability. For this reason, burr height values of hole exit were measured after laser drilling experiments and the effect of machining parameters on burr formations were investigated. In Figure 2, the burr height values obtained within the scope of the study are given depending on the focal point (-5, -4 and -3 mm) and other machining parameters (pressure and feed rate).

First of all, nonuniform burr formation is observed around the hole exit for all machining conditions, for example as seen in Figure 1. This result can be attributed to the dynamic characteristics of the molten material quantity, which changes depending on the machining parameters. In the light of the obtained data, it is observed that the burr height grows with increasing feed rate at constant gas pressure. Also, it was determined that the burr height decreases with the increase of pressure at a constant feed rate. However, it was found that as the gas pressure continued to increase, the values of the burr height increases at constant feed rate. For this reason, it can be said that 15 bar gas pressure is the critical level for the burr height in laser drilling of the stainless steel (Figure 2). On the other hand, a mechanical force on the workpiece may occur due to high gas pressure in laser drilling. Thus, the molten material easily can remove. The decrease of the burr height can be attributed this situation. But, if the pressure go on to increase, the rising cooling speed can hinder the eject of the molten material. For this reason, values of the burr height may increase depend on the this situation [16]. In

the present study, a result similar to the situation mentioned above was obtained, and it is seen that the burr height increases as the gas pressure increases from 15 bar to 18 bar (Figure 2).

As a result of the performed laser drilling operations, the lowest burr height was found as 504 μm at a feed speed of 1200 mm/min, focal point of -5 and gas pressure of 15 bar. The highest burr height was determined 4039 μm at a feed speed of 2000 mm/min, focal point of -3 and gas pressure of 18 bar. At constant focal point of -3 and gas pressure of 12 bar, it was calculated that with rise of the feed speed from 1200 to 1600 and from 1600 to 2000 mm/min, the burr height was increased 20.54% and 26.22%, respectively. When looking at the same conditions in terms of -4 focal point, the burr height increased by 11.57% and 12.94%, respectively; for the -5 focal point, increases of 20.84% and 12.85% were found, respectively. At constant focal point of -3 and gas pressure of 15 bar, it was calculated that with increase of the feed speed from 1200 to 1600 and from 1600 to 2000 mm/min, the burr height was increased 32.5% and 55.26%, respectively. When looking at the same conditions in terms of -4 focal point, the burr height increased by 88.90% and 134.72%, respectively; for the -5 focal point, increases of 35.12% and 145.52% were achieved, respectively. At constant focal point of -3 and gas pressure of 18 bar, it was calculated that with increase of the feed speed from 1200 to 1600 and from 1600 to 2000 mm/min, the burr height was increased 127.73% and 77.54%, respectively. When considering the same conditions for -4 focal point, the burr height increased by 68.12% and 60.60%; for the -5 focal point, increase of 538.68% and 129.98% were found, respectively. Consequently, the lowest burr height was obtained as 504 found as 504 μm at a feed speed of 1200 mm/min, focal point of -5 and gas pressure of 15 bar.

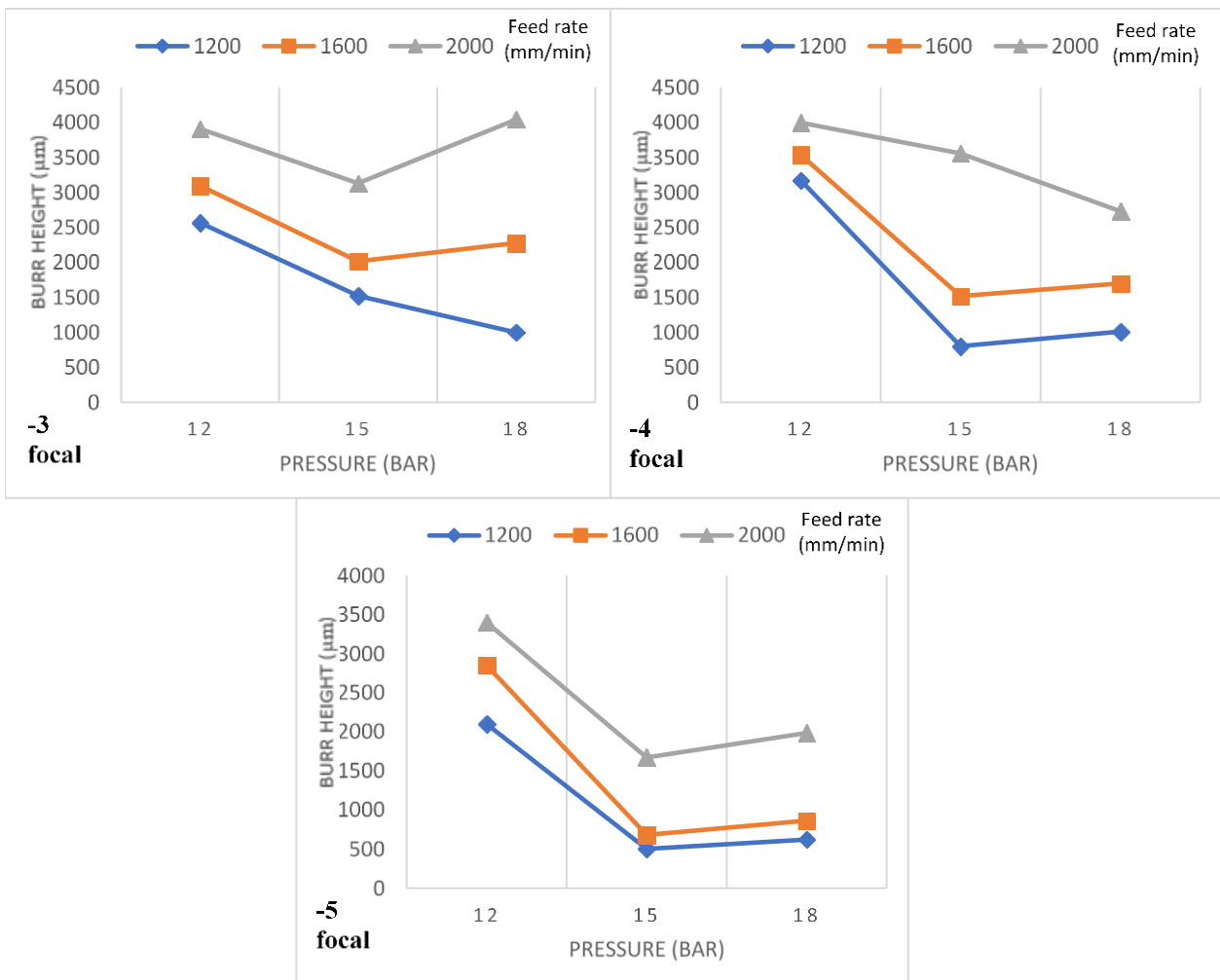


Figure 2. Change of burr height depending on machining parameters (İşleme parametrelerine bağlı çapak yükseklik değişimi)

The effects of machining parameters on the burr height was detected by analysis of variance (ANOVA). The ANOVA was carried out at 95% confidence level. If P value less than 0.05, the parameters are significance on the response. The results are shown in Table 3. When evaluate the ANOVA results, it was determined that the feed speed has the highest effect with a 38.71 % of PCR in laser drilling. In addition, the gas pressure, has another important effect with a 36.08% of PCR. Lastly, it has been seen that the focal point has effect on burr height with a 14.72% of PCR.

Table 3. ANOVA results for Bh (Çapak yüksekliği için ANOVA sonuçları)

Parameter	DF	SS	MS	F	P	PCR
F_p	2	4979437	2489718	16.36	0.001	14.72
f	2	13090450	6545225	43.02	0.000	38.71
P	2	12200274	6100137	40.09	0.000	36.08
F_p*f	20	406589	101647	0.67	0.632	1.20
F_p*P	26	1087812	271953	1.79	0.225	3.22
$f*P$		836675	209169	1.37	0.324	2.48
Error		1217213	152152			3.59
Total		33818449				

3.2. Response Surface Methodology Based Mathematical Modeling (Yanıt Yüzey Metodolojisi Tabanlı Matematiksel Modelleme)

Mathematical modeling can be constituted using different techniques for obtained an output parameter (response) in any field depending on numerous input parameters. By the way, response surface methodology (RSM) is a technique commonly used to develop mathematical model for predicting the response and understand the interactions between machining parameters and responses. Also, statistical analysis of output parameters with RSM is possible depending on the experimental results [17]. In this regard, the mathematical model of burr height was created by using RSM with the data gained during drilling of AISI 430 ferritic stainless steel. The mathematical model for the response was developed with the full quadratic regression model:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \tag{1}$$

In Eq. (1), Y is the dependent variable, β_0 is constant regression coefficient, β_i and β_{ii} are regression coefficient, X_i is uncoded (real) values of independent variable and k is parameter number. Developed models based on the focal point (F_p), feed speed (f) and gas pressure (P) for burr height (B_h) is shown in Eq. (2).

$$B_h = 19482 - 3901F_p - 4.04f - 2837P - 323F_p^2 + 0.001613f^2 + 86.8P^2 + 0.448F_p f + 73F_p P + 0.1845fP \tag{2}$$

The coefficients of determination (R^2) value was found to determine the quality of the mathematical model created using response surface methodology. In other words, it can be said that R^2 is define the relationship between the machining parameters and the responses. Comparison of the experimental and predicted results is shown in Figure 3 for burr height (Bh).

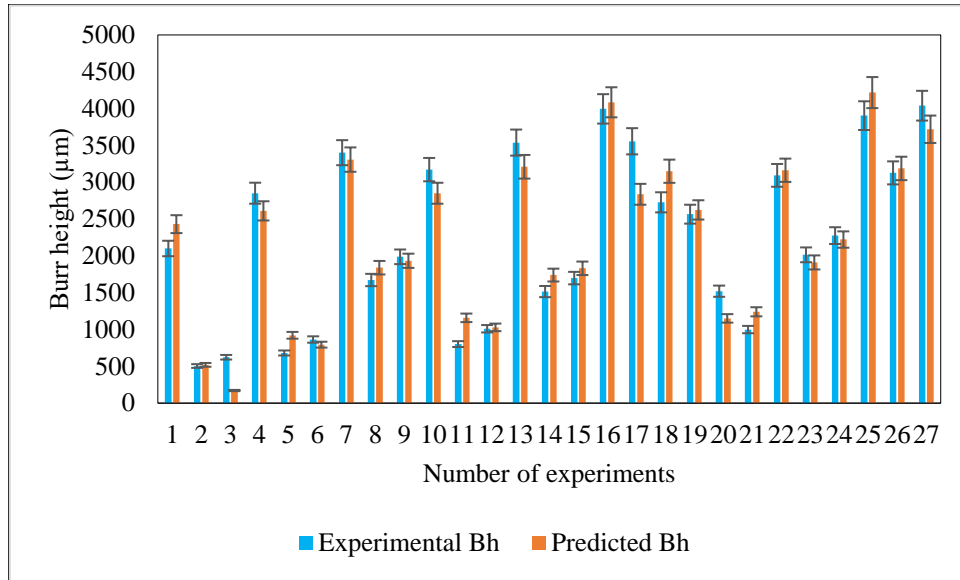


Figure 3. Comparison of the experimental and predicted results for Bh (Bh için deneysel ve tahmini sonuçların karşılaştırılması)

The coefficient of determination for predicting the burr height was found as 94.09%. The R^2 value and the error bars shown in Figure 3 indicated that the developed model is reliable and strong of the relationship between the machining parameters and response.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the effects of machining parameters in fiber laser drilling of the ferritic stainless steel was investigated and also a mathematical model was developed by response surface methodology for the burr height. The obtained results are listed below.

- It was obviously determined that the burr height values for each focal point are increased with the rise of feed speed at constant gas pressure.
- It has been determined that the height of the burr was decreased with the increase of the gas pressure from 12 bar to 15 bar at constant feed speed. But, in the second stage, it has been observed that the burr height was increased with the increase of the gas pressure 15 bar to 18 bar.
- The optimum machining parameters were found as feed speed of 1200 mm/min, focal point of -5 and gas pressure of 15 bar for minimize the burr height.
- Based on ANOVA results, it was determined that the most influence parameter for burr height was found feed speed with 38.71 of % PCR in laser drilling.
- The R^2 value of Bh model obtained by response surface method indicated a robust relationship in high level between the machining parameters and response.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. A.M. Pak, M. Moradi, Hole geometry features analysis in fiber laser percussion drilling process, *International Journal of Advances in Mechanical and Automobile Engineering*, 2(1): 18-21, 2015.
2. B.S. Yilbas, *Laser Drilling Practical Applications*, Springer, Berlin, 2013.
3. K. Jarosz, P. Löschner, P. Nieslony, Effect of cutting speed surface quality and heat-affected zone in laser cutting of 316L stainless steel, *International Conference on Manufacturing Engineering and Materials*, 6-10 June 2016, NovýSmokovec.
4. M. Taskin, U. Caligulu, The effect on the joining of welding power on the laser welding of couple steels AISI 430/1010, *Firat University Journal of Engineering Science*, 21(1): 11-22, 2009.
5. N. Fujita, K. Ohmura, A. Yamamoto, Changes of microstructures and high temperature properties during high temperature service of Niobium added ferritic stainless steels. *Material Science and Engineering A*, 351(1-2): 272-281, 2003.

6. J.C. Aurich, D. Dornfeld, P.J. Arrazola, V. Franke, L. Leitz, S. Min., Burrs-Analysis, control and removal, *CIRP Annals*, 58(2): 519-542, 2009.
7. H. Ozaki, Y. Koike, H. Kawakami, J. Suzuki, Cutting properties of austenitic stainless steel by using laser cutting process without assist gas, *Hindawi Publishing Corporation Advances in Optical Technologies*, 1-8, 2012.
8. D.J. Kotodiya, D.H. Pandya, Parametric analysis of laser machining with response surface method on SS-304, *Procedia Technology*, 23:376-382, 2016.
9. C. Wandera, V. Kujanpaa Optimization of parameters for fibre laser cutting of a 10 mm stainless steel plate, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225:641-649, 2011.
10. S. Chatterjee, K. Abhishek, S.S. Mahapatra, Study on surface quality of laser drilled holes: parametric optimization using harmony search algorithm, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 5(4): 251-254 2017.
11. J. Petru, T. Zlamal, R. Cep, K. Monkova, P. Monka, Influence of cutting parameters on heat-affected zone after laser cutting, *Tehnicki Vjesnik*, 20(2): 225-230, 2013.
12. M. Moradi, E. Golchin, Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14: 464-484, 2017.
13. Y.R. Satpute, K.H. Inamdar, An investigation of CO₂ laser drilling, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(3): 124-128, 2016.
14. C. Yüce, Paslanmaz çelik malzemelerin fiber lazer kesiminde proses parametrelerinin optimizasyonu, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2): 685-696, 2019.
15. H. Uzun, Paslanmaz çeliğin fiber lazerle kesilmesinde işleme parametrelerinin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye, 2019.
16. W. Duan, K. Wang, X. Dong, X. Mei, W. Wang, Z. Fan, Experimental characterizations of burr deposition in Nd: YAG laser drilling: a parametric study, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76:1529-1542, 2014.
17. R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2016.

Sertleştirilmiş AISI 4340 Çeliğin Isı-Destekli İşlenmesinde TIG Tekniğinin Uygulanabilirliği

Atakan Uğraş^{1,*}, Fırat Kafkas²

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Porsuk Meslek Yüksekokulu, Eskişehir, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 25.07.2020

Kabul: 20.08.2020

Anahtar Kelimeler:

Isı destekli işleme

TIG

Kesme gücü

AISI 4340

ÖZET

Isı destekli işleme yöntemi, iş parçası yüzeyinin bir enerji kaynağı ile bölgesel olarak ısıtılması ve ardından bu bölgenin kesici takım tarafından işlenmesi prensibine dayanmaktadır. Isı destekli işlemede ısıtma işlemi için lazer, indüksiyon, plazma ve oksijen-gaz alevi gibi farklı türden enerji kaynakları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaca en uygun enerji kaynaklarından biri de maliyeti düşük, ulaşılması ve kontrolü kolay, otomasyona uygun bir enerji kaynağı olan Tungsten İnert Gaz (TIG) yöntemidir. Bu çalışmada, TIG yönteminin ısı destekli işleme için uygulanabilirliği ve talaş kaldırma işleminde harcanan güç üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerde iş malzemesi olarak 49HRC sertliğinde AISI 4340 çeliği kullanılmıştır. Tornalama işleminde, kaplamalı karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Çalışma, TIG yönteminin ısı destekli işleme için uygun bir enerji kaynağı olabileceğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, TIG yönteminin uygulanabilirlik açısından bazı avantaj ve dezavantajlara sahip olduğunu göstermiştir. TIG yöntemiyle yapılan ısı destekli işlemede konvansiyonel işleme göre kesme için harcanan güçte %46'ya varan iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca konvansiyonel işleme göre daha dengeli bir işleme gerçekleşmiştir. TIG yöntemiyle yapılan ısı destekli işlemede yüksek kesme hızları ve kısa devre oluşumu nedeniyle arkın kesilmesi başlıca dezavantaj olarak belirlenmiştir.

Feasibility of TIG Technique in Heat-Assisted Machining of Hardened AISI 4340 Steel

ARTICLE INFO

Received: 25.07.2020

Accepted: 20.08.2020

Keywords:

Heat-assisted machining

TIG

Cutting power

AISI 4340

ABSTRACT

Heat-assisted machining method is based on the principle that locally heated the surface of work piece by the energy source and then this zone is machined by the cutting tool. For heating process in heat assisted machining different types of energy sources such as laser, induction, plasma and oxy-gas flame are commonly used. One of the most suitable energy sources for this purpose is the Tungsten Inert Gas (TIG) method, which is cost-effective, easy to access, easy to control and being suitable energy source for automation. In this paper, the applicability of the TIG method for heat-assisted machining and the effects on the power expended in the chip removal process was investigated. In the experiments, 49HRC hardened AISI 4340 steel is used as work material. Coated carbide cutting tools were used in the turning process. The study showed that the TIG method can be suitable energy source for heat assisted machining. The results showed that the TIG method has some advantages and disadvantages in terms of applicability. An improvement up to 46% has been achieved in the power consumed for cutting compared to conventional machining in heat-assisted machining with TIG method. In addition, more stable machining has been realized comparing to conventional machining. The main disadvantage of the heat-assisted machining with TIG method is the arc failure due to high cutting speeds and short circuit formation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mevcut üretim teknolojileri ile yapılan üretimlerde yüksek kesme kuvveti, yüksek kesme sıcaklığı, kötü yüzey, kısa takım ömrü karşılaşılan başlıca sorunlardır. Düşük kesme hızları kullanılması

* Sorumlu yazar, e-posta: atakanugras@gmail.com

nedeniyle işleme zamanı uzamaktadır. Bu sorunların birleşmesi ile üretim maliyetleri artmaktadır. İşlenmesi zor malzemelerin işlenebilirliğini geliştirme ile ilgili çalışmalar hala araştırmacılar için ilgi çekici bir özelliğe sahiptir. Bu malzemelerin yüksek dayanımı, sertliği ve gerinim sertleşmesi gibi özellikleri yüksek kesme enerjisi gerektirmektedir. Bunun sonucu olarak kesme bölgesindeki sıcaklık artmaktadır. Ancak kesme bölgesindeki bu sıcaklık kesici takımın plastik deformasyonuna, ısıya bağlı takım aşınmalarına ve takım malzemesi ile iş malzemesi arasındaki kimyasal ilişkinin pekişmesine yol açmaktadır.

Bahsedilen sorunlar gerçekleşmediği sürece kesme bölgesinde açığa çıkan ısı işlenebilirliğe olumlu yönde etki etmektedir. Bu yüzden araştırmacılar kesme işlemlerinde kritik bir role sahip olan ısının yönetilmesine ve kontrol edilmesine odaklanmışlardır. Çalışmaların bir kısmı kesme bölgesindeki sıcaklığın düşürülmesine ait çalışmalardır. Burada işlenmesi zor malzemeleri işlemek için minimum miktarda yağlama, yüksek basınçlı soğutma, kriyojenik işleme ve soğutulmuş hava ile işleme kesme bölgesindeki sıcaklığı düşürmek için kullanılan yöntemlerdendir. Diğer bir grup çalışma ise kesme bölgesindeki sıcaklığı artırmaya yönelik yapılan çalışmalardır. Bunlar ısı destekli işleme (Heat-Assisted Machining) başlığı altında toplanabilir. Lazer [1], plazma [2], oksijen-gaz alevi [3], indüksiyon akımı [4] ve Tungsten Inert Gas (TIG) tekniği [5] iş malzemesini ısıtmak için kullanılan tekniklerdir.

Isı, malzemelerin şekillendirilmesine olumlu yönde etki etmekte ve işlemede plastik deformasyonu kolaylaştırmaktadır. Isıtma sayesinde kesme bölgesindeki malzemenin akma dayanımı, sertliği ve pekleşme eğilimi düşer, böylece takım tezgâhının harcadığı güç azalır [2] ve talaş kaldırma işlemi daha düşük kesme kuvvetleri ile gerçekleşmiş olur [6]. Isı destekli işleme ile talaş kaldırma oranı artar [7], takım aşınması azalır [8], yüzey kalitesi iyileşir [9], sertleştirilmiş parçalar karbür kesici takımlarla işlenebilir [10], taşlama işlemi elimine edilebilir [11], soğutma sıvısı kullanılmadığı için çevreye verilen zararlar azalır [12]. Isı destekli işlemede kullanılan enerji kaynağı ısıtmayı dar bir bölgede yapmalıdır [13]. Isıtma derinliği kesme derinliğini aşmamalıdır.

Isı destekli işleme için kullanılan enerji kaynakları değerlendirildiğinde; ekonomiklik ve ulaşılabilirlik, kontrol kolaylığı ve düşük bakım maliyeti gibi özellikler aranmaktadır. Günümüzde yapılan çalışmalarda lazerin ısı destekli işlemede yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir. Lazer ısıtma işlemini etkili biçimde gerçekleştirmede esneklik ve kontrol kolaylığı sağlar, ayrıca otomasyonu kolaydır. Ancak lazer kurulum ve bakım maliyeti yüksek bir enerji kaynağıdır. Yüksek radyasyon/yoğunlaştırılmış enerji kaynağı olarak operatör, takım-tezgâhı ve çevre için zararlı etkiler oluşturabilir. Bu açıdan bakıldığında, TIG kaynak yöntemi ideal bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. TIG kaynak yöntemi ile iş malzemesinde dar bir kısmı ısıtmak mümkündür. Ayrıca enerji girişini daha iyi kontrol etmek için gerekli parametrik ayarlar (akım şiddeti, koruyucu gaz debisi vb.) kolayca yapılabilir. Amin ve arkadaşları [5] çalışmalarında TIG kaynak makinesini ısı kaynağı olarak kullanmışlardır. Çalışmalarında, AISI 304 paslanmaz çeliğin işlenmesinde titreşim genliğini ve takım aşınmasını düşürecek optimum kesme sıcaklığını araştırmışlardır. Deneyler sonucunda AISI 304 paslanmaz çeliğin TIG yardımcı ısı destekli işlenmesinde optimum kesme sıcaklığını 450 °C olarak bulmuşlardır.

Bu çalışmada, harcanan güç bakımından ısı destekli işleme ile konvansiyonel işleme karşılaştırılmıştır. Ayrıca ulaşılabilir ve maliyeti düşük bir enerji kaynağı olan TIG tekniğinin ısı destekli işleme için uygulanabilirliği araştırılmıştır. Deneylerde işlenmesi zor bir malzeme olan 49 HRC sertliğindeki AISI 4340 çeliği kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

TIG kaynağında pek çok parametre bulunmaktadır. Önceki çalışmada TIG kaynağı parametrelerinden hangilerinin ısı destekli işleme için etkin parametreler olduğu belirlenmiştir ve yüzey sıcaklığı üzerindeki en etkili TIG parametresinin akım şiddeti olduğu görülmüştür [14]. Tablo 1'de deneylere ait çalışma parametreleri ve bunların seviyeleri gösterilmektedir. Kesme parametrelerinden kesme hızı (m/dak) ve ilerleme oranı (mm/dev) değişken alınırken kesme derinliği sabit 1 mm alınmıştır. İşleme parametreleri ve bunların seviyelerine göre hazırlanmış deney planı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. İşleme parametreleri ve seviyeleri(Machining parameters and levels)

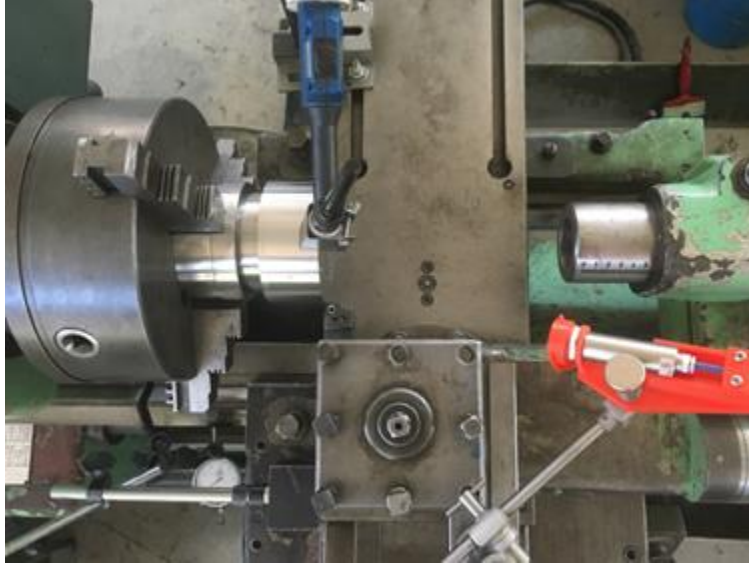
Parametreler	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme hızı (V)	m/dak	159	176	194
İlerleme oranı (f)	mm/dev	0.11	0.18	0.24
Akım (A)	Amper	150	175	200

Isı destekli işleme deneyleri aynı kesme şartlarında konvansiyonel olarak tekrar edilmiştir. Çalışmada iyi bir tokluğa sahip olan ve yaygın kullanılan bir çelik türü olan AISI 4340 çeliği kullanılmıştır. Numuneler üç farklı kesme hızına göre Ø104x120 mm-Ø115.5x120 mm-Ø127 x120 mm boyutlarında hazırlanmış ardından 49 HRC değerinde sertleştirilmiştir.

Tablo 2. Konvansiyonel ve ısı destekli işleme için deney planı (Test plan for conventional and heat-assisted machining)

Deney No	Kesme hızı-V (m/dak)	İlerleme-f (mm/dev)	Akım-A (Amper)	Deney No	Kesme hızı-V (m/dak)	İlerleme-f (mm/dev)	Akım-A (Amper)
1	159	0.11	0	19	176	0.18	175
2	159	0.11	150	20	176	0.18	200
3	159	0.11	175	21	176	0.24	0
4	159	0.11	200	22	176	0.24	150
5	159	0.18	0	23	176	0.24	175
6	159	0.18	150	24	176	0.24	200
7	159	0.18	175	25	194	0.11	0
8	159	0.18	200	26	194	0.11	150
9	159	0.24	0	27	194	0.11	175
10	159	0.24	150	28	194	0.11	200
11	159	0.24	175	29	194	0.18	0
12	159	0.24	200	30	194	0.18	150
13	176	0.11	0	31	194	0.18	175
14	176	0.11	150	32	194	0.18	200
15	176	0.11	175	33	194	0.24	0
16	176	0.11	200	34	194	0.24	150
17	176	0.18	0	35	194	0.24	175
18	176	0.18	150	36	194	0.24	200

Deney düzeneği Şekil 1’de gösterilmektedir. Deneyler maksimum devir sayısı 1000 dev/dak olan, 7 kW gücündeki bir universal torna tezgâhında yapılmıştır. Deneylerde ısı kaynağı olarak maksimum 200 A akım şiddetinde çalışabilen hava soğutmalı bir TIG kaynak makinesi kullanılmıştır. Elektrot ucu ile iş malzemesi arasındaki ark mesafesi 2 mm alınmıştır. Kesici takım olarak Sandvik firmasının SNMG 12 04 08-QM 4225 ISO kodlu kaplamalı karbür kesici ucu kullanılmıştır. Kesici ucu bağlamak için PSBNR2525M12 ISO kodlu takım tutucu kullanılmıştır.



Şekil 1. TIG tekniğinin kullanıldığı ısı destekli işleme deney düzeneği (Heat assisted machining experimental setup using TIG technique)

İş malzemesi üzerinde oluşan yüksek akım ve deney şartlarının oluşturduğu riskler nedeniyle dinamometre kullanılmamıştır. Torna tezgâhının talaş kaldırma esnasında harcadığı gücü belirlemek için Şekil 2’de verilen üç fazlı bir enerji ölçer sistemi kullanılmıştır. Ölçülen güç verileri .xlsx uzantılı dosyalar şeklinde Ethernet bağlantısı kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır. Talaş kaldırma oranı (MRR) kesme işleminin performansı hakkında kullanıcılara fikir vermektedir. MRR kesme deneylerinde kullanılan kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliği şeklindeki üç bağımsız değişkenin çarpımından elde edilen bir orandır. Deneylerde yapılan güç ölçümlerine göre MRR’deki artışa bağlı olarak kesme anında harcanan güçteki değişim (Güç/MRR) değerlendirilmiştir. Elde edilen verilerin istatistiksel analizinde Minitab programı kullanılmıştır.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan enerji ölçer sistemi görünümü (View of energy meter system used in experiments)

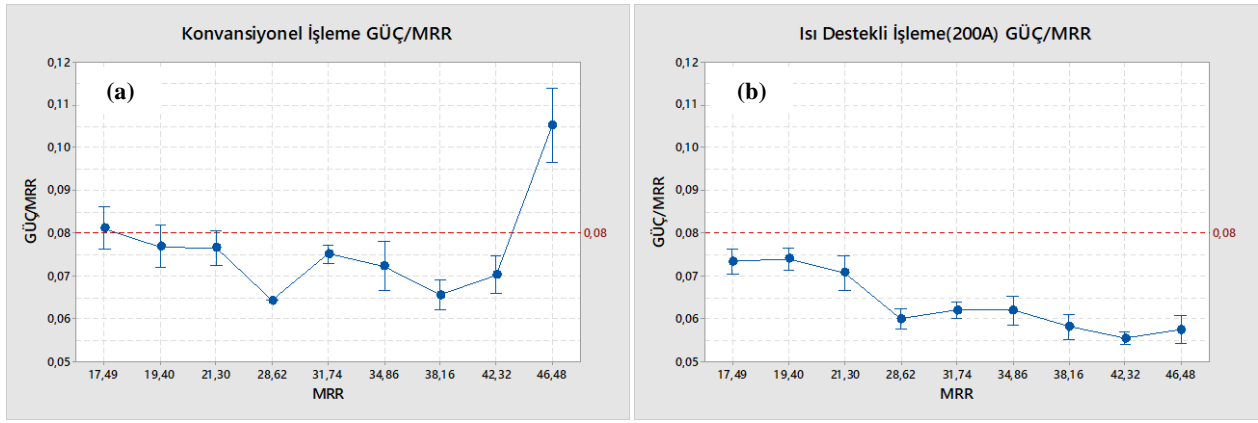
3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

Tablo 2'deki deney planına göre gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen kesme anında harcanan ortalama güç, talaş kaldırma oranı (MRR) ve ısı destekli işleme neticesinde güç tüketimindeki iyileşmeler Tablo 3'de yer almaktadır. Isı desteği alınarak yapılan tüm işlemlerde kesme anında torna tezgâhının harcadığı gücün aynı şartlardaki konvansiyonel işleme göre azaldığı tespit edilmiştir. Harcanan güç bakımından en iyi sonucun 34 numaralı deneyde elde edildiği görülmektedir. 33 numaralı deneyde konvansiyonel işleme şartlarında kesici takım üzerine gelen yükleri karşılayamamış ve kırılmıştır. Isı destekli işleme için her kesme şartında güç gereksiniminin konvansiyonel işleme göre daha az olduğu görülmektedir. Yüzde iyileşme miktarlarına bakıldığında ısı destekli işleme sayesinde konvansiyonel işleme göre kesme anında harcanan güçte bir kazanım sağlandığı görülmektedir. Ancak TIG yöntemi kullanılarak yapılan ısı destekli işleme kendi içinde değerlendirildiğinde 150A, 175A ve 200A kullanılarak yapılan işlemler arasında belirgin bir farkın olmadığı, iyileşme oranlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu yakınlığa ark oluşumunda yaşanan güçlükler ve akım değerlerinin birbirine çok yakın olmasının neden olduğu düşünülmektedir. Kesme anında harcanan güçteki yüzde iyileşme miktarının yanı sıra Güç/MRR oranı işlemin verimliliği hakkında fikir vermektedir. Konvansiyonel işleme göre ısı destekli işlemede daha düşük güçler kullanılarak aynı oranda talaş kaldırılmıştır.

Şekil 3'teki grafiklerde konvansiyonel işleme ve 200A kullanılan ısı destekli işleme için kesme anında harcanan gücün MRR'deki artışa göre değişimi değerlendirilmiştir. Isı destekli işlemede güç gereksiniminin MRR arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Benzeri bir azalma eğilimi konvansiyonel işlemede görülememiştir. Isı destekli işlemedeki bu değişime kesme bölgesine ısı girdisinin artması nedeniyle malzeme sertliğindeki azalma neden olabilir [8].

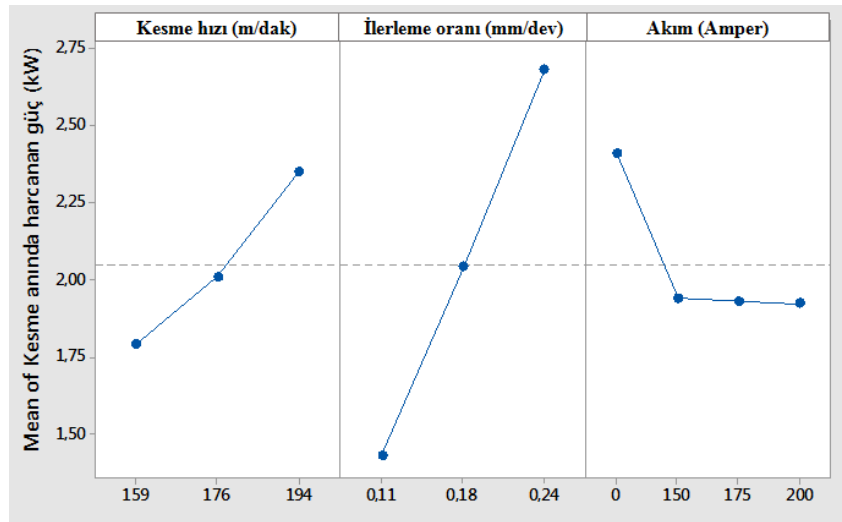
Tablo 3. MRR-Güç ilişkisi ve kesme sırasında harcanan güçteki iyileşmeler (MRR-Power relationship and improvements in power consumed during cutting)

Deney No	MRR (cm ³ /dk)	Güç (kW)	Güç/MRR	İyileşme %	Deney No	MRR (cm ³ /dk)	Güç (kW)	Güç/MRR	İyileşme %
1	17.5	1.42	0.081		19	31.7	2.01	0.063	16 %
2	17.5	1.29	0.074	9 %	20	31.7	1.97	0.062	18 %
3	17.5	1.19	0.068	16 %	21	42.3	2.97	0.070	
4	17.5	1.28	0.073	10 %	22	42.3	2.40	0.057	19 %
5	28.6	1.84	0.064		23	42.3	2.32	0.055	22 %
6	28.6	1.80	0.063	2 %	24	42.3	2.35	0.055	21 %
7	28.6	1.76	0.062	4 %	25	21.3	1.63	0.077	
8	28.6	1.71	0.060	7 %	26	21.3	1.57	0.074	4 %
9	38.2	2.50	0.066		27	21.3	1.55	0.073	5%
10	38.2	2.22	0.058	11 %	28	21.3	1.51	0.071	8 %
11	38.2	2.23	0.059	11 %	29	34.9	2.52	0.072	
12	38.2	2.22	0.058	11 %	30	34.9	2.16	0.062	14 %
13	19.4	1.49	0.077		31	34.9	2.21	0.063	12 %
14	19.4	1.44	0.074	4 %	32	34.9	2.16	0.062	14 %
15	19.4	1.39	0.072	7 %	33	46.5	4.90	0.105	
16	19.4	1.44	0.074	4 %	34	46.5	2.62	0.056	46 %
17	31.7	2.38	0.075		35	46.5	2.72	0.059	44 %
18	31.7	1.96	0.062	18 %	36	46.5	2.67	0.057	45 %



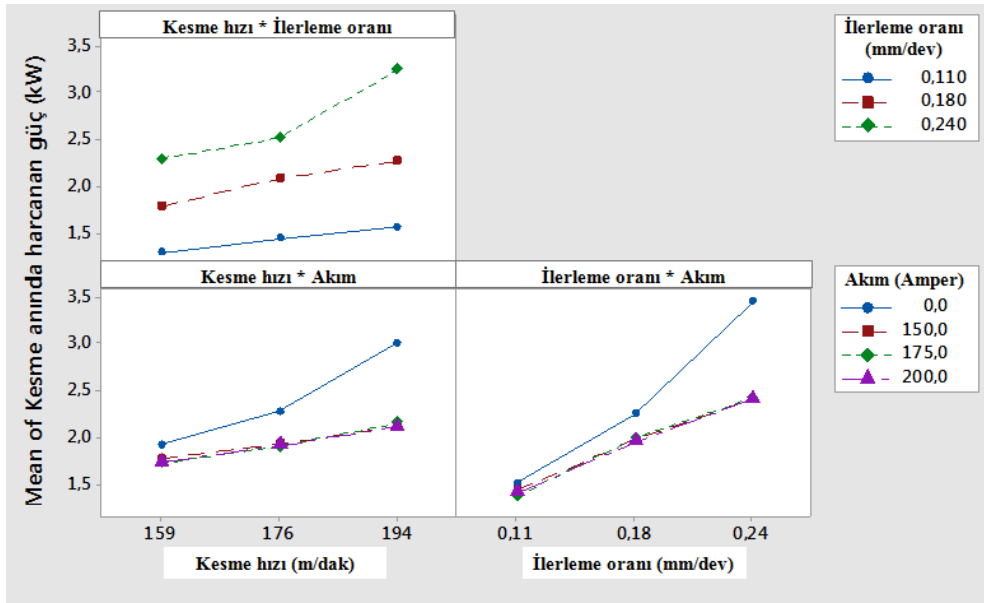
Şekil 3. a) Konvansiyonel işlemedeki Güç/MRR oranı, b) Isı destekli işlemedeki Güç/MRR oranı (Power/MRR ratio in conventional machining, b) Power/MRR ratio in heat assisted machining)

Şekil 4’de kesme hızı, ilerleme oranı ve akım parametrelerinin kesme anında harcanan güce etkilerini gösteren etki grafikleri verilmiştir. Konvansiyonel işlemeye (0 amper) göre ısı destekli işlemin harcanan gücün azalmasında etkili olduğu görülmektedir. Ancak ısı destekli işlemede 150 A ile 200 A arasındaki farkın harcanan gücü önemli ölçüde azaltacak bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bu duruma, akım seviyeleri arasındaki farkın az olması önemli bir etkidir. Daha yüksek akım değerlerinin kullanılması durumunda, harcanan gücünde buna bağlı olarak önemli düzeyde düşeceği değerlendirilebilir. İlerleme oranı ve kesme hızındaki artışın kesme işleminin doğası gereği harcanan gücü artırdığı görülmektedir. Kesme hızı ve ilerleme oranı arttığında işleme süresi kısalmakta, dolayısıyla ısıtma süresi azalmaktadır [15]. Buna bağlı olarak ısı destekli işleme yardımıyla sağlanan ısı girdisi azalmaktadır.



Şekil 4. İşleme parametrelerinin kesme için harcanan güce etkileri (The effects of machining parameters on the power consumed for cutting)

Şekil 5’de kesme hızı, ilerleme oranı ve akım değerlerinin kesme anında harcanan güç üzerindeki ikili etkileşimleri verilmiştir. Kesme hızı ve ilerleme oranı arttıkça torna tezgâhında kesme için harcanan güçte artmıştır. Kesme hızı - akım ve ilerleme oranı - akım etkileşimlerine bakıldığında konvansiyonel işleme ile ısı destekli işleme arasındaki fark belirginleşmektedir. Ancak, burada farklı akım değerlerinin kesme anında harcanan güç üzerinde neredeyse aynı etkiyi oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 5. İşleme parametreleri etkileşiminde harcanan gücün değişimi (The change in the power consumed in the interaction of processing parameters)

Tablo 4’de varyans analizi (ANOVA) verilmiştir. 49 HRC sertliğindeki AISI 4340 iş malzemesinin TIG yöntemi kullanılan ısı destekli işleme sistemi ile işlenmesinde deney faktörlerinin etki oranlarına bakılacak olursa kesme anında harcanan güce sırasıyla ilerleme oranı, kesme hızı ve akım etki etmektedir. Tablo 4 incelendiğinde yüksek bir hata oranı olduğu görülmektedir. Bu durumun konvansiyonel işleme esnasındaki güç tüketim dalgalanmasından meydana geldiği düşünülmektedir.

Tablo 4. Isı destekli işlemede harcanan güç için ANOVA tablosu (ANOVA table for power consumed in heat assisted machining)

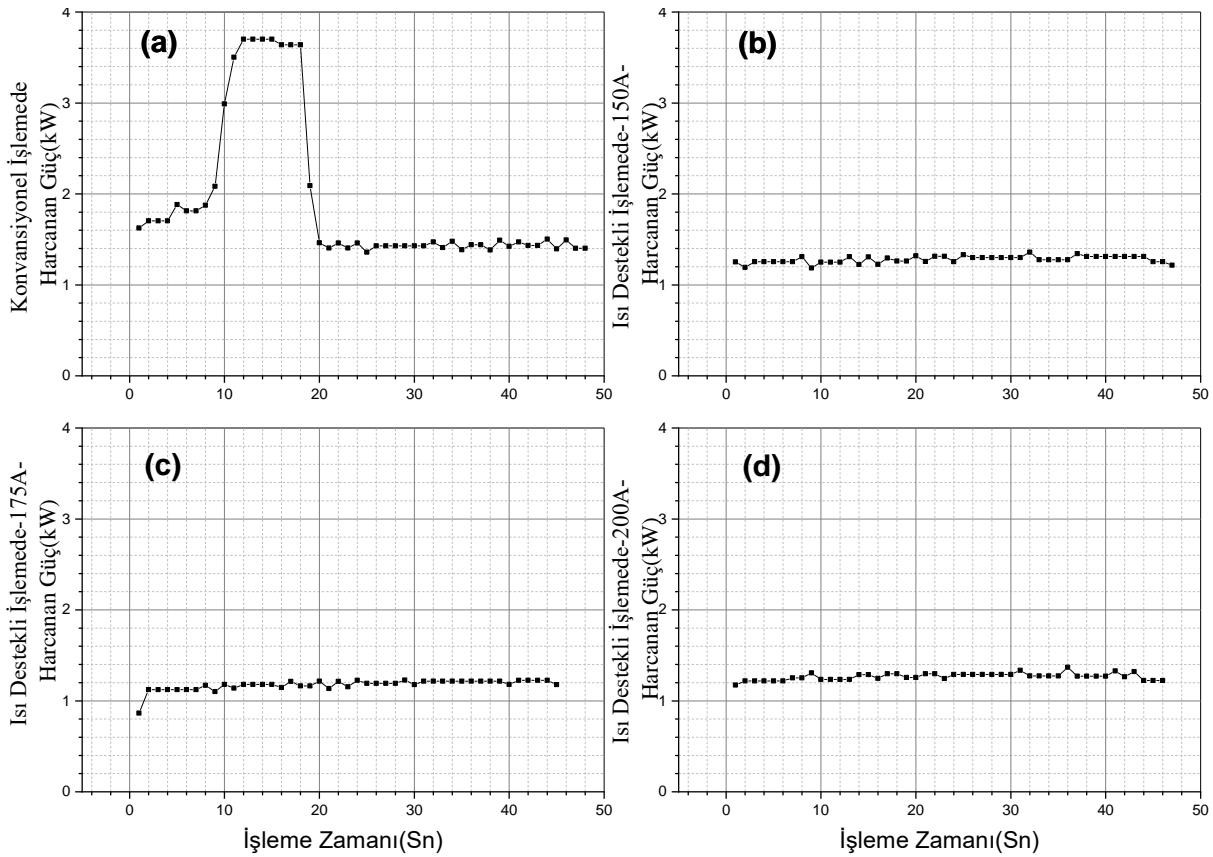
Faktörler	SD	KT	KO	F-Değeri	Katkı Oranı (%)
Lineer model					
V-Kesme Hızı (m/dak)	2	1.918	0.959	7.86	11.87 %
f-İlerleme (mm/dev)	2	9.312	4.656	38.18	57.61 %
A-Akım (Amper)	3	1.52	0.507	4.16	9.40 %
Hata	28	3.414	0.122		21.12 %
Toplam	35				100.00 %

SD: Serbestlik Derecesi, KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalaması

Konvansiyonel işlemeye ait Şekil 6a’da verilen grafikte başlangıçta ani bir güç artışı meydana geldiği görülmektedir. Harcanan güçteki artışa, iş malzemesinin sertliği nedeniyle kesici takımın kesmeye başlayamaması sonucu artan sürtünmelerin yol açtığı değerlendirilmektedir. Isı destekli işlemede kesmeden az önce yapılan ön ısıtma nedeniyle iş malzemesi sertliği azalmaktadır dolayısıyla ısı destekli işlemeye ait Şekil 6b, Şekil 6c ve Şekil 6d’de verilen grafiklerde benzer güç artışı görülmemektedir. Isı destekli işlemede kesme işleminin konvansiyonel işlemeye göre daha dengeli gerçekleştiği değerlendirilmektedir.

TIG yönteminde ark oluşabilmesi için elektrot ucu ile iş parçası arasında bir ark mesafesi bulunması şarttır. TIG yöntemi ile gerçekleştirilen ısı destekli işlemede elektrot ve iş parçası arasındaki arkin kesilmesi deneylerde karşılaşılan başlıca problem olmuştur. Yüksek kesme hızlarında ark oluşumunda sorunlar yaşanmıştır. Ayrıca kesme anında talaşın elektrot ile parça arasına girmesi nedeniyle elektrot ucu bozulmuş ve ark kesilmiştir. Dinamik gerçekleşen talaş kaldırma

işleminde ark mesafesinin korunması zorunluluğu TIG tekniğinin lazer yardımcı işlemeye göre en büyük dezavantajdır.



Şekil 6. $V=159$ m/dak ve $f=0.11$ mm/dev kesme şartlarında harcanan güç değişimi; a) Konvansiyonel, b) 150A ısı destekli, c) 175A ısı destekli, d) 200A ısı destekli (The change in power consumed at cutting conditions $V=159$ m/min and $f=0.11$ mm/rev; a) Conventional, b) 150A heat assisted, c) 175A heat assisted, d) 200A heat assisted)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, sertleştirilmiş AISI 4340 çeliği enerji kaynağı olarak TIG yönteminin kullanıldığı bir ısı destekli işleme sistemi ile tormalanmıştır. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Yapılan çalışmalar, TIG yönteminin ısı destekli işleme için uygun bir ısı kaynağı olduğu göstermiştir. Bu bakımdan, TIG yöntemi, lazer ve plazmanın yanında, ısı destekli işleme için kullanılacak alternatif bir enerji kaynağıdır.
- Isı desteği sayesinde kesme işlemi konvansiyonel işlemeye göre daha dengeli bir şekilde gerçekleşmiştir. Konvansiyonel işlemede başlangıçta meydana gelen ani güç artışının ısı destekli işlemede meydana gelmediği görülmüştür.
- Isı destekli işlemede, konvansiyonel işlemeye göre güç tüketiminde %46'ya varan iyileşme sağlanmıştır.
- Isı destekli işlemede MRR arttıkça torna tezgâhının güç gereksiniminin azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.
- Akım şiddetindeki artışın kesme anında harcanan güç üzerinde belirgin bir iyileşmeye sağlamadığı belirlenmiştir.
- Talaşın ark bölgesine girmesi sonucu kısa devre oluşması ve yüksek kesme hızlarında ark kesilmesi olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. M. Anderson, R. Patwa, Y.C. Shin, Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46: 1879–1891, 2006.
2. G. Madhavulu, B. Ahmed, Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations, *Journal of Materials Processing Technology*, 44: 199-206, 1994.
3. N. Tosun, L. Ozler, Optimisation for hot turning operations with multiple performance characteristics, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23: 777–782, 2004.
4. J. Luo, H. Ding, A. J. Shih, Induction-heated tool machining of elastomers- Part 2: Chip morphology, cutting forces, and machined surfaces, *Machining Science and Technology*, 9: 567–588, 2005.
5. A.K.M.N. Amin, M.D. Arif, N.H.B.M. Rasdi, K.S.B. Mahmud, A.H.B. Ibrahim, M.F.B. Zawani, A.F.B.A. Malik, Identification of optimum heating temperature in thermal assisted turning of stainless steel using three different approaches, *Applied Mechanics and Materials*, 393: 194-199, 2013.
6. S. Xavierarockiaraj, P. Kuppan, Investigation of cutting forces surface roughness and tool wear during laser assisted machining of SKD11 tool steel, *Procedia Engineering*, 97: 1657 – 1666, 2014.
7. S. Skvarenina, Y.C. Shin, Laser-assisted machining of compacted graphite iron, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46: 7–17, 2006.
8. C.R. Dandekar, Y.C. Shin, J. Barnes, Machinability improvement of titanium alloy (Ti–6Al–4V) via LAM and hybrid machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50: 174–182, 2010.
9. E. Ukar, A. Lamikiz, L.N. Lo’pez de Lacalle, D. Del Pozo, J.L. Arana, Laser polishing of tool steel with CO2 laser and high-power diode laser. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50:115–125, 2010.
10. M.A. Lajis, A.K.M.N. Amin, A.N.M. Karim, H.C.D.M. Radzi, T.L. Ginta, Hot machining of hardened steels with coated carbide inserts, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2): 421-427, 2009.
11. H. Ding, Y.C. Shin, Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50: 106–114, 2010.
12. A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman, Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 57: 83–101, 2012.
13. V.G. Navas, I. Arriola, O. Gonzalo, J. Leunda, Mechanisms involved in the improvement of Inconel 718 machinability by laser assisted machining (LAM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 74: 19–28, 2013.
14. A. Ugras, F. Kafkas, Isı destekli işlemede TIG tekniğinin uygulanabilirliği, 10th International Congress on Machining, 07-09 Kasım 2019, Antalya.
15. M.K. Venkatesh, P. Kuppan, K.A. Senthil, K.K. Ramesh, R.J. John, Effect of laser scan speed on surface temperature, cutting forces and tool wear during laser assisted machining of alumina, *Procedia Engineering*, 97: 1647-1656, 2014.