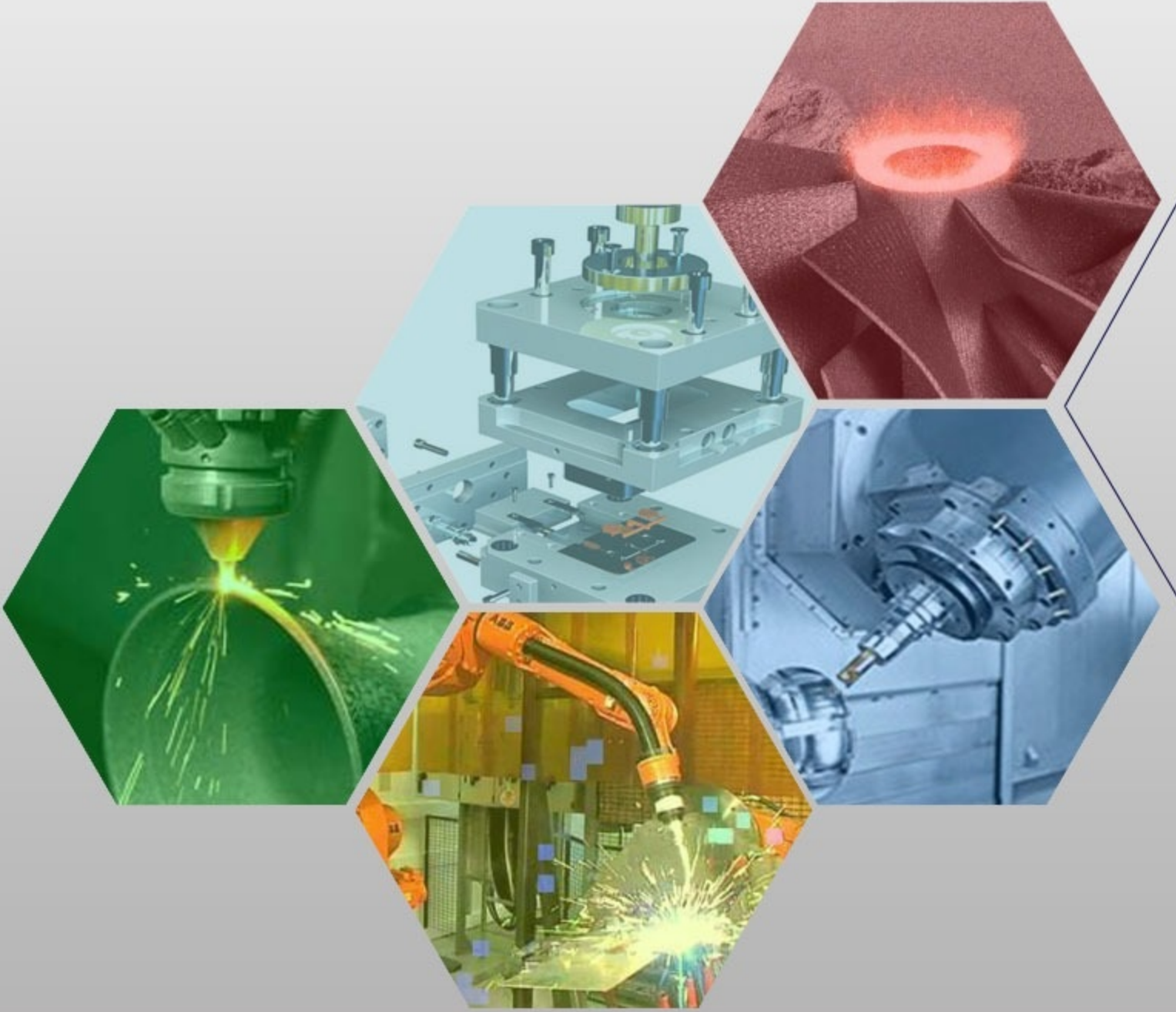




İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:1 SAYI:1 YIL: 2020

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:1 ISSUE:1 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
Doç. 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) : 1
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)
Nisan 2020 (April 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)

- An Experimental Investigation into The Optimal Processing Conditions for The Diamond Paste Polishing of SKD 61 Mold Steel (SKD 61 Kalıp Çeliğinin Elmas Pastayla Parlatma İşleminde Optimal İşleme Koşulları Üzerine Deneysel Bir İnceleme)**
Ulaş ÇAYDAŞ , Mahmut ÇELİK 13-21
- AISI 2205 Dupleks Paslanmaz Çeliğin CNC Torna Tezgahında İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetlerinin Deneysel Araştırılması (Experimental Investigation of Surface Roughness and Cutting Forces in Machining of AISI 2205 Duplex Stainless Steel on CNC Lathe)**
Fatih MEMİŞ , Yakup TURGUT 22-33
- Yüksek İlerlemeli Frezeleme İşleminde İşlenebilirlik Parametrelerinin İncelenmesi (Investigation of Machinability Parameters in High-Feed Milling Process)**
Gültekin UZUN , Ramazan ÇAKIROGLU 34-41
- Nb-V Mikroalaşım Çeliğinde Mekanik Alaşımlama Süresinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi (Effect of Mechanical Alloying Time on Microstructure and Mechanical Properties in Nb-V Microalloyed Steel)**
Mehmet Akif ERDEN , Alperen YILMAZ , Nuri ŞEN 42-54

Derleme Makale (Review Article)

- Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi ((Evaluation of Studies on Additive Manufacturing Methods and Used Machining Methods)**
Hakan DEDEKAYOĞULLARI , Alaattin KAÇAL 1-12

Eklemlerli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi

Hakan Dedeakayoğulları¹, Alaattin Kaçal^{2,*}

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Kütahya, Türkiye

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 26.03.2020

Kabul: 27.04.2020

Anahtar Kelimeler:

Eklemlerli İmalat

Laser Işını Ergitme

Ti6Al4V

İşlenebilirlik

ÖZET

Son yıllarda imalat sektörüne giren ve hızla gelişen, hızlı prototipleme ve üç boyutlu (3B) baskı adlarıyla da bilinen eklemlerli imalat (Eİ); geleneksel bilgisayar destekli üretimdeki talaş kaldırma yaklaşımının aksine malzemelerin katmanlar halinde birleştirilerek, üretilmesine imkân sağlayan modern bir imalat yöntemidir. Eİ yöntemi, karmaşık geometriye sahip parçaların imalatı, hızlı tedarik ve operasyon, düşük maliyet, verimli malzeme kullanımı, montaj aşamalarının sadeleştirilebilmesi, iç kanal ve boşluklara sahip parçaların üretilmesi, uzaktan üretim için uygun bir imalat yöntemi olması gibi birçok avantaja sahiptir. Ancak yüksek sayılı üretimler dikkate alındığında Eİ seri üretimden daha maliyetli olmaktadır. Malzeme çeşidinin ve baskı boyutunun sınırlı olması, üretim sonrası son-işlem uygulamaları Eİ'nin diğer dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Yetersiz yüzey kalitesi talaşlı imalat araştırmalarına ihtiyacı öne çıkarmıştır. Eİ yöntemiyle üretilen parçaların uygulama gereksinimleri karşılamak için talaşlı imalat operasyonlarına da ihtiyacı vardır. Eİ ile üretilen parçaların talaşlı imalatında ise geleneksel malzemelerden parça üretmeye kıyasla farklı işlenebilirlik özellikleri ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, işleme parametrelerinin Eİ parçalarının delme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak büyük önem taşımaktadır. Yapılacak araştırmalarla Eİ üretim maliyetlerinde avantaj elde edilebilir. Eİ'de eksikliği görülen alanlarda yapılacak çalışmalar her zaman olacaktır. Geleceği olan bir imalat prosesinin araştırılması ülkemizin havacılık ve savunma sanayisindeki hedefleri düşünüldüğünde önem arz etmektedir.

Evaluation of Studies on Additive Manufacturing Methods and Used Machining Methods

ARTICLE INFO

Received: 26.03.2020

Accepted: 27.04.2020

Keywords:

Additive Manufacturing

Laser Beam Melting

Ti6Al4V

Machinability

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM), which has entered the manufacturing sector in recent years and is rapidly developing, also known as rapid prototyping and three-dimensional (3D) printing names; It is a modern manufacturing method that allows the materials to be combined and produced in layers as opposed to the stock removal approach in traditional computer aided production. The AM method has many advantages such as the production of complex geometry parts, rapid supply and operation, low cost, efficient material use, simplifying assembly stages, producing parts with internal channels and cavities, and being a suitable manufacturing method for remote production. However, considering the high number of productions, AM is costlier than mass production. The limited variety of materials and print size, post-production post-processing applications are other disadvantages of AM. Poor surface quality has highlighted the need for machining research. Parts produced by the AM method also need machining operations to meet application requirements. In machining of parts produced with AM, different machinability properties may emerge compared to producing parts from traditional materials. For this reason, it is of great importance to investigate the effects of machining parameters on the piercing properties of AM parts. Advantages in AM production costs can be obtained through the researches to be carried out. There will always be studies to be carried out in areas that have deficiencies in AM. Researching a future manufacturing process is important considering the goals of our country in the aviation and defence industry.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

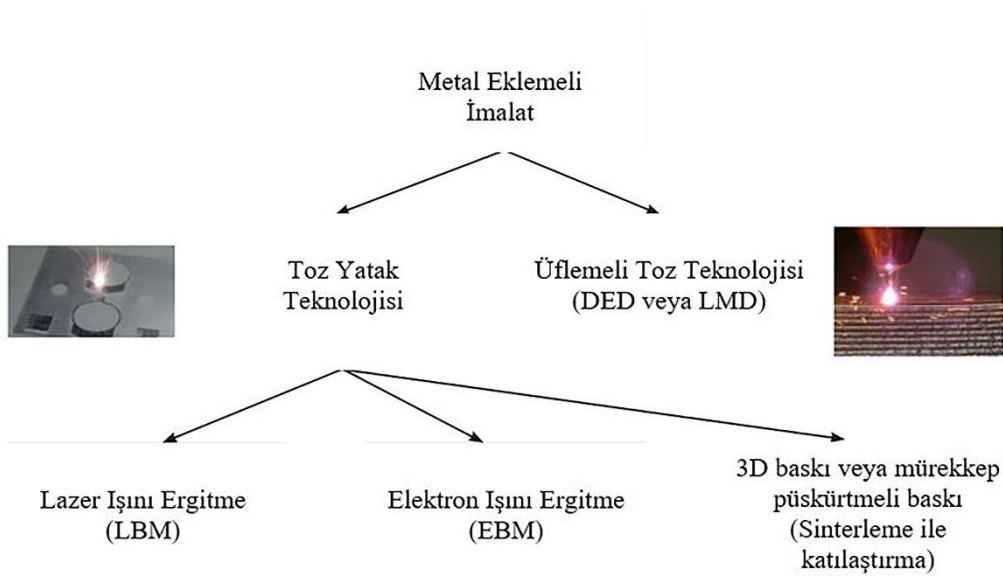
İmalat endüstrilerinde talaşlı imalat (tornalama, frezeleme, delme, taşlama vb.) ve talaşsız imalat (döküm, plastik şekil verme ve kaynak vb.) yöntemleri başlıca imalat yöntemleri olarak öne çıkmaktadır. Bunların yanında elektro erozyon, lazer, ultrasonik, basınçlı su jeti ve plazma ile işleme gibi yeni nesil imalat yöntemleri de kullanılmaktadır. Son yıllardaki hızlı teknolojik gelişmelerle birlikte imalat sektörüne giren ve hızla gelişen ilgi çekici bir imalat yöntemi olan eklemeli imalattır [1]. Hızlı prototipleme ve üç boyutlu (3B) baskı adlarıyla da bilinen eklemeli imalat (Eİ); geleneksel bilgisayar destekli üretimdeki talaş kaldırma yaklaşımının aksine malzemelerin katmanlar halinde birleştirilerek, karmaşık geometrili parçaların üretilmesine imkân sağlayan modern bir imalat yöntemidir. Bazı sektörlerde teknolojideki gelişmeler, müşteri beklentileri ve güvenlik taleplerinin sürekli artması tasarımı yapılan parçaları karmaşıklaştırmaktadır. Bu da geleneksel imalat yöntemlerinden modern imalat yöntemlerine geçişi arttırmaktadır. Bu üretim yöntemleri otomotiv, havacılık, biyomedikal, tıp, gıda, eğitim ve eğlence sektörlerinde artarak kullanılmaktadır. Üretim yaklaşımlarının değiştiği ve bilginin dijital olarak aktarıldığı günümüzde endüstrinin endüstri 4.0 ile eklemeli imalatın geniş çapta yayılacağı ön görülmektedir. Çünkü akıllı endüstri olarak da bilinen endüstri 4.0, 3B yazıcılarla son derece uyumlu olan nesnelerin interneti, hizmetlerin interneti, büyük veri, bulut tabanlı hesaplama, siber-fiziksel sistemler gibi bileşenlerden oluşmaktadır. [2-5]. Son şekle yakın ve minimum malzeme hacmi ile yapılan bu imalat yönteminde, polimer esaslı malzemeler, takım çeliği, paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımları, karbür metal tozları kullanılarak kaynak kabiliyeti iyi olan malzemelerden endüstriye parça imalatı yapılabilir hale gelmiştir [4]. Eİ'nin metal tozları ile birlikte kullanılması yeni ve büyüyen bir endüstri sektörüdür. Bu yöntem, daha önce olduğu gibi sadece prototipler değil, metalden bitmiş şekilli karmaşık parçalar üretmek için de uygun bir yöntemdir. Eklemeli üretim artık havacılık-uzay, enerji, otomotiv, tıp, aletler ve tüketici ürünleri gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde hem bir tasarım devrimine hem de bir endüstriyel devrime olanak vermektedir [6]. Son on yılın gelişmeleri, lazer ışını Eritme (LBM)'nin sadece prototipleme ve kalıp üretimi için değil, aynı zamanda protez ve küçük seri üretim gibi son derece kişiselleştirilmiş ürünler için umut verici, güvenilir ve tamamlayıcı bir üretim yöntemi olduğunu göstermektedir [7,24].

Eİ'de toz malzemenin şekli ve boyutu, lazer gücü, tarama yönü, tarama hızı, tarama çizgi aralığı ve katman kalınlığı gibi işlem parametrelerinin ürün mekanik dayanımı, boyutsal değişimi ve yüzey kalitesi üzerine önemli bir etkiye sahiptir [4]. Katmanlar malzemenin bir ısı kaynağı ile yerel olarak eritilmesiyle oluşturulduğundan malzemelerin termo-fiziksel özellikleri önemle ele alınmalıdır [3]. Lazer gücünün artması çekme dayanımını artırırken, tozların yüksek lazer enerjisini absorbe ettiklerinden dolayı daha fazla boyutsal değişime neden olduğu ve dolayısıyla yüzey kalitesini düşürdüğü belirtilmektedir [4].

Ancak yüksek sayılı üretim beklentileri oluştuğunda, Eİ seri üretimden daha maliyetli olabilmektedir. Ayrıca bazı havacılık, sağlık vb. kritik öneme sahip alanlarda yüksek mekanik özellikli ve çözünürlüklü basım yapabilen 3B yazıcılar gerekmektedir. Böylesi bir durumda yazıcıların yüksek fiyatları bu teknolojinin kullanımını kısıtlamaktadır. Malzeme çeşidinin ve baskı boyutunun sınırlı olması, gözeneklilik, üretim için tasarım zorluğu, baskı işlemi bittikten sonraki son işlem uygulamaları 3B baskı teknolojisinin diğer dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alanda endüstriyel ve akademik ortamlarda geliştirme çalışmaları sürekli devam etmektedir. Tasarım ve son işlem aşamaları üzerine yoğunlaşıldığı söylenebilir. Eİ Sonrasında yapılan son işlemler (Post Processing); makineyle işleme, elektro erozyon, bilya püskürtme, taşlama, cilalama, yüzey işleme, ısıl işlem, artık poroziteleri gidermek için sıcak izostatik presleme (HIP) ve kontroldür. [2, 6,8]. Bu çalışmada katmanlı imalat ile üretilen metalik malzemelerin kaynakla birleştirilmesi sonucu mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin araştırıldığı çalışmalar derlenmiştir.

2. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ (ADDITIVE MANUFACTURING METHODS)

Eklemeli imalat esaslı parça imalat yöntemleri Şekil 1'deki şemada verilmiştir. Ayrıca daha geniş sınıflandırma Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Eklemeli imalat yöntemleri (Additive manufacturing methods) [6]

Eİ yöntemlerinin uygulanmasında en yaygın kullanılan teknolojinin Stereolitografi (Stereolithography SLA) olduğu görülmektedir. Bu yöntem yüksek doğrulukta, renkli parçalar üretebilmektedir. Ancak parçalarda çarpılma ve büzülme olabilmektedir. Mukavemetli parçalar yapılacağına seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering SLS), ergiterek yığma ile modelleme (Fused Deposition Modeling FDM), elektron ışını ergitme (Electron Beam Melting EBM) ve şekil biriktirme imalat prosesi (Shape Deposition Manufacturing SDM) teknolojileri tercih edilebilir. Özellikle SLS, EBM ve SDM teknolojileri metal parça üretimini mümkün kılmaktadır. Fonksiyonel parça üretiminde SLS, SLA, FDM, EBM ve SDM sistemleri avantaj sağlamaktadır [1]. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) metodunun işlem süreleri, süreç analizleri, hasar oluşumundaki sıcaklık dağılım etkileri üzerine yapılan çalışmalarda; mevcut denklemler ve imalatın tüm adımlarını ve her türlü gideri hesaplamaya dâhil ederek genel bir maliyet ve süreç hesaplaması denklemi türetilmiştir. Geliştirilen model ve elde edilen sonuçlar DMLS ile imal edilmesi planlanan parçaların imalat süreleri, verimliliği ve hataların giderilmesi konusunda yapılması gerekenleri endüstrileşme potansiyeli ve imalatçılar tarafından kullanılabilirliğini arttırmıştır [9, 10]. SLS/E İ için lazer parametre değerlerine göre imalatı yapılacak metal parçanın mekanik özelliklerin tahminini için geliştirilen bulanık mantık modeli geleneksel yöntemler ile imal edilmiş 316L paslanmaz çelik parçadan daha iyi çekme dayanımına ve sertliğe sahip son kullanım parça imalatına imkan vermektedir [11]. Bunun yanı sıra Eİ ile, dövme çubuktan işlenmiş bir diz implantında işlemeyen kaynaklanan malzeme atıkları %80'e kadar ulaşabilir [12]. Sofu'nun çalışmasında, SLS ve SLM makinelerine lineer motorlar ve galvanometri adaptörleri kullanarak gövde tasarımının CAD modeli yapılmış ve lazerin çalışma alanı genişletilmiştir. Yeni oluşturulan CAD modelinin imalatının gerçekleştirerek ileride bu cihazların yerli üretiminin yapılması ve mevcut teknoloji üzerinde gelişmeler yapmak için geleceğe ışık tutması amaçlanmıştır [13]. Polat'ın çalışmasında, lazer ergitme metodu ile üretime yönelik bir düzene geliştirilmiştir. Bu düzeneğin üretim yeteneğini üzerine, üretimi etkileyen temel işlem parametrelerinin ürün üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneylerde Stellite-12 eşdeğeri toz kullanılmıştır. İşlem parametrelerinden lazer gücü, lazer tarama hızı, lazer frekansı, lazer tarama şekli ve katman kalınlığı göz önüne alınmıştır. MATLAB ortamında geliştirilen program ile görüntü işleme esaslı analizler yapılarak işlem parametrelerinin gözeneklilik oranına olan etkileri karşılaştırılmıştır. Lazer gücündeki artışın, tarama hızındaki azalmanın ve lazer frekansındaki artışın lazer enerji yoğunluğunu arttırmıştır. Giriş ısısının artışının uygun ergitmenin gerçekleşmesine sebep olduğu ve bu durumun gözenekliliği azalttığı belirtilmiştir [14].

Tablo 1. Eklemeli imalat yöntemleri ve özellikleri (Additive manufacturing methods and properties) [2]

	TİP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
EKLEMELİ İMALAT	SIVI	Eriyik	Malzeme Ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal Enerji	-Düşük yazıcı maliyeti -Çoklu malzeme ile baskı -Yüksek mukavemet -Düşük parça çözünürlüğü -Zayıf yüzey iş-sonu -Düşük baskı hızı
		Polimerize edilebilir	Fotopolimerisasyon	SL(SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV Işını	-Yüksek baskı hızı -Yüksek parça çözünürlüğü -Yüksek detay -Malzeme maliyeti yüksek
				DLP		Projeksiyon	-Yüksek baskı hızı -Çözünürlük, projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır
			Malzeme Püskürtme	Çoklu Püskürtme (PJ)	Fotopolimer, Wax	UV Işını	-Çoklu malzeme ile baskı -İyi yüzey iş-sonu -Yüksek doğruluk -Yüksek detay
	KATI	Yapışık Objeler	Sac Lamimasyon	Lamine Nesne İmalatı (LOM)	Kağıt, Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer Işını	-İyi yüzey iş-sonu -Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük -Büyük boyutlu malzeme basabilme -Dikey yönde zayıf mukavemet
	TOZ	Eritme	Toz Yataklı Eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek Güçlü Lazer Işını	-Yüksek doğruluk -Yüksek detay -Tam dolu parça üretimi -Yüksek mukavemet -Destek yapıları gerekmez
				DMSL			
				SLM	Metal Tozu, Seramik Tozu	Elektron Işını	
				EBM			
		Direk Enerji Depolama	LENS	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını	-Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme -Son-işlem gerekir	
	EBAM						
Yapıştırma	Yapıştırıcı Püskürtme	Bağlayıcı Püskürtme (BJ)	Seramik Tozu, Metal Tozu, Kum	Termal Enerji	-Renkli obje baskısı -Destek yapıları gerekmez -Geniş malzeme seçeneği -Yüksek baskı hızı -Son-işlem için infiltren malzeme gerektirir -Düşük dayanım -Yüksek gözeneklilik		

Seçer'in çalışmasında, eklemeli üretim yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM) üretim yöntemi ile 316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak farklı yüzey desenlerine (altıgen, dağımık, elips, kare, üçgen ve yeni model) sahip numuneler üretilmiştir. Numunelerin morfolojik, yapısal ve mekanik özelliklerini incelemek için XRD, SEM, üç boyutlu profilometre ve mikro sertlik cihazı kullanılmıştır. Numuneler kuru ve simüle edilmiş vücut sıvısı (SBF) ortamında dairesel (pin-on-disk) aşınma testine tabii tutulmuştur. Kuru ortamda yapılan deneylerde, geometrik desende keskin köşelerin olmaması ve aşınma azaltma yeteneğinden dolayı, sıvı ortamda ise pozitif net hidrodinamik fayda elde edildiğinden dolayı en iyi tribolojik özelliği elips geometrik desen göstermiştir [15]. Ahuja vd. çalışmalarında, bir toz yatağında lazer ışını ergitme yöntemi için değişen işleme koşulları ve sistem teknolojisine bağlı mekanik özelliklerde varyasyonları anlamayı amaçlayan bir testin tasarımını yapmışlardır. Yapım sonrası ısıl işlem, yüzey değişimi ve yapının oryantasyonu gibi tasarlanmış varyasyonların etkisi de sonuçlarda belirtilmiştir [16]. Nath vd., Lazer-toz yatak füzyon (L-TYF) tekniği ile üretilen AISI-420 paslanmaz çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin

incelemişlerdir. Isıl işlem öncesi 1050 MPa çekme mukavemeti, %2.5 uzama ve 55 HRC sertlik değerleri elde edilirken, ısıl işlem sonrası 1520 MPa çekme mukavemeti, %6 uzama ve 53 HRC sertlik değeri elde edilmiştir [17].

Lopez-Galilea vd. çalışmalarında, iki SLM işleme parametresinin (tarama hızı ve tarama mesafesi) Ni-esaslı süper alaşım CMSX-4'ün mikro yapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ayrıca, dönüşüm kusurlarını iyileştirmek için sıcak izostatik presleme (HIP) ile mikroyapı geliştirilmiştir. SLM ile elde edilen ince hücreli mikro yapılar, materyalin tamamen homojenleştirilmesi ve birincil çökeltilerin çözünmesi için tutma sürelerinin kısaltılmasını sağlar. 15 dakika tutma süresi 1300 °C'de alaşımı homojenleştirmek için yeterlidir [18]. Schönrrath vd. LBM içindeki proses parametrelerinin perma alaşımının (Ni78.5 Fe21.5) element dağılımı ve manyetik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Fe-Ni yumuşak mıknatıslarda özel manyetik anizotropi yönleri yaratmanın etkileri tartışılmıştır. Ticari olarak temin edilebilen Fe ve Ni tozlarının Ni78.5 Fe21.5 bileşimi ile ikili bir karışımından LBM ile homojen bir FeNi₃ alaşımı oluşturulmuştur. En yüksek enerji girdisi olan numunelerde, tek eksenli manyetik anizotropi sağlayan Demir ve Nikelin şerit şeklinde bir yüzey ayrımı bulunmuştur. Sonuç olarak, toz karışımlarından manyetik alaşımların eklemeli üretimi, gelecekteki cihazlarda manyetikleşmenin yönünü ve büyüklüğünü ve manyetik anizotropiyi ayarlamaya izin verebilir [19]. Weirather vd. çalışmasında, Lazer Işını Eritme işleminin simülasyonu için uygun üç boyutlu çok fazlı, zayıf sıkıştırılabilir bir SPH yaklaşımı sunulmuştur. Simülasyon sonuçları, tarama hızı ve lazer gücü proses parametreleri açısından model geçerliliğini değerlendirmek için tekli eriyik izlerinin deneysel bulguları ile karşılaştırılmıştır. [20]. Douellou vd. LBM eklemeli imalat sırasında meydana gelen termal bozulmaların değerlendirilmesi için GPS standartlarından esinlenen sayısal bir yaklaşım geliştirilmişlerdir. Temel geometrik özellik (duvar) için, düzlük kusurundaki farklılaşmayı boyutların bir fonksiyonu olarak tanımlamak mümkün olmuştur. Şekil optimizasyonu açısından beklentiler, LBM eklemeli imalat sürecinin sunduğu yeni olasılıklardan daha iyi yararlanılmasını sağlayabilir [21]. Pfaff vd., yaptıkları çalışmada, LBM ile malzemeler üretmede, üretim parametrelerinin malzeme yapısına ve özelliklerine etkisi araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, mikroyapının ortaya çıkan değişimi analiz edilmiştir. Alınan veriler, lazer gücü ve pozlama hızı ile ortaya çıkan tane büyüklüğü ve eriyik havuzu boyutları arasındaki korelasyonu göstermiştir [22].

Günümüzde çelikler, alüminyum ve titanyum alaşımları gibi birçok malzeme, bir lazer veya elektron ışını (Lazer Işını Ergitme-LBM ve Elektron Işın Ergitme-EBM) vasıtasıyla toz katmanlarını eriten toz yatak çözeltileri ile üretilebilir. Yüksek soğutma hızına sahip katman katman katılma ile gerçekleştirilen mikroyapı izotropik olarak kabul edilemez. Bu nedenle, mekanik özellikler inşaa yönünden etkilenebilir. [23].

Hattal vd., %1 ve %2.5 (ağırlıkça%) nano itriya stabilize zirkonya (nYSZ) ile güçlendirilmiş Ti6Al4V'nin seçici lazer eritme (SLM) sonuçlarını incelemişlerdir. nYSZ tozlarının Ti6Al4V ve kontrollü hacim fraksiyonları SLM teknolojisi ile harmanlanmıştır. Üretilen parçalar yaklaşık% 99.6 gibi çok yüksek bir yoğunluk göstermiştir. XRD sonuçları, oluşturulmuş Ti6Al4V örneğinde neredeyse α fazının (~% 99) ve% 1 ve% 2.5 nYSZ takviyesinin eklenmesiyle az miktarda β fazın varlığını göstermiştir. Kalıntı stres değerlendirmeleri yapıldı ve sonuçlar, sıkıştırma tipi kalıntı gerilmelerin varlığını gösterdi. NYSZ ile güçlendirilmiş Ti6Al4V'nin basınç dayanımı 1751 MPa'ya kadar arttırılmıştır. Ti6Al4V sünekliği,% 1 nYSZ ilavesinden sonra muhafaza edildi. Bu özellikler havacılık, savunma, nükleer ve petrokimya alanları gibi alanlarda çok faydalı olabilir [24]. Yüksek mekanik mukavemeti korurken seçici lazer eritme (SLM) ile üretilen Ti bazlı alaşımların sünekliğinin arttırılması, eklemeli imalatın en büyük zorluklardan biridir. Liu vd., böyle bir materyalin elde edilmesi için işlem parametreleri üzerinde sistematik bir araştırma yapmıştır. SLM sırasında optimal parametreler kullanılarak güçlü ve sünek Ti6Al4V alaşımlarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen mekanik özelliklerin önemli ölçüde artması, esas olarak martensit oluşumunun sınırlandırılması ve gözeneklerin en aza indirilmesi ile ilgilidir. Üretilen Ti6Al4V alaşımlarının mekanik özellikleri, imalat sonrası ısı veya basınç işlemlerine ihtiyaç duyulmaksızın dövme ve dökme malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde aşmaktadır [25]. Meneghetti vd. doğal kusurlar içeren SLM Eİ ile üretilmiş çelik numuneler üzerinde itme-çekme, gerilim kontrollü yorulma testleri

yapılmışlardır. İnşa yönüne paralel (0° yönlendirmeli) ve dik (90° yönlendirilmiş) olan numuneler test edilmiştir. Malzeme mikro yapısı imal edildiği durumdadır, yani yaşlandırma ısıl işlemi imalattan sonra yapılmamıştır. 0° -odaklı örnekler yaklaşık 30000 çevrim yorulma ömürlerinde yaklaşık 90° -odaklı örneklerle aynı yorulma mukavemetini sergilemiştir [26]. Moridi vd.'nin çalışmasında Ti6Al4V üretmek için seçici lazer eritme (SLM) kullanılmıştır. SLM işleminden sonra Ti6Al4V'nin mikroyapı analizi ile çekme testleri yapılmıştır. Basılan Ti6Al4V'nin birincil, ikincil ve üçüncül α 'martenzitten oluşan mikroyapıları tabaka bazında SLM işlemi sırasında döngüsel ısıl işlemin bir sonucu olarak oluşur. Gerilme deformasyonu üzerine primer α martensit içindeki gerinim lokalizasyonu, mikroskobik sünek mikro boşluk oluşumu ve birleşmesinin yanı sıra makroskopik gevrek kırılma ile sonuçlanmıştır [27]. Larimian vd. çalışmalarında, farklı işleme parametreleri ile SLM işlemi ile üretilen 16 örnek incelenmiştir. Mikro sertlik testleri, çekme testleri ve bir tarama elektron mikroskobu (SEM) analizi yaparak tarama hızının, tarama stratejisinin ve enerji yoğunluğunun bu örneklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öncelikle soğutma hızındaki azalma nedeniyle tarama hızının azalması sonucunda dendritlerin genişliğinde bir artış gözlenmiştir. 316L paslanmaz çelik numunelerin mekanik özellikleri olarak tarama stratejisi, tarama hızı ve enerji yoğunluğunun yoğunlaşmayı, mikro yapıyı önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Daha yüksek tarama hızında işlenen SLM numuneleri, daha düşük tarama hızıyla işlenen örneklere kıyasla daha iyi yoğunlaştırma, rafine mikro yapı ve mükemmel mekanik özellikler sergiledi. Bu öncelikle yüksek tarama hızları ile işlenen numunelerde elde edilen yüksek soğutma oranı nedeniyle daha yüksek yoğunlaştırma ve rafine mikroyapıdan kaynaklanmaktadır [28]. Holovenko vd. İnterpenetrasyon Faz Kompozitlerinin (IPC) üretilmesinde titanyum hücresel kafes yapılarının sert metal (WC-Co) tozu ile doldurulması ve ardından Spark Plazma Sinterleme (SPS) ile konsolidasyon yoluyla üretilmiştir. Konsolidasyon işlemi sırasında kimyasal reaksiyonların ve difüzyonun derecesini değiştirmek için titanyum kafesin yüzey nitrürlenmesi ve karbürizasyonu gerçekleştirilmiştir. Mevcut araştırma bulguları, Eİ uygulanarak metal-seramik IPC'lerin üretilebileceğini göstermektedir [29].

Son yıllarda uçak imalatında hafif kompozit parçalar metallerin yerini almaya başlamıştır. Buna rağmen halen küçük bir yolcu uçağında birkaç ton titanyum kullanılmaktadır. Bu parçalar çoğunlukla talaşlı imalatla elde edilirken, proses esnasında malzemenin %90'ı kesilip atılmaktadır. Katmanlı imalatla, talaşlı imalattaki malzeme sarfiyatından da kaçınılarak hem enerji tasarrufu sağlanmakta hem de çevreye daha az zarar verilmektedir. Son zamanlarda geliştirilen ve lazer yardımıyla eritilmiş Ti6Al4V, TiCP, 17-4, 316L paslanmaz çelik gibi metal tozlarının kullanıldığı metal esaslı katmanlı imalat teknolojisi, havacılık sanayi tarafından kucaklanmış durumdadır [5]. Katmanlı imalat yöntemlerinin havacılık firmaları tarafından gelecekte önemli ölçüde kullanılacağı ve bu amaçla ciddi Ar-Ge çalışmalarını gerçekleştirdiği görülmektedir. Maliyet ve işçilik kazançlarından dolayı oldukça tercih edilebilecek bir yöntem olacaktır [30]. Motor parçalarında Inconel 718 ve Inconel 625 gibi malzemeler, gövde ve yapısal parçalarda ise Ti6Al4V daha fazla kullanılmaktadır. Parça için kritik olan malzeme özellikleri katmanlı imalat yöntemiyle elde edilebildiğinden, örneğin GE havacılık türbinli motorların sıcak kısımlarına uygun bazı parçaları bu teknoloji yardımıyla imal etmeyi tercih etmektedir [5]. Katmanlı imalat ile 20 parçadan oluşan yakıt nozulü tek parça haline getirilebilmiştir. Yüksek ısıya karşı dayanıklı malzemelerin kullanılacağı ve %15-20 yakıt tasarrufu sağlayacak olan bu jet motoru, Airbus'un uçak serilerinde de kullanılması beklenmektedir [13]. Havacılık sanayinde katmanlı imalat; zaman, yetkin çalışan (örneğin kalıp yapımında) ve hurdaya çıkan malzeme miktarının çokluğundan dolayı pahalıya mal olan döküm, dövme ve talaşlı imalat parçalarının yüksek fiyatlarına göre daha avantajlı olmaktadır. Ayrıca kalıp ihtiyacını azaltarak ya da tamamen ortadan kaldırarak yeni parçaların geliştirilmesini de hızlandırmaktadır. Tasarım hatalarını düzeltme, montaj kolaylığı sağlama veya versiyon değişikliği gibi durumlarda bu teknolojide sadece 3 boyutlu modeli değiştirerek, takım masrafı olmadan parçada istenen değişikliğin oluşturulması mümkündür [5].

3. EKLEMELİ İMALATTA SON İŞLEM OLARAK TALAŞLI İMALAT UYGULAMALARI (MACHINING PRACTICE AS A POST PROCESSING IN ADDITIVE MANUFACTURING)

Holmberg vd., üç yüksek enerjili işleme yöntemini (aşındırıcı su jeti (AWJM), elektrik deşarj ile işleme (EDM) ve lazer ışını ile işleme (LBM)) yüzey bütünlüğü, küresel uçlu frezelenmiş bir yüzeyle karşılaştırılmıştır. AWJM'nin yüzey bölgesindeki basınç kalıntı gerilmeleri ve düşük yüzey pürüzlülüğü ile en yüksek kalitede sonuçlandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, EDM'nin yüzeyde sıg kalıntı gerilmeleri ve daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip izotropik bir yüzey dokusu ile sonuçlandığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, her iki yöntem de geleneksel frezelemeye olası alternatifler olarak düşünülse de ek işlem gerektirir. Bunun nedeni, yüzeylerin AWJM'den aşındırıcı ortamdan veya EDM'den yeniden katmandan temizlenmesi gerektiğidir. Ayrıca, LBM'nin, işleme sürecinden kaynaklanan derin zararlı etki nedeniyle bu durumda bir alternatif olarak görülmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Lazer ışını ile işleme, yüksek gerilimli artık gerilmelere, yüksek yüzey pürüzlülüğüne ve işlenmiş iş parçası için mikro yapının derin değişikliklerine yol açan olumsuz etkisi nedeniyle 8 mm kalınlığında Inconel 718 levhaların işlenmesi için uygun bir işleme yöntemi değildir [31].

Bonaiti vd. çalışmalarında, Laser Engineered Net Shaping (LENS) eklemeli imalat işlemiyle üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mikro-frezeleme işlenebilirliğini yüzey kalitesine, kesme kuvvetlerine ve talaş oluşumuna göre incelemiştir. Eklemeli imalat parametrelerinin etkileri de incelenmiştir, çünkü işleme sırasındaki malzeme termal geçmişi, numunelerin gözenekliliğini ve mekanik davranışını etkileyebildiği için farklı frezeleme performansları vermiştir. Ti-6Al-4V'nin temel sorunları, yüksek deformasyon sertleşmesi davranışı, kimyasal yakınlık ve takım aşınmasını hızlandıran düşük termal iletkenlik ile ilgilidir. Dış başına ilerlemenin ve kesme derinliğinin doğrudan pozitif bir etkisi vardır. Bununla birlikte, malzeme tipinin etkisi belirli bir eğilim göstermiştir. Ayrıca, pürüzlülük değerlerinden ortalama olarak standart dövme titanyumun üç Eİ malzemesinden çok daha yüksek pürüzlülük değerine sahip olduğu görülmüştür. Eİ malzemelerin artan sertliği daha ince bir martenzit ve artan lazer gücünün kullanımı ile ilgilidir. Bununla birlikte, lazer gücündeki artış daha düşük gözeneklilik üretir, böylece malzeme numunelerinin genel bütünlüğünü geliştirir. Pürüzlülük, kesme derinliği ve ilerleme parametrelerindeki artışla artar. Bununla birlikte, Eİ malzemelerinin sertliğinde bir artış daha düşük bir pürüzlülük değeri üretir. Standart titanyum malzemenin işlenmesi, düşük sertliğine rağmen Eİ malzemelerinden çok daha pürüzlü bir yüzey üretir. Ortaya çıkan kesme kuvvetleri, yüksek sertliklerine rağmen Eİ materyalleri için standart titanyumdan daha düşüktür. Genel olarak kuvvetler, dış başına ilerleme ve kesme derinliği ile birlikte artar. Aynı yönlü frezelemenin çapak oluşumu, standart titanyum ile karşılaştırıldığında Eİ malzemeleri için önemlidir. Çapak oluşumu, Eİ malzemeleri için kullanılan lazer gücü ile ilgilidir [32]. Bordin vd. EBM ile eklemeli üretilmiş Ti6Al4V asetabular kapların tornalanmasında işlenebilirliği kriyojenik işleme ve kuru işleme şartlarında karşılaştırmışlardır. 40 saniyelik kısa tornalama işlemleri için, kriyojenik tornalama uygulanabilir çünkü ıslak ve kuru tornalamada benzer geometrik sapmalar sergilemiştir. Daha uzun tornalama işlemleri için, takım tutucunun kaçınılmaz soğutulması geometrik sapmaları giderek artırır [33]. Ti6Al4V, genellikle kesilmesi zor bir metal alaşımı olarak kabul edilir. Kesme sıcaklığını azaltarak işlenebilirliğini arttırmak için, Sıvı Azot (LN₂) ile kriyojenik soğutma, özellikle biyomedikal alanda toksik olmayan, güvenli ve temiz olmasına çok dikkat çekmiştir. Sartori vd.'nin çalışmasında, iki Metalik Sinterleme (DMLS) ve Elektron Işın Eritme (EBM) iki Eklemeli Üretim (Eİ) tekniği ile üretilen farklı Ti6Al4V mikroyapı değişimlerinde yarı ince talaş işlemede kuru kesme ile karşılaştırıldığında bu soğutma stratejisinin etkinliğini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, incelenen alaşımların mekanik ve termal özellikleri ile hem kuru kesme hem de kriyojenik soğutma koşullarında takım aşınma mekanizmaları arasında bir ilişki olduğunu kanıtlamaktadır. En derin krater aşınması DMLS'yi işleyen takımda hem en yüksek sertliği hem de en düşük termal içeriği nedeniyle oluşmaktadır. Hem kesici kenardaki abrasiv aşınma hem de yan yüzey aşınması LN₂ uygulanarak azaltılmıştır [34]. Bordin vd.'nin çalışmasında da aynı malzeme için benzer sonuçlara işaret edilmiştir [35]. Gong ve Li Eİ'den sonra, frezeleme sonrası takım aşınması ve kırılan takımları incelemiştir. 316L paslanmaz çeliği farklı frezeleme sonrası takım aşınma performansını ve yüzey

kalitesini değerlendirmektedir. Frezeleme süresinin artmasıyla birlikte takım aşınması ilk aşınma aşamasını, normal işleme aşamasını ve ciddi kırık aşamasını yaşar. Frezelenmiş yüzey kalitesi ve pürüzlülüğü de üç aşamadan oluşur. İlk olarak, yüzey kalitesi çok iyidir. Sonra pürüzlülük sabit kalır. Son olarak, yüzey pürüzlülüğü hızla azalır. Aşağı frezeleme, LAM tarafından elde edilen bileşenler için yukarı frezelemeden daha iyidir [36]. Zhang vd. tel ark eklemeli imalatı (WAAM) ve frezelemeyi birleştiren hibrit bir teknik ile Al5Si alüminyum alaşımı kullanılarak incelemiştir. Sonuçlar, frezeleme kesme derinliği 0.4-1.2 mm aralığında olduğunda, bu hibrit katkı / çıkarıcı imalatın hem yüzey pürüzlülüğünün hem de işleme payının saf WAAM ile karşılaştırıldığında azaldığını göstermiştir. Ayrıca, bu şekillendirme parçalarının uygulama gereksinimini karşılamak için genellikle işlem sonrası kullanılır [37,38]. Dang vd., kuru delme işlemi altında kesme kuvvetleri, sıcaklıklar, işlenmiş yüzey pürüzlülüğü, takım aşınma tipleri, seçilen kesme hızları, ilerleme hızları ile talaş morfolojisi dahil olmak üzere Eİ ile üretilen Ti6Al4V'nin işlenebilirliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde kullanılan malzeme, Direct Metal Lazer Sinterleme (DMLS) teknolojisi tarafından üretilen Ti6Al4V'dir. Deneysel sonuçlar, DMLS Ti6Al4V'nin işlenebilirliği üzerindeki parametrik etkiyi vurgulamış ve işleme parametrelerini buna göre yeniden tasarlama imkanı sunmuştur [39]. Rysava vd., DMLS adı verilen Eİ teknolojisi ile üretilen Ti6Al4V titanyum alaşımının delinebilirlik özelliklerini araştırmışlardır. Kuru kesme koşullarında değişen kesme hızında ve ilerleme hızında 5 eksenli yüksek hassasiyetli bir mikro freze tezgahında 1.6 mm çapında delikler açılmıştır. İşlenmiş deliklerin en temsili geometrik özelliklerini (çap ve diklik) ve çapakların miktarını ölçmek ve karşılaştırmak için özel bir ölçüm prosedürü geliştirilmiştir. Deneysel yaklaşım diş pimi implantının üst kısmı ile insan çenesi arasındaki bağlantıyı sağlayan fonksiyonel özelliği üretmek için gerekli olan, diş açmadan önceki yüksek hassasiyetli delikler açmak için kullanılmıştır. Uygun bir delme parametresi seti seçilerek, sonraki diş açmanın yüksek doğrulukta geometrik kalite sağlayabileceği kanıtlanmıştır [10]. Ming vd., kuru delme işlemi sırasında yaygın olarak kullanılan standart helisel matkap ile talaş morfolojisi ve talaş gelişimi ve delinmiş deliklerin yüzey bütünlüğü araştırmıştır. Doğrudan metal lazer sinterleme özellikli EOS TM EOSINT M280 (DMLS) Eİ tekniği ile üretilen Ti6Al4V deney numunesi malzemesi olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, talaşların matkap ucunun ilerlemesi ile farklı morfolojiler gösterdiğini ve kesme değişkenlerinden bağımsız olarak sürekli talaşların elde edildiğini göstermektedir. Matkap ilerledikçe, talaş morfolojisi spiral koniden katlanmış şeride dönüşmektedir. Matkap ucundaki karışık talaşlar nedeniyle delik yüzeylerinde bazı çizik ve bulaşma izleri oluşturmuştur [40].

Talaşlı imalatın temel hedefi, üretilecek iş parçasının geometrik ve boyutsal tamlığıyla birlikte yüzey kalitesinin ve delik çıkışındaki çapakların yüksekliğinin istenen sınırlar içerisinde ekonomik olarak sağlanmasıdır. Yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımlarının gerek Eİ ile gerekse geleneksel olarak üretilenlerinin dolayı talaşlı işlenmesi veya delinmesi oldukça zordur. Tungsten karbür (WC) ve yüksek hız çeliği (HSS) matkaplarla, farklı kesme hızı ve ilerlemelerde Ti-6Al-4V'nin delinmesinde yüzey pürüzlülüğü, delik çapındaki sapma, çapak yüksekliği, sıcaklık, talaş oluşumu ve takım aşınması üzerine etkileri incelenmiştir. Kesme hızının artması takım ve iş parçasındaki sürtünmeyi arttırdığından ve Ti-6Al-4V malzemenin düşük termal özelliğe sahip olması, kesici takımların daha fazla ısınmasına neden olmuştur. Hem ilerlemenin hem de kesme hızının artması takım aşınmasını arttırmıştır. İlerleme arttıkça ortalama yüzey pürüzlülük değeri, kesme kuvvetleri ve aşınma artış eğilimindedir [41-43]. Ayrıca bu alaşım için soğutma sıvısı kullanımı delik kalitesini ve takım aşınmasını da iyileştirmektedir [44, 45].

Tablo 2. Literatür özet tablosu (Literature summary table)

İşleme Yöntemi	Deney Parametreleri	Eklemeli İmalat Parametreleri	Değerlendirme kriterleri:
Frezeleme : F Tornalama : T Delme: D Eklemeli İmalat: Eİ	Kesme Parametreleri Kesme Hızı:Vc Kesme derinliği:ap İlerleme:f Kesici takım tipi:KT	Lazer Gücü: W Tarama Hızı: Th	Kesme kuvvetleri: KK Takım aşınması:TA Takım ömrü:TÖ Yüzey pürüzlülüğü:YP Parça Mukavemeti: PM Mikroyapı Analizi: MA Isıl İşlem: Ht Kriyojenik Soğutma: LN
LBM = Laser Beam Melting (Lazer Işını Ergitme) DMLS/E = Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme) SPS = Spark Plasma Sintering (Kıvılcım Plazma Sinterleme) SLM = Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme) EBM = Electron Beam Melting (Elektron Işını Ergitme) LENS = Laser Engineered Net Shaping (Lazerle Tasarlanmış Ağ Şekillendirme) WAAM = Wire Arc Additive Manufacturing (Tel Ark Eklemeli İmalat)			

Kaynak	Malzeme	Üretim Yöntemi	İşleme Yöntemi	Deney Param.	Değ. Kriterleri
1			Eİ		YP, PM, Derleme
2			Eİ		Eİ Geleceği derleme
3			Eİ		Eİ Kullanılan malzemeler
7		LBM	Eİ		MA, PM
9		DMLS	Eİ		Eİ Verimlilik, Maliyet,
10		DMLS	Eİ		Eİ Etkileyen parametreler
11		DMLS/E	Eİ		Tezgah parametresi
14	Stellite-12	LBM	Eİ	W,Th	MA
15	316L	SLM	Eİ		Tribolojik, MA
16		LBM	T		YP, Ht
18	CMSX-4	SLM	Eİ		MA,Ht
19	Fe-Ni	LBM	Eİ		MA
20	Inconel 718	LBM	Eİ	W, Th	MA
22		LBM	Eİ	W, Th	MA
23		LBM, EBM	Eİ		MA, PM
24	Ti6Al4V	SLM			MA, PM
25	Ti	SLM	Eİ	W	PM, Ht
26		SLM	Eİ		PM, Ht
27	Ti6Al4V	SLM			MA
28	316L	SLM	Eİ	W, Th	MA
29	WC-Co	SPS	Eİ		MA
31	718	LBM, EDM			YP
32	Ti6Al4V	LENS	F	Vc,ap,f,W	KK, YP
33	Ti6Al4V	EBM	T		YP
34	Ti6Al4V	EBM, DMLS	T	Vc,ap,	TA, LN, YP
35	Ti6Al4V	EBM	T	Vc,f,	TA, YP, LN
36	316L		F	Vc,ap	TA, YP
37	Al5Si	WAAM	F	Vc,ap	YP, KK
39	Ti6Al4V	DMLS			KK, TA, YP, MA
40	Ti6Al4V	DMLS			KK, TA, YP, MA, LN, Ht
41	Ti6Al4V		F	Vc,f,KT	YP, TA, YP
42	Ti6Al4V		D	KT,f,Vc	TA, KK, YP
43	Ti6Al4V		D	Vc,f,	LN, KK, YP, TA
44	Ti6Al4V		D	Vc,f,KT	YP
45	Ti6Al4V		D	Vc,f	KK, YP

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Yukarıda verilen literatür bilgileri ve Tablo 2 değerlendirildiğinde Eİ konusunda akademik alanda yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmada yer verilemeyen çok sayıda çalışmanın da olduğu göz ardı edilmemelidir. Eİ konusunun her yönüyle endüstriyel ve akademik olarak geliştirilmek istendiği görülmektedir. Bu da gelecekte Eİ proseslerinin endüstriyel sahada geniş kullanım alanı bulacağını göstermektedir. Araştırmaların temel çıkış noktasının Eİ süreçlerinin olumsuz yönlerinin azaltılması ya da ortadan kaldırılması olduğu söylenebilir. Özellikle üretim parametrelerinin optimizasyonu ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi arayışları öne çıkmaktadır. Eİ ile üretilen mekanik parçaların son işlem gereksinimleri halen kaçınılmazdır. Yüzey kalitesindeki yetersizliklerin talaşlı imalat ihtiyacını öne çıkardığı söylenmektedir. Bu aşamada tornalama, frezeleme, taşlama, delik delme ve parlatma gibi operasyonların çalışıldığı görülmektedir. Delik delme operasyonlarında ise dolu parçadan delik delme ve kılavuz çekme için delik delme gibi çalışmalar [39,40] son aylarda literatüre girmiştir. Özellikle protez ve diş implant parçaları üzerine araştırmalara ilgi gösterilmektedir. Eİ yöntemiyle üretilen parçaların kullanılacağı yerlerdeki montaj şartlarını karşılamaları için genellikle delme gibi geleneksel işlemeye ihtiyacı vardır. Bazı sektörlerde üretilen ve kullanılan parçalarda özellikle montaj ve kılavuz çekme amaçlı delik delme operasyonları önemli yer tutmaktadır. Bu durumda delik delme işlemlerinin fazlalığı prosesin iyileştirilmesi beklentisini arttırmaktadır. Bu tür talaşlı imalatta ise geleneksel dövme işlemleriyle üretilen malzemelere kıyasla farklı işlenebilirlik özellikleri anlamına gelmektedir. Bu nedenle, işleme (delme) parametrelerinin Eİ parçalarının delme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak büyük önem taşımaktadır. Yapılacak araştırmalarla Eİ üretim maliyetlerine getireceği avantaj elde edilebilir.

Bu alanda eksikliği görülen alanlarda yapılacak çalışmalar her zaman olacaktır ve olmalıdır. Geleceği olan bir imalat prosesinin araştırılması ülkemizin havacılık ve savunma sanayisindeki hedefleri düşünüldüğünde önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. İ. Çelik, F. Karakoc, M.C. Cakir, A. Duysak, Rapid prototyping technologies and application areas, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31:53–70, 2013.
2. H.K. Sürmen, Eklemeli imalat (3B Baskı): Teknolojiler ve uygulamalar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24:373–92, 2019.
3. O. Özsolak, Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 1:9–14, 2019.
4. B. Yalçın, B. Ergene, Endüstride yeni eğilim olan 3-B eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknol. Bilim Dergisi*, 9:65–88, 2017.
5. N. Kara, Havacılıkta katmanlı imalat teknolojisinin kullanımı, *Mühendis ve Makine*, 54:70–5, 2013.
6. Epma. Introduction to additive manufacturing technology, a guide for designers and engineers, *Euro Powder Metall Assoc.*, Shrewsbury, 2019.
7. M. Schmidt, M. Merklein, D. Bourell, D. Dimitrov, T. Hausotte, K. Wegener, Laser based additive manufacturing in industry and academia, *CIRP Ann Manuf Technol*, 66:561–83, 2017.
8. H. Irrinki, M. Alhofors, J. Stitzel, O. Gulsoy, Sıcak izostatik preslemenin lazer-toz yatak füzyon tekniği ile üretilmiş 17-4PH paslanmaz çelikler üzerine etkisi, *2nd International Turkish World Engineering and Science Congress*, 7-10 Kasım, 2019, Türkiye.
9. M.Y. Kayacan, N. Yılmaz, DMLS eklemeli imalatta süreç ve maliyet modeli geliştirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 22:763–70, 2019.
10. M.Y. Kayacan, N. Yılmaz, DMLS ile eklemeli imalatta dengesiz sıcaklık dağılımı ve parçaya etkilerinin araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 7:79–94, 2019.
11. B. Duman, M.C. Kayacan, Doğrudan metal lazer sinterleme / ergitme yöntemi ile imal edilecek parçanın mekanik özelliklerinin tahmini, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 7:12-28, 2017.
12. Z. Rysava, S. Bruschi, S. Carmignato, F. Medeossi, E. Savio, F. Zanini, Micro-drilling and threading of the Ti6Al4V titanium alloy produced through additive manufacturing, *Procedia CIRP*, 46:583–6, 2016.
13. M.M. Sofu, Hızlı direkt imalatta kullanılan seçici lazer sinterleme ve ergitme cihazının gövde tasarımı ve imalatı, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü, Isparta, 2007.
14. E. Polat, Katmanlı lazer ergitme metodu ile üretime yönelik düzenek geliştirilmesi ve işlem parametrelerinin etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2016.

- 15.Y. Seçer, Seçici lazer ergitme yöntemi ile oluşturulan farklı yüzey tekstürlerinin ve plazma nitrüleme işleminin AISI 316L paslanmaz çeliğinin yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi , Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2019.
- 16.B. Ahuja, A. Schaub, D. Junker, M. Karg, F. Tenner, R. Plettke, A round robin study for laser beam melting in a metal powder bed, *South African J Ind Eng* 27:30–42, 2016.
- 17.S. D. Nath, H. Irrinki, M. Kearns, O. Gulsoy, S. V. Atre, Microstructure and mechanical properties of AISI-420 stainless steels produced by laser-powdered bed fusion, 2nd International Turkish World Engineering and Science Congress, 7-10 Kasım, 2019, Türkiye.
- 18.I. Lopez-Galilea, B. Rutttert, J. He, T. Hammerschmidt, R. Drautz, B. Gault, Additive manufacturing of CMSX-4 Ni-base Superalloy by Selective Laser Melting: Influence of Processing Parameters and Heat Treatment, *Addit Manuf*, 30:874-899, 2019.
- 19.H. Schönrrath, M. Spasova, S.O. Kilian, R. Meckenstock, G. Witt, J.T. Sehr, Additive manufacturing of soft magnetic permalloy from Fe and Ni powders: Control of Magnetic Anisotropy, *J Magn Magn Mater*, 478:274–8, 2019.
- 20.J. Weirather, V. Rozov, M. Wille, P. Schuler, C. Seidel, N.A Adams, A smoothed particle hydrodynamics model for laser beam melting of Ni-based alloy 718, *Comput Math with Appl*, 78:2377–94, 2019.
- 21.C. Douellou, X. Balandraud, E. Duc, Assessment of geometrical defects caused by thermal distortions in laser-beam-melting additive manufacturing: a simulation approach, *Rapid Prototyp J*, 25:939–50, 2019.
- 22.A. Pfaff, M. Jäcklein, K. Hoschke, M. Wickert, Designed materials by additive manufacturing—impact of exposure strategies and parameters on material characteristics of AlSi10Mg processed by laser beam melting, *Metals (Basel)*, 8, 2018.
- 23.D. Rigon, G. Meneghetti, M. Görtler, D. Cozzi, W. Waldhauser, M. Dabalà, Influence of defects on axial fatigue strength of maraging steel specimens produced by additive manufacturing, *MATEC Web Conf*, 165:2–8, 2018.
- 24.A. Hattal, T. Chauveau, M. Djemai, J.J. Fouchet, B. Bacroix, G. Dirras, Effect of nano- Yttria stabilized zirconia addition on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V parts manufactured by selective laser melting, *Mater Des*, 180, 2019.
- 25.J. Liu, Q. Sun, C. Zhou, X. Wang, H. Li, K. Guo, Achieving Ti6Al4V alloys with both high strength and ductility via selective laser melting, *Mater Sci Eng A*, 766, 2019.
- 26.G. Meneghetti, D. Rigon, C. Gennari, An analysis of defects influence on axial fatigue strength of maraging steel specimens produced by additive manufacturing, *Int J Fatigue*, 118:54–64, 2018.
- 27.A. Moridi, A.G. Demir, L. Caprio, A.J. Hart, B. Previtali, B.M. Colosimo, Deformation and failure mechanisms of Ti–6Al–4V as built by selective laser melting, *Mater Sci Eng A*, 768, 2019.
- 28.T. Larimian, M. Kannan, D. Grzesiak, B. AlMangour, T. Borkar, Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting, *Mater Sci Eng A*, 770, 2020.
- 29.Y. Holovenko, L. Kollo, M. Saarna, R. Rahmani, T. Soloviova, M. Antonov, Effect of lattice surface treatment on performance of hardmetal - titanium interpenetrating phase composites, *Int J Refract Met Hard Mater*, 86, 2020.
- 30.B. Aktimur, E.S. Gökpinar, Katmanlı üretimin havacılıkdaki uygulamaları, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim Dergisi*, 3:463–9, 2015.
- 31.J. Holmberg, J. Berglund, A. Wretland, T. Beno, Evaluation of surface integrity after high energy machining with edm, laser beam machining and abrasive water jet machining of alloy 718, *Int J Adv Manuf Technol*, 100,1575–91, 2019.
- 32.G. Bonaiti, P. Parenti, M. Annoni, S. Kapoor, Micro-milling machinability of DED additive titanium Ti-6Al-4V, 45th SME North Am Manuf Res Conf, 10,497–509, 2017.
- 33.A. Bordin, F. Medeossi, A. Ghiotti, S. Bruschi, E. Savio, L. Facchini, Feasibility of cryogenic cooling in finishing turning of acetabular cups made of additive manufactured Ti6Al4V, *Procedia CIRP*, 46:615–8, 2016.
- 34.S. Sartori, L. Moro, A. Ghiotti, S. Bruschi, On the tool wear mechanisms in dry and cryogenic turning additive manufactured titanium alloys, *Tribol Int*, 105:264–73, 2017.
- 35.A. Bordin, S. Sartori, S. Bruschi, A. Ghiotti, Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by additive manufacturing, *J Clean Prod*, 142:4142–51, 2017.
- 36.Y. Gong, P. Li, Analysis of Tool Wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel, *J Mech Sci Technol*, 33:2387–95, 2019.
- 37.S. Zhang, Y. Zhang, M. Gao, F. Wang, Q. Li, X. Zeng, Effects of milling thickness on wire deposition

- accuracy of hybrid additive/subtractive manufacturing, *Sci Technol Weld Join*, 24:375–81, 2019.
- 38.F. Li, S. Chen, J. Shi, H. Tian, Y. Zhao, Evaluation and optimization of a hybrid manufacturing process combining wire arc additive manufacturing with milling for the fabrication of stiffened panels, *Appl Sci*, 7, 2017.
- 39.J. Dang, G. Liu, Y. Chen, Q. An , W. Ming, M. Chen, Experimental investigation on machinability of DMLS Ti6Al4V under dry drilling process, *Mater Manuf Process*, 34:749–58, 2019.
- 40.W. Ming, J. Dang, Q. An, M. Chen, Chip formation and hole quality in dry drilling additive manufactured Ti6Al4V, *Mater Manuf Process*, 1-9, 2019.
- 41.H. Yıldız, Ti-6AL-4V alaşımın delinmesinde kesme parametrelerinin delik üzerine ve kesici takıma etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi , Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, Türkiye, 2019.
- 42.G. Uzun, S.A. Yaşar, I. Korkut, Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve delik kalitesine etkisinin incelenmesi, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi* 7:469–75, 2017.
- 43.M. Perçin, K. Aslantas, I. Uzun, Y. Kaynak, A. Çicek, Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: The effects of cooling/lubricating, *Precis Eng*, 45:450–62, 2017.
- 44.T. Kıvak, U. Şeker, Tİ-6AL-4V alaşımının delinmesinde M42 HSS takımlara uygulanan kriyojenik işlemin delik kalitesi üzerine etkileri, 7th International Symposium On Machining, Kasım 3-5, 2016.
- 45.J. Nam, S.W. Lee, Machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V) in environmentally-friendly micro-drilling process with nanofluid minimum quantity lubrication using nanodiamond particles, *Int J Precis Eng Manuf - Green Technol*, 5:29–35, 2018.

An Experimental Investigation into The Optimal Processing Conditions for The Diamond Paste Polishing of SKD 61 Mold Steel

Ulaş ÇAYDAŞ¹, Mahmut ÇELİK^{2,*}

¹Erciyes University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Kayseri/Turkey

²Firat University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Elazığ/Turkey

ARTICLE INFORMATION

Received: 09.03.2020

Accepted: 30.04.2020

Keywords:

Mirror surface

Ultra-high precision machining

Diamond paste polishing
Optimization

ABSTRACT

In this study, the effect of diamond paste polishing parameters such as polishing time, axial loading and spindle speed on the surface roughness and specular reflectance of SKD 61 mold steel were experimentally investigated. The experiments were conducted based on the Taguchi orthogonal array. The statistical significance of the each factor and their interactions on the measured responses and optimal parameter level settings were determined using analysis of variance (ANOVA) and main effect plots. In order to predict the each output characteristic, a linear regression equation was developed. Polished surfaces were studied using atomic force microscope (AFM). The developed models predicted the responses with an R^2 of 0.74 and 0.85 for surface roughness and specular reflectance, respectively.

SKD 61 Kalıp Çeliğinin Elmas Pastayla Parlatma İşleminde Optimal İşleme Koşulları Üzerine Deneysel Bir İnceleme

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 09.03.2020

Kabul: 30.04.2020

Anahtar Kelimeler:

Ayna yüzey

Ultra yüksek hassas işleme

Elmas pastayla parlatma
Optimizasyon

ÖZET

Bu çalışmada, parlatma süresi, eksenel yükleme ve fener mili hızı gibi elmas macunuyla parlatma parametrelerinin SKD 61 kalıp çeliğinin yüzey pürüzlülüğü ve speküler yansımaları üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel Taguchi ortogonal deneysel tasarım dizisine göre yapılmış olup her bir faktörün istatistiksel önemi ve ölçülen yanıtlar ile optimal parametre seviyeleri üzerindeki etkileşimleri varyans analizi (ANOVA) ve esas etki grafikleri kullanılarak belirlenmiştir. Her bir çıktı karakteristiğini tahmin etmek için doğrusal bir regresyon denklemi geliştirilmiştir. Parlatılan yüzeyler atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak incelenmiştir. Geliştirilen modeller, yüzey pürüzlülüğü ve speküler yansıma için sırasıyla 0.74 ve 0.85'lik bir R^2 ile yanıtları tahmin etmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The quality of an engineering surface has to satisfy the increasing demands for machine parts. Fabricating a high precise surface in machining mass standards has recently been the focus of attention. According to the Taniguchi classification of the machining techniques, the surfaces about an accuracy of 0.1 μm is accepted as precision machining while 0.01 μm was regarded as high precision machining [1]. Super-finished and mirror surfaces ($R_a < 0.1\mu\text{m}$) find an increasing application especially in electronic components, casing for consumer electronics, optics, tribology, micro mechanics and micro fluids [2]. In the field of optical surfaces, the reflectivity has to be as possible as high and the allowable average roughness (R_a) value should be lower than 10 nm [3]. Since the presence of oxygen in the atmosphere, the colored materials such as aluminum and copper give matt surfaces which reduce the life of molds significantly. Therefore, researchers have attempted to produce the steel molds mirror surfaces [4]. Polishing is a micro chip material removal process by the rubbing of peaks to produce a smooth and shiny surface with a significant specular reflection [5].

* Corresponding author, e-mail: mahmutcelik@erciyes.edu.tr

The process of polishing with an abrasive wheel leads to many undesirable surface defects. During the polishing process, the micro sized abrasive grains which are continuously in contact with the workpiece are generally blunted due to the friction; therefore, the forces and thickness of the metamorphic layer are increased to produce burning effects on the machined surface. Moreover, the removed micro chips from the surface during polishing process are accumulated between the abrasive grains reduce the efficacy of the abrasive wheels [6]. The generated surface textures are consisting of many marks and scratches by the scooping and ploughing actions of the abrasive particles. On the other hand, chemical polishing processes have also several limitations including delaminating at weak interfaces, corrosive attacks from slurry and chemicals stress cracking [7]. Apart from the abrasive wheel, chemical mechanical [8-10], magnetic compound fluid slurry [11,12], phosphate laser glass polishing [13], dynamic friction polishing processes [14], diamond pastes are the most frequently used abrasives to obtain the desired mirror-like glossy and smooth surfaces [15-17]. Steel mirror surfaces can be achieved by different methods such as diamond tool turning, grinding and polishing. On the other hand some kind of dental nanocomposites can be polished by diamond paste polishing [18]. The aim of this study was to determine the influence of diamond paste finishing parameters on surface roughness and mirror reflectivity of polished mold steel of SKD 61. For this purpose, the rotation speed of workpiece, the polishing time and axial loads were changed between a certain interval to explore their effects on polishing qualities

2. MATERIAL AND METHOD (MATERYAL VE YÖNTEM)

2.1. Experimental Setup (Deney Düzeneği)

Prior to the polishing experiments, the specimens were cut and machined with a ceramic tool under high rpm turning conditions to eliminate the surface tracks. Thereafter, sample surfaces were ground with 80 to 1200 mesh sandpaper until the tool marks of the abrasive grains are completely removed from the surface. To avoid the surfaces overheating and absorption of paste particles, a diamond paste was used with granulometry finer than 3 microns. The SKD 61 mold steel with a hardness of 20 HRC was used as the test material. The experiments were conducted using a CNC milling machine with a maximum speed of 3500 rpm. The experimental setup is given in Figure 1.

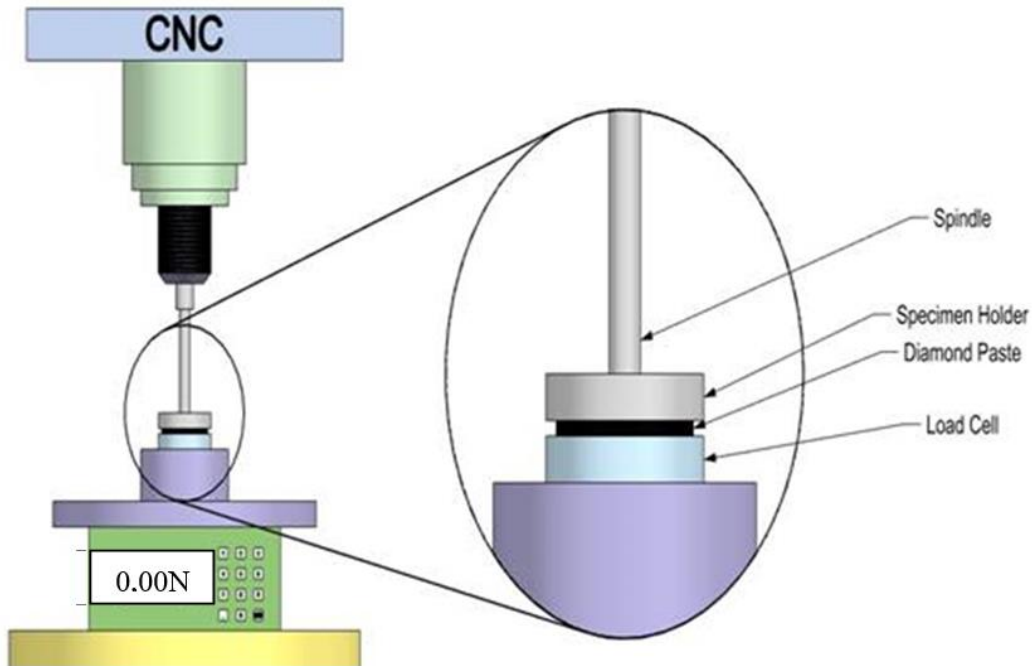


Figure 1. Experimental setup (Deney düzeneği)

As shown in Fig. 1, the specimens were connected to the spindle. The spindle is controlled down in the z axis and pressure is applied to the load cell located on the base of the machine. The spindle is controlled by moving the desired axial load is provided and the experiments were started. Between

each polishing step, the black residue remaining on the samples were removed by gently rubbing them off in an alcohol bath with the same type of polishing silk cloth just used. The polishing quality was quantified in terms of the average surface roughness (Ra) and surface reflectivity. The average surface roughnesses of the samples were measured by using a Mitutoyo SurfTest SJ-201 portable device. The specular reflection of the mirror surfaces was determined by measuring the angle between incoming laser light with respect to the surface normal. In experimental studies, the most efficient parameters which detected by previous researches, spindle speed (rpm), axial load (N) and polishing time (min.) were chosen as variable parameters. With these polishing parameters and their levels, a Taguchi L27 orthogonal array was chosen for the experimental design. The experimental parameters and their levels are provided in Table 1 and the sequence of the experiments is provided in Table 2. The surface properties of polished samples were investigated by atomic force microscope (AFM), in contact mode. 1 Hz scan rate and 256 x256 resolutions were used to obtain topography on a 40x40 μm^2 scanning area. A Shimadzu UV-2600 spectrophotometer was used to measure the specular reflectance of samples.

Table 1. Polishing parameters and their factor levels (Parlatma parametreleri ve faktör seviyeleri)

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
Spindle speed (rpm)	1000	1500	2000
Axial load (N)	5	10	15
Polishing time (min)	2	4	6

Table 2. Experimental layout using an L27 orthogonal array and measurement results (L27 ortogonal deney dizisi ve ölçüm sonuçları)

Exp. No	Spindle Speed (rpm)	Axial Load (N)	Polishing Time (min)	Surface Roughness	Specular Reflectance (%)
1	1500	15	6	0.0320	12.322
2	1500	15	4	0.0310	12.228
3	1000	10	6	0.0486	9.859
4	2000	15	2	0.0226	15.502
5	2000	15	4	0.0222	16.121
6	1000	5	2	0.1000	9.386
7	1000	15	2	0.0450	10.153
8	1500	10	6	0.0340	11.979
9	1500	10	4	0.0350	11.956
11	1500	5	2	0.0400	11.166
12	100	5	6	0.0610	9.608
13	2000	15	6	0.0210	17.625
14	1000	15	6	0.0403	11.067
15	2000	5	2	0.0300	12.506
16	1500	5	6	0.0363	11.313
17	2000	10	2	0.0260	12.799
18	1000	10	2	0.0593	9.704
19	1500	15	2	0.0340	12.179
20	1000	10	4	0.0500	9.741
21	1500	5	4	0.0376	11.222

22	2000	10	4	0.0260	12.799
23	2000	10	6	0.0256	12.901
24	1500	10	2	0.0360	11.686
25	2000	5	4	0.0280	12.594
26	1000	15	4	0.0410	11.041
27	1000	5	4	0.0860	9.566

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

3.1. Reflection properties of polished specimens (Parlatılmış numunelerin yansıma özellikleri)

The reflectance of a surface can be measured by the means of internal or external reflectances. The radiation beam passes through a crystal in the structure of the material for internal reflectance measurements; however the specimen surface directly reflects the beam in external reflectance measurements [4,19,20]. External reflectance can be categorized into two groups: diffuse and specular reflectances (SR). Mirror-like surfaces reflect the concentrated lights around the specular angle due to very low surface roughness values. As the surface roughness increases, reflections become increasingly diffuse, and the surface appears matt/dull. SR is a more useful and nondestructive way to study the mirror-like reflection characteristics of the machined/polished metal surfaces applied in industry. In this measurement, the angle of incidence is equal to the reflection angle of radiation quantity of light deflection is significantly depends on the surface roughness of the samples [21]. As previously reported [22], the light scattering by the surface roughness of the mirror materials is directly related to the wavelength and incidence angle. The measured specular reflectance spectra for the all polished specimens are shown in Fig. 2. A sharpen reflectance peak losses in the wavelength range around 200 nm can be seen for all samples. The reflectance distribution is gradually decreasing at a longer wavelength for all polished surfaces. This result is coherent with the light scattering theory of mirror surfaces which shows an inversely proportional relation between wavelength and scattering distribution width [23].

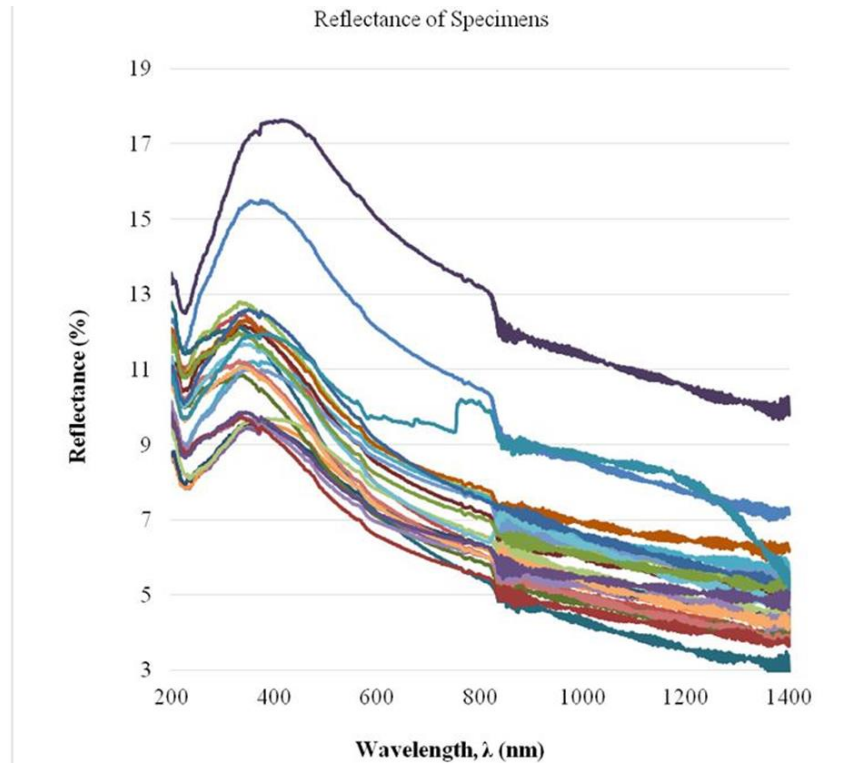


Figure 1. Plotting of the specular reflectance versus wavelengths for polished specimens (Parlatılmış numunelere ait dalga boyuna göre speküler yansıma diyagramı)

When reflectance values are evaluated with the surface roughness results given in Table 2, the 13th experiment with lowest surface roughness ($R_a=0.021$) gives the highest reflectance (17.625%) and a linear relation between surface roughness and reflectance was recorded. The 6th experiment gave the worst results by means of surface roughness and reflectance ($R_a=0.1$; Reflectance=9.386%).

2D and 3D AFM images of 13th and 6th samples are given in Fig. 3a and Fig. 3b respectively. As clearly seen from Fig. 3, the 2D surface of polished 6th specimen consists of some furrowed and micro ploughed topography which causes the reduction of reflectance. 13th sample showed relatively smoother surface with a low height of peak to valley and swiped lines and grooves. On the other hand, Fig. 4 shows the picture of these specimen surfaces which is reflecting the word "FUTF" representing "Firat University Technology Faculty". A good and clear reflection of "FUTF" can be observed for the 13th sample's center zone and the surface of this sample can be considered as mirror-like. However, the outer annual surface of 6th sample seems to be blurred and do not give a clear reflection of "FUTF".

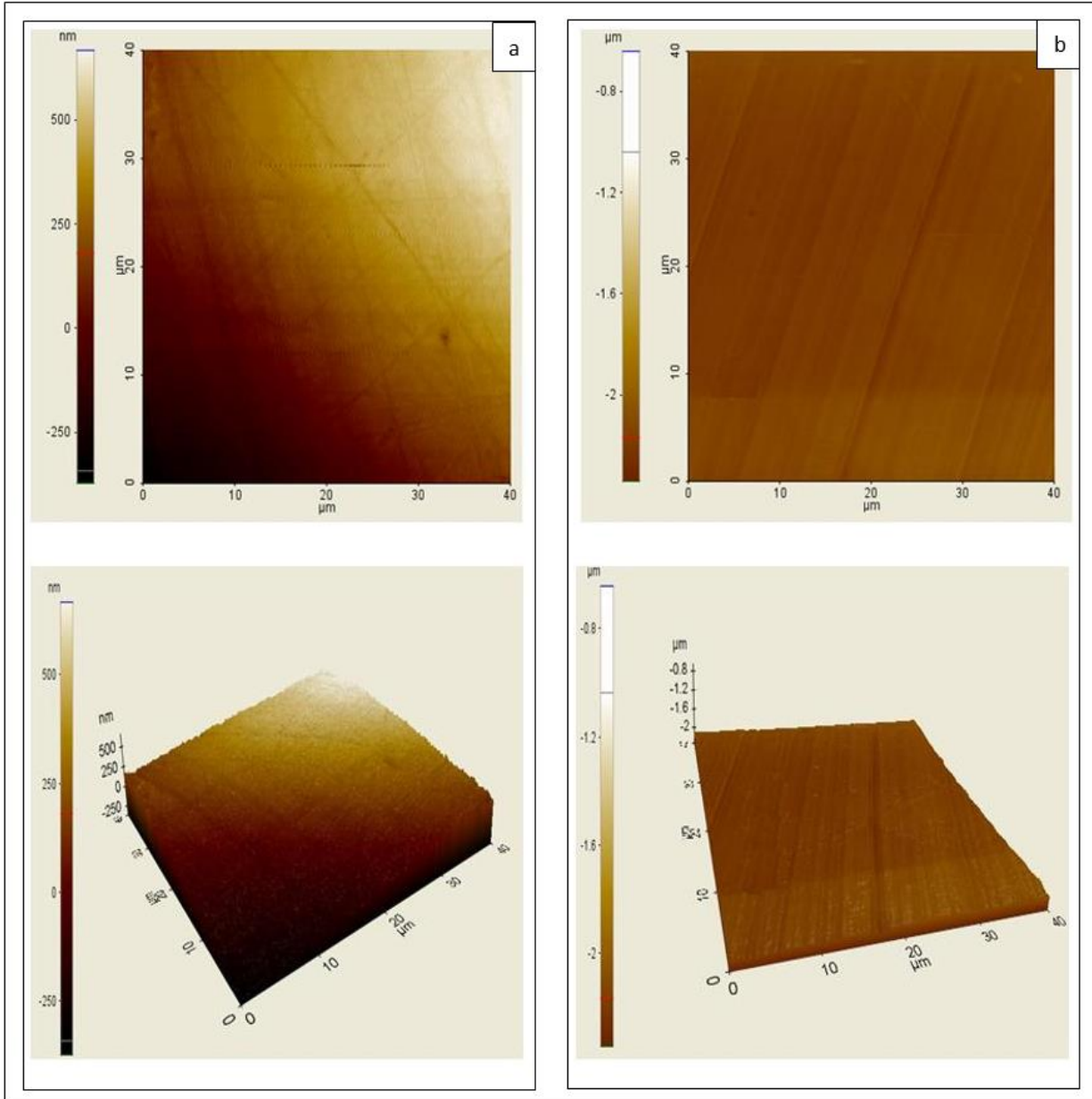


Figure 3. (a) 2D and 3D AFM image of 13th sample (b) 2D and 3D AFM image of 6th sample ((a) 13.numunenin 2 ve 3 boyutlu AKM görüntüsü, (b) 6. numunenin 2 ve 3 boyutlu AKM görüntüsü)

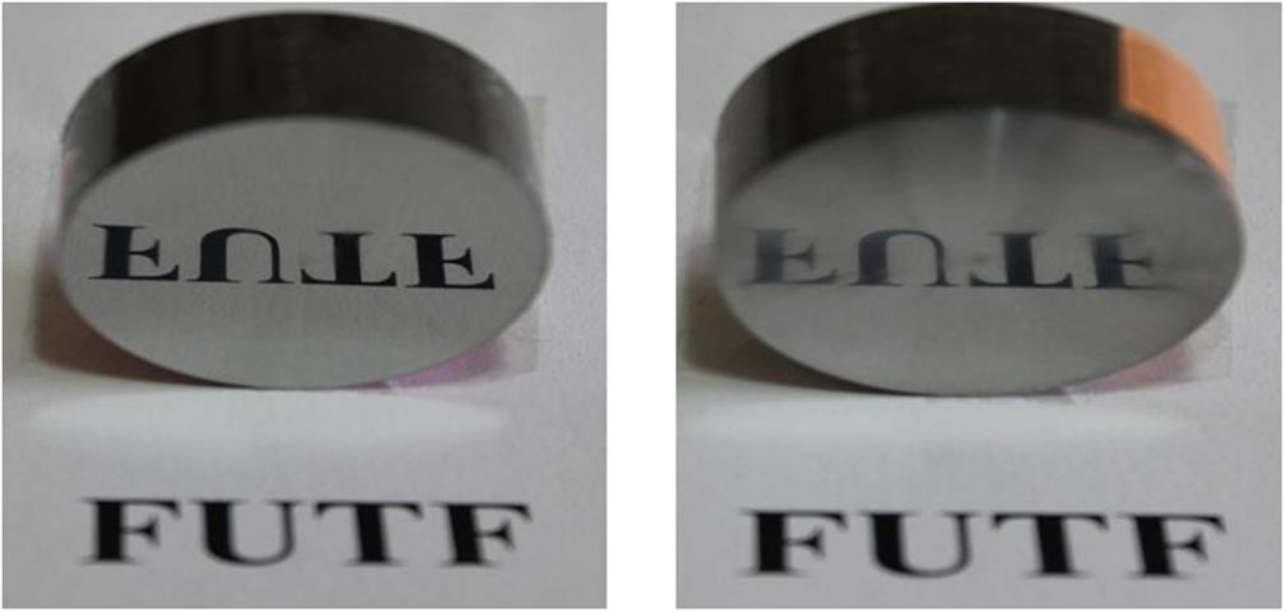


Figure 4. Reflection of 6th and 13th specimens after diamond paste polishing process (6 ve 13. numunelerin elmas pastayla parlatma işleminden sonraki yansıma görüntüleri).

A uniform surface roughness profile was recorded for 13th sample along the measurement length as shown in Fig. 5-a, while the profile of 6th sample was not regular (Fig.5-b). This sample was polished at low axial loading and polishing time conditions (see Table 3). The diamond paste micro particles between the polishing silk and workpiece surface are easily ablated from the center of the wheel to the outward due to the weak loading force. Therefore, the polishing effects of these particles on the specimens were less than the center region owing to the drag of these particles on the side of polishing wheel.

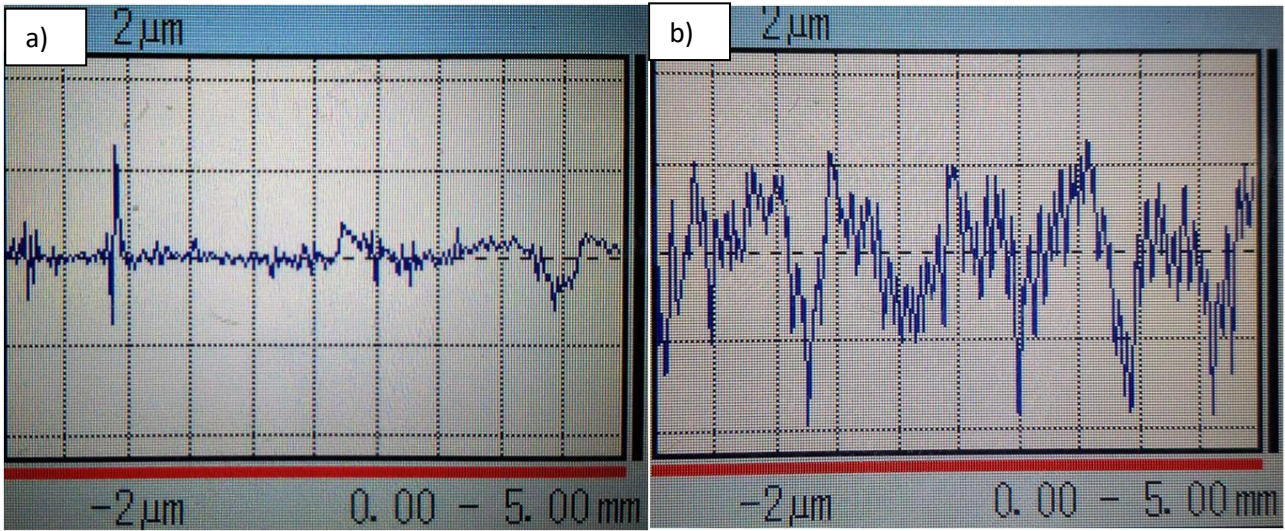


Figure 5. a) Surface roughness profile of 13th sample, b) Surface roughness profile of 6th sample (a) 13. numunenin yüzey pürüzlülük profili, b) 6. numunenin yüzey pürüzlülük profili)

3.2. Analysis of Results (Sonuçların Analizi)

The experimentally gathered data through Taguchi L27 orthogonal array was carried out MINITAB R15 package program for analyzing the results. In order to determine the statistical effects of each polishing parameter on the surface roughness and specular reflectance, the analysis of means (AOM) and analysis of variance (ANOVA) was performed to the study. The analysis was carried out at 95% confidence level (or P – values are less than 0.05). Main effects plots were used to see the

effect of the polishing parameters on both surface roughness and specular reflection. The main effects of polishing parameters on the surface roughness are shown in Fig. 6. From this graph, the surface was decreased from 0.059 to 0.035 μm when the revolution speed increases 1000 to 1500 rpm and it gets better with 2000rpm. Similar trends in the change of surface roughness with the axial load and polishing time were observed with a more slightly decrease.

Table 3. ANOVA results for surface roughness (Yüzey pürüzlülükleri için ANOVA sonuçları)

Polishing parameter	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F ratio	% Cont.	P value
Spindle speed	2	0.005393	0.002696	17.93	59.91	0.000
Axial Load	2	0.001443	0.000721	2.29	16.02	0.123
Polishing Time	2	0.000244	0.000122	0.33	2.71	0.720
Error	2	0.00236	0.00118	-	21.36	-
Total	8	0.00944	-	-	100	-

Table 3 shows the result of ANOVA analysis for surface roughness. The percentage contribution of each polishing factor on the surface roughness, indicating their degree of statistical influence on the results is listed in this table. The spindle speed was found the most efficient factor with the maximum contribution (59.91%). Axial loading was the second ranking factor on the surface roughness with a contribution value of 16.02%. The statistical effects of axial loading and polishing time on the surface roughness were not significant because P values of them were greater than 0.05. The combination of highest levels of factors was found good on surface roughness. The main effect plots and ANOVA analysis results for specular reflectance are given in Figure 7 and Table 4, respectively. As seen from Fig.7, the specular reflectance was increased from 10.01% to 13.93% when spindle speed was increased from 1000 to 2000 rpm. This indicates approximately 28.14% increase in reflectance. Spindle speed was found again the most important factor on specular reflectance with the highest contribution of 66.56%. Axial loading and polishing time factors were followed by 20.07% and 0.93%.

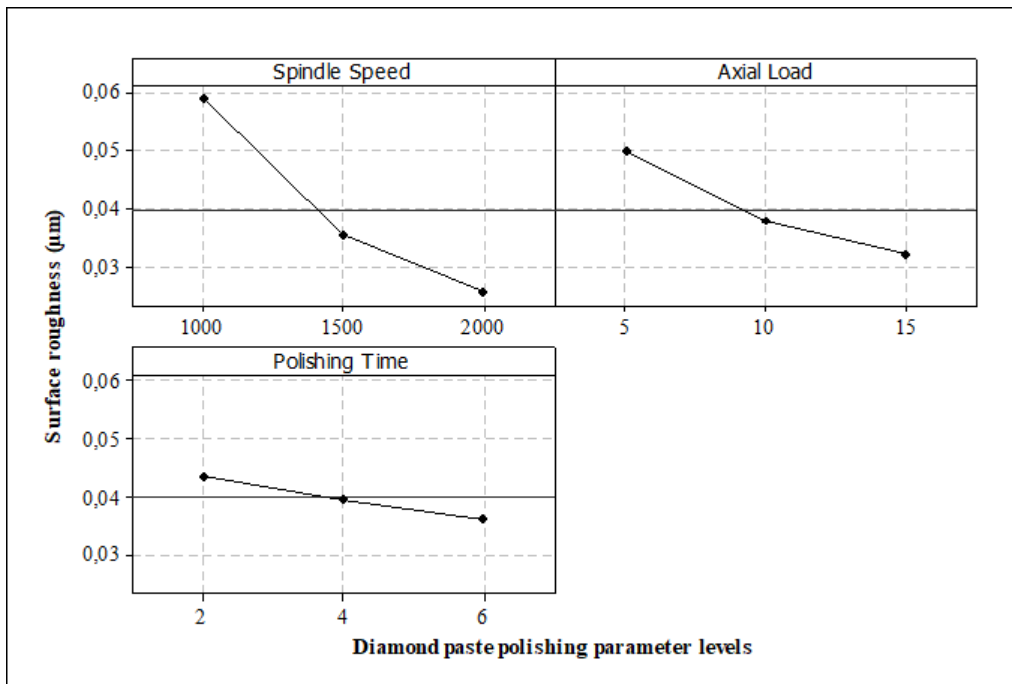


Figure 6. Main effects plot for surface roughness (Yüzey pürüzlülüğü esas etki grafiği) .

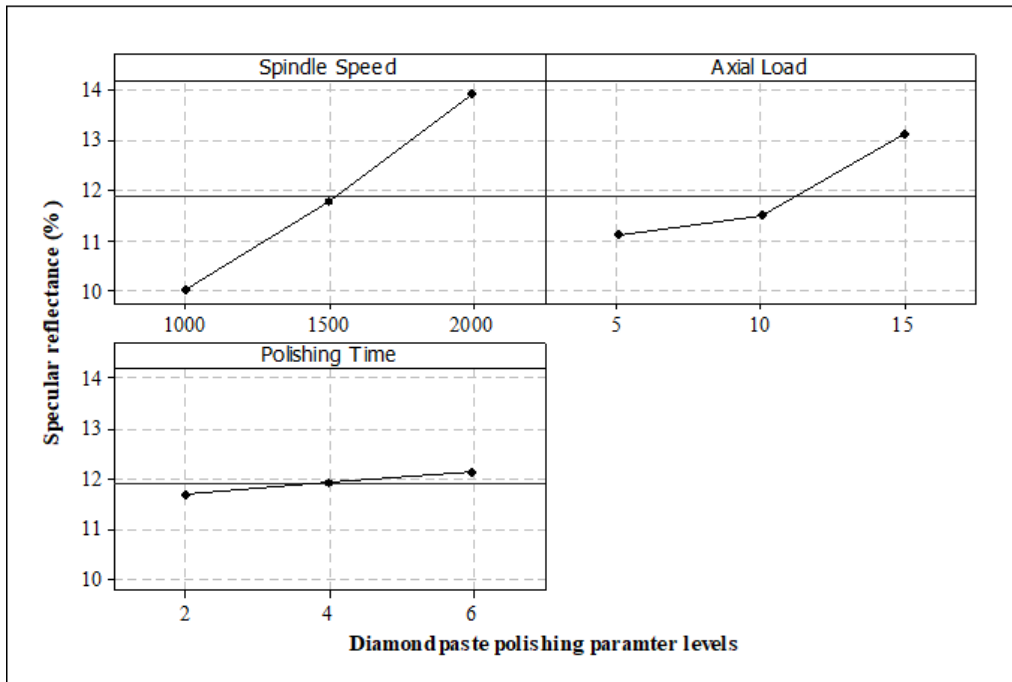


Figure 7. Main effects plot for specular reflectance (Speküler yansıma için esas etki grafiği)

Table 4. ANOVA results for specular reflectance (Speküler yansıma için ANOVA sonuçları)

Polishing parameter	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F ratio	% Cont.	P value
Spindle speed	2	69.51	34.76	23.89	66.56	0.000
Axial Load	2	20.95	10.48	3.01	20.07	0.068
Polishing Time	2	0.97	0.49	0.11	0.93	0.894
Error	2	15.238	7.61	-	12.44	-
Total	8	106.668	-	-	100	-

On the other hand, regression analysis is performed to the study in order to determine the mathematical relationship between the polishing process parameters and surface roughness and specular reflectance. A linear model was constructed between the factors and responses. The regression equations for surface roughness and specular reflectance are as follow:

$$\text{Surface roughness} = 0.115 - 0.000034 \text{ Spindle Speed} - 0.00176 \text{ Axial Load} - 0.00184 \text{ Polishing Time}$$

$$\text{Specular reflectance} = 3.53 + 0,00392 \text{ Spindle Speed} + 0.203 \text{ Axial Load} + 0.116 \text{ Polishing Time}$$

The R² values indicate that the predictors explain 74 and 85% of the variance in surface roughness and specular reflectance, respectively.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, an experimental investigation was performed to consider surface roughness and specular reflectance in diamond paste polishing of SKD61 mold steel used in industry. The experiments were performed using an L27 Taguchi orthogonal array. Three important polishing parameters such as spindle speed, axial loading and polishing time were considered for the present research. The relative effects of each factor and combination of factors on responses were obtained by analysis of variance (ANOVA). Linear regression models were developed. The polished surfaces were also studied by using atomic force microscope (AFM). The following conclusion can be drawn:

1. The surface roughness was decreased with an increase in the factor level of polishing parameters, while the specular reflectance was tendency of increase at the same conditions.

2. According to the ANOVA results, the most important factor on both surface roughness and specular reflectance was found as spindle speed with 59.91% and 66.56%, respectively. Axial loading and polishing time were not statistically significant parameters on responses with lower P values.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. N. Taniguchi, Nanotechnology, Oxford University Press, Oxford, 1996.
2. U. Maradia, M. Scuderi, R. Knaak, M. Boccadoro, I. Beltrami, J. Stirnimann, K. Wegener, Super-finished surfaces using meso-micro EDM, *Procedia CIRP*, 6:157-162, 2013.
3. N.M. Spenrath, *Technologische Aspekte zum Feinstdrehen von Kupferspiegeln* 1991.
4. M. M. Francis, *Modern Techniques in Applied Molecular Spectroscopy*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc; 1998.
5. <http://en.wikipedia.org/wiki/Polishing>
6. T.Endo, W.J.Finger, M. Kanehira, A.Utterodt, M. Komatsu, *Dental Materials Journal*, 29(2): 213-223, 2010.
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical-mechanical_planarization
8. Z. W. Zhong, Y.B. Tian, J.H. Ng, Y.J. Ang, Chemical mechanical polishing (CMP) processes for manufacturing optical silicon substrates with shortened polishing time, *Materials and Manufacturing Processes*, 29(1): 15-19, 2014.
9. B. Pan, R. Kang, J. Guo, H. Fu, D. Du, J. Kong, Precision Fabrication of Thin Copper Substrate by Double-sided Lapping and Chemical Mechanical Polishing, *Journal of Manufacturing Process*, 44:47-54, 2019.
10. Z. Ozdemir, A. Ozdemir, G.B. Basim, Application of chemical mechanical polishing process on titanium based implants. *Materials Science and Engineering C*, 68:383-396, 2016.
11. H. Guo, Y. Wu, D. Lu, M. Fujimoto, & M. Nomura, Ultrafine Polishing of Electroless Nickel-Phosphorus-Plated Mold with Magnetic Compound Fluid Slurry, *Materials and Manufacturing Processes* 2014.
12. H. Guo, Y. Wu, D. Lu, M. Fujimoto, M. Nomura, Effects of pressure and shear stress on material removal rate in ultra-fine polishing of optical glass with magnetic compound fluid slurry. *Journal of Materials Processing Technology*, 214: 2759-2769, 2014.
13. G. Chen, K. Yi, M. Yang, W. Liu, X. Xu, Factor effect on material removal rate during phosphate laser glass polishing, *Materials and Manufacturing Processes*, 29(6): 721-725, 2014.
14. Z. Jin, S. Shi, J. Lin, L. Jin, Preparation and performance of dynamic friction polishing plate for diamond film, *Materials and Manufacturing Processes*, 29(1): 20-26, 2014.
15. S.R. Jefferies, W.W. Barkmeier, A.J. Gwinnett, *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 4: 181-185, 1992.
16. P. Senawongse, P. Pongprueksa, *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 19: 265-275, 2007.
17. T. Lainovic, L. Blazic, D. Kukuruzovic, M. Vilotic, A. Ivanisevic, D. Kakas, Effect of Diamond Paste Finishing on Surface Topography and Roughness of Dental Nanohybrid Composites – AFM Analysis, *Procedia Engineering*, 69: 945-951, 2014.
18. T. Lainović, M. Vilotić, L. Blažić, D. Kakaš, D. Marković, A. Ivanišević, Determination of surface roughness and topography of dental resin-based nanocomposites using AFM analysis, *Bosn. J. Basic Med. Sci.* 13:34-43, 2013.
19. D.J. Dahm, K.D. Dahm, *Interpreting diffuse reflectance and transmittance. NIR*, Chichester, 2007.
20. <http://www.specac.com/userfiles/file/ReflectanceSpectroscopy.pdf>
21. C. Aydın, M.A. El-Sadek, K. Zheng, I.S. Yahia, F. Yakuphanoglu, Synthesis, diffused reflectance and electrical properties of nanocrystalline Fe-doped ZnO via sol-gel calcination technique, *Optics & Laser Technology*, 48: 447-452, 2013.
22. M. Marco, Approximated method for modelling hemispherical reflectance and evaluating near-specular reflectance of CSP mirrors, *Solar Energy*, 92: 280-287, 2013.
23. P. Good, T. Cooper, M. Querci, N. Wiik, G. Ambrosetti, A. Steinfeld, Spectral reflectance, transmittance, and angular scattering of materials for solar concentrators, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144: 509-522, 2016.

AISI 2205 Dupleks Paslanmaz Çeliğin CNC Torna Tezgahında İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetlerinin Deneysel Araştırılması

Fatih Memiş¹, Yakup Turgut^{2,*}

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 21.04.2020

Kabul: 29.04.2020

Anahtar Kelimeler:

İşlenebilirlik

Paslanmaz çelik

Yüzey pürüzlülüğü

Kesme kuvvetleri

ÖZET

Bu çalışmada, özellikle denizcilik, petrol ve kimya sektöründe yaygın kullanım alanına sahip AISI 2205 (EN 1.4462) paslanmaz çeliğin CNC torna tezgahında işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülükleri ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel parametreleri olarak; SNMG 120408 NM4 WSM20 ve SNMG 120408 NR4 WSM20 iki farklı talaş kırıcı formuna sahip kesici takımlar, 1 mm kesme derinliği, 0.1-0.2-0.3 mm/dev ilerleme hızı ve 150, 180, 210, 240, 270 m/dak kesme hızı kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, en iyi yüzey pürüzlülük ve en düşük kesme kuvveti değerleri SNMG 120408 NR4 WSM20 kodlu kesici takımlarla elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değeri NR4 kodlu talaş kırıcı formuna sahip kesici takım ile 0,1 mm/dev ilerleme hızı ve 210 m/dak kesme hızında 0.659 µm olarak ölçülmüştür. En düşük kesme kuvvetleri en düşük ilerleme hızı 0.1 mm/dev'de oluşurken en yüksek kesme kuvvetleri ise en yüksek ilerleme hızı 0.3 mm/dev'de oluşmuştur. Her iki kesici için de düşük ilerleme hızlarında yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin azaldığı, ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Kesme hızının artması ile birlikte kesme kuvvetleri genellikle azalmıştır.

Experimental Investigation of Surface Roughness and Cutting Forces in Machining of AISI 2205 Duplex Stainless Steel on CNC Lathe

ARTICLE INFO

Received: 21.04.2020

Accepted: 29.04.2020

Keywords:

Machinability

Stainless steel

Surface roughness

Cutting forces

ABSTRACT

In this study, the effects of cutting parameters on surface roughness and cutting forces were investigated in machining of AISI 2205 (EN 1.4462) stainless steel, which is widely used in the marine, petroleum and chemical industries, on a CNC lathe. In experiments, cutting tools with two different chip breaker forms SNMG 120408 NM4 WSM20 and SNMG 120408 NR4 WSM20, 1 mm cutting depth, 0.1-0.2-0.3 mm/rev feed rate and 150, 180, 210, 240, 270 m/min cutting speed were used. As a result of the experiments, the best surface roughness and the lowest cutting force values were obtained with SNMG 120408 NR4 WSM20 coded cutting tool. The lowest surface roughness was measured as 0.659 µm with 0.1 mm/rev feed rate and 210 m/min cutting speed with NR4 coded chip breaker cutting tool. The lowest cutting forces occurred at the lowest feed rate of 0.1 mm/rev while the highest cutting forces occurred at the highest feed rate of 0.3 mm/rev. For both cutting tools, surface roughness and cutting forces decreased at low feed rates and surface roughness and cutting forces increased with increasing feed rate. Cutting forces were generally decreased with increasing cutting speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dupleks paslanmaz çelikler, son yıllarda Türkiye'de ve dünyada kullanımı büyük artış gösteren bir paslanmaz çelik kalitesidir. Yüksek miktarda krom ve az miktarda nikel alaşım elementi esaslı olup östenitik ve ferritik yapıyı bünyesinde bulunduran bir malzemedir. Dupleks paslanmaz çelik diğer paslanmaz çeliklere oranla daha yüksek dayanım ve korozyon direnci göstermektedir. Bu özelliklerinden dolayı, pompa millerinde, tekne şaftlarında, pervane yapımında, özel hidroelektrik santrallerinde, gıda sektöründe, kimya sektöründe, medikal sektöründe ve makine üretiminde

* Sorumlu yazar, e-posta: yturgut@gazi.edu.tr

kullanılmaktadırlar. Dubleks paslanmaz çelik sınıfından olan AISI 2205 (EN 1.4462) çelik, mükemmel korozyon direnci ve yüksek mukavemet özellikleri sebebi ile yaygın kullanım alanına sahiptir [1-3].

Paslanmaz çeliklerin sahip olduğu yüksek çekme mukavemeti ve yüksek korozyon direnci, düşük ısıl iletkenlik, sünek bir malzeme olması, yüksek miktarda krom-nikel ve bir miktar molibden gibi mukavemet artırıcı elementlerin içeriği ve işlerken pekleşme özelliği işlemeyi zorlaştıran başlıca etkenlerdir. İşlenebilirliğin zorlaşması imalatçılar için büyük sorun teşkil etmekle birlikte işleme maliyetlerini de etkilemektedir. Ayrıca, işlenen malzemenin istenilen yüzey kalitesinde imal edilememesi o malzemenin kullanımı sırasında birçok problemleri beraberinde getirmektedir ki bu da daha büyük maliyetlere sebep olmaktadır [4].

Yüzey kalitesi, mühendislik malzemelerinin önemli bir kalite göstergesidir. İşlenmiş parçaların yüzey kalitesinin asıl göstergesi ise yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülüğü temelde takım geometrisi (uç yarıçapı, kesme kenar geometrisi, boşluk açısı vs.) ve kesme şartları (ilerleme hızı, kesme hızı, kesme derinliği vs.) gibi işleme parametrelerinin yanında malzemenin özelliklerine de bağlıdır. Yüksek kalite veya iş parçası yüzey tamlığı, daha uzun parça ömrü sağlamaktadır. İşlenmiş parça yüzeylerinin tribolojik özellikleri, yüzey dokusundan birinci derecede etkilenmektedir. Yüzey pürüzlülüğü sadece aşınma, sürtünme ve yağlama gibi tribolojinin geleneksel konularından değil aynı zamanda sızdırmazlık, hidrodinamik, elektrik, ısı iletimi vb. farklı alanlarda da dikkate alınması gereken önemli bir faktördür [5,6].

Talaş kaldırma sırasında kesme kuvvetleri gerek takım gerekse parça üzerinde bir takım şekil değiştirmelere neden olarak takım parça konumunu değiştirirler ve işleme kalitesini etkilerler [7]. Kesici takım üzerine etki eden kesme kuvvetleri, talaş kaldırmanın önemli bir safhasını oluşturur. Kesme kuvvetleri; takım tezgâhlarının rijit olması ile birlikte kesme derinliği, talaş açısı, kesme hızı, ilerleme miktarı, iş parçasının malzemesi vb. faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir [8].

Uluslararası rekabetin hızla arttığı imalat sektöründe en temel amaç istenilen kalitede ürünün en düşük maliyetle üretilmesidir. İmalatçılar bu temel amaç için sürekli çalışmalar yapmaktadır. Kesici takımın daha uzun ömürlü olabilmesi, iş parçasının da istenilen kalitede üretilerek hammadde israfının önlenmesi için, kesme performansı ve şartlarını iyi belirlemek gerekir. Uygun işleme parametrelerinin seçilememesi maliyeti yükselten unsurlardandır. Ürünlerin daha az maliyet ile istenilen tolerans sınırları içerisinde kalmasını ve daha iyi işleme şartları sağlamak amacı ile geçmişten günümüze kadar çelik malzemelerin işlenebilirliği üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalar incelendiğinde malzemelerin işlenebilirliğini etkileyen birçok etken göze çarpmaktadır. Kullanılan takım tezgahı, kesici takım özellikleri, soğutma sıvısı, kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi parametrelerin, işlenebilirliği etkileyen ana etkenler olarak öne çıktığı görülmektedir [2,9].

Birçok çalışmada çeşitli paslanmaz çelikler farklı kesme parametreleri ve kesici takımlar kullanarak tornalanmış ve kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri araştırılmıştır. Tekaslan ve arkadaşları AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğini tornalamışlar, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı, ilerleme hızının kesme hızına nazaran yüzey pürüzlülüğünde daha etkili olduğunu belirtmişlerdir [10]. Çiftçi, AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çelikleri işlemiş ve kesme hızının, kesme kuvvetleri üzerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı ancak, yüzey pürüzlülüğünü önemli derecede etkilediği sonucuna varmıştır. Kesme hızı artırıldığında, yüzey pürüzlülük değerleri azalmış, kesme hızı azaltıldığında yüzey pürüzlülük değerlerinde artış eğilimi olduğu belirtilmiştir [11,12]. Özer ve Bahçeci, farklı kesicilerle AISI 410 martensitik paslanmaz çeliği tornalamış ve TiC+TiN kaplamalı sementit karbür takımın en yüksek kesme kuvveti değerlerini verdiği CBN takımın en düşük kesme kuvveti değerlerini vermesine karşın, kısa işleme mesafelerinde takımda kırılmalar olduğu kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü bakımından optimum değerlerin TiC kaplı sementit karbür takım ile talaş kaldırma işleminde elde edildiği belirtilmiştir [13]. Yeyen ve arkadaşları, AISI 303 paslanmaz çelikler ile AISI 304 paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğini karşılaştırmışlardır. AISI 303'ün işlenmesi sırasında AISI 304'e göre % 19 daha fazla kesme kuvvetleri oluştuğu, yüzey pürüzlülüğünde ise % 51 artış olduğu ölçülmüştür.

Kesme kuvvetinin azalması ile titreşimin azaldığı ve daha iyi yüzey kalitesinin oluştuğu belirtilmiştir. Kesme hızı arttıkça kesme kuvvetinin düştüğü belirtilmiştir [14]. Korkut ve arkadaşları AISI 304 paslanmaz çeliğini işlemişler ve 180 m/dak'nın üzerindeki kesme hızlarında takım aşınmasının azaldığı, kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin de azaldığı belirtilmiştir [15]. Gürbüz ve arkadaşları AISI 316L paslanmaz çeliği işlemişler ve kesme derinliği ve ilerleme hızı arttığında kesme kuvvetlerinin arttığı, kesme hızındaki artışa bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün azalma eğiliminde olduğu belirtilmiştir [16]. Ay ve Kalyon 17-4 PH paslanmaz çeliği tornalamışlar ve ilerleme hızının artmasıyla parçanın yüzey pürüzlülük değerinin arttığı, düşük ilerleme hızlarında daha iyi yüzey kalitesi elde edildiği, artan talaş derinliği ve ilerleme hızlarında kesme kuvvetlerinin arttığı belirtmişlerdir [17]. Kayır ve arkadaşlarının yaptıkları iki farklı çalışmada, AISI 316Ti paslanmaz çeliği işlemişler ve ilerleme hızı arttıkça, kesme kuvvetlerinin arttığı, takım uç yarıçapının büyümesi ile de yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, kesme hızının yüzey pürüzlülüğünde ilerleme hızı kadar etkili olmadığı, takım uç yarıçapının değişmesi ile kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünün etkilendiği belirtilmiştir [3,18]. Yalçın ve Temiz, AISI 316L paslanmaz çeliği işlemişler ve kesme hızının esas kesme kuvvetine ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin oldukça düşük olduğu ancak ilerleme hızının etkisinin kesme derinliğine göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [19]. Kasap, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliği işlemiş ve kesme hızının artması ile kesme kuvvetinde fazla bir düşme olmadığını belirtmiştir. İlerlemenin artırılması da kesme bölgesindeki yükü artırarak kesici takım aşınmasının artmasına neden olduğu ve en uygun ilerleme hızının 0,24 mm/dev olduğu belirtilmiştir [20]. Özek ve arkadaşları AISI 304 östenitik paslanmaz çeliği tornalamışlar ve kesme hızının artması ile takım-talaş ara yüzey sıcaklığının ve takım yan yüzey aşınmasının azaldığı, ilerleme hızı ve talaş derinliğinin azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünün iyileştiğini belirtmişlerdir [21]. Özek ve Savaş, AISI 304 paslanmaz çeliği işlemişler, en iyi yüzey pürüzlülüğünün yüksek kesme hızı, düşük ilerleme hızı ve düşük kesme derinliğinde elde edildiği kullandıkları takımlardan P20 kesici takımın P10 kesici takıma göre daha çok aşındığı belirtilmiştir [22]. Mavi ve Uzun Dublex 1.4462 paslanmaz çeliği QM ve SMR talaş formlarında kesicilerle tornalamışlar ve esas kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonuç SMR talaş formuna sahip kesici takımlarla elde edildiğini belirtmişlerdir [23].

Gurbuz ve arkadaşları AISI 316L çeliği tornalamış, tüm kesme koşullarında, kesme derinliği ve ilerleme hızı arttıkça yüzey bütünlüğünün kötüleştiği, kesme hızının artmasıyla yüzey bütünlüğünün iyileştiği belirtilmiştir. MF formuna sahip kesici takımlarla en iyi yüzey bütünlüğü sonuçları elde edilirken, MM formuna sahip kesici takımlarla en kötü yüzey bütünlüğü sonuçları elde edildiği belirtilmiştir [24]. Sharma ve Gupta, 304 paslanmaz çeliğin kaplanmamış ve çok katmanlı kaplamalı karbür takımlar kullanılarak kuru tornalamış ve işleme parametrelerinin takım aşınmasının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. TiAlN/TiN kaplanmış karbür takımlar, kaplanmamış takımlara nazaran takım aşınmasında ve ortalama pürüzlülük değerlerinde önemli bir iyileşme gösterdiği belirtilmiştir [25]. Dhananchezian ve arkadaşları 2205 dubleks paslanmaz çeliği kuru ve kriyojenik soğutma kullanarak tornalamışlardır. Kriyojenik soğutma kuru tornalama ile karşılaştırıldığında, kesme kuvvetleri % 30-43 ve pürüzlülük değeri yaklaşık % 18-23 azaldığını ve sıvı azot ile kriyojenik soğutma, kuru kesme koşullarından daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [26]. Pradhan ve arkadaşları, östenitik paslanmaz çeliği SiAlON seramik takımla tornalamışlar ve kesme hızının artmasıyla hem kesme kuvveti hem de yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerleme hızının artması ile kesme kuvveti, pürüzlülük ve sıcaklığın arttığı ancak takım aşınmasının azaldığı belirtilmiştir [27].

Bu çalışmada ise, iki farklı talaş kırıcı formuna sahip karbür kesicilerle AISI 2205 (EN 1.4462) paslanmaz çeliğin CNC torna tezgahında işlenmesinde kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülükleri ve kesme kuvvetleri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Deneylerde, özellikle denizcilik, kimya, kağıt ve petrol tesislerinde sık kullanılan AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik kullanılmıştır. Kullanılan AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik malzemenin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

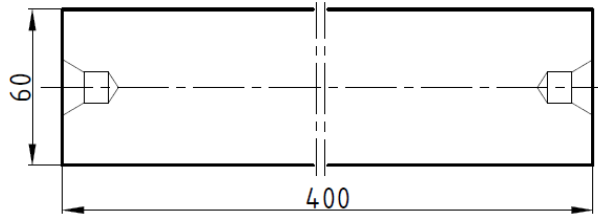
Tablo 1. AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI 2205 duplex stainless steel)

Alaşım			UNS No			EN No			Malzeme tanımı		
2205			S31803			1.4462			X2CrNiMoN22-5-3		
C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	W	Cu	N	Fe
0.020	22.38	5.88	3.13	0.54	1.56	0.030	0.001	0.047	0.45	0.180	Diğer

Tablo 2. AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin oda sıcaklığındaki tipik mekanik özellikleri ve PRE (oyuklanma direnci) değerleri (Typical mechanical properties and PRE (Pitting Resistance Equivalent) values of AISI 2205 duplex stainless steel at room temperature)

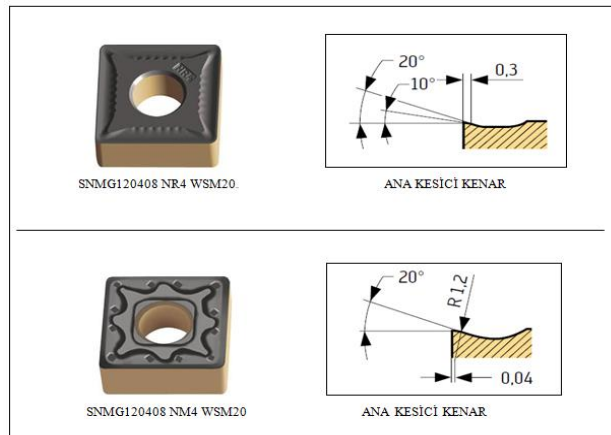
Alaşım	UNS No	EN No	Akma Dayanımı N/mm ²	Kopma mukavemeti N/mm ²	Uzama %	Çentik darbe direnci (J)	PRE
2205	S31803	1.4462	527	765	37	60	35.7

Deneylerde kullanılan iş parçası ölçüleri TSE 10329 standardında önerilen çap/boy oranı 1/10’u geçmeyecek şekilde Ø60x400 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan iş parçasının alın yüzeyleri temizlenerek punta deliği delinmiş ve dış çapı tornalanarak deney numunesi Şekil 1’de yer alan geometri ve ölçülerde hazırlanmıştır.

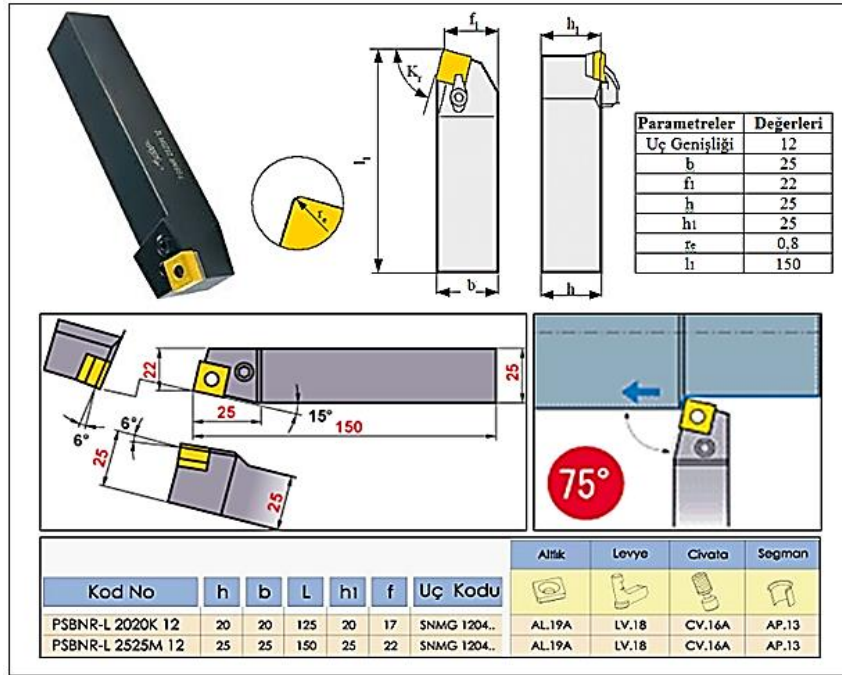


Şekil 1. Deney numunesi ölçüleri (Test sample dimensions)

Kesici takım olarak TS10329 (ISO 3685)’de belirtilen deney şartlarına uygun olarak üretici firmanın (WALTER) kataloğunda dubleks paslanmaz çelikler için tavsiye edilen M20 kalitesinde PVD yöntemiyle TiAlN+Al₂O₃ (ZrCN) kaplanmış farklı talaş kırıcı formuna sahip SNMG 120408 NR4 WSM20 (1. takım) ve SNMG 120408 NM4 WSM20 (2. takım) kod numaralı iki farklı sementit karbür kesici takım seçilmiştir (Şekil 2). Bu kesici takımları bağlamak içinde Şekil 3’te verilen PSB NR2525M12 kodunda takım tutucu kullanılmıştır.



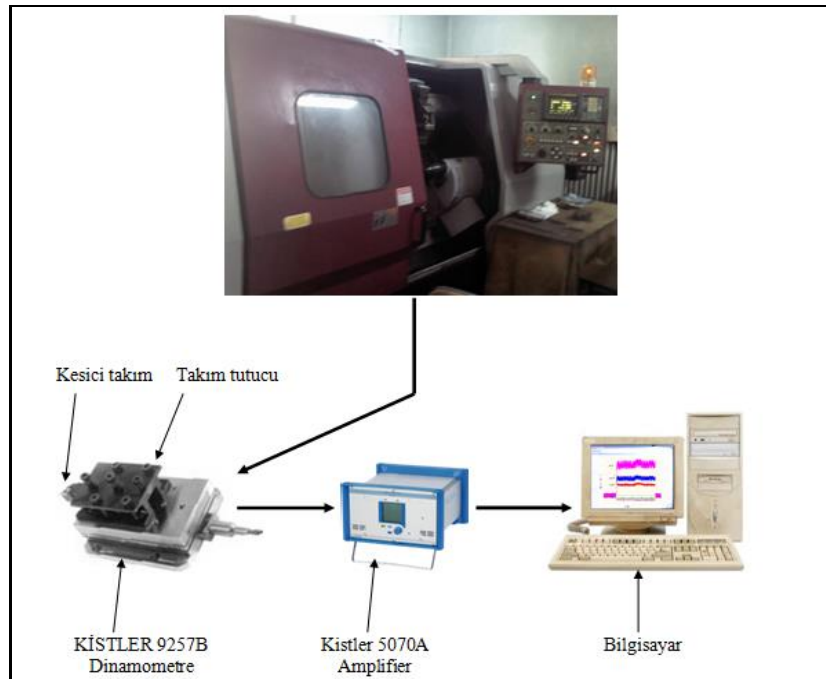
Şekil 2. Deneylerde kullanılan kesici takım formları (Cutting tool forms used in experiments) [28]



Şekil 3. PSBNR 2525M12 formunda takım tutucu ve özellikleri (PSBNR 2525M12 tool holder and features) [28]

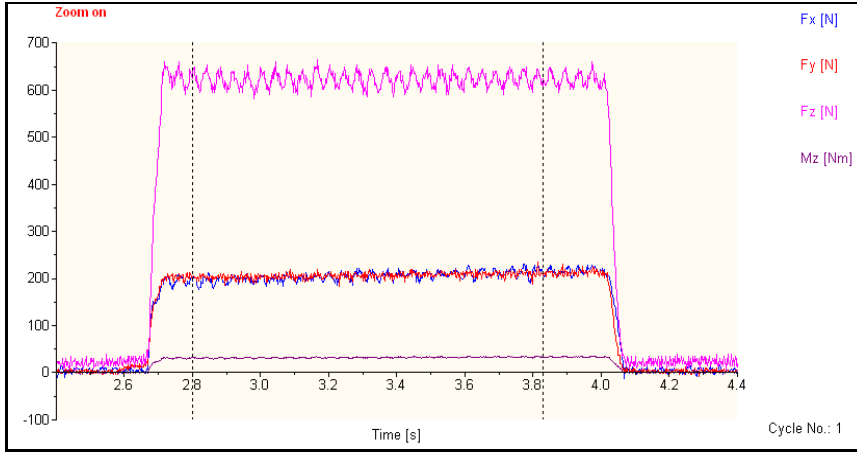
Deneyler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü CNC laboratuvarında bulunan Fanuc kontrol ünitesine sahip JOHNFORDTC-35 sanayi tipi CNC torna tezgahında yapılmıştır. Deneylerde, deney numunesi CNC torna tezgahında ayna-punta arasına bağlanıp üzerinden 1mm sabit kesme derinliğinde 10’ar mm uzunluğunda farklı kesme ve ilerleme hızlarında talaş kaldırılarak tornalama işlemi yapılmıştır.

Yapılan tüm deneylerde kesme esnasında kesme kuvvetlerini ölçmek için KISTLER 9257B Piezokristal esaslı dinamometre kullanılmıştır. Tezgah taretine bağlanan dinamometreye “KISTLER Type 9403” kater tutucu ve bu tutucuya da kater ve kesici takım bağlanmıştır. Dinamometreden alınan kuvvet değerleri, “KISTLER Type 5070A” sinyal yükselticiye (Multichannel Charge Amplifier) ve “RS-232C” ara kablo ile bilgisayara gönderilerek “DYNOWARE Type 2825A1-2” programı ile bilgisayara aktararak grafiklere dönüştürülmüştür. Dinamometrenin tezgah bağlantısı ve deney düzeneği şematik olarak Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneği (Experimental setup)

Kurulan bu sistem sayesinde DynoWare programı ile her deney için kesme kuvveti grafikleri bilgisayar ekranında açılmış (Şekil 5) ve kararlı (efektif) kesme bölgesindeki kesme kuvveti değerlerinin ortalaması alınarak kesme kuvveti verileri elde edilmiştir. Kesme kuvveti verilerinden, dinamometrenin Z eksenine denk gelen esas kesme kuvveti (F_c) alınarak deneysel sonuçlar değerlendirmek için Microsoft Excel’de grafikler çizilmiştir.



Şekil 5. Örnek kesme kuvveti grafiği (Sample cutting force graph)

Numunelerin işlenmiş yüzeyleri üzerinden yüzey pürüzlülük ölçümleri için “Mahr” marka Perthometer M1 tipi masa üstü yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı kullanılmıştır (Resim 1). Her deneyin sonunda iş parçası kendi ekseninde döndürülerek üç ölçüm yapılmış, yüzey pürüzlülük değerleri bu üç değer aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Ölçümlerde ortalama yüzey pürüzlülük değeri olan “Ra” değeri dikkate alınmıştır.



Resim 1. Perthometer M1 masa tipi yüzey pürüzlülük ölçme cihazı (Perthometer M1 table type surface roughness measuring device)

Deneyler için, ISO 3685’teki öneriler dikkate alınarak ve üretici firmanın (WALTER) kataloğunda dubleks paslanmaz çelikler için tavsiye edilen kesme parametreleri dikkate alınarak beş farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme hızı değeri belirlenmiştir. Uç yarıçapı 0.8 mm kesici takım için uygun kesme derinliği 1 mm seçilmiş ve her deneyde kullanılmamış yeni kesici takımlar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri (Cutting parameters used in experiments)

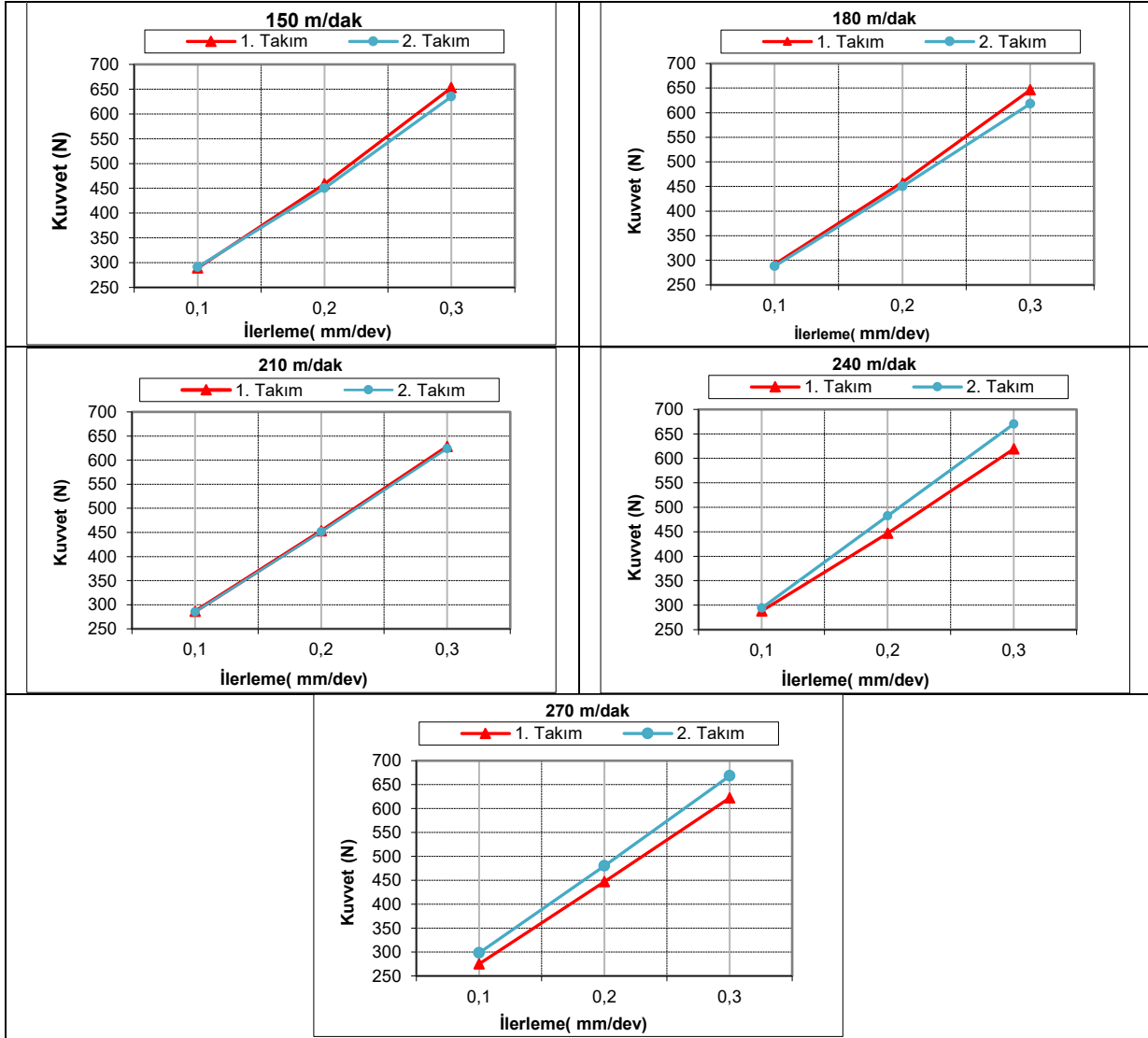
Kesme derinliği	1mm
İlerleme hızı	0.1-0.2-0.3 mm/dev
Kesme hızı	150-180-210-240-270 m/dak
Kesici takımlar	SNMG 120408 NR4 WSM20 SNMG 120408 NM4 WSM20

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

Sonuçlar, belirlenmiş kesme şartlarında her bir kesici için kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüklerinin değerlendirilmesi şeklinde iki bölüm halinde yapılmıştır.

3.1. Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Cutting Forces)

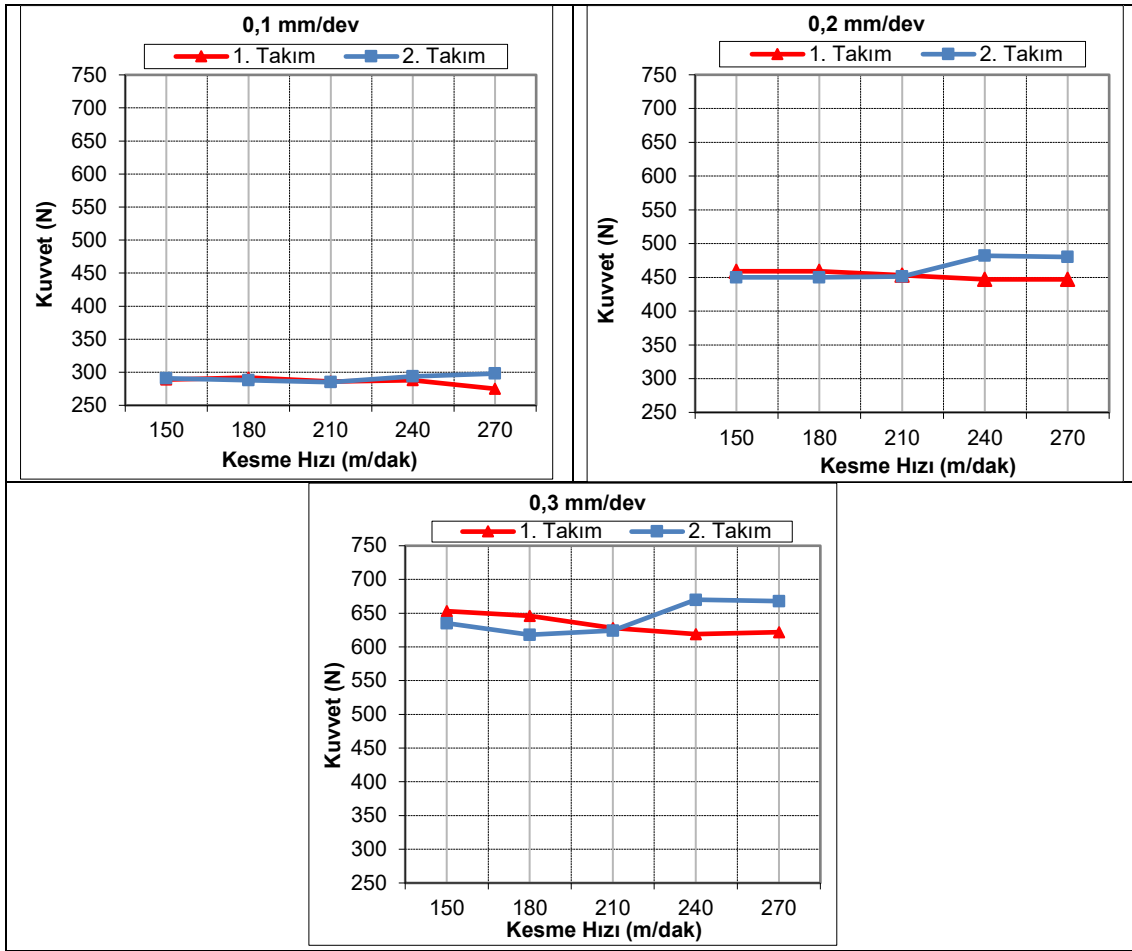
Her bir kesme hızında, 1 mm kesme derinliği için her iki kesici uç için kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına bağlı değişimleri Şekil 6'da grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 6. İlerleme hızına bağlı kesme kuvvetleri (Cutting forces based on feed rate)

Şekil 6'daki grafikler incelendiğinde her iki talaş kırıcı formuna sahip kesici ile yapılan deneylerde, ilerleme hızının artması ile kesme kuvvetlerinin sürekli ve orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu durumu, ilerleme hızının artması ile kaldırılan talaş hacminin artmasına bağlamak mümkündür. Grafiklere bakıldığında, en düşük kesme kuvvetleri en düşük ilerleme hızı olan 0.1 mm/dev'de oluşurken, en yüksek kesme kuvvetleri ise en yüksek ilerleme hızı olan 0.3 mm/dev'de oluşmuştur. Düşük kesme hızları ve düşük ilerleme hızlarında, her iki kesici takımında da oluşan kesme kuvvetleri hemen hemen birbirine eşit çıkarken, kesme hızının artması ile 1. takımında oluşan kuvvetler daha az çıkmıştır. Bunu da kesici takımlarda bulunan talaş kırıcı formunun talaş akışını etkilemesine bağlamak mümkündür [23].

Kullanılan iki kesici uç için de aynı ilerleme hızlarında, kesme hızına bağlı kesme kuvveti grafikleri Şekil 7'de verilmiştir.

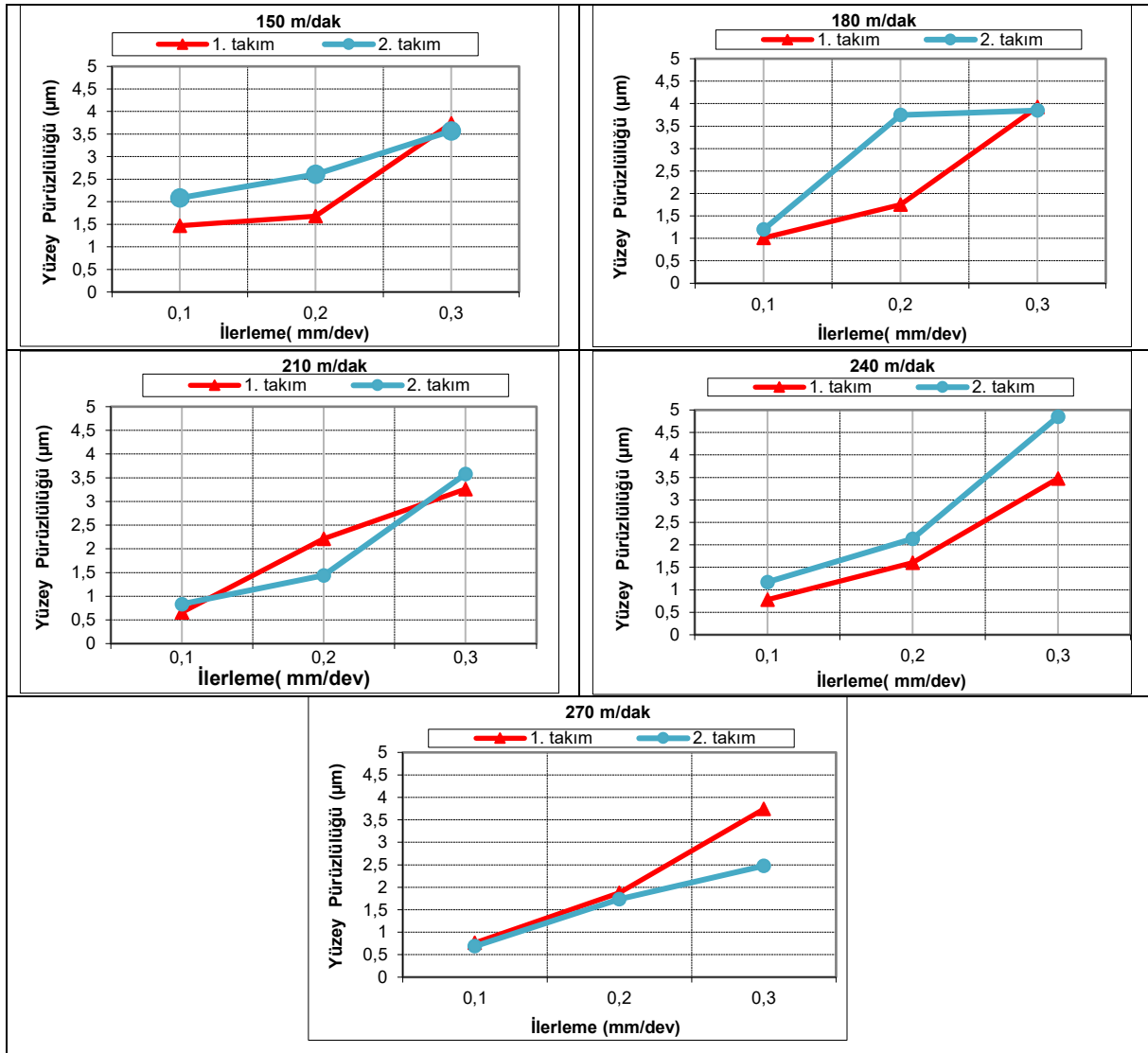


Şekil 7. Kesme hızına bağlı kesme kuvvetleri (Cutting forces based on cutting speed)

Şekil 7'deki grafikler incelendiğinde, kesme hızının 150 m/dak'dan 210 m/dak'ya kadar artması, kesme kuvvetlerinin azalmasına sebep olmuştur. 210 m/dak'dan sonra kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerinde genelde bir artış eğilimi olduğu görülmektedir. Bu durumu kısmen takım talaş temas alanındaki azalma, kısmen de kesme hızındaki artışla birlikte birinci ve ikinci defarmasyon bölgelerinde artan sıcaklığın işlenen malzemenin akma mukavemetini bir noktaya kadar düşürmesi ile açıklamak mümkündür [11,29,30]. Kesme kuvvetleri, yüksek kesme hızlarında 1. takım daha az oluşurken, düşük kesme hızlarında ise 2. takım daha az oluşmuştur. Bu duruma, kesici takımlardaki talaş kırıcı formların sebep olduğu düşünülmektedir. En düşük kesme kuvveti 1. kesici takım 270 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme hızında 275 N olarak ölçülmüştür. En yüksek kesme kuvveti değeri ise 1. kesici takım 240 m/dak kesme hızı ve 0.3 mm/dev ilerleme hızında 670 N olarak ölçülmüştür. Kesici takım firmasının tavsiye ettiği orta kesme hızı değeri olan 210 m/dak kesme hızında kesme kuvvetlerinin birbirlerine hemen hemen eşit olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda, kesme kuvvetleri üzerinde ilerleme hızının etkisi, kesme hızına göre daha etkili olduğu söylenebilir.

3.2. Yüze Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Surface Roughnesses)

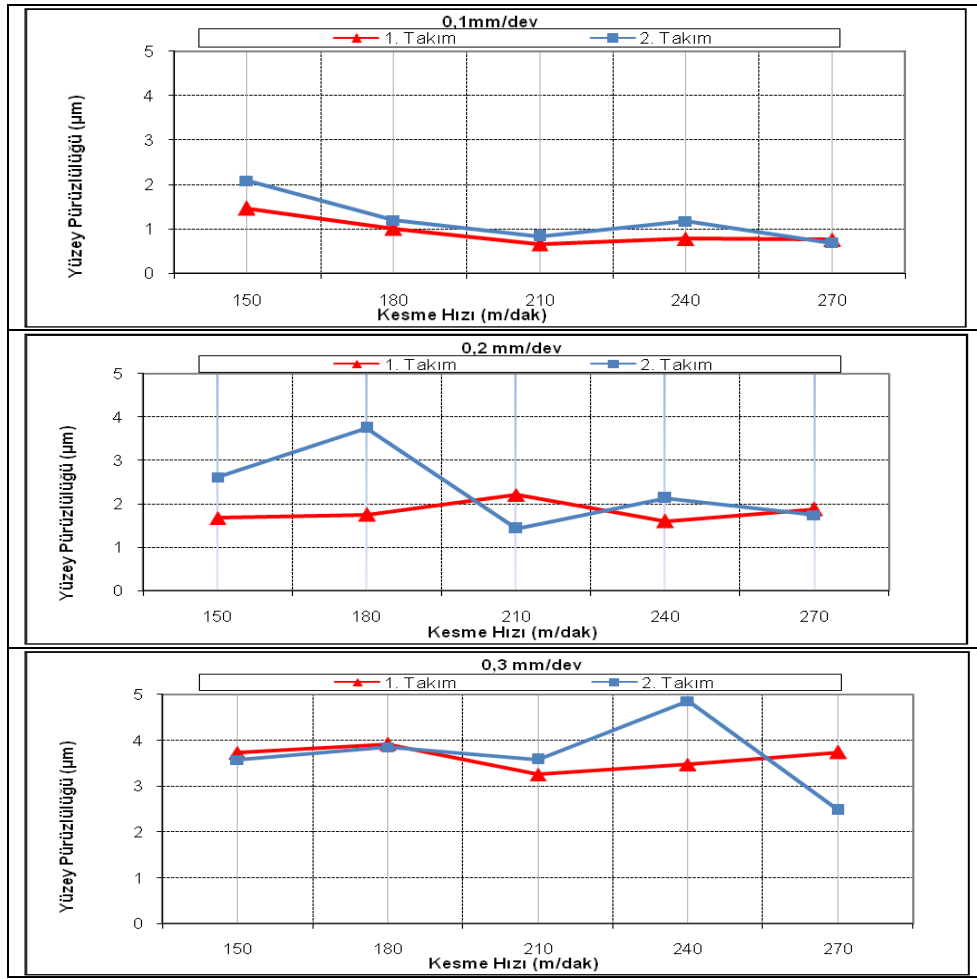
Kullanılan her bir kesici uç için, aynı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı kesme kuvvetlerinin grafikleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. İlerleme hızına bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü (Average surface roughness depending on the feed rate)

Şekil 8'deki grafikler değerlendirildiğinde, her iki talaş kırıncı formuna sahip kesici takımlar için de, deney yapılan tüm kesme hızlarında (150-180-210-240-270 m/dak) ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün de sürekli arttığı görülmektedir. Düşük ilerleme hızlarında daha iyi yüzey kalitesi elde edildiği görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ile ilerleme hızı arasında orantılı bir ilişki olduğu söylenebilir. Bu durumun daha önce yapılan literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir [11,29]. En düşük yüzey pürüzlülük değeri NR4 kodlu talaş kırıncı formuna sahip 1. kesici takım ile 0.1 mm/dev ilerleme hızı ve 210 m/dak kesme hızında 0.659 µm olarak ölçülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri ise NM4 kodlu talaş kırıncı formuna sahip 2. kesici takım ile 0.3 mm/dev ilerleme hızı 240 m/dak kesme hızında 4.852 µm olarak ölçülmüştür. Kesici takımlar arasında kıyaslama yapıldığında, en yüksek kesme hızı (270 m/dak) hariç diğer kesme hızlarında, 1. kesici takım ile yapılan deneylerde pürüzlülük değeri daha düşük çıkmıştır.

Kesme hızına bağlı yüzey pürüzlülük grafikleri üç ilerleme hızı için de Şekil 9'daki gibi oluşmuştur.



Şekil 9. İlerleme hızlarına bağlı yüzey pürüzlülükleri (Surface roughness due to feed rates)

Şekil 9 değerlendirildiğinde, genel olarak kesme hızının 210 m/dak kesme hızına kadar artması ile yüzey pürüzlülük değerleri azalmakta, ancak bu değerden sonra kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri artış eğilimi sergilemiştir. 210 m/dak kesme hızına kadar artan kesme hızıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azalması yığıntı talaş oluşma eğiliminin azalmasıyla açıklanabilir. Çünkü, bir noktaya kadar artan kesme hızıyla sıcaklık artar ve sıcaklığın artması ile de kesici uçtaki yığıntı talaş sertliğini ve dayanımını kaybederek devam eden kesme sürecinde üzerine gelen gerilmelere dayanamayarak kesici uçtan uzaklaştırılır. Dolayısıyla belli bir kesme hızı değerine kadar, yığıntı talaş oluşma eğilimi azalır. Ancak, kesme hızındaki 210 m/dak'dan sonraki artışla yüzey pürüzlülüğünün artması, yüksek kesme hızlarında kesici takım ucundaki muhtemel küçük kırılmalarla (chipping) açıklanabilir [11]. En düşük yüzey pürüzlülük değeri NR4 kodlu talaş kırıcı formuna sahip 1. Takım ile, en küçük ilerleme ve orta kesme hızı değerleri olan 0.1 mm/dev ilerleme hızı ve 210 m/dak kesme hızında 0.659 µm olarak ölçülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri ise NM4 kodlu talaş kırıcı formuna sahip kesici ile 0.3 mm/dev ilerleme hızı 240 m/dak kesme hızında 4.852 µm olarak ölçülmüştür. Kesici takımlar yüzey pürüzlülüğü açısından kıyaslandığında genel olarak 1. takım ile yapılan deneylerde daha iyi yüzeyler elde edildiği söylenebilir. NM4 kodlu 2. takımında, bazı kesme şartlarında (0,2 mm/dev'de 180 m/dak ve 0,3 mm/dev'de 240 m/dak) yüzey pürüzlülüğünde beklenmedik durumlar oluşmuş ve bu durumlar da talaş sarılması gibi kontrol edilemeyen sebeplere bağlanmıştır. NM4 kodlu 2. takımında 0,2 mm/dev ilerleme hızı ve 180 m/dak kesme hızında yükselerek 3.744 µm'a ulaştığı, yine aynı takımında 0.3 mm/dev ilerleme hızı ve 240 m/dak kesme hızında 4.852 µm ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AISI 2205 (EN 1.4462) paslanmaz çeliğin CNC torna tezgahında, iki farklı talaş kırıcı forma sahip kesicilerle işlenmesinde, kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülükleri ve kesme kuvvetlerini araştırmaya yönelik bu çalışma ile elde edilen önemli bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- NR4 (1. takım) ve NM4 (2. takım) talaş kırıcı formuna sahip kesici takımlar ile yapılan deneylerde her iki kesici takım için de ilerleme hızının artması ile kesme kuvvetleri sürekli ve orantılı bir şekilde artmıştır.
- En düşük kesme kuvvetleri en düşük ilerleme hızı olan 0.1 mm/dev'de oluşurken, en yüksek kesme kuvvetleri ise en yüksek ilerleme hızı olan 0.3 mm/dev'de oluşmuştur.
- Düşük kesme hızları ve düşük ilerleme hızlarında, her iki kesici takımında da oluşan kesme kuvvetleri hemen hemen birbirine eşit çıkarken, kesme hızının artması ile 1. takımında oluşan kuvvetler daha az çıkmıştır.
- Kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetleri kesici takım firmasının tavsiye ettiği kesme hızı (210 m/dak) değerine kadar azalmış daha sonra artmıştır.
- Kesme kuvvetleri, yüksek kesme hızlarında 1. takımında daha az oluşurken, düşük kesme hızlarında 2. takımında daha az oluşmuştur.
- En düşük kesme kuvveti 1. takımında 270 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme hızında 275 N olarak ölçülmüştür. En yüksek kesme kuvveti değeri ise yine 1. takımında 240 m/dak kesme hızı ve 0.3 mm/dev ilerleme hızında 670 N olarak ölçülmüştür.
- 210 m/dak kesme hızına kadar 2. takımında oluşan kuvvetler az çıkarken, bu kesme hızından büyük olan hızlarda 1. takımında oluşan kuvvetler daha az çıkmıştır.
- Deney yapılan tüm kesme hızlarında, ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü de sürekli artmıştır.
- En düşük yüzey pürüzlülük değeri NR4 kodlu talaş kırıcı formuna sahip 1. kesici takım ile 0.1 mm/dev ilerleme hızı ve 210 m/dak kesme hızında 0.659 μm olarak ölçülmüştür.
- En yüksek yüzey pürüzlülük değeri NM4 kodlu talaş kırıcı formuna sahip 2. kesici takım ile 0.3 mm/dev ilerleme hızı 240 m/dak kesme hızında 4.852 μm olarak ölçülmüştür.
- Kesici takımlar arasında kıyaslama yapıldığında, en yüksek kesme hızı (270 m/dak) hariç diğer kesme hızlarında, NR4 kodlu talaş kırıcı formuna sahip 1. kesici takım ile yapılan deneylerde pürüzlülük değeri daha düşük çıkmıştır.
- Kesme hızının 210 m/dak kesme hızına kadar artması ile yüzey pürüzlülük değerleri azalmış, ancak bu değerden sonra kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri artış eğilimi sergilemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. R. Badji, M. Bouabdallah, B. Bacroix, C. Kahloun, K. Bettahar, N. Kherrouba, Effect of solution treatment temperature on the precipitation kinetic of σ phase in 2205 duplex stainless steel welds, *Materials Science and Engineering*, 496(1-2): 447-454, 2008.
2. F. Memiş, AISI 2205 paslanmaz çeliğin CNC torna tezgahında işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin deneysel araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2015.
3. Y. Kayır, S. Asalan, A. Aytürk, AISI 316Ti paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesici uç etkisinin taguchi yöntemi ile analizi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 28(2): 63-372, 2013.
4. Ö. Tekaslan, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde işlenebilirliğe bağlı olarak kalıcı gerilme problemlerinin araştırılması, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye, 2007.
5. H. Demir, H.B. Ulaş, M. Zeyveli, Stavax ESR çeliğinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri açısından değerlendirilmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
6. İ. Çakmak, Frezeleme işleminde takım talaş kırıcı formunun yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etkisinin deneysel araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2013.

7. Y. Işık, M.C. Çakır, Hız çeliği takımlar için kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, TEKNOLOJİ, 1-2: 111-118, 2001.
8. B. Özlü, H. Demir, E. Nas, CNC tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etki eden parametrelerin matematiksel olarak modellenmesi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi 3(2): 75-86, 2014.
9. M. Ay, A. Kalyon, CNC torna tezgahında 17-4 PH paslanmaz çeliğin işleme parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi, 6. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ.
10. Ö. Tekaslan, N. Gerger, U. Şeker, CNC torna tezgahında AISI 304 çeliklerin işlenmesinde optimum yüzey pürüzlülüğünü sağlayacak kesme parametrelerinin tespiti, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16:97-104, 2008.
11. İ. Çiftçi, Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20(2): 205-209, 2005.
12. İ. Çiftçi, Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools, Tribology International, 39: 565-569, 2006.
13. A. Özer, E. Bahçeci, AISI 410 martensitik paslanmaz çeliğin işlenebilirliği, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(4): 693-698, 2009.
14. H.E.Yeyen, İ. Korkut, Y. Turgut, İ. Çiftçi, AISI 303 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesme hızı ve ilerlemenin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
15. İ. Korkut, M. Kasap, İ. Çiftçi, U. Seker, Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel, Materials&Desing, 25:303-305 2004.
16. H. Gürbüz, F. Kafkas, U. Şeker, Kesici takıma farklı yöntemle uygulanmış kaplamaların kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak araştırılması, 6. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ.
17. M. Aydın, M. Uçar, A. Cengiz, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kuru tornalanabilmesine kesme parametrelerinin etkisi, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 11-12 Kasım 2010, Balıkesir.
18. Y. Kayır, A. Aytürk, AISI 316Ti paslanmaz çeliğin işlenebilirlik karakteristiklerinin incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(1):61-71, 2012.
19. B. Yalçın, D. Temiz, İmplant malzemesi olarak kullanılan AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin kuru tornalanabilirliğinin araştırılması, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 4-5 Ekim 2012, Ankara.
20. M. Kasap, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinde en uygun kesme parametrelerinin ve işleme şartlarının deneysel olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2001.
21. C. Özek, A. Haşçalık, U. Çaydaş, F. Karaca, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin tornalanması, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2:117-121, 2006.
22. C. Özek, V. Savaş, CNC torna tezgahlarında takım aşınmasına etki eden faktörlerin belirlenmesi, Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, 14-16 Nisan 2004, Denizli.
23. A. Mavi, G. Uzun, Dupleks 1.4462 Paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerinin işlenebilirlik üzerine etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(3): 177-184, 2017.
24. H. Gurbuz, U. Seker, F. Kafkas, Effects of cutting tool forms on the surface integrity in turning of AISI 316L stainless steel, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1):225-240, 2020.
25. N. Sharma, K. Gupta, Influence of coated and uncoated carbide tools on tool wear and Surface quality during dry machining of stainless steel 304, Materials Research Express, 6(8): 2019.
26. M. Dhananchezian, M.R. Priyan, G. Rajashekar, S.S. Narayanan, Study the effect of cryogenic cooling on machinability characteristics during turning duplex stainless steel 2205, Materials Today-Proceedings, 5(5): 12062-12070, 2018.
27. S. Pradhan, A. Das, A. Santoshwar, T.R. Dharmendrabhai, S.R. Das, Sustainability assessment and machinability investigation of austenitic stainless steel in finish turning with advanced ultra-hard sialon ceramic tool under different cutting environments, Silicon, Early Access, Feb 2020.
28. General Catalogue - Walter Tools, 2012.
29. E.M. Trent, Metal cutting, Butterworths Press, London, 1989.
30. İ. Çiftçi, M. Kasap, U. Şeker, Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirlik parametrelerinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar üzerine bir değerlendirme, Teknoloji, 2(3-4):131-145, 1999.

Yüksek İlerlemeli Frezeleme İşleminde İşlenebilirlik Parametrelerinin İncelenmesi

Gültekin UZUN^{1,*}, Ramazan ÇAKIROĞLU²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 21.04.2020

Kabul: 29.04.2020

Anahtar Kelimeler:

Yüksek ilerleme

Frezeleme

Yüzey pürüzlülüğü

Kesme kuvveti

ÖZET

Bu çalışmada farklı sertlikteki malzemeler üzerinden, talaş kaldırma deneyleri yüksek ilerleme (0.6-0.9 ve 1.2 mm/dev) değerlerinde, üç farklı kesme hızında (50-70 ve 98 m/dak) ve 0.5 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Vermüküler grafitli dökme demir numuneleri 375 °C sıcaklıkta ve üç farklı bekleme süresinde (60, 120 ve 180 dak.) östemperleme işlemine tabi tutulmuştur. Talaş kaldırma sonucu kesici üzerinde oluşan kesme kuvveti ve malzemelerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Yüksek ilerleme değerinde yapılan deneylerde 0.5 µm ile 5 µm değerlerinde yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Kesme kuvvetleri açısından bileşke kuvvetin 3000 N ile 1500 N arasında olduğu görülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti değerleri 0.6 mm/dev ilerleme değerinde tespit edilmiştir. Östemperleme süresinin kesme işlemini etkilediği ve kısa östemperleme sürelerinde daha iyi kesme değerlerinin elde edildiği görülmüştür.

Investigation of Machinability Parameters in High-Feed Milling Process

ARTICLE INFO

Received: 21.04.2020

Accepted: 29.04.2020

Keywords:

High-feed

Milling

Surface roughness

Cutting force

ABSTRACT

In this study, the machining experiments were performed on different hardness leveled materials at high feed rates (0.6-0.9 and 1.2 mm/rev), at three different cutting speeds (50-70 and 98 m/min) and at a constant cutting depth of 0.5 mm. Vermicular graphite cast iron specimens were austempered with respect to three different treatment times (60, 120 and 180 min) at 375 °C. The cutting force occurred on the cutting tool and the surface roughness values of the materials were measured after each machining experiment. In high feed experiments, surface roughness values were obtained between 0.5 µm and 5 µm. The resultant cutting force values were obtained between 1500 N and 3000 N. The lowest cutting force value and the best surface roughness value obtained at 0.6 mm/rev feed rate. It is determined that the austempering time effects cutting process and also lower values obtained at shorter austempering times in terms of cutting force and surface roughness.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kesici takımında meydana gelen deformasyonlar; iş parçasının yüzey kalitesini ve toleranslarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte takımında meydana gelen deformasyonların oluşturduğu en büyük olumsuzluk takım ömrünün azalmasıdır. Takım üzerinde oluşan kesme kuvveti bu durumu etkileyen en önemli parametrelerdendir. Takım ömrünün azalması, takım maliyetini ve sonuç olarak da üretim maliyetini etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedendir ki; takım ömrünü etkileyen faktörlerin bilinmesi, bu faktörleri kontrol altına alınabilecek tedbirlerin geliştirilmesi, efektif takım ömrünün belirlenebilmesi ve optimum takım değiştirme zamanının belirlenmesi büyük önem kazanmaktadır. İlerleme miktarı, serbest biçimli bir takım yoluna ulaşmak için doğrusal veya eğrisel interpolasyon yaklaşımını kullanarak yol boyunca ciddi şekilde değişir [1-3]. Hamdan ve arkadaşları AISI 304 paslanmaz çeliği yüksek kesme hızlarında frezelemişler ve minimum kesme kuvveti ile daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmeyi amaçlamışlardır. Frezeleme esnasında kesme hızı, ilerleme değeri, eksenel kesme derinliği ve soğutma/yağlama yöntemi kesme parametresi olarak

seçilmiştir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, kesme kuvveti ile yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olarak ilerleme değerini ve bunu sırasıyla kesme hızı, kesme derinliği ve soğutma/yağlama yönteminin takip ettiğini söylemişlerdir [2]. Honghua ve arkadaşları TA15 titanyum alaşımını PCD ve PCBN takımlar ile yüksek hızlarda (100-140-180 m/dak ve 0,02-0,04-0,06 mm/dev) frezelemişler ve takım ömrü ile aşınma mekanizmasını incelemişlerdir. Araştırmacılar özellikle yüksek hızlarda PCD takımların daha yüksek takım ömrüne sahip olduğunu iddia etmişlerdir [3]. Rao ve Shin yaptıkları çalışmada karbür ve elmas uçlar kullanarak 7075-T6 alüminyum alaşımını yüksek hızlarda frezelemişlerdir. Kesme hızını 518-1585 m/dak arasında, ilerleme değerini 0,2 mm/dev ve kesme derinliğini 0,51-2,54 mm arasında kullanmışlardır. Sonuçları kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve talaş morfolojisi açısından incelemişlerdir. Araştırmacılar, daha yüksek kesme hızının daha ince talaş ürettiğini iddia ederken yüksek kesme hızlarında daha yüksek talaş akış açısının, daha düşük kesme kuvvetinin ve yüksek kesme açısının olduğunu, dolayısıyla da bunların daha verimli bir talaş kaldırma işlemi sağladığını söylemişlerdir [4].

Vermüküler grafitli dökme demirler, küresel grafit üretmek için yapılan deneylerde tesadüfen bulunmuş bir malzeme türüdür. Ancak daha sonra kabul görmüş ve 1960'lı yılların ortasından itibaren ürün yelpazesi içerisinde yer almaktadır. Grafit yapıları oldukça karmaşık olan bu malzemeler, bünyesinde yaklaşık olarak %20 oranında küresel grafit ve %80 seviyesinde vermüküler grafit barındırmaktadırlar. Dahası bu malzemelerin mikro yapılarında hiç lamel grafit yoktur. Vermüküler grafit denilen yapıları tanımlamak gerekirse; lamel grafitlerden daha kalın ve lamel uçları yuvarlatılmış bir yapıya sahiptirler [5]. Mavi, vermüküler grafitli dökme demirlerin işlenmesi esnasında yüzey pürüzlülüğündeki değişimi araştırmıştır. Sonuçların analizini yapan araştırmacı perlitik vermüküler grafitli dökme demirlerin en yüksek hızda en iyi yüzey pürüzlülük değerini verdiğini iddia etmiştir [6]. Şeker ve Hasırcı, östemperli dökme demiri işlemişler ve kesme kuvveti ile yüzey kalitesindeki değişimi incelemişlerdir. Araştırmacılar en düşük kesme kuvvetini ve yüzey pürüzlülüğünü döküm numunelerden elde etmişlerdir [7]. Zimba ve arkadaşları, östemperleme işlemi uyguladıkları küresel grafitli dökme demirin özelliklerindeki değişimi incelemişler ve östemperleme sıcaklığı artınca malzeme sertliğinin azaldığını iddia etmişlerdir [8]. Karabulut ve Güllü, vermüküler grafitli dökme demirin mekanik özelliklerine ait bazı değerlendirmelerde bulunurken aynı zamanda malzemenin frezelenmesini araştırmışlardır. Araştırmacılar, karbür takımlarda yavaşma açısının artması ile birlikte takım ömrünün azaldığını iddia ederken seramik takımlarda bunun tersi bir durumla karşılaştığını iddia etmişlerdir [9]. Uzun ve arkadaşları, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demiri tornalamışlar ve çıktı parametresi olarak takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerindeki değişimi incelemişlerdir. Östemperleme sıcaklığının azaltılması ile birlikte kesme kuvvetlerinin arttığını iddia eden araştırmacılar yüzey kalitesinde tam tersi bir durum olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca araştırmacılar dominant aşınma türünün yanak aşınması olduğunu iddia etmişlerdir. [10].

Literatür araştırması sonucunda yüksek kesme hızlarında frezeleme işlemlerinin olduğu, fakat yüksek ilerleme değerlerinin kullanılmadığı görülmüştür. Yüksek kesme hızlarında işlem yapmak için özel imal edilmiş fener milli tezgâhlara ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat yüksek ilerleme değeri için standart tezgâhlar kullanılabilir. Literatürde ilerleme değerleri 0.02 ile 0.2 mm/dev aralığında kullanıldığı görülmüştür. Yapılan çalışma ile ilerleme değerleri 3-6 kat arasında artırılmış ve 0.6-0.9-1.2 mm/dev kullanılmıştır. Bu sayede işleme zamanı bakımından büyük kazançlar sağlanabilmesi amaçlanmıştır. Bu işleme parametrelerinin sanayide yaygın olarak kullanılan vermüküler grafitli demir üzerinde etkileri araştırılmıştır. Yapılan vermüküler grafitli dökme demir incelemelerinin çoğunun malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimi tespit etmek amaçlı yapıldığı görülmüştür. Buna karşın östemperlenmiş vermüküler grafitli dökme demir malzemelerin frezeleme yöntemiyle işlenebilirliği ile ilgili sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Literatür çalışmalarından esinlenilerek vermüküler grafitli dökme demir malzemesine uygulanan östemperleme sıcaklığı ve sürelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü açısından incelenmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. İş parçası ve Takım Özellikleri (Workpiece and Tool Properties)

Yüksek ilerlemeli frezeleme (High-Feed), klasik yöntemlere göre üç kat daha yüksek işleme hızı sağlayan bir frezeleme yöntemidir. Sığ kesme derinliği ile ağız başına yüksek ilerleme değeri bir araya getirilir, böylece talaş kaldırma hızı artar ve daha fazla parça işlenebilir. Kesme kuvvetleri tezgâhın fener miline aksel gelecek şekilde yönlendirilir ve böylece daha fazla denge ve daha az titreşim ile takım ömrü uzar. Ayrıca yüksek ilerlemeli freze takımları yarı finiş işleme ihtiyacını ortadan kaldırarak ve takım değişimlerini azaltarak zaman tasarrufu sağlar. Kapsamlı yüksek ilerlemeli frezeleme çözümleri, tüm uygulama ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Yüksek ilerlemeli frezeleme yöntemi ile yüzey frezeleme yöntemi, sonraki işleme operasyonları veya son finiş işleme için iyi bir platform üretmeye son derece uygundur. Çoğu uygulamada yalnızca son işlemenin gerekeceği çok hassas toleranslar elde edilebilir. Yüksek ilerlemeli frezeleme ayrıca düz olmayan yüzeylerde kopya frezeleme için son derece kullanışlı ve girintilerin frezelenmesi ve kalıp üretimi için son derece etkilidir. Yüksek ilerlemeli frezeleme, helisel enterpolasyon yaparken büyük çaplı delikler açmak için de uygundur çünkü genellikle ön işleme veya ön delik açma aşamaları atlanır. Ayrıca özellikle titanyum ve diğer hafif alaşımlar gibi zorlu malzemeler kullanıldığında dalma kesme operasyonlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

Deneylerde SANDVIK Coromant tarafından high-feed takımı olarak üretilen silindirik saplı, işleme kapasitesi 32 mm olan ve 10° kesme açılı CoroMill R210-032A25-09H kodlu takım tutucu kullanılmıştır. Takım tutucunun 10° lik kesme kenarı açısı, yüzey frezeleme sırasında çok yüksek ilerleme değerlerinin kullanılmasına imkân vermektedir. Bu durum kesme kuvvetlerini aksel yönde olmasını ve düzgün bir kesme işlemi ile minimum titreşim yatkınlığı elde edilmesini sağlamaktadır [12]. Takım geometrisi ve ölçüleri Şekil 3'te verilmiştir. Deneylerde SANDVIK Coromant tarafından üretilen GC3330 kalite (R210-09 04 14E-KM) CVD yöntemi ile kaplanmış $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$ kaplamalı sementit karbür kesici uçlar kullanılmıştır.

Fonksiyonel uzunluk (LF)	210 mm	
Uyarlamalı arayüz makina yönü (ADINTMS)	25 mm	
Bağlantı çapı (DCON)	25 mm	
Preferik etkili kesici kenar sayısı (ZEFP)	3	
Maksimum dalma derinliği (AZ)	1.8 mm	
Maksimum kesme derinliği (APMXFFW)	1.2 mm	
Maksimum kesme derinliği (APMXEFW)	8 mm	
Kesim öge sayısı (CICTP1)	3	
Maksimum kesme çapı (DCX)	32 mm	
Kesme çapı (DC)	17.9 mm	
Takım kesme kenar açısı (KAPR)	10°	
Köşe yarıçapı (RE)	1.4 mm	
Büyük kesme açısı (KRINS)	10°	
Kesici kenar etkili uzunluk (LE)	5.77 mm	
İç teğet daire çapı (IC)	9.5 mm	
Kesici uç kalınlığı (S)	4.5 mm	

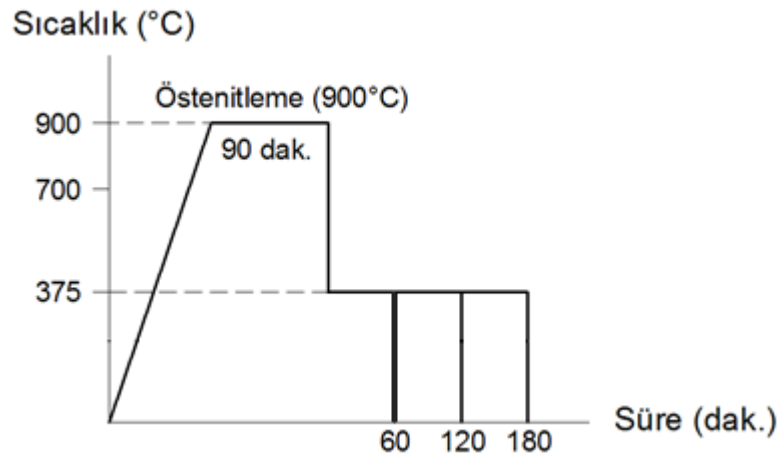
Şekil 1. Kesici takım geometrisi ve özellikleri (Cutting tool geometry and properties)

Deney numuneleri 25x30x100 mm ölçülerinde kesilmiş ve dinamometreye bağlanmaya hazır hale getirilmiştir. Tablo 1'de deney numunesine ait kimyasal bileşim gösterilmektedir.

Tablo 1. Vermüküler grafitli dökme demirin kimyasal bileşimleri (Chemical compositions of vermicular graphite cast iron)

Sertlik (HRC)		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
23	Perlitik	3.82	1.804	0.337	0.031	0.015	0.074	0.013	0.002
		Cu	Mg	Sn	Ti	Al	Zn	Bi	Fe
	Perlitik	0.879	0.014	0.092	0.0203	0.008	0.082	0.007	Kalan

Östempereleme için seçilen süre ve sıcaklık değeri literatür araştırması ve ön deneyler sonucu belirlenmiştir [7]. Deney numunesine ilk olarak ön ısıtma yapılmış ve daha sonra östenitleme yapılmış en son aşamada ise östempereleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemler esnasında sıcaklık ölçümü için K tipi ısı çifti kullanılmıştır. Şekil 2’de uygulanan ısı işlemlerin özeti verilmiştir.



Şekil 2. Deney numunesine uygulanan ısı işlemin özeti (Summary of heat treatment applied to the test sample)

Östenitleme sonrası östempereleme işlemi uygulanarak deneysel çalışma kapsamında kullanılan üç farklı malzemeye ait özellikler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Deneysel malzeme özellikleri (Experimental material properties) [12, 13]

	1. Malzeme	2. Malzeme	3. Malzeme
Kısaltma	N1	N2	N3
Östempereleme sıcaklığı (°C)	375	375	375
Östempereleme süresi (dak)	60	120	180
Sertlik (HRC)	38	41	40

Östempereleme işleminin yapılmasıyla birlikte malzemenin sertliği artmaktadır. Farklı östempereleme süreleri altında ısı işlem uygulanan malzemenin sertliği ısı işlem uygulanmamış malzemenin sertliği ile kıyaslandığında yaklaşık 1.65-1.8 kat artış olmuştur. Östempereleme ile birlikte malzemenin sertliğinde meydana gelen artışın sebebi ısı işlemle birlikte malzemenin mikro yapısında meydana gelen değişim olarak gösterilebilir [15]. Malzeme bünyesinde bulunan kalıntı östenit doğal olarak soğutulduğunda martenzit yapıya dönüşmekte ve böylece malzemenin sertliği artmaktadır [6, 12, 13].

2.2. İşlenebilirlik Deneyleri (Machinability Tests)

Deneyler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan Fanuc kontrol ünitesi, 5.5 kW güce sahip Johnford VMC550 işleme merkezinde yapılmıştır. Kesme değerleri, imalatçı firmanın verileri referans alınarak belirlenmiştir. Deneyler üç farklı kesme hızında

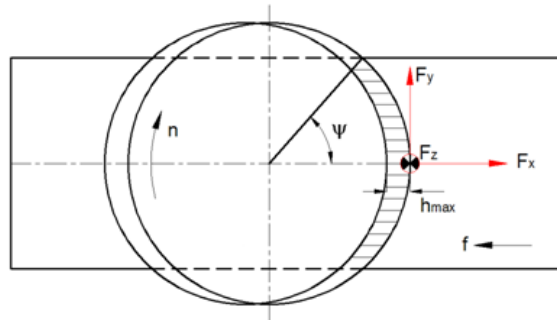
(60-120-180 m/dak), üç farklı ilerleme değeri (0.6-0.9-1.2 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (0.5 mm) kuru şartlarda yapılmıştır. Tüm kombinasyonlar hesaplanarak 27 adet deney yapılmıştır.

Kesme kuvveti ölçümleri Kistler 9257B üç bileşenli piezoelektrik dinamometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu dinamometre Kistler 5070A çok kanallı şarj amplifiere bağlanmıştır. Daha sonra kesme kuvveti verileri Dynoware yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Kesme kuvvetlerini ölçmek için kullanılan deney düzeneğinin bileşenleri Şekil 3’de görülmektedir.



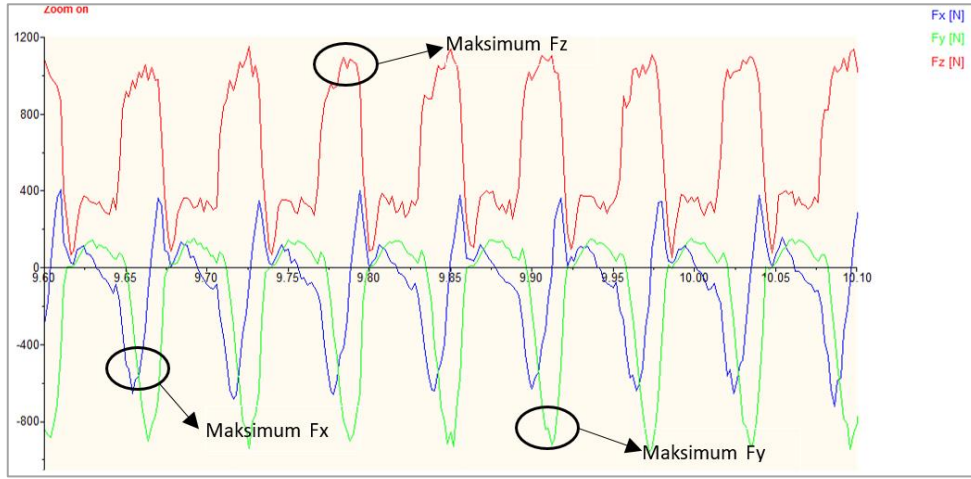
Şekil 3. Deney düzeneği ve kesme kuvvetlerinin ölçümü (Experimental setup and measurement of cutting forces)

Deneyler simetrik yüzey frezeleme işlemi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simetrik yüzey frezelemede kesici takımın bir kesici ucunun üzerine etki eden kesme kuvveti bileşenleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Bu şekilde F_x anlık ilerleme bileşeni (X yönünde elde edilen kesme kuvvetinin doğrultusu), F_y anlık normal bileşeni (Y yönünde elde edilen kesme kuvvetinin doğrultusu), F_z anlık dikey bileşen (Z yönünde elde edilen kesme kuvvetinin doğrultusu) iş parçası üzerinde oluşan kesme kuvvetidir. F_x , F_y ve F_z sırasıyla X, Y ve Z yönlerindeki bir kesici uç üzerindeki anlık kesme kuvvetleridir, ψ açısı kesicinin anlık kesme açısıdır. Grafikler; Belirlenen F_x , F_y , F_z kesme kuvvetlerinin vektörel toplamı ile bileşke kuvveti (F_R) hesaplanmıştır (Şekil 4). Dynoware yazılımı kullanılarak kesici en maksimum talaş yüksekliğine (h_{max}) ulaştığında F_x , F_y ve F_z kesme kuvvetleri ölçülerek oluşturulmuştur. Bileşke kuvveti hesaplamak için kullanılan denklem Eşitlik 1’de verilmiştir [16]. Şekil 5’de kuvvet oluşumları ve seçimleri gösterilmiştir. F_x , F_y ve F_z kuvvetleri için dört adet kuvvet değeri seçilmiş ve bu kuvvetlerin ortalama değeri kullanılmıştır.



Şekil 4. Simetrik yüzey frezelemede kesme geometrisi (Cutting geometry in symmetrical milling)

$$F_R = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (1)$$



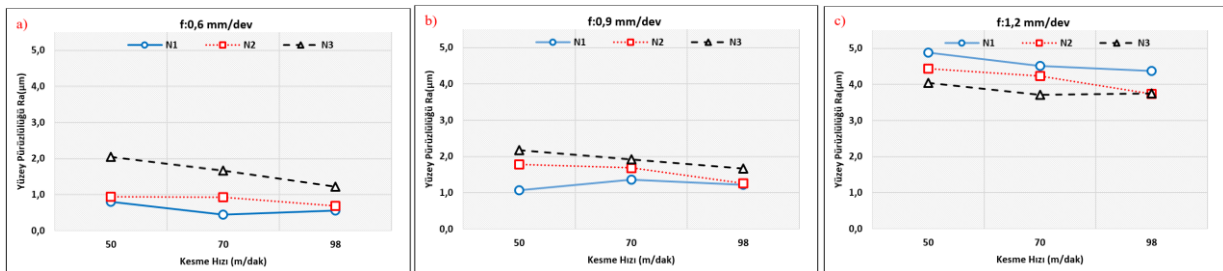
Şekil 5. Kuvvet oluşum grafiği ve seçimi (Force formation chart and selection)

Yüzey pürüzlülük ölçümü için profil metodu tercih edilmiş ve buna uygun olarak portatif MAHR-Perthometer M1 modeli ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler, oksitlenmeden etkilenmemesi için talaş kaldırma işleminin hemen sonrasında yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümü işleme yönünde ve üç bölgede (başlangıç bölgesi, orta bölge ve bitiş bölgesinden) rasgele belirlenen noktalardan üçer adet olmak üzere toplamda dokuz adet ölçülmüş ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

3. DENEY SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF EXPERIMENT RESULTS)

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük verilerine ait grafikler Şekil 5’de verilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 60 dakika östemperleme süresine sahip vermüküler grafitli dökme demirin 70 m/dak kesme hızı ve 0.6 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü grafikleri incelendiğinde, ilerleme değerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ve ilerlemenin artmasıyla birlikte yüzey kalitesinde önemli bir kötüleşme olduğu görülmektedir (Şekil 6). En düşük yüzey pürüzlülüğü 0.6 mm/dev ilerleme ile çıkarken 0.9 mm/dev ilerlemede yüzey pürüzlülük değeri %20 ile %50 arasında artmıştır. ancak ilerlemenin 1.2 mm/dev seviyesine çıkması ile birlikte bu artış %200 ile %375 artmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ilerleme değerinin bir fonksiyonudur ve ilerlemenin artması ile birlikte yüzey kalitesinin kötüleşmesi beklenen bir durumdur [17]. Bunun sebebi, ilerleme değerinin artması ile birlikte işlenmiş yüzeyde oluşacak çukur ve tepelerin daha belirgin bir hale gelmesidir. Bir başka deyişle, düşük ilerleme hızlarında kesicinin iş parçası üzerindeki ilerleme hareketi daha yavaş olmakta ve kesici takım birim alanda daha fazla bulunmaktadır. Düşük ilerlemeli frezeleme işlemlerinde yüzey kaliteleri 0.5 μm değerlerinde gerçekleşmektedir [12]. Yüksek ilerleme ile işleminde 0.6 mm/dev ilerleme değerinde bu değerler elde edilmiştir.



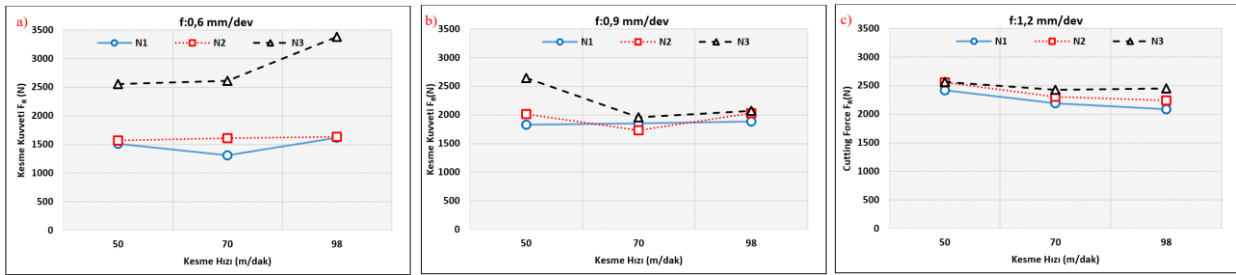
Şekil 6. Kesme hızı ve östemperleme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Effect of cutting speed and austempering time on surface roughness) a) 0.6 mm/dev b) 0.9 mm/dev c) 1.2 mm/dev

Yüzey pürüzlülüğüne kesme hızı açısından bakıldığında kesme hızının artması ile birlikte yüzey kalitesinde iyileşme olmuştur. Bu durum, kesme hızının artmasına paralel olarak kesme sıcaklığının

artması ve böylece malzemenin, kesici kenar ve uç radyüsü etrafında daha kolay deforme edilmesi ile açıklanabilir [10]. Ancak, kesme hızındaki artışın devam etmesi ile yüzey kalitesi kötüleşmeye başlamıştır (Şekil 6a). Östemperleme süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde, karmaşık bir durum görülse de genel olarak sürenin artması ile yüzey pürüzlülüğünde bir iyileşme olduğu söylenebilir. Bu durum, ısıl işlem süresi daha kısa olan malzemelerin mekanik özelliklerinin daha düşük olması ve talaş kaldırma esnasında karşılaşılan talaş tipinin toz talaş olmasıyla açıklanabilir.

3.2. Kesme Kuvveti (Cutting Force)

Deneyler sonucunda elde edilen kesme kuvveti verilerine ait grafikler Şekil 7’de verilmiştir. Deney sonuçlarının analizine göre en düşük kesme kuvveti değeri 60 dakika östemperleme süresine sahip vermüküler grafitli dökme demirin 70 m/dak kesme hızı ve 0.6 mm/dev ilerleme ile frezelenildiği durumda ortaya çıkmıştır (Şekil 7a).



Şekil 7. Kesme hızı ve östemperleme süresinin kesme kuvvetine etkisi (Effect of cutting speed and austempering time on cutting force) a) 0.6 mm/dev b) 0.9 mm/dev c) 1.2 mm/dev.

Kesme kuvveti ile ilerleme arasındaki ilişki incelendiğinde, ilerlemenin artması ile birlikte kesme kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Kesme kuvvetini belirleyen en önemli faktörlerden biri ilerleme değeri ile oluşan talaş kesit alanıdır. Bundan dolayı ilerlemenin artışı ile bileşke kesme kuvvetinin artması beklenen bir durumdur [18]. Kesme kuvvetlerinin kesme hızına bağlı olarak değişimi incelendiğinde kesme hızının artmasıyla birlikte kesme kuvvetinin %1 ile %10 arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bu durum, kesme hızının artmasıyla birlikte kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın artması ve deformasyon için gereken enerjinin daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Ancak, kesici takımın aşınma periyoduna girdiği durumlarda kesme hızının artması kesme kuvvetlerini de arttıracaktır [10]. Östemperleme süresinin kesme kuvvetlerine etkisi incelendiğinde, sürenin artmasıyla birlikte kesme kuvvetlerinin de arttığı görülmektedir. Östemperleme işlemi malzemelerin yapı ve özelliklerini değiştiren bir uygulamadır. Bunun en belirgin hali de malzemelere ait sertliklerin artmasıdır. Malzeme sertliğinin artması talaş kaldırma işleminin zorlaşacağı anlamına gelmektedir ki bu bile kesme kuvvetlerinin artması için yeterli bir sebeptir. Ayrıca, özellikle kısa östemperleme sürelerinde bazı östenit alanları tam dönüşmemektedir. Östenit yapılar deformasyon sertleşmesine uygun yapılar olduğu için dönüşümü tamamlanmış bölgelerin sertliği daha yüksektir. Östemperleme süresi uzun olan malzemelerin östenit yapıya dönüşmesi daha mümkün olmaktadır. Bundan dolayı da östemperleme süresi uzun olan malzemeleri işlemek için gerekli olan kesme kuvveti artmaktadır [19].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, vermüküler grafitli dökme demirin yüksek ilerleme değerlerinde frezelemesinde östemperleme ısıl işlem süresi ve kesme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Araştırma çıktısı olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti belirlenmiştir. Çalışma boyunca 27 adet deney yapılmış ve deney sonuçlarının analiz edilmesi ile elde edilen sonuçlar aşağıda madde madde verilmiştir;

- Yüksek ilerleme miktarlarında yapılan deneylerde 0.5 μm ile 5 μm değerlerinde yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.
- Kesme kuvvetleri açısından bileşke kuvvetin 3000 N ile 1500 N arasında olduğu görülmüştür.

- İlerleme açısından en iyi yüzey kalitesi değeri ve kesme kuvveti değeri en düşük ilerleme ile elde edilmiştir. İlerlemenin artması ile birlikte yüzey pürüzlülüğü parametrelerinde kötüleşme gözlemlenmiştir.
- Kesme hızının artması ile birlikte kesme bölgesindeki ısının artışı ve deformasyonun artması talaş kaldırmayı kolaylaştırdığı için yüzey pürüzlülük değeri ve kesme kuvveti azalmıştır.
- Kısa östemperleme süresi ile ısı işlem yapılan malzemeden çıkan talaş toz talaş olduğu için yüzey pürüzlülüğünü kötüleştirmiştir. Uzun östemperleme süresi malzemeyi sertleştirdiği için kesme kuvveti artmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. R.T. Coelho, A.F.Souza, A.R. Roger, A.M.Y. Rigatti, A.A. Riberio, Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 46: 1103–1111, 2010.
2. A. Hamdan, A. A. D. Sarhan, M. Hamdi, An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 58:81–91, 2012.
3. H. Su, P. Liu, Y. Fu, J. Xu, Tool life and surface integrity in high-speed milling of titanium alloy TA15 with PCD/PCBN tools, *Chinese J. Aeronaut.*, 25(5): 784–790, 2012.
4. B. Rao, Y. C. Shin, Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 41(12): 1763–1781, 2001.
5. D. M. Stefanescu, R. Hummer, and E. Nechtelberger, Compacted graphite irons, *Met. Handb.*, 1, January 1990, pp. 667–677, 1988.
6. A. Mavi, İ. Korkut, The effects of austempering temperature and time on the machinability of vermicular graphite iron, *Mater. Test.*, 56(4): 289–293, 2014.
7. U. Şeker, H. Hasırcı, Evaluation of machinability of austempered ductile Irons in terms of cutting forces and surface quality, *J. Mater. Process. Technol.*, 173(3): 260–268, 2005.
8. J. Zimba, D. J. Simbi, E. Navara, Austempered ductile iron: An alternative material for earth moving components, *Cem. Concr. Compos.*, 25(6): 643–649, 2003.
9. Ş. Karabulut, A. Güllü, Farklı yanaşma açıları ile vermiküler grafitli dökme demirin frezelenmesinde kesme kuvvetlerinin araştırılması ve analitik modellenmesi, *Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 28(1):135–143, 2013.
10. İ. Uzun, K. Aslantaş, S. Taşgetiren, K. Gök, Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin sinterlenmiş karbür kesici takım ile tornalama işleminde takım performansının incelenmesi, *Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 22(4): 739–744, 2007.
11. Seco Tools Kesici Takımlar Mak. San. Tic. A.Ş., Yüksek İlerlemeli Frezeler <https://www.secotools.com/#article/614>, Ekim, 2018.
12. Kahraman Y., Uzun G., Korkut I., Vermiküler grafitli dökme demirlerin frezelenmesinde östemperleme sıcaklığı ve süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi, 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım Sabancı Üniversitesi İstanbul, 2015.
13. Kahraman Y., Uzun G., Mavi A., Korkut I., Östemperlenmiş vermiküler grafitli dökme demirin mekanik özelliklerinin kesme kuvvetlerine etkisi , 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2014), 23-25 Ekim, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2014.
14. Sandvik Endüstriyel Mamüller Sanayi ve Ticaret A.Ş., Yüksek ilerlemeli yüzey ve dalma frezeleme, https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/products/coromill_210/, Ekim, 2018.
15. İ. Ovalı, A. Mavi, Ösferrit hacim oranının çift fazlı küresel grafitli dökme demirlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi, in 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 2011.
16. M. Gunay, A. Kacal, Y. Turgut, Optimization of machining parameters in milling of Ti-6Al-4V Alloy using Taguchi method, *New world Sci. Acad.*, 6(1): 428–440, 2011.
17. T. Kivak, Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 50 (1):19–28, 2014.
18. İ. Korkut, M. A. Dönertaş, Kesme parametrelerinin frezelemede oluşan kesme kuvvetleri üzerine etkileri, *Politek. Derg.*, 6 (1): 385–389, 2003.
19. Z. G. Wang, Y. S. Wong, M. Rahman, High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 45(1): 105–114, 2005.

Nb-V Mikroalaşım Çeliğinde Mekanik Alaşımlama Süresinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Mehmet Akif ERDEN^{1,*}, Alperen YILMAZ², Nuri ŞEN³

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

²Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği A.B.D., Karabük, Türkiye

³Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Düzce, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 21.04.2020

Kabul: 30.04.2020

Anahtar Kelimeler:

Toz metalürjisi

Nb-V mikroalaşım çelik

Mikroyapı

Mekanik özellikler

Mekanik alaşımlama süresi

ÖZET

Çelikler demir karbon alaşımı olarak ifade edilebilir. Çeliğin dayanımını etkileyen faktörler olarak karbon miktarı, alaşım elementi, ısıl işlem ve haddeleme gibi deformasyon işlemleri şeklinde sıralanabilir. Karbon miktarı çelikte belli orana kadar dayanımı artırır. Alaşım elementleri ise çeliğin dayanımını genellikle çökelti oluşturarak veya mikroyapıdaki oluşan fazları değiştirerek etkiler. Mikroalaşım çelikler ise % 0.05 ve % 0.20 aralığında alüminyum, niobyum, vanadyum ve titanyum gibi mikroalaşım elementleri ilave edilerek çökelti sertleşmesi, tane boyutu küçültme gibi dayanımı arttıran mekanizmalar ile düşük alaşım yüksek dayanımlı çelikler olarak tanımlanabilir.

Bu çalışmada Fe matris içerisine niobyum ve vanadyum elementlerinin ilavesiyle istenilen bileşimde farklı sürelerde mekanik alaşımlama yöntemi uygulanarak toz metalürjisi yöntemiyle mikroalaşım çelikler üretilmiştir. Mikroyapı analizinden sonra çekme numunesi boyutlarında hazırlanan farklı kimyasal bileşimdeki mikroalaşım çelik numunelere çekme testi uygulanmıştır. Numunelerin % uzama, akma-çekme dayanımları, mikroyapısal değişimlere bağlı olarak açıklanmıştır. Akma ve çekme dayanımları artan alaşım miktarına bağlı olarak artış sergilerken % uzama değerleri düşüş gözlenmiştir. Maximum akma ve çekme dayanımı 15 dakika yapılan mekanik alaşımlama ile sağlanmıştır.

Effect of Mechanical Alloying Time on Microstructure and Mechanical Properties in Nb-V Microalloyed Steel

ARTICLE INFO

Received: 21.04.2020

Accepted: 30.04.2020

Keywords:

Powder metallurgy

Nb-V microalloyed steel

Microstructure

Mechanical properties

Mechanical alloying time

ABSTRACT

Steels can be expressed as iron-carbon alloy. The alloy element can be sorted by deformation, such as heat treatment and rolling. The amount of carbon increases the strength up to a certain rate in steel. Regulating the strength of the steel for alloy elements affects by precipitate or changing the phases in the microstructure. Microalloyed steels can be defined as low alloyed multi-strength steels with resistance-enhancing mechanisms such as precipitate hardening, grain size reduction, such as aluminum, niobium, vanadium and titanium in the range of 0.05% and 0.20%.

This arrangement is designed with the addition of niobium and vanadium elements into the Fe matrix, by applying mechanical alloying method for different times, microalloyed steels are produced by powder metallurgy method. After microstructure analysis, tensile testing of micro alloy steel samples of different chemical composition prepared in tensile sample sizes was performed. Elongation, yield-tensile strength of the samples are explained depending on microstructural changes. While the yield and tensile strength increased due to the increasing amount of alloys, an increase in% elongation was observed. Maximum flow and tensile strength is provided by mechanical alloying for 15 minutes.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çelikler demir karbon alaşımı olarak ifade edilebilir. Çeliğin dayanımını etkileyen faktörler olarak karbon miktarı, alaşım elementi, ısıl işlem ve haddeleme gibi deformasyon işlemleri şeklinde sıralanabilir. Karbon miktarı çelikte belli orana kadar dayanımı artırır. Alaşım elementleri ise çeliğin dayanımını genellikle çökelti oluşturarak veya mikroyapıdaki oluşan fazları değiştirerek etkiler. Mikroalaşım çelikler, mekanik özelliklerin güçlendirilmesi amacıyla çok az miktarda kuvvetli karbür yada nitrür yapıcı element ilavesiyle yüksek dayanım özelliği kazanmasından dolayı Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşım Çelikler (YDDA) ya da High Strength-Low Alloyed (HSLA) olarak adlandırılmaktadır. Düşük karbon içeriği, farklı sertleştirme mekanizmaları ve termomekanik işlem kolaylığıyla birlikte kaynak edilebilirlik, tokluk, düşük sıcaklıklarda gevrek kırılma emniyeti veya mukavemet özelliklerinin bileşimine sahip bir malzeme grubudur [1-11]. Mikroalaşım elementlerinin ana rolü tane boyutunu küçültmek, yeniden kristalleşmeyi engellemek ve çökelti sertleşmesine katkıda bulunmak şeklinde sıralanabilir. Mikroalaşım elementlerinin tane sınırı hareketine ve yeniden kristalleşmeye etkisi karbür, nitrür ve karbonitrür çökeltilerinin bir sonucudur [10-17].

Mikroalaşım çeliklerinin tarihsel gelişimi incelenecek olursa, 1900'lü yıllarda alaşımlamayla birlikte mikroalaşım çeliklerin gelişimi başlamıştır. 1930 ve 1940'lı yıllarda yüksek dayanımlı yapı çeliklerinin geliştirilmesi sonrası ferrit tane boyutunun küçültülmesiyle 1950'lerde ince taneli çelikler üretilmiş ve normalleştirilmenin yerine kontrollü haddelemenin uygulanmasıyla da Avrupa'da yüksek dayanımlı düşük alaşım çelikler üretilmiştir. Bu süreçte; 20. yüzyılın başlarında Ford Model T'nin üretiminde vanadyum çeliklerinin kullanımı, 1921'de Almanya'da az miktarda titanyum ilavesiyle çeliğin dayanımının iyileştirilmesi, 1950 sonrasında Çin'de mikrotitanyum ve mikrovanadyum kullanımı, 1962'de İngiliz BS 968 mikroalaşım ilaveli ulusal çelik standardının meydana getirilmesi sonrasında devrim niteliğinde sayılan Amerikan Great Lakes Steel şirketince 1988'de Niyobyumlu (Nb) C-Mn çeliği üretimiyle bu alanda önemli gelişme sağlanmıştır. Mikroalaşımlama 1960'lı yıllarda çelik ürünlerinde yaygınlaşmıştır. Yapı çeliklerinde kaynak kullanılmadığı 1940'lı yıllarda yüksek karbon ve mangan içeriği problem oluşturmasa da Melbourne King Street köprüsü yapılırken kaynaklamada yaşanan problem köprü yapımında başarısızlığa yol açmıştır. Bu sorun çeliğe mikroalaşım ilavesiyle çözülmüştür. Günümüzde çelik üretiminin %10-15'lik bölümünü mikroalaşım çelik üretiminin oluşturduğu düşünülmektedir. Normal karbon çeliklerine göre ağırlık olarak yaklaşık % 34 hafif olmasına rağmen dayanımı iki kat fazladır. Bu açıdan bakıldığında mikroalaşım çelik üretimi ve kullanımı satış fiyatı / maliyet oranı normal karbon çeliğinden yüksek olduğundan üretici açısından ağırlık / dayanım oranı ise karbon çeliğinden yüksek olduğundan kullanıcı açısından daha avantajlıdır. Çeliklere Niyobyum (Nb) ve Vanadyum (V) eklenmesi ilk kez 2. Dünya Savaşı yıllarında ABD'de yapılmakla birlikte yüksek dayanımlı düşük alaşım çeliklerinin gelişimi 1960'lı yıllarda başladı. Nb ve V elementlerinin (<%0.10) oranında katımlarıyla C-Mn çeliklerinin dayanımının arttığı bulundu [17-21].

Devam eden araştırmalarla, içyapıları ferritli + çok az perlitli olan çelikler geliştirildi. Bunlar içinde sadece Nb, sadece V, sadece Ti içerikli olanlar gibi V+Nb, V+Ti, Nb+Ti, Nb+Mo ve V+N içerikli olanların yanında üçlü ve dördü alaşımlılar da katılmıştır [21]. Mikroalaşımlama elementlerinin eklenmesi ve termomekanik haddeleme pratiklerinin uygulanmasıyla geliştirilen YDDA çeliklerde istenen özellikler elde edilmiş ve çeşitli ihtiyaçları karşılayabilecek, kullanım alanı geniş bir ürün elde edilmiştir [22].

Toz metalürjisi ise imalatı zor olan küçük parçaların minimum malzeme kaybı ile son şekle yakın, lambalarda kullanılan tugsten filament ve kesici takımların imalatında kullanılan karbür uçlar gibi diğer üretim yöntemleri ile üretilemeyen parçaları seri olarak üretilebilen döküm, talaşlı imalat gibi müstakil imalat yöntemlerinden biridir. Son yıllarda özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılan parçaların bir bölümünün üretim tekniği tamamen toz metalürjisine dayanmaktadır. Kalite dağılımının homojen olması, içeriğinin kontrol edilebilir olması ve birim maliyetin düşük kalması gibi faktörler nedeniyle toz metalürjisi üretim yöntemi imalat sektöründe müstakil üretim seçeneği olarak kullanılmaktadır [23-26].

Mekanik alaşımlama, toz partiküllerinin tekrar tekrar soğuk kaynak, kırma ve yeniden işleme tabi tutulduğu yüksek enerjili bir öğütme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Mekanik enerjinin toz

parçacıklarına aktarılmasıyla partikül ve tane büyüklüklerinde incelleme meydana gelir, difüzyon mesafeleri azalır, öğütme sırasında sıcaklığın da hafif artışıyla harmanlanmış tozların alaşımlanmasına yol açar [27-29].

Bu çalışmada Nb-V mikroalaşım çeliği değişik kompozisyonlarda üretilmiştir. Üretilen bu parçalara farklı sürelerde mekanik alaşımlandırma işlemi uygulanmıştır. Üretilen parçalara çekme deneyi uygulanarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Mekanik özellikleri belirlenen numunelerin mikroyapı incelemeleri (Optik mikroskop, SEM mikroyapı, SEM kırık yüzey ve EDS) yapılarak mikroyapı mekanik özellikleri ilişkilendirilerek toz metalurjisi ile üretilen Nb-V mikroalaşım çelikleri için ideal mekanik alaşımlandırma işlemi süresi tayin edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Yapılan çalışma tozların temin edilmesi ile başlayarak, toz karışım oranlarının hesabı ve karıştırılması, farklı sürelerde mekanik alaşımlama işleminin uygulanması, preslenmesi, sinterlenmesi daha sonra ise mekanik testlerin yapılması ve mikroyapı incelemelerinin gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Tablo 1’de deneysel çalışmada kullanılan tozlar ve saflık değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Tozlar ve Özellikleri (Powder and Properties)

	Elementel Tozlar	Toz Boyutu (μm)	% Saflık Değeri
1	Demir	<150	99.9
2	Karbon	10-20	96.5
3	Niyobyum	<45	99.8
4	Vanadyum	44	99.5

RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazi ile 0.0001 hassasiyetinde tartılan toz metaller Tablo 2’de kimyasal kompozisyonu verilen oranlarda bir araya getirilip karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tartım ve bir araya getirilme işlemi yapılan tozlar Turbula marka üç eksenli karıştırıcı ile 1 saat süreyle bilyesiz olarak karıştırılmıştır.

Tablo 2. Mikroalaşımlı TM çeliklerin kimyasal kompozisyonları (Chemical composition of microalloyed powder metal steels)

Bileşen	Grafite (%Ağ.)	Niyobyum (%Ağ.)	Vanadyum (%Ağ.)	Demir (%Ağ.)
Alaşım 1	0.25	-	-	Geri Kalanı
Alaşım 2	0.25	0.050	0.050	Geri Kalanı
Alaşım 3	0.25	0.100	0.100	Geri Kalanı

Üç eksenli karıştırma sonrası hazırlanan toz metal karışımlarına 1/10 toz/bilye oranında 5 mm çapındaki çelik bilyeler kullanılarak mekanik alaşımlandırma gerçekleştirilmiştir. Değirmen hızı 300 dev/dk olarak belirlenmiştir. Mekanik alaşımlandırma işlemi gerçekleştirilirken mekanik alaşımlandırma süresi 15 dk, 30 dk ve 60 dk olarak uygulanmıştır. Mekanik alaşımlama gerçekleştirilmemiş ve gerçekleştirilen tozlarının preslenmesi 100 Ton basma kapasiteli Hidroliksan marka preste 700 MPa presleme basıncında çekme numunesi şeklinde ve tek yönlü olarak yapılmıştır. Çekme deneyi için hazırlanan numune boyutları ASTM (E8M) toz metal malzeme standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır.

Üretilen numuneler argon gazı atmosferinde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi Protherm PTF 16/75/610 marka atmosfer kontrollü boru fırında yapılmıştır. Çizelge 2’de belirtilen bileşimdeki numuneler 1350 °C’de sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi numunelerin sinterleme sıcaklığına 5 °C/dk hızla ısıtılması ile başlanmıştır. Sıcaklık sinterleme sıcaklığına ulaştıktan sonra numuneler bu sıcaklıkta 2 saat bekletilip ardından oda sıcaklığına yine 5 °C/dk hızla soğutulmuştur. Sinterlenen çekme numuneleri çekme deneyi uygulanarak 1 mm/dk çekme hızında kopana kadar deneye tabi tutulmuştur. Her deney sonrasında gerilme-%gerinim diyagramları elde edilmiştir. Bu diyagramlardan numunelerin akma dayanımı (%0.2) çekme dayanımı ve % uzama değerleri hesaplanarak alaşım miktarındaki değişimden dolayı mekanik özelliklerdeki farklılık tespit edilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, Nikon marka (X50-X2000 büyütme kapasiteli) optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Her numunenin birbirinden farklı bölgelerinden farklı oranlardaki büyütme ile görüntüler alınarak bu görüntülerin bütün mikroyapının temsili nitelikte olmasına dikkat edilmiştir. SEM incelemeleri ise Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Metalografik incelemelerin yapılması için, parlatılan ve dağlamaya hazır hale getirilen numunelere uygulamak üzere %2 nital çözeltisi ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi numunelere uygulandıktan sonra dağlanan yüzeyler alkol ile temizlenerek kurutulduktan sonra optik mikroskopta incelemeye hazır hale getirilmiştir. Numunelerin yoğunluk ölçümleri, RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazide RADWAG AS yoğunluk ölçüm kiti ile Archimets prensibine göre yapılmıştır.

3. DENEY VE SONUÇLAR (EXPERIMENT AND RESULTS)

3.1. Mikroyapı Sonuçları (Microstructure Results)

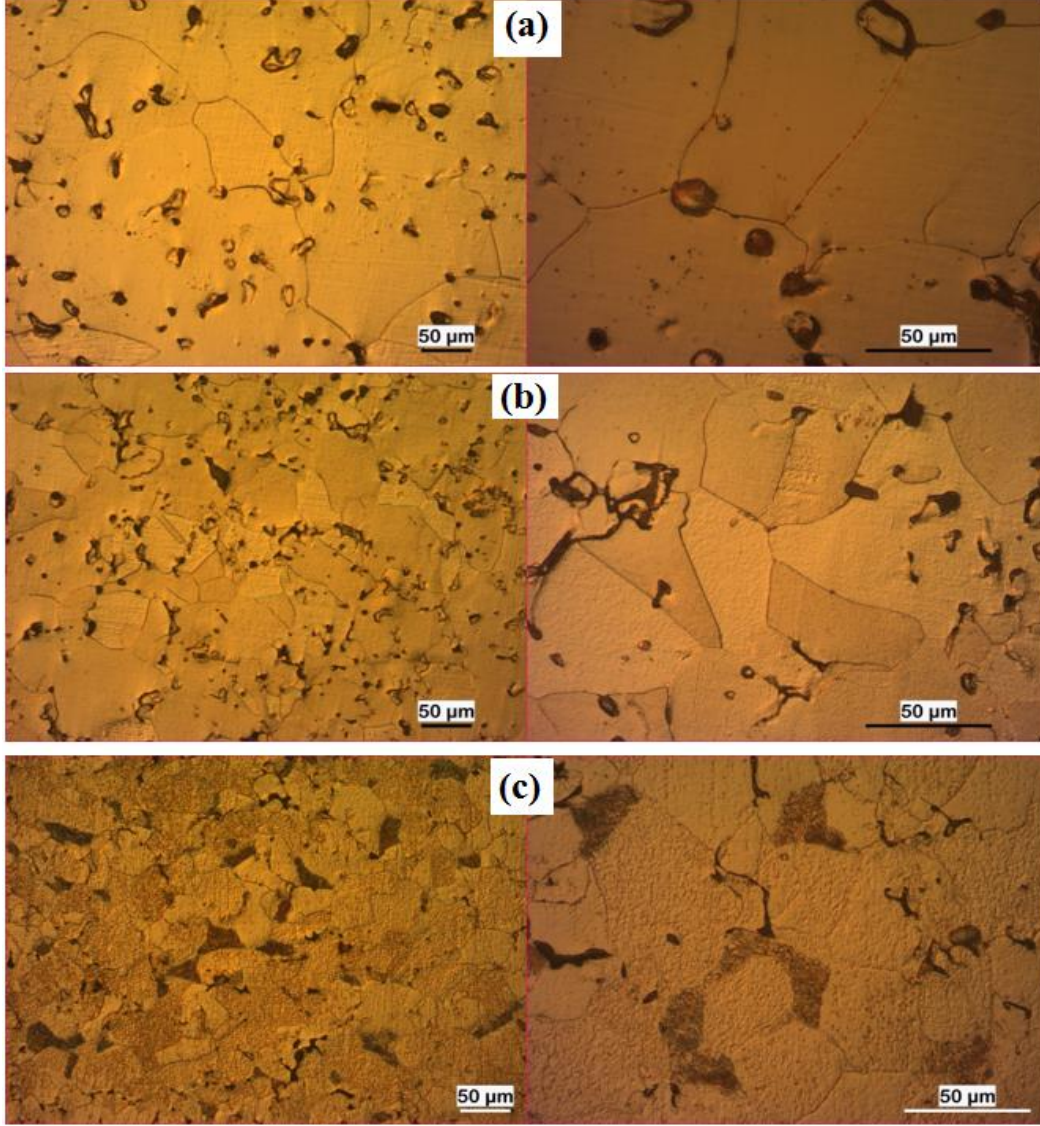
Bu çalışma kapsamında çeşitli karışım oranları ve mekanik alaşımlama sürelerinde üretilen toz metal (TM) çelik numunelerin yoğunluk, gözeneklilik ve tane boyutu değerleri Tablo 3’te verilmiştir. Farklı sürelerde (0, 15, 30 ve 60 dakika) mekanik alaşımlama yapılan numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 1-2-3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir.

Tablo 3. TM çelik numunelerin % yoğunluk, % gözeneklilik, ortalama tane boyutu değerleri (Relative density, Porosity and mean linear intercept grain sizes in PM specimens)

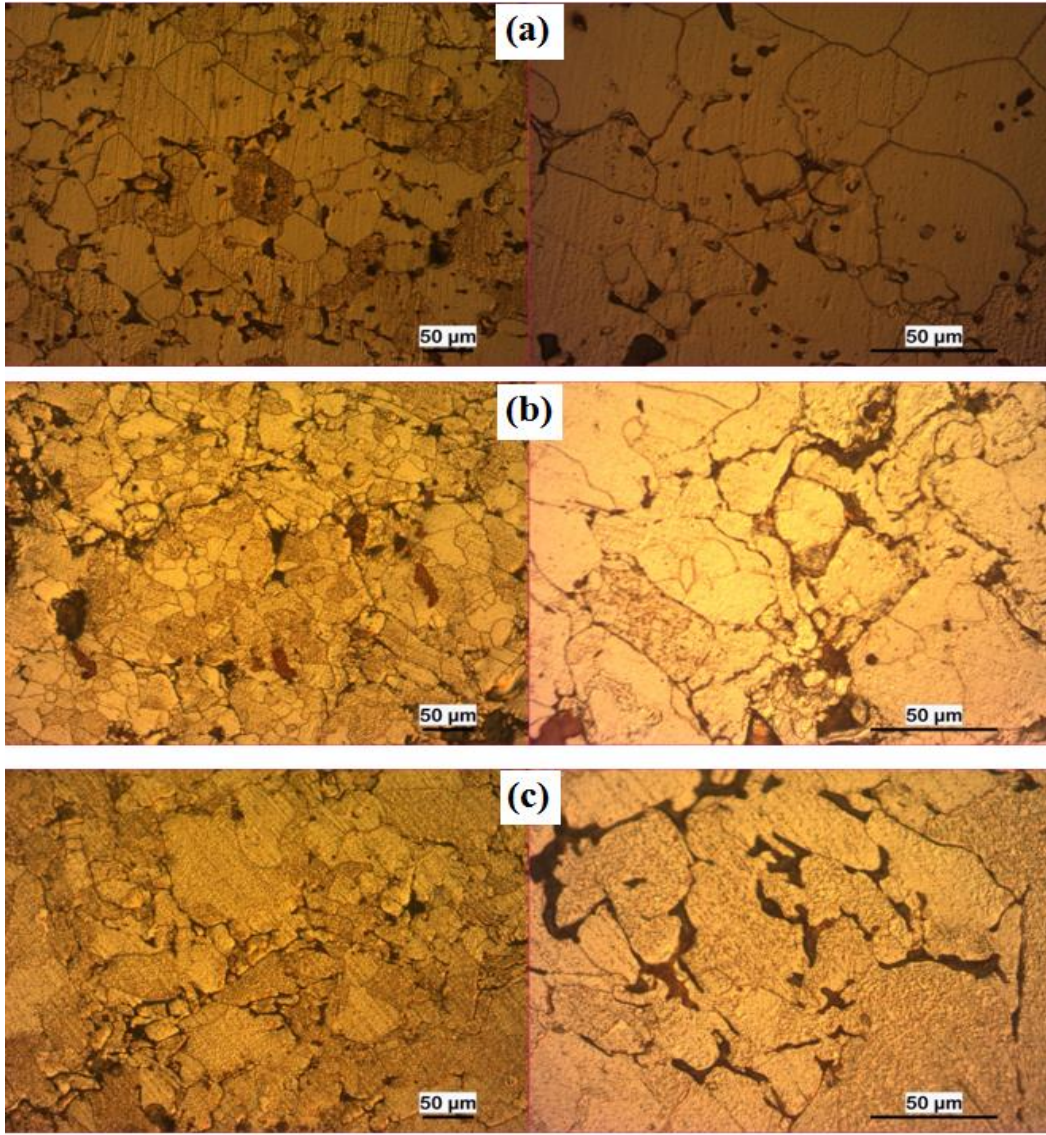
Bileşen	Yoğunluk (Gr/cm ³)	Gözeneklilik (%)	Tane Boyutu (µm)
0.25C+Fe	7.5021	6.09	36.68
0.25C+0.05NbV+Fe	7.4002	5.68	26.33
0.25C+0.1NbV+Fe	7.3673	4.38	24.45
0.25C+Fe 15 dk MA	7.9022	0.71	25.63
0.25C+0.05NbV+Fe 15 dk MA	7.3574	6.22	18.96
0.25C+0.1NbV+Fe 15 dk MA	7.3030	6.91	16.56
0.25C+Fe 30 dk MA	7.3575	6.23	38.66
0.25C+0.05NbV+Fe 30 dk MA	7.2624	7.43	28.53
0.25C+0.1NbV+Fe 30 dk MA	7.3627	6.15	19.75
0.25C+Fe 60 dk MA	7.3189	6.72	38.96
0.25C+0.05NbV+Fe 60 dk MA	7.3946	5.74	30.11
0.25C+0.1NbV+Fe 60 dk MA	7.3851	5.86	21.31

Mikroyapı resimlerinden alaşımsız TM çeliğinin Nb ve V ile alaşımlandırılan TM çeliğine göre daha büyük taneli olduğu gözlenmiştir. Örneğin; Nb ve V ile alaşımlandırılan TM çeliğinin ortalama tane boyutu 24.45 µm iken alaşımsız TM çeliğinin ortalama tane boyutu 26.33 µm çıkmıştır. Alaşım elementi ilavesi ile çökeltilerin tane boyutu büyümesini engelleyerek küçük taneli yapı elde edilmiştir. 15-30 ve 60 dakika mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulan TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 2, 3 ve 4’te verilmiştir. Mikroyapı resimlerinden mekanik alaşımlama yapılan alaşımsız TM çeliğinin daha büyük taneli olduğu ve mekanik alaşımlama yapılmış

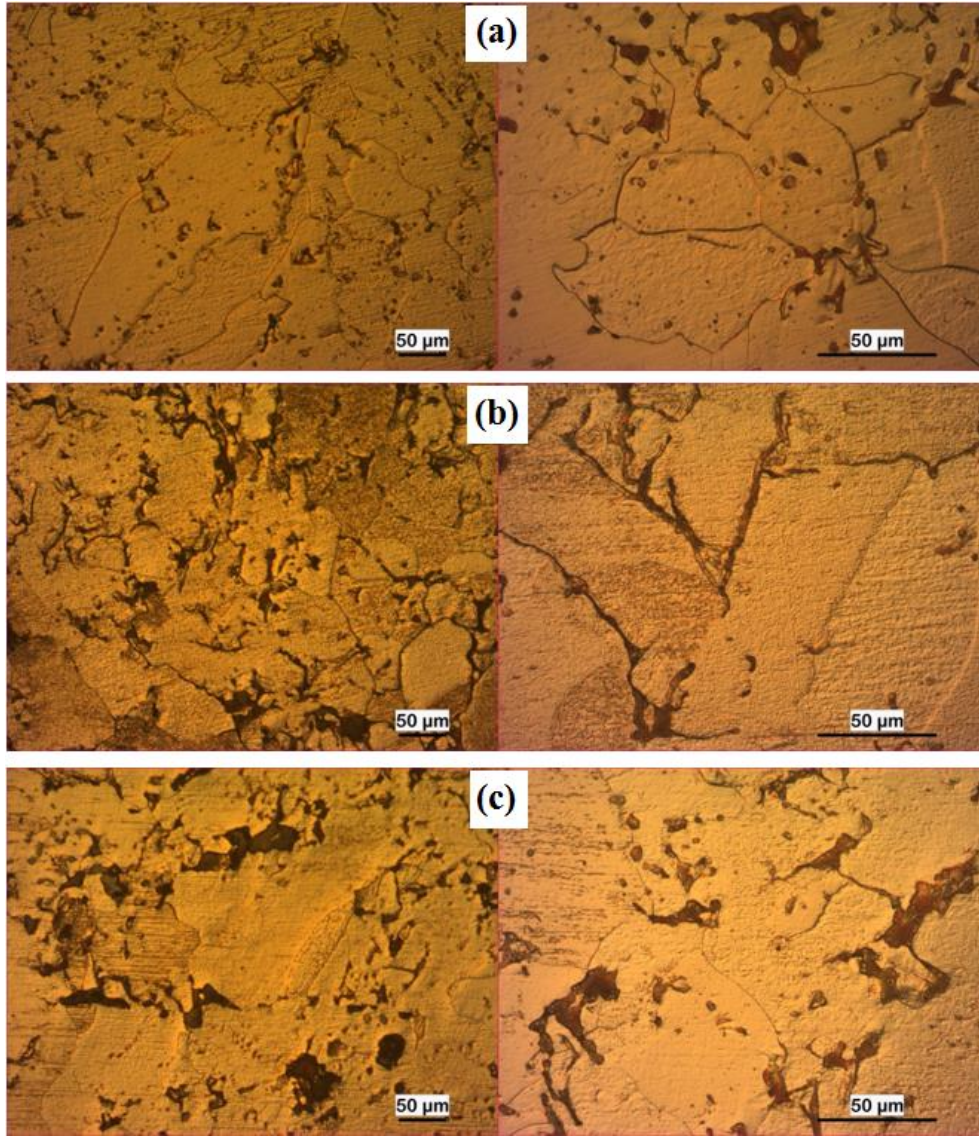
mikroalaşımli TM çeliklerde tane boyutunun giderek küçüldüğü anlaşılmaktadır. Buna nazaran yapıdaki perlit fazlarının birleşerek belli bir oranda büyüdüğü görülmektedir. Ayrıca mikroyapı resimlerinden anlaşılacağı üzere 15 dakika mekanik alaşımli TM çeliklerdeki tane yapılarının, mekanik alaşımlama süresi 30 dakikaya çıkması ile tane boyutunun büyüdüğü görülmektedir. Bunu yanı sıra mekanik alaşımlama süresinin 60 dakikaya çıkması ile yapılardaki tane boyutunun iyice büyüdüğü görülmektedir.



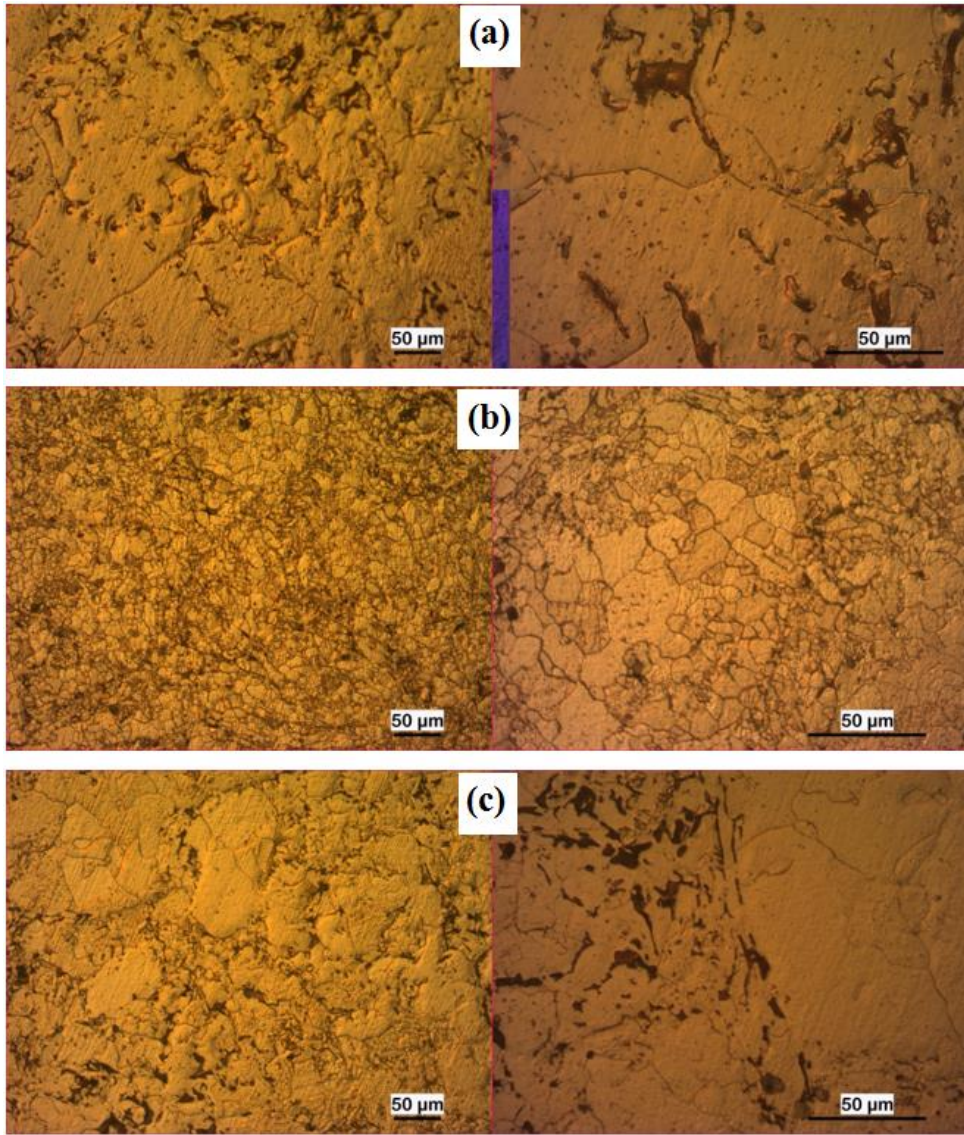
Şekil 1. Mekanik alaşımlama uygulanmamış alaşımsız ve Nb-V TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri (200 x-500 x) (a-Alaşım 1, b-Alaşım 2 ve c-Alaşım 3). (Microstructure drawings of non-mechanical alloying unalloyed and Nb-V TM steel samples (200 x-500 x) (a-Alloy 1, b-Alloy 2 and c-Alloy 3))



Şekil 2. 15 dk mekanik alaşımlama uygulanmış alaşımsız ve Nb-V TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri (200 x-500 x) (a-Alaşım 1, b-Alaşım 2 ve c-Alaşım 3). (Microstructure drawings of 15 min applied mechanical alloying unalloyed and Nb-V TM steel samples (200 x-500 x) (a-Alloy 1, b-Alloy 2 and c-Alloy 3))



Şekil 3. 0 dk. mekanik alaşımlama uygulanmış alaşımsız ve Nb-V TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri (200 x-500 x) (a-Alaşım 1, b-Alaşım 2 ve c-Alaşım 3). (Microstructure drawings of 30 min applied mechanical alloying unalloyed and Nb-V TM steel samples (200 x-500 x) (a-Alloy 1, b-Alloy 2 and c-Alloy 3))

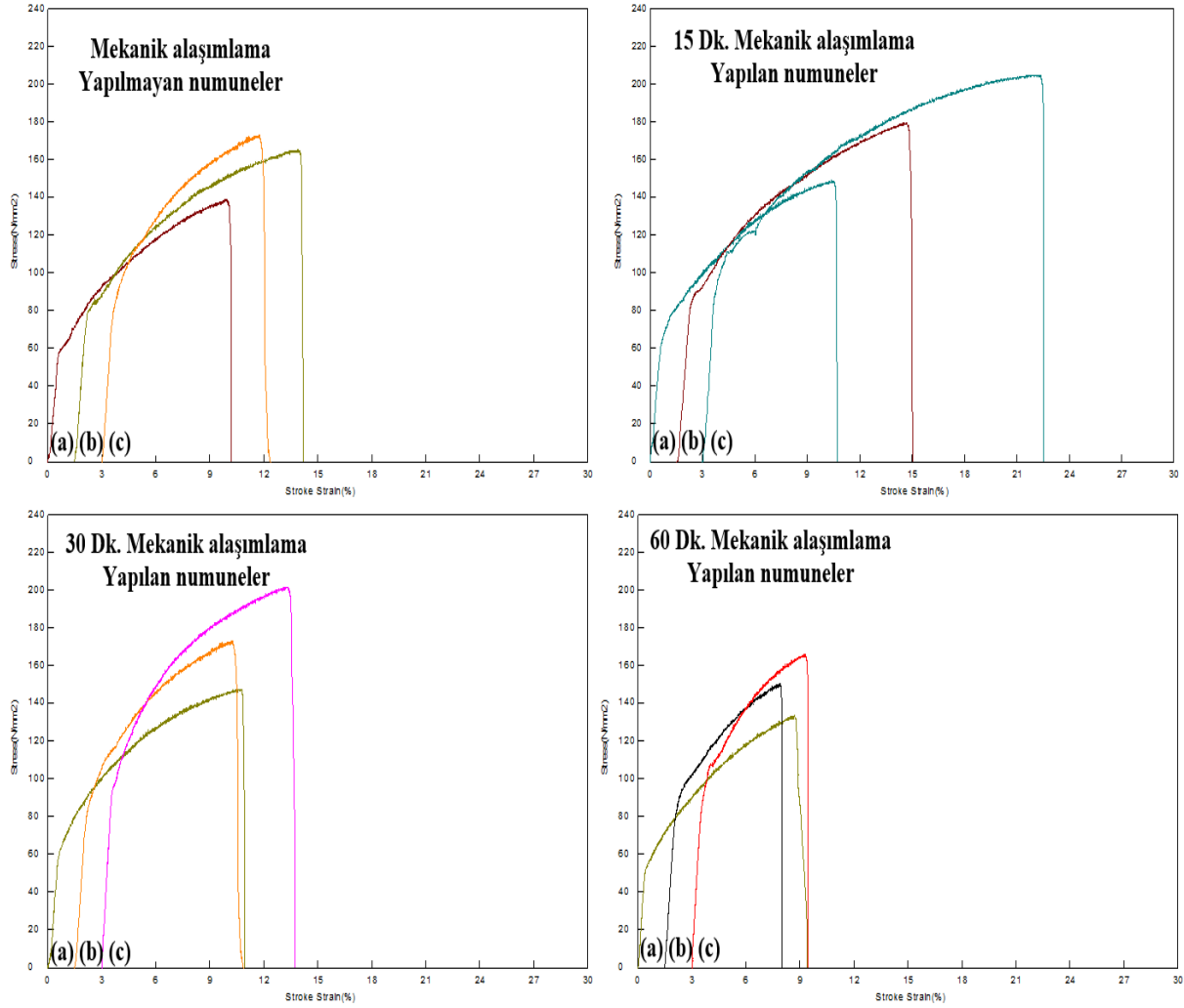


Şekil 4. 60 dk mekanik alaşımlama uygulanmış alaşımsız ve Nb-V TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri (200 x-500 x) (a-Alaşım 1, b-Alaşım 2 ve c-Alaşım 3). (Microstructure drawings of 60 min applied mechanical alloying unalloyed and Nb-V TM steel samples (200 x-500 x) (a-Alloy 1, b-Alloy 2 and c-Alloy 3)

3.2. Mekanik Test Sonuçları (Mechanical Test Results)

TM ile üretilen alaşımsız ve Nb-V mikroalaşım çelik numunelerin çekme deneyi sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Tablo 2'de belirtildiği gibi karbon miktarları aynı olmasına rağmen içerisine Nb ve V eklemesi yapılan TM mikroalaşım çeliklerinin akma ve çekme dayanımının artışı net bir şekilde görülmektedir. TM metallerinin akma ve çekme dayanımlarının maksimum olduğu mekanik alaşımlama süresinin 15 dakika olduğu saptanmıştır. Mekanik alaşımlama süresinin 30 dakika ve üzeri sürelerle çıkması ile akma ve çekme dayanımlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Mekanik alaşımlama işleminin 30 dakika ve üzeri sürelerle çıkması mikroalaşım elementlerinin tane sınırlarına yayılması, tane büyümesini engelleyememesi mekanik özelliklerin düşmesinin başlıca sebeplerindendir. Yapılan çalışmalarda [11] birkaç mikroalaşım elementinin alaşımın içerisinde bulunması farklı bileşimlerde karbür ve nitrürlerin oluşmasına neden olduğu gösterilmektedir. Oluşan bu çökeltiler dayanımı artırma adına çok daha etkin rol üstlenmektedir. Çökeltilerin oluşması ile katı ergiyik içerisinde serbest halde bulunan karbon ve azot miktarı azaldığı için dayanım artışına katı ergiyik sertleşmesinin etkisi düşmektedir. Bu nedenle (Nb-V) mikroalaşım TM çeliğinde dayanımın artmasının nedeni çelik içerisinde oluşan NbC, VC ve NbVC(N) çökeltilerin olduğu söylenebilir. Şekil 5 ve Tablo 4'den görüldüğü gibi genel olarak (Nb-V) oranı arttıkça akma ve çekme dayanımında bir artış görülmüştür. Dayanım değerlerindeki bu değişme NbC(N) ve VC(N) gibi çökeltilerin

oluşarak farklı boyutlarda matris içerisinde dağılmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [5,10,12].



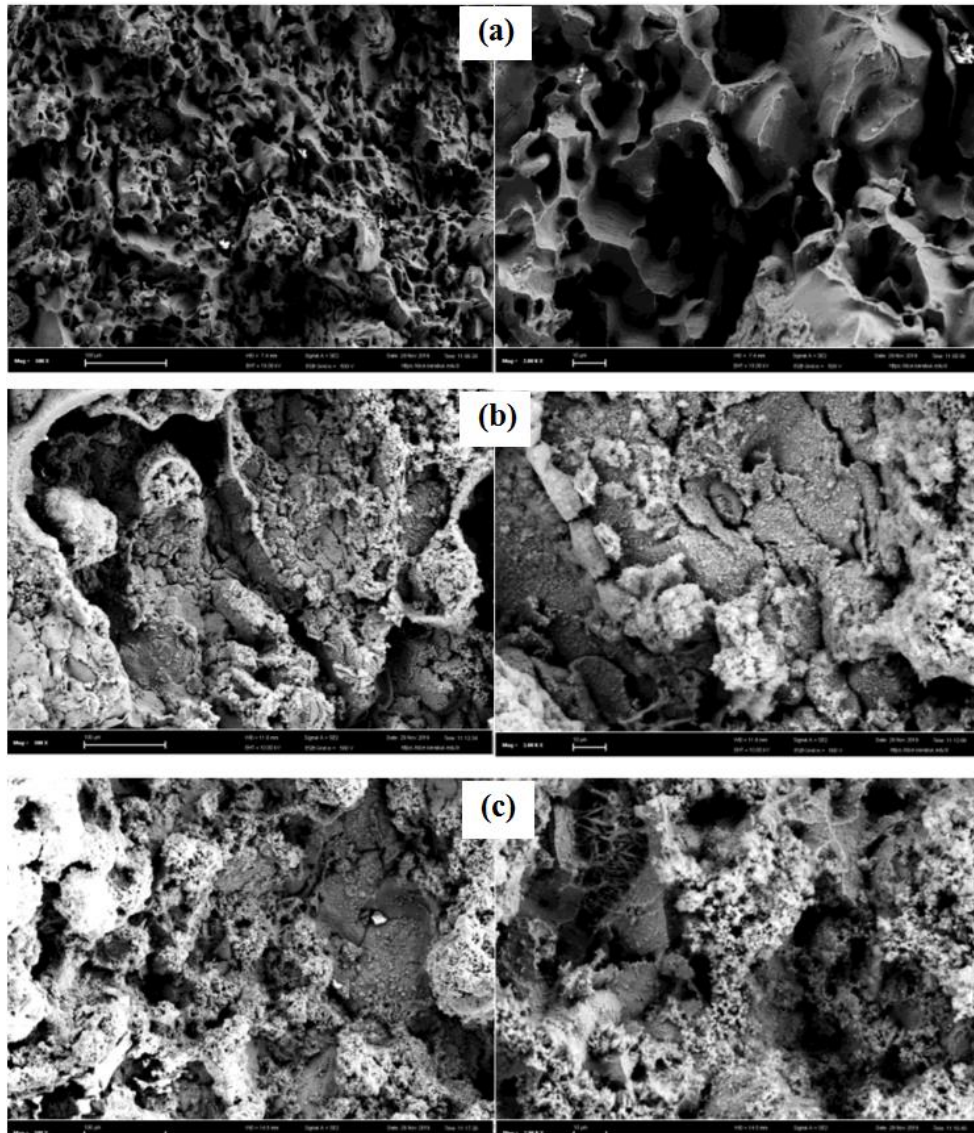
Şekil 5. TM yöntemiyle üretilen numunelerin gerilme-uzama diyagramları, (a-Alaşım 1, b-Alaşım 2 ve c-Alaşım 3) (Stress-elongation diagrams of samples produced by TM method (a-Alloy 1, b-Alloy 2 and c-Alloy 3))

Tablo 4. TM yöntemiyle üretilen çelik numunelerin akma-çekme dayanımları, % uzama değerleri (Yield-tensile strength of steel samples produced by TM method, % elongation values)

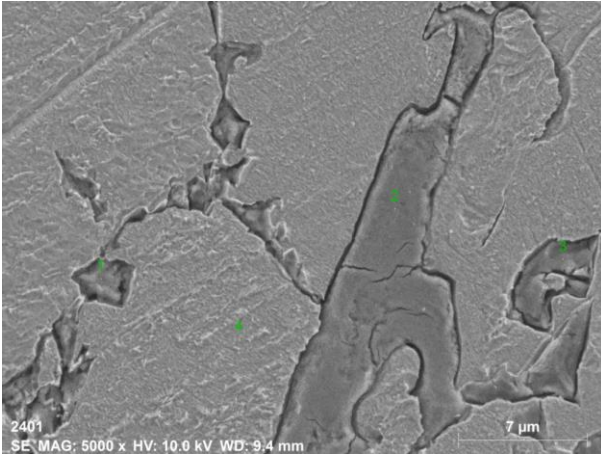
Bileşen	Akme Dayanımı (Mpa)	Mak. Çekme Dayanımı (Mpa)	Uzama (%)
0.25C+Fe	63	140	10
0.25C+0.05NbV+Fe	85	166	12.4
0.25C+0.1NbV+Fe	115	174	10
0.25C+Fe 15 dk. MA	86	150	10
0.25C+0.05NbV+Fe 15 dk. MA	93	180	13
0.25C+0.1NbV+Fe 15 dk. MA	121	205	19
0.25C+Fe 30 dk. MA	66	148	10
0.25C+0.05NbV+Fe 30 dk. MA	88	173	9
0.25C+0.1NbV+Fe 30 dk. MA	100	201	11
0.25C+Fe 60 dk. MA	55	134	9
0.25C+0.05NbV+Fe 60 dk. MA	83	151	7
0.25C+0.1NbV+Fe 60 dk. MA	91	166	6

3.3. SEM ve EDS Analizi Sonuçları (The SEM and EDS Analysis Results)

15 dk mekanik alaşımlama yapılan TM numunelerin çekme deneyi sonrası X500 ve X5000'de kırık yüzey görüntüleri alınmıştır. Alınan kırık yüzey görüntüleri Şekil 6'da gösterilmiştir. TM çeliklerinin kırık yüzeyleri incelendiğinde çukurcukların yani petekli bir yapının olduğu görülmektedir. Mikroboşlukların birleşip büyümesi ile bu çukurcukların oluştuğu düşünülmektedir. Bu nedenle bu TM çeliklerinin sünek bir davranış sergilediği kırık yüzey görüntüsünden anlaşılmaktadır. Ayrıca kırık yüzeylerin kısmen sünek (petekli yapı) ve kısmen gevrek (ayrılma düzlemleri) davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Yapılan SEM kırık yüzey analizlerinde gözeneklerin olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir. Kırılmanın, bu gözeneklerin birleşip ilerlemesiyle gerçekleştiği saptanmıştır. Gevrek kırılmanın ağırlıklı olarak %1 Nb-V içeren mikroalaşımli çelik numunelerde olduğu görülmektedir. Literatürde bu sonucu destekleyen çalışmalar mevcuttur. Alaşım miktarının artması ile gevrek kırılmanın gösteren ayrılma düzlemlerinin arttığı gözlenmiştir. Nitekim Erden, vd. [16] ve Gündüz vd. [24] yaptıkları çalışmalarda bu durumu tespit etmişlerdir [11-15, 23-29]. Ayrıca kırık yüzey resimlerinde görünen büyük boşlukların çekme testi sırasında kopma sırasında karbür ve nitrür çökeltilerin parçadan ayrılması sırasında oluşturduğu düşünülmektedir [15, 30].



Şekil 6. 15 dk mekanik alaşımsız ve Nb-V TM çelik numunelerin SEM kırık yüzey resimleri (500 x-5000 x) (a-Alaşım 1, b-Alaşım 2 ve c-Alaşım 3) (Fracture surfaces of nonalloyed and Nb-V microalloyed PM steels applied 15 min mechanical alloying (a-Alloy 1, b-Alloy 2 and c-Alloy 3))



Mass percent (%)

Spectrum	C	V	Fe	Nb
1	6.11	0.93	92.97	0.00
2	8.07	0.00	91.48	0.45
3	12.35	0.99	86.04	0.62
4	3.02	0.00	96.60	0.37
Mean value:	7.39	0.48	91.77	0.36
Sigma:	3.91	0.55	4.39	0.26
Sigma mean:	1.95	0.28	2.19	0.13

Şekil 7. 15 dk mekanik alaşımlama yapılan Alaşım 3 numunesinin X5000 büyütmelerdeki SEM mikroyapı resimleri ve EDS sonuçları (SEM microstructures and EDS results of X5000 magnifications of Alloy 3 sample, which was mechanically alloyed for 15 min)

Şekil 7’de gösterilen nokta EDS sonuçları incelendiğinde Nb-V mikroalaşımli çelikler incelendiğinde demir ve karbon içermesinden dolayı Fe_3C çökeltilerinin, niyobyumun ve vanadyumun çelik içerisinde bulunması ile NbC(N) ve VC(N) çökeltilerinin oluştuğu yine SEM ve EDS incelemeleri ile tespit edilmiştir. Oluşan bu çökeltilerin çökelti serleşmesi ve tane boyutu küçültme gibi mukavemet artırıcı mekanizmalar ile malzemenin dayanımını artırdığı belirtilmiştir [11-15, 23-29].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Alaşımless çelik ve iki farklı hacim oranına sahip (%0.05 ve %0.1 Nb-V) olan mikroalaşımli TM çelik numuneler, farklı mekanik alaşımlama süreleri uygulanarak elde edilen tozların soğuk presleme ve ardından 1350 °C’de argon atmosferinde sinterleme işlemi uygulanarak üretilmiştir. Aşağıda sıralanan sonuçlar bu çalışmadan elde edilmiştir.

1. Nb-V mikroalaşımli çelikler, alaşımless çeliklere göre bütün alaşım oranlarında daha küçük taneli yapı sergilemişlerdir. Bu durum alaşım elementlerinin oluşturmuş olduğu karbür ve nitürlerin tane büyümesini engellemesinden kaynaklanmaktadır.
2. Alaşımless ve Nb-V mikroalaşımli TM çeliklerinin sinterleme sonrası yoğunluklarının genel olarak %88 civarında olduğu görülmektedir.
3. Maksimum akma ve çekme dayanımı 15 dakika yapılan mekanik alaşımlama ile sağlanmıştır. 30 dakika ve 60 dakika yapılan mekanik alaşımlamalarda ise dayanımlarda düşüş görülmüştür.
4. Nb-V mikroalaşım çelikleri toz metalürjisi yöntemiyle üretilebilmektedir. Sinterleme sırasında veya sinterleme sonrası soğutma sırasında oluşan katı ergiyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi çeliğin mukavemetini arttırmaktadır.
5. Nb-V ile mikroalaşımlandırılmış TM çeliklerinin EDS analizleri V, Nb C ve N elementlerini ve bu elementlerin oluşturmuş olduğu VC(N) ve NbC(N) gibi çökeltilerin demir matris içinde bulunduğunu ortaya çıkarmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Z. Çolak, Y. Ayan, N. Kahraman, Gerçek deniz ortamında su altı kaynağı ile birleştirilen Grade AH36 gemi sacının kaynak bölgesinin karakterizasyonu, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(2): 786-775, 2019.
2. M. Günay, İ. Korkut, E. Aslan, U. Şeker, Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force, Journal of Materials Processing Technology, 166(1): 44-49, 2005.
3. M. A. Erden, S. Gündüz, U. Çalığıülü, M. Boz, Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen alaşımless ve hardoks çeliklerin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(1): 221-226, 2018.

4. B. Özlü, M. Akgün, H. Demir, AA 6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(2): 151-158, 2019.
5. T. Topateş, Mikroalaşımli çeliklerin termomekanik işlemi sırasında değişen proses parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 1995.
6. M. Türkmen, N. Katı, H. Kejanlı, and U. Çalığülü (2020). Properties of P460-S355 submerged arc welds. Materials Testing: Vol. 62(1): 104-108, 2020.
7. H. Demir, S. Gündüz, M. A. Erden, Influence of the heat treatment on the microstructure and machinability of AISI H13 hot work tool steel, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 95 (5-8) : 2951-2958, 2018.
8. Y. Kaya, S235JR ile S355JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla mag kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması, Politeknik Dergisi, 21(3): 602-597,2018.
9. A. Alzahougi M. Elitaş B. DEMİR, RSW junctions of advanced automotive sheet steel by using different electrode pressures, Engineering, Engineering, Technology & Applied Science Research, 8 (5): 3492-3495, 2018.
- 10.İ. Tekait, Plazma arkı ile kesim işlemlerinde kesme parametrelerinin malzemenin kesim yüzeyi kalitesine ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) genişliğine etkisinin deneysel olarak araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(3): 1518-1509, 2020.
- 11.S. Gündüz, M. A. Erden, H. Karabulut, M. Türkmen, The effect of vanadium and titanium on mechanical properties of microalloyed PM steel, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 55 (5-6): 277-287, 2016.
- 12.M.A. Erden, M. T. Taşçı, Toz metalürjisi ile üretilen Nb-V mikroalaşım çeliğine Ni ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi, Politeknik Dergisi, 19(4): 611-616, 2016.
- 13.M. Türkmen, M.A. Erden, H. Karabulut, S. Gündüz, Effect of TiN addition on the microstructure and mechanical properties of PM steels, Technological Applied Sciences, 12(4): 178-184, 2017.
- 14.M.A. Erden, Effect of C content on microstructure and mechanical properties of Nb-V added microalloyed steel produced by powder metallurgy method, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(9): 44-47, 2016.
- 15.D. Özdemirler, S. Gündüz, M. A. Erden, Influence of NbC addition on the sintering behaviour of medium carbon PM steels, Metals, 7 (4):121-132, 2017.
- 16.M.A. Erden, The effect of the sintering temperature and addition of niobium and vanadium on the microstructure and mechanical properties of microalloyed PM steels, Metals, 7: 329-345, 2017.
- 17.H. Karabulut, M. Türkmen, M.A. Erden, S. Gündüz, Effect of different current values on microstructure and mechanical properties of microalloyed steels joined by the submerged arc welding method. Metals, 6: 281-288, 2016.
- 18.Morrison, W.B., Overview of Microalloying in Steel. The Proceedings of the Vanitec Symposium, 25-35, Nov. 2000, Guilin.
19. M.A. Erden, Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen mikroalaşım çeliklerinin mikroyapı mekanik özellik ilişkisinin araştırılması, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye, 2015.
20. S. Gündüz, H. Karabulut, M.A. Erden, M. Türkmen, Microstructural effects on fatigue behaviour of a forged medium carbon microalloyed steel, Materials Testing, 55(11-12): 865-870,2013.
21. E. Tekin, API standardı petrol ve doğalgaz boruları çeliklerine genel bir bakış, Metalurji Dergisi, 162: 23-41, 2012.
22. M.Z. Mahmutoğlu, Niyobyum ve vanadyumlu bir boru hattı çeliğinde mikroyapı-mekanik özellik karakterizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2003.
23. M. Türkmen, M.A. Erden, H. Karabulut, S. Gündüz, The effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Nb-V microalloyed powder metallurgy steels, Acta Polonica A, 135(4): 834-836, 2019.
24. S. Gündüz, H. Karabulut, M. Türkmen, Effect of the addition niobium and aluminium on the microstructure and mechanical properties of the micro-alloyed PM steels, Materials and Technology, 50(5): 641-648, 2016.
25. S., Barlak, B. Adalı, Ö. Çelikkıran, Toz metalurjisi ile üretilen Nb-V mikroalaşım çeliğine vanadyum ilavesinin mikroyapı mekanik özellikleri üzerine etkisi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(3): 636-629, 2018.

26. M.A. Erden, Toz metalürjisi ile üretilen çeliklerde nikel ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4(4): 245-241, 2016.
27. S. Erman, Toz metal çeliklerde mekanik alaşımlamanın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye, 2019.
28. F. Demir, Mekanik alaşımlama yöntemi ile FeCrC takviyeli ni esaslı kompozit üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, Türkiye, 2014.
- 29.C. Suryanarayana, E. Ivanov, V.V. Boldyrev, The science and thecnology of mechanical alloying, *Mater. Sci. Eng., A*, 304-306:151-158, 2001.
- 30.D. Shanmugasundaram, R. Chandramouli, Tensile and impact behaviour of sinter-forged Cr, Ni and Mo alloyed PM steels, *Mater. Des.*, 30: 3444–3449, 2009.