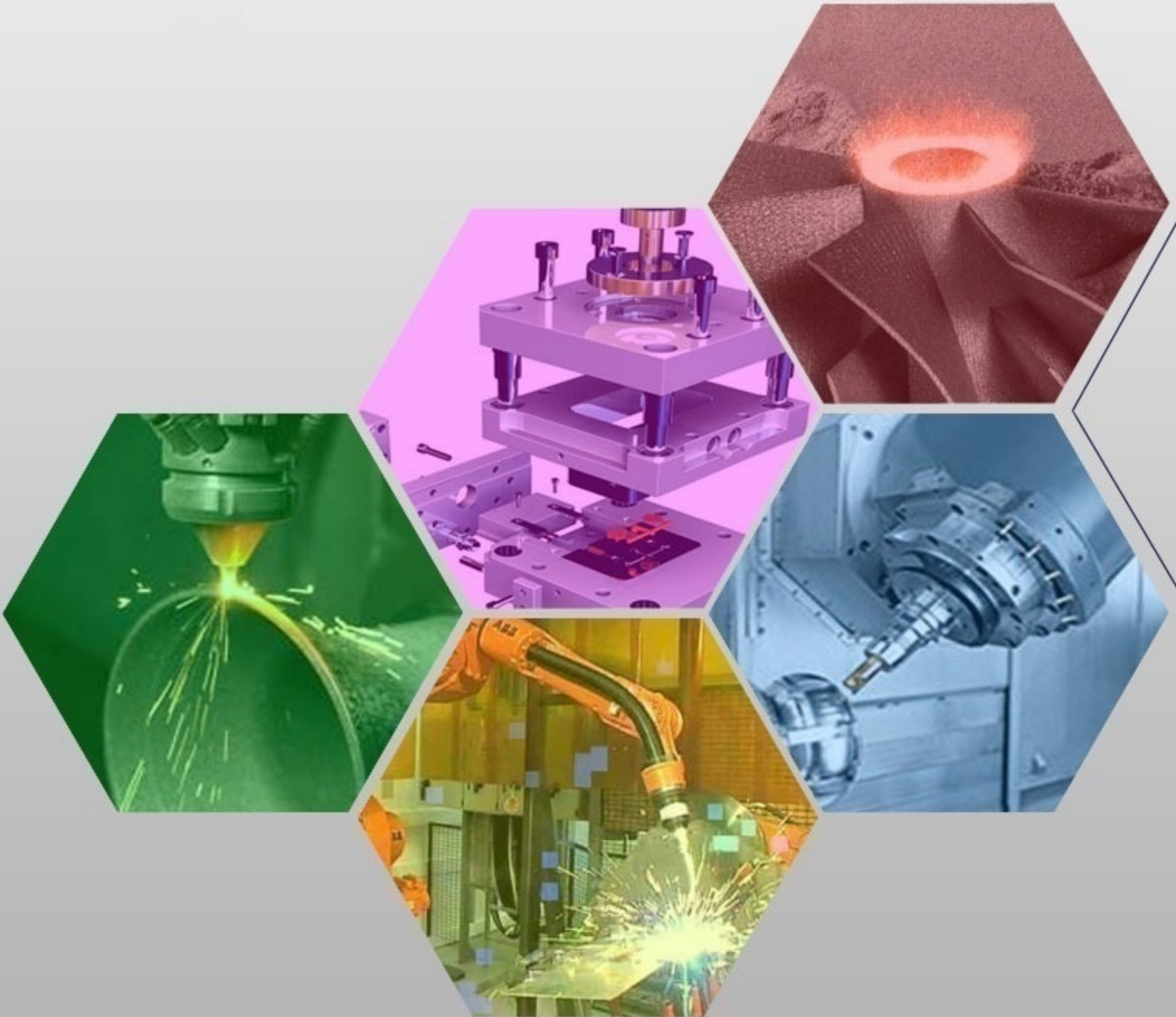




İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:3 SAYI:2 YIL: 2022

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:3 ISSUE:2 YEAR: 2022



Cilt (Volume) : 3

Sayı (Issue) : 2

Yıl (Year) : 2022

e-ISSN: 2717-7475

İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları Manufacturing Technologies and Applications (MATECA)

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

Honoray Editör (Honorary Editor)

Prof. Dr. Ulvi Şeker, Gazi Üniversitesi

Baş Editor (Editor in Chief)

Prof. Dr. Mustafa Günay, Karabük Üniversitesi

Yardımcı Editör (Associate Editor)

Prof. Dr. Alaattin KAÇAL, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Alan Editörleri (Editors)

Prof. Dr. Turgay Kıvak, Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Yakup Turgut, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Murat Sarıkaya, Sinop Üniversitesi

Dr. Munish Kumar Gupta, Opole University of Technology

Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY, Düzce Üniversitesi

Dil Editörü (Language Editor)

Doç. Dr. Mehmet Erdi Korkmaz, Karabük Üniversitesi

Teknik Editörler (Technical Editors)

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Özmen, Karabük Üniversitesi

Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU, Gazi Üniversitesi

Danışma Kurulu (Advisory Board)

Prof. Dr. Can Çoğun, Çankaya Üniversitesi

Prof. Dr. Serdar Salman, Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Grzegorz M. Królczyk, Opole University of Technology

Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır, Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. Teyfik Demir, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. İhsan Korkut, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuzhan Yılmaz, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. İlyas Uygur, Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ramazan Kaçar, Karabük Üniversitesi

Prof. Dr. Ulaş Çaydaş, Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Ayhan Erol, Afyon Kocatepe Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim Çiftçi, Çankırı Üniversitesi

Doç. Dr. Mohd Fathullah Ghazali, University of Malaysia Perlis

Doç. Dr. Gültekin Uzun, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Çağrı Vakkas Yıldırım, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Nafiz Yaşar, Karabük Üniversitesi

Dr. Mozammel Mia, Imperial College London

Dr. Catalin Pruncu, University of Strathclyde

Dr. Ferhat Yıldırım, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Dr. Selçuk Yağmur, Gazi Üniversitesi



Cilt (Volume) : 3
Sayı (Issue) : 2
Yıl (Year) : 2022
e-ISSN: 2717-7475

Yayıncı (Publisher)
Mustafa GÜNAY

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

Yayın Tarihi (Publication Date)
Ağustos 2022 (August 2022)

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)
Mekanik Alaşımlanmış AlCuCrFeNi Yüksek Entropili Alaşımının Fiziksel Buhar Biriktirme Tekniği ile Kaplanabilirliğinin İncelenmesi (<i>Investigation of Coatability of Mechanically Alloyed AlCuCrFeNi High Entropy Alloy by Physical Vapor Deposition Technique</i>) Yunus Emre ŞİMŞEK, Kadir Mert DÖLEKER, Mehmet KURU, Sefa Emre SÜN BÜL, Kürşat İÇİN	1-8
AISI 329 Dupleks Paslanmaz Çeliğin Frezelenmesinde Farklı Sürfaktan Katkılı CuO Nanoakışkanların Performans Değerlendirmesi (<i>Performance Evaluation of CuO Nanofluids with Different Surfactants in the Milling of AISI 329 Duplex Stainless Steel</i>) İbrahim DEMİR, Turgay KIVAK, Şenol ŞİRİN	9-21
AISI 8620 (20NiCrMo2) Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Kriyojenik İşlemin Etkisinin İncelenmesi (<i>Investigation the Effect of Cryogenic Treatment on Mechanical Properties of AISI 8620 (20NiCrMo2) Steel</i>) Furkan GÜNEY, Menderes KAM	22-31
Rene 41 Süper Alaşımının Tornalama Yöntemiyle İşlenebilirliğinin Araştırılması (<i>Investigation Machinability of Rene 41 Superalloy in Turning Method</i>) Fatih MEYDANERİ, Gültekin UZUN	32-38

Mekanik Alaşımlanmış AlCuCrFeNi Yüksek Entropili Alaşımının Fiziksel Buhar Biriktirme Tekniği ile Kaplanabilirliğinin İncelenmesi

Yunus Emre ŞİMŞEK^{1*} , Kadir Mert DÖLEKER¹ , Mehmet KURU¹ , Sefa Emre SÜN BÜL^{2,3} , Kürşat İÇİN² 

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Samsun, Türkiye

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Trabzon, Türkiye

³Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gaziantep, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 02.06.2022

Kabul: 11.07.2022

Anahtar Kelimeler:

Yüksek entropili alaşım
Fiziksel buhar biriktirme
Mekanik alaşımlama
AlCuCrFeNi

ÖZET

Yüksek entropili alaşımlar sahip oldukları üstün özellikleri sayesinde süper alaşımlara alternatif olarak önerilmektedir. Yüksek entropili alaşımlar araştırılmaya devam ettikçe ortaya çıkan özgün ve üstün özellikleri sayesinde geniş alanlarda kullanılabilir olmasıyla birlikte önemi gittikçe artmaktadır. Bu çalışmada mekanik alaşımlama tekniği ile AlCuCrFeNi tozları sentezlenmiştir. Sentezlenen tozlarda YMK (Yüzey Merkezli Kübik), HMK (Hacim Merkezli Kübik) ve B2 fazları tespit edilmiştir. Tozlar peletlendikten sonra fiziksel buhar biriktirme (FBB) tekniği ile Monel 400 altlık malzeme üzerine biriktirilmiştir. Üretilen kaplamanın mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Üretim sonrası homojene yakın bir ince film tabakası üretilmiştir.

Investigation of Coatability of Mechanically Alloyed AlCuCrFeNi High Entropy Alloy by Physical Vapor Deposition Technique

ARTICLE INFO

Received: 02.06.2022

Accepted: 11.07.2022

Keywords:

High entropy alloy
Physical vapor deposition
Mechanical alloying
AlCuCrFeNi

ABSTRACT

High entropy alloys have been proposed as an alternative to superalloys due to having unique properties. As high entropy alloys continue to be researched, their importance is increasing with their unique and superior properties that can be used in wide areas. In this study, AlCuCrFeNi powders were synthesized by mechanical alloying technique. FCC (Face Centered Cubic), BCC (Body Centered Cubic) and B2 phases were detected in the synthesized powders. After the powders were pelleted, they were deposited on the Monel 400 substrate by the physical vapor deposition (PVD) technique. In this research, the microstructural properties of the produced coating were investigated. After production, an almost homogeneous thin film layer was produced.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek entropili alaşımlar (YEA) terimi ilk defa 2004 yılında Taylan'lı araştırmacı Yeh ve ekibi tarafından incelenmiş ve ismi konulmuştur. Geleneksel alaşımların aksine YEA'lar oluşturulurken ve üretilirken eş veya birbirine yakın düzeyde kullanılarak oluşturulurlar [1,2]. Yüksek entropili alaşımları önemli kılan ve alaşımlara etki eden 4 ana etken bulunmaktadır. Bunlar; Yüksek Entropi etkisi, Yavaş difüzyon etkisi, Kafes Distorsiyonu ve Kokteyl etkileridir. Kısaca bahsetmek gerekirse yüksek entropi etkisi alaşım içerisindeki katı çözelti fazlarının serbest enerjisini azalttığı ve yüksek sıcaklıklarda bunların oluşumunu kolaylaştırdığı bilinmektedir. Yavaş difüzyon etkisi ise alaşım içerisindeki her kafes bölgesindeki her atomun komşu atomu farklıdır. Bu sebepten her atomun bir

*Sorumlu yazar, e-posta: emresimsek2013@gmail.com

To cite this article: Y.E. Şimşek, K.M. Döleker, M. Kuru, S.E. Sünbül, K. İçin, Investigation of Coatability of Mechanically Alloyed AlCuCrFeNi High Entropy Alloy by Physical Vapor Deposition Technique, Manufacturing Technologies and Applications, 3(2), 1-8, 2022. <https://doi.org/10.52795/mateca.1124722>, This paper is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

yandaki boşluğa atlamasında komşu atomu değişecektir. Buda kafes içerisinde farklı yerel enerji seviyelerine yol açar. Bu sebepten dolayı YEA'larda difüzyon yavaştır. Kafes Distorsiyonu ise kafes içerisinde bulunan atomların her birinin farklı atom çapına sahip olmasından dolayı kafes bozunmasına yol açar. Örnek olarak büyük atomlar komşularını uzaklaştırır ve küçük atomların çevrelerinde daha büyük ve fazladan boşluklar oluşur. Buda YEA kafesinin toplam serbest enerjisini yükseltir. Son olarak Kokteyl etkisi ise, geleneksel alaşımlarda olduğu gibi bir alaşımın özellikleri onu oluşturan elementlerin özelliklerine bağlıdır. Örnek olarak Al gibi hafif bir element alaşımın yoğunluğunu azaltır fakat CoCrCuFeNi alaşımına Al ilavesi sistemin sertliğini arttırır. Bu nedenle YEA'lar yalnızca elementlerin özgül etkilerinden değil birbirleri arasındaki bağların etkilerinden de oldukça etkilenmektedir [3].

Mekanik alaşımlama yöntemi tozların topaklanması veya kaynaklanması ve sonrasında kırılmasının bir süreç halinde devam ettiği bir yöntemdir. Cihazın krozeyle ilettiği mekanik enerji ile partikül boyutu azalırken kimyasal reaksiyonlar ve yapısal değişiklikler gözlemlenir. Mekanik alaşımlamadaki dönme hareketi ile tozlar stabil hallerinden uzaklaşarak bağları kırılır. Bu yöntemin avantajları ise; amorf fazların oluşturulması, oksitlerde daha çok olan ikincil fazların ince dağılımlı üretilmesi, nano boyutlara yakın tozların elde edilmesi gibi birçok avantaj sıralanabilmektedir. Bu yöntem ile bilinen klasik Hume-Routery kuralları ile gerçekleşmeyecek elementlerin bir araya gelip alaşımlanması ve homojen bir alaşım eldesi mümkün olduğu için yöntem ön plana çıkmaktadır [4, 5]. Alaşımlama sürecinde tozlar alaşımlanırken soğuk kaynak etkisi ile kırılma olayı bir döngü şeklinde devam eder. Bilyaların kroze içerisinde tozlara çarpması sonucu toz partikülleri deformasyona uğrayarak şekil değişikliğine maruz kalmaktadırlar. Topaklanma ve kırılma olayı partikül boyutunun azalarak sabitleşmesine kadar devam etmektedir[5, 6]. Proses esnasında bilyaların tozları bir nevi dövmesi sonucu ortaya çıkan sıcaklık artışında difüzyonu olayın içine alarak yeni fazların ortaya çıkabilmesine neden olabilmektedir. Prosesin son aşamasında ise bu kaynak ve kırılma olayı arasındaki denge sağlanınca homojen bir yapı elde edilir [4, 6].

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) methodu, tozların veya alaşımın kaynağının vakum altında buharlaştırılması ve kaplama oluşturulmak istenilen altlık üzerine biriktirilmesine dayanan bir yöntemdir [5]. PVD tekniğinin gelişmesi ile; daha yoğun kaplama yapısı, düşük sıcaklıklarda bile iyi bir kaplama yapısı elde edilmesi, kaplanacak malzemenin yüzeye iyi şekilde difüzyon etkisi ile yerleşmesi bu tekniğin yaygınlaşmasında rol oynamıştır [6]. Fiziksel buhar biriktirme yönteminin en yaygın olarak kullanıldığı yöntem termal buharlaşma yöntemidir. Bu yöntem farklı farklı değişik alanlarda çeşitli malzemelerin yüzeylerine ince film kaplama yapabilmektedir. Bu yöntem ile kaplanacak malzeme yüzeyinde malzeme kalınlığı angstrom veya mikron mertebesinde kalmaktadır. Termal buharlaştırma yöntemi katı bir malzemeyi vakum ortamında ısıtarak, bir buhar basıncı oluşturmayı amaçlar. Vakum altında bu buhar basıncı düşük olsa bile oda içerisinde buhar bulutu oluşturmak için yeterlidir. Buharlaşmış malzeme oda içerisinde uçarak, eğer ki altlık malzemeye gidecek bir referans yol yok ise, oda içerisindeki heryere yapışarak ince film kaplamayı oluşturmaya başlar. FBB ile yoğun ve homojen kaplama üretimleri yapıldığından YEA'ların kaplama olarak geleneksel alaşımlar üzerine biriktirilmesi üzerine çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Ustinov ve arkadaşları indüksiyon ergitme ile üretilmiş CrFeCoNiCu alaşımını elektron ışını destekli FBB ile AISI 302 altlık üzerine 40 ile 100 µm kalınlıklarda biriktirmişlerdir [7]. Liao ve arkadaşları döküm tekniği ile üretilmiş FeCoCrNiAl_{0.1} alaşımını AISI 304 altlık üzerine 1.5 µm kalınlıkta FBB tekniği ile başarılı şekilde biriktirmişlerdir [8]. Nadutov ve arkadaşları elektrik ark fırını ile üretilmiş AlFeCoNiCuCr alaşımını katot ark destekli FBB ile paslanmaz çelik altlık üzerine ~34–38 µm kalınlıkta biriktirmişlerdir [9]. Nagy ve arkadaşları CoCrFeNi alaşımını bir Si süperalaşım altlık üzerine ortalama 0.916µm kalınlığında iyon ışını püskürtmeli FBB yardımı ile başarılı şekilde biriktirmişlerdir [10]. Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş

AlCuCrFeNi alaşımı FBB tekniği ile Monel 400 üzerine biriktirilmiştir. Alaşımın üretim ve kaplama sonrası mikroyapıları incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Tozların Üretimi (Production of Powders)

Üretilecek toz AlCuCrFeNi alaşımının elde edilmesi için eşmolar şekilde %20'şer olarak atomik oranda tartılarak kroze içerisine yerleştirilmiştir.

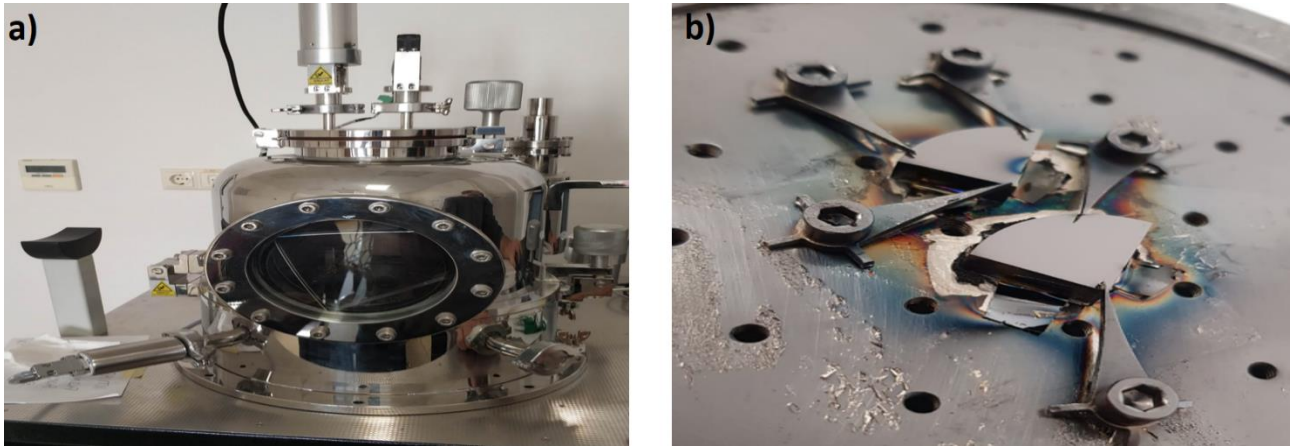
Tablo 1. Kullanılan tozların %molar miktarları (% molar amounts of powders used)

	Al(%)	Cu(%)	Cr(%)	Fe(%)	Ni(%)
AlCuCrFeNi alaşımının %molar miktarı	20	20	20	20	20

Tozlar yukarıda Tablo 1'de verilen molar orana göre hassas terazide tartılıp paslanmaz çelik kroze içerisinde yerleştirildikten sonra kroze içerisinde ağırlıkça %2 oranında etanol çözeltisi eklenmiştir. Etanol, bilyaların tozları öğütmesi ile birlikte oluşacak sıcaklığın etkisiyle tozların oksitlenmesini ve soğuk kaynak etkisini azaltmak için eklenmiştir. Tozların hazırlanması işlemi bitirildikten sonra toz bilya oranı 1:10 olacak şekilde 20g toz karışımı, etanol ve 200g paslanmaz çelik bilya kroze içerisine yerleştirilmiştir. Tozlar 400 rpm hızında 30 dakika öğütme-30 dakika soğutma şeklinde 24 saat boyunca yani 24 çevrimde mekanik olarak alaşımlanmıştır. Üretilen tozlar haznedan çıkarıldıktan sonra etüvde 100 °C' de 10 saat süreyle kurutulmuştur.

2.2. Alaşımlanan Tozun FBB ile Kaplanması (Coating of Alloyed Powder with FBB)

PVD kaplama cihazının içerisindeki potaya üretilen 20 g tozun 4 gramı mekanik olarak preslendikten sonra yerleştirilmiştir. PVD kaplama işlemi için Şekil 1a'da gösterilen Vaksis markasının Handy PVD termal kaplama cihazı kullanılmıştır. Kaplama öncesi VK-1608 programı yardımıyla vakum altına alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 30 dakika sürmüştür. Altlık numune üzerine biriktirilen kaplamanın son hali ise Şekil 1b'de gösterilmiştir. Kaplama işleminin parametreleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. PVD Handy Kaplama Cihazı ve kaplama sonrası makro görüntüsü (PVD Handy Coating Device and macro image after coating)

Tablo 2. PVD kaplama parametreleri (PVD coating parameters)

Amper (A)	Kaplama hızı (A°/s)	Vakum değeri (Torr)
82	23	1.8×10^{-6}

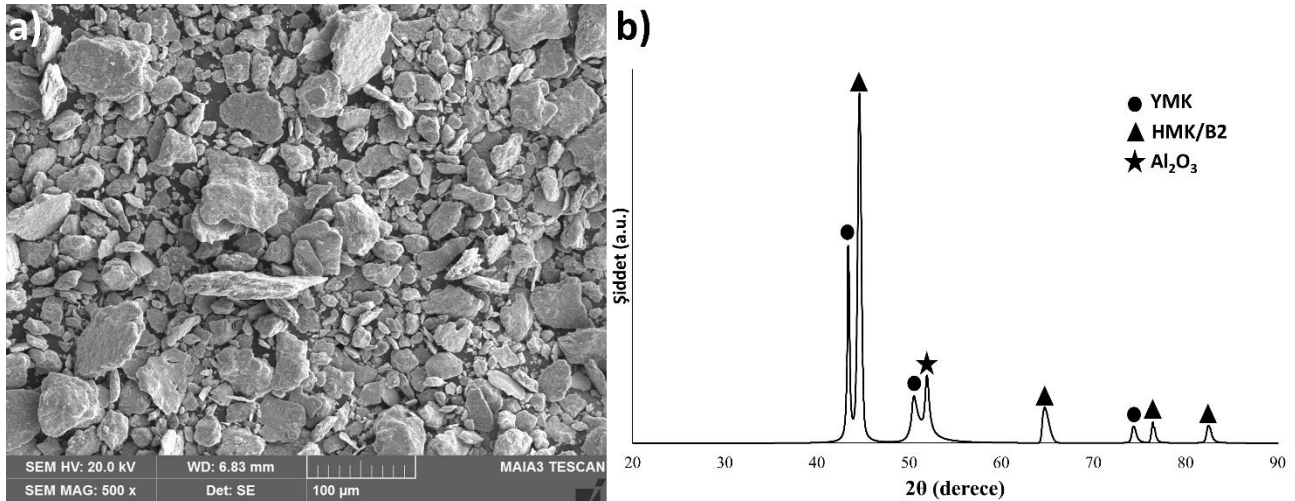
2.3. Karakterizasyon (Characterization)

Tozların üretim sonrası faz analizleri XRD (Rigaku, $\text{CuK}\alpha$, DMAX 2200, Japonya) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tarama hızı $2^\circ/\text{dk}$ olarak 10° ve 90° aralıklarda XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen tozların ve kaplamanın mikroyapısal incelemelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) (JEOL JSM-7001F, Japonya) kullanılmıştır. Elementel haritalama ve nokta analizlerinde X-ray spektrometre (Oxford Instruments, X-max 80 AZtec) kullanılmıştır. PVD ile üretilmiş numune kesit görüntüsü için metalografik olarak hazırlanmıştır. Numuneler soğuk bakalit yardımı ile bakalitlendikten sonra 1200 mesh zımparaya kadar zımpara işlemi uygulanmıştır. Devamında ise elmas solüsyon ile 1 mikronluk çuha yardımıyla parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Mekanik Alaşımlama Sonrası Tozların Karakterizasyonu (Characterization of Powders After Mechanical Alloying)

Şekil 2'de mekanik alaşımlanmış AlCuCrFeNi tozlarının SEM görüntüsü ve tozlara ait XRD desenleri verilmiştir. Üretilen tozların boyutları farklılık göstermektedir. Çok ince tozlar ve kalın uzun köşeli morfolojiye sahip tozların karışık şekilde olduğu alınan SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Mekanik alaşımlama sırasında deformasyon etkisi ile gevrekleşen yapının daha sonra tekrardan kırılmasından dolayı homojen bir toz morfolojisine sahip olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca işlem esnasında tozların ufalanarak, devamında ise topaklanarak da birikmiş parçacıklardan da meydana geldiği anlaşılmaktadır. Şekil 2b'de verilen XRD paterninde 3 farklı fazdan meydana gelen bir alaşım üretildiği görülmektedir. Alaşımda YMK yapıya sahip Cu'ca zengin fazların yanı sıra HMK yapıya sahip Fe-Cr zengin fazlar ve B2 yapıya sahip Ni-Al zengin fazlardan oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. Mekanik alaşımlanmış AlCuCrFeNi alaşımlarının; a) SEM görüntüsü ve b) XRD paterni (Mechanically alloyed AlCuCrFeNi alloy; a) SEM image and b) XRD pattern)

Karışım entalpisi (ΔH_{mix}) YEA'larda değerlerine bağlı olarak üç farklı duruma sebep olabilmektedir. Bunlardan birincisi eğer karışım entalpi değeri çok negatif olursa oluşacak ikili bileşik intermetalik faz oluşturma meylinde olması iken bu değer sifira yaklaştığında katı çözültü oluşümü gözlenmektedir. Bu değer fazla pozitif bir değer aldığımda ise bileşik oluşturma özelliği zayıflar ve faz ayrışması ihtimali artmaktadır [11]. Tablo 3'te görüldüğü üzere AlCuCrFeNi alaşımında oluşacak baskın faz NiAl fazıdır. Bunun sebebi bu iki elementin karışım entalpisi diğerlerine göre çok daha negatif olmasından kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak Cu elementi ise alaşımda bulunan diğer elementler ile alaşım yapma isteği çok düşük gözükmemektedir. Al hariç diğer elementlerle karışım entalpi pozitif değerdedir. Al'nin ise diğer elementlerle olan karışım entalpisinin daha negatif olmasından kaynaklı Cu ile Cu-Al fazı oluşumu gözlenmemektedir. Bu sebepten dolayı alaşımlama esnasında Cu elementi diğer elementlerden ayrıştığı görülmüştür.

Bunların dışında Cu-Fe-Ni-Cr nin atomik çapları ile birbirine çok yakın değerlere sahipken Al'nin daha büyük olmasından dolayı YMK kafesinde çözünürlüğü sınırlı kalmasından dolayıda B2 ve HMK fazlarının ayrışmaya meyil ettiği anlaşılmaktadır. XRD analizine göre (Şekil 2b) tozlarda oksitlenmeden kaynaklı Al₂O₃ meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu durum tozların mekanik alaşımlanması esnasında ısınması ve koruyucu gaz atmosferi olmadan çalışmasından kaynaklanmıştır. Erdogan ve arkadaşları [12] yapmış oldukları çalışmada benzer kompozisyonda üretimi mekanik alaşımlama tekniği kullanarak yapmışlardır. Elde edilen sinterlenmiş pelet malzemelere ait tozlarda 3 farklı fazın basit kübik yapının yani HMK1, HMK2 ve YMK fazlarından meydana geldiğini belirtmişlerdir. HMK1 fazı FeCr bakımında zengin faz iken, HMK2 fazı ise B2 yapısı yani NiAl bakımından zengin faz olduğu ve YMK fazın bakırca zengin katı çözelti fazdan oluşması mevcut çalışmamızla uyumlu olduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan elementlerin alaşımlanırken karışım entalpi değerleri (kJ/mol) (Mixture enthalpy values of the elements used in the study when alloying)

	Al	Cu	Cr	Fe	Ni
Al	Al	-1	-10	-11	-22
Cu	-1	Cu	12	13	4
Cr	-10	12	Cr	-1	-7
Fe	-11	13	-1	Fe	-2
Ni	-22	4	-7	-2	Ni

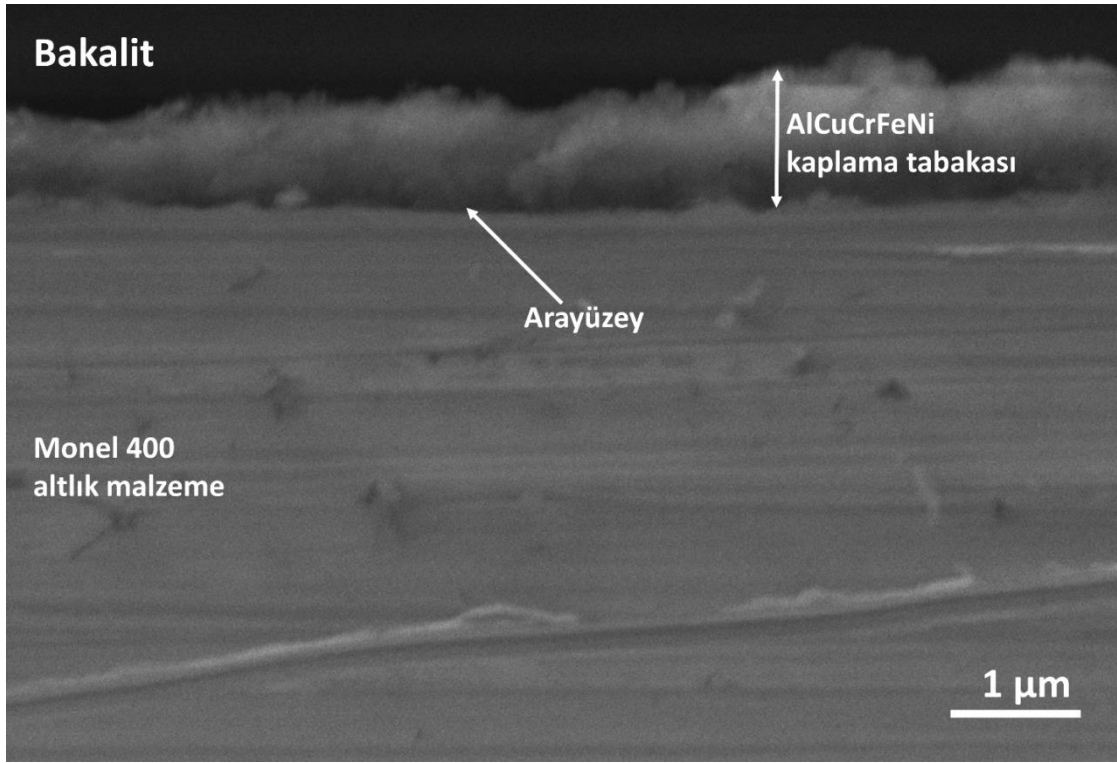
Tablo 4'te gösterilen hesaplamalara göre VEC değeri 7.6 bulunmuş olup AlCuCrFeNi'nin YMK ve HMK fazlarından oluşacağını göstermektedir. Bu fazlar içerisinde intermetalik fazlarında olacağı öngörülmüştür. Tablo 4'ten yola çıkıldığında oluşacak intermetalik fazın NiAl olacağı anlaşılmıştır. Valans elektron konsantrasyon (VEC) değerinin 6.87 ile 8 arasında olması durumunda YMK ve HMK fazlarının bir arada bulunacağı literatürde belirtilmiştir. Aynı şekilde karışım entropi (ΔS_{mix}) değerinin 11 ile 19.5 arasında olması ve atomik çap farkının (δ) ise 8.5 dan küçük olması durumunda da basit kübik yapıların oluşacağı belirtilmiştir [3]. Ω parametresinin ise 1' den büyük olması durumunda katı çözelti faz oluşumu desteklediği, küçük olması halinde ise segregasyon ve intermetalik faz ayrışmalarının gözlemlendiği rapor edilmiştir [13].

Tablo 4. Alaşım tasarımının teorik hesaplamalarında elde edilen veriler (Data from theoretical calculations of alloy design)

Alaşım Sistemi	δ	ΔH_{mix}	VEC	ΔS_{mix}	Ω	T _m (K)	Baskın ikili faz
AlCuCrFeNi	2.91	-25	7.6	13.37	856.74	1602	NiAl

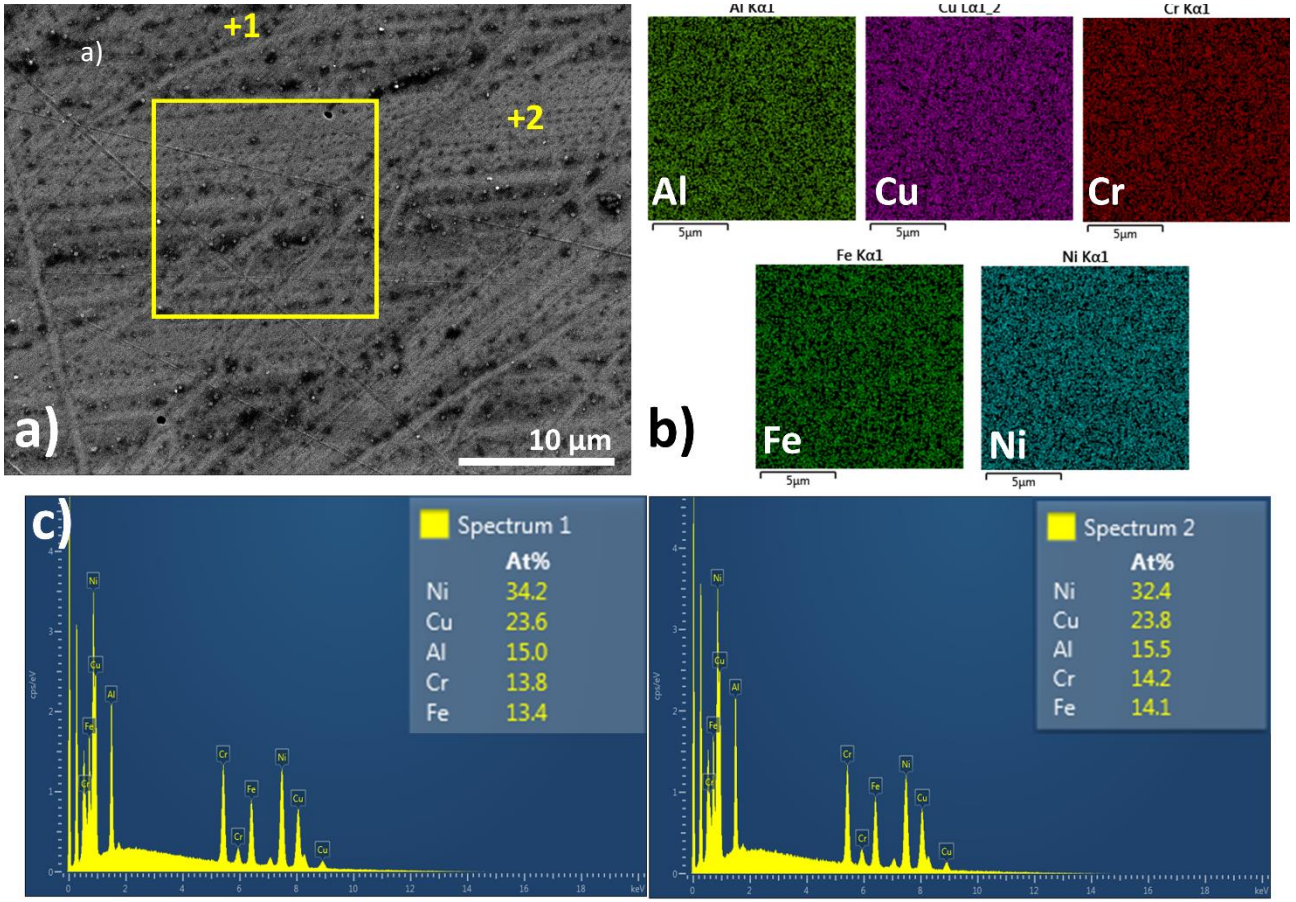
3.2. FBB ile Kaplanmış YEA'nın Mikroyapısal Karakterizasyonu (Microstructural Characterization of FBB Coated YEA)

Şekil 3'de PVD kaplamalar arasından termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak elde edilmiş AlCuCrFeNi kaplamanın 14 kx büyütmede alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Termal olarak ısıtılıp buharlaştırılan mekanik alaşımlanmış pelet altlık yüzeyinde yaklaşık 1 µm civarında kalınlığa ulaştığı görülmektedir. Oluşan kaplama tabakasının kalınlığının tam homojen olmadığı görülmektedir. Altlık ile oluşan kaplama tabakası arayüzeyinde ise herhangi ayrılma veya çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Alınan görüntü SEM'in SE modunda alınmasından dolayı kontrast detayları çok belli olmamaktadır. Kaplama kalınlığının çok ince olmasından dolayı yapılan elementel haritalama analizlerinde ise renk detayları çok belirgin olmadığından eklenmemiştir.



Şekil 3. AlCuCrFeNi kaplama ve CuNi altlık malzemeye ait SEM mikroyapı görüntüsü (SEM microstructure image of AlCuCrFeNi coating and CuNi backing material)

Şekil 4'te ise elementel ve nokta analizlerinin alındığı bölgeler gösterilmektedir. Üst yüzeyden alınan SEM görüntüsü (Şekil 4a) altlık malzemenin topografik görüntü detayını vermektedir. Görülen çizik benzeri hafif oyuklu izler, kaplama öncesi metalografik numune hazırlama aşamasından kalmıştır. Şekil 4b'de üst yüzeyden alınan elementel haritalama görüntüsü bulunmaktadır. Elementel haritalamada dağılımın homojen olduğu net şekilde görülmektedir. Tozlardan alınan XRD analizinde 3 farklı fazın varlığı kaplama sonrası kontrast detayı vermemiştir. Cu ve Ni renklerinin biraz daha koyu tonda olduğu görülmektedir. Bununda kaplama kalınlığının ince olmasından dolayı altlık malzemeden gelen spektrumlarından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Altlık malzememizin ise CuNi alaşımı olan Monel 400 olmasından dolayı ve bu alaşımın %67 Ni %32 Cu içermesinden dolayı nokta analizindeki oranlar eşmolar olarak gözükmemektedir [14]. Şekil 4c'de kaplama üst yüzeyinden alınan 2 adet spektrum verilmiştir. Her iki spektrumda da Ni ve Cu miktarları yüksek Al-Cr-Fe miktarlarının ise hemen hemen eşit ve düşük miktarda olduğu görülmektedir. Bununda benzer şekilde ince kaplama tabakasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Özellikle Al, Cr ve Fe miktarlarının eş molar yakın olması kaplamanın üretilen alaşıma ait olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 4. AICuCrFeNi kaplamaya ait a) üst yüzey SEM görüntüsü, b) Elementel haritalama görüntüsü ve c) EDX nokta analiz sonucu (AICuCrFeNi coating; a) top surface SEM image, b) Elemental mapping image, and c) EDX point analysis result)

Gabbitas ve arkadaşları TiAl alaşımını mekanik alaşımlama kullanarak ürettikten sonra presleyerek PVD hedefi olarak kullanarak başarılı şekilde üretimini sağlamışlardır [15]. 12 saat öğütme süresi ile alaşımlanıp, sıcak izostatik presleme sonrası PVD tekniği ile hedef alaşımın başarılı şekilde üretildiği görülmüştür. Mevcut çalışmamızda öğütme süremiz 20 saat olarak yapılması hedef alaşım üretimi için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak tozların preslenme ve sinterlenmesine gerek kalmadan ince film alaşım üretimi başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada Monel 400 altlık malzeme üzerine FBB-Termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak AICuCrFeNi yüksek entropili alaşımı kaplanmıştır. Üretilen kaplamanın mikroyapısal karakterizasyon sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. AICuCrFeNi içerikli yüksek entropili alaşım mekanik alaşımlama tekniği kullanarak başarılı şekilde sentezlenmiş ve yapılan faz analiz incelemesinde baskın olarak HMK/B2 fazları ve YMK fazlardan meydana geldiği tespit edilmiştir.
2. Deneysel çalışmada tek parametre kullanılarak ile PVD Termal buharlaştırma yöntemiyle Monel 400 alaşımı üzerine mekanik alaşımlanarak üretilmiş yüksek entropili AICuCrFeNi alaşımı biriktirilmiştir. Altlık malzemeden gelen spektrum verileride göz önüne alındığında eşmole yakın olarak başarılı şekilde alaşımın biriktirildiği tespit edilmiştir.
3. Üretim sonrası kaplama kalınlığının yaklaşık 1µm civarlarında altlık üzerine biriktiği tespit edilmiştir. Kaplama arayüzeyinde herhangi bir ayrılma ve uyumsuzluğun meydana gelmediği görülmüştür.

İleriki çalışmalarda PVD parametrelerinin optimizasyonu, oluşan kaplamanın sertliği ve ısıl işlemler sonrası altlıkla olan etkileşimine odaklanılacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang, Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes, *Advanced Engineering Materials*, 6: 299–303, 2004.
2. Y.F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu, Y. Yang, High-entropy alloy: challenges and prospects, *Materials Today*, 19: 349–362, 2016.
3. M.-H. Tsai, J.-W. Yeh, High-entropy alloys: a critical review, *Materials Research Letters*, 2: 107–123, 2014.
4. K. Harsha, *Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films*, Wiley, 2005.
5. A. Inspektor, P.A. Salvador, Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review, *Surface and Coatings Technology*, 257: 138–153, 2014.
6. W.D. Sproul, Physical vapor deposition tool coatings, *Surface and Coatings Technology*, 81: 1–7, 1996.
7. A.I. Ustinov, S.A. Demchenkov, T.V. Melnychenko, V.S. Skorodzievskii, S.S. Polishchuk, Effect of structure of high entropy CrFeCoNiCu alloys produced by EB PVD on their strength and dissipative properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 887, 161408, 2021.
8. L. Liao, R. Gao, Z.H. Yang, S.T. Wu, Q. Wan, A study on the wear and corrosion resistance of high-entropy alloy treated with laser shock peening and PVD coating, *Surface and Coatings Technology*, 437: 128281, 2022.
9. V.M. Nadutov, A.V. Proshak, S.Y. Makarenko, V.Y. Panarin, M.Y. SvavilNyj, Creation and Mössbauer studies of high-entropy physical vapor deposition by cathode arc evaporation (PVD CAE) coating AlFeCoNiCuCr, *Materwiss Werksttech*, 47: 272–277, 2016.
10. P. Nagy, N. Rohbeck, G. Roussely, P. Sortais, J.L. Lábár, J. Gubicza, J. Michler, L. Pethö, Processing and characterization of a multibeam sputtered nanocrystalline CoCrFeNi high-entropy alloy film, *Surface and Coatings Technology*, 386, 125465, 2020.
11. Y.F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu, Y. Yang, High-entropy alloy: challenges and prospects, *Materials Today*, 19: 349–362, 2016.
12. A. Erdogan, S.E. Sunbul, K. İcin, K.M. Doleker, Microstructure, wear and oxidation behavior of AlCrFeNiX (X = Cu, Si, Co) high entropy alloys produced by powder metallurgy, *Vacuum*, 187, 110143, 2021.
13. X. Yang, Y. Zhang, Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys, *Materials Chemistry and Physics*, 132: 233–238, 2012.
14. Y. Küçük, K.M. Döleker, M.S. Gök, S. Dal, Y. Altınay, A. Erdoğan, Microstructure, hardness and high temperature wear characteristics of boronized Monel 400, *Surface and Coatings Technology*, 436, 128277, 2022.
15. B. Gabbitas, P. Cao, S. Raynova, D.L. Zhang, Fabrication of TiAl Target by Mechanical Alloying and Applications in Physical Vapour Deposition Coating, *Materials Science Forum*, 534–536: 805–808, 2007.

AISI 329 Dupleks Paslanmaz Çeliğin Frezelenmesinde Farklı Sürfaktan Katkılı CuO Nanoakışkanların Performans Değerlendirmesi

İbrahim DEMİR¹ , Turgay KIVAK¹ , Şenol ŞİRİN^{2,*} 

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Düzce, Türkiye

² Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Düzce, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 26.06.2022

Kabul: 29.07.2022

Anahtar Kelimeler:

AISI 329

Sürfaktan

Frezeleme

MMY

ÖZET

Nanoakışkanlar metal işleme sektöründe, işleme performansına son derece olumlu katkılar sunmaktadır. Son yıllarda özellikle nanoakışkanlar üzerine çalışmalar yoğunlaşmakla birlikte raf ömrü ve homojenliği bir merak konusudur. Homojen bir nanoakışkan elde etme ve karışımın raf ömrünü artırma adına farklı yüzey aktif maddeler (sürfaktanlar) karışıma eklenebilmektedir. Bu çalışmada, CuO nanopartikül katkılı bitkisel esaslı yağın içerisine farklı oranlarda cetiltrimetilamonyum bromid (CTAB), polivinilpolipirrolidon (PVP) ve sodyum dodesil sülfat (SDS) eklenerek nanoakışkan karışımlar hazırlanmıştır. Aynı oranlarda eklenen surfaktanların işleme performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi adına AISI 329 dupleks paslanmaz çelik malzemeye bir dizi frezeleme deneyi uygulanmıştır. Deneyler Taguchi L9 deney seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde girdi parametresi olarak üç farklı surfaktan (CTAB, PVP ve SDS), kesme hızı (120, 160 ve 200 m/dak), ilerleme (0.10-0.15 ve 0.20 mm/dev) seçilmiştir. Performans kriteri olarak yüzey pürüzlülüğü (Ra), kesme sıcaklığı (T) ve takım aşınması tercih edilmiştir. Faktörlere ait etki düzeylerinin belirlenmesinde varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre; PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkanın Ra, kesme sıcaklığı ve takım aşınmasında en iyi performansı gösterdiği anlaşılmıştır.

Performance Evaluation of CuO Nanofluids with Different Surfactants in the Milling of AISI 329 Duplex Stainless Steel

ARTICLE INFO

Received: 26.06.2022

Accepted: 29.07.2022

Keywords:

AISI 329

Surfactant

Milling

MQL

ABSTRACT

Nanofluids offer extremely positive contributions to the machining performance in the metalworking industry. Although studies on nanofluids have been intensified in recent years, shelf-life and homogeneity are a matter of curiosity. Different surface agents (surfactants) can be added to the mixture in order to obtain a homogeneous nanofluid and increase the shelf-life of the mixture. In this study, nanofluid mixtures were prepared by adding cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), polyvinylpyrrolidone (PVP) and sodium dodecyl sulphate (SDS) at different rates into CuO nanoparticle added vegetable based oil. A series of milling experiments were applied to AISI 329 duplex stainless steel material to determine the effects of surfactants added in the same proportions on the machining performance. Experiments were carried out using the Taguchi L9 experimental set. Three different surfactants (CTAB, PVP, and SDS), cutting speed (120, 160, and 200 m/min), feed (0.10, 0.15, and 0.20 mm/rev) were selected as input parameters in the experiments. Surface roughness (Ra), cutting temperature (T) and tool wear were preferred as machining performance criteria. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the effect levels of the factors. According to the results obtained from the experiments; it was determined that PVP surfactant-added CuO nanofluid showed best performance in surface quality, cutting temperature and tool wear according to other surfactants.

*Sorumlu yazar, e-posta: senolsirin@duzce.edu.tr

To cite this article: İ. Demir, T. Kivak, Ş. Şirin, Performance Evaluation of CuO Nanofluids with Different Surfactants in the Milling of AISI 329 Duplex Stainless Steel, Manufacturing Technologies and Applications, 3(2), 9-21, 2022.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1135978>, This paper is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Paslanmaz çelikler gündelik yaşamda karşımıza çıkan ve gıda sektöründen kimyasal sektöre kadar geniş bir çerçevede kullanım potansiyeline sahip malzemelerdir. Paslanmaz çelikleri östenitik, ferritik, ferritik-östenitik, çökeltme sertleşmeli ve dubleks olmak üzere beş başlık altında toplayabiliriz [1]. Yapılarında yüksek oranda krom (Cr, %20~30) ve nikel (Ni, %5~10) barındıran dubleks paslanmaz çelikler aynı zamanda ferritik-östenitik paslanmaz çelik olarak da adlandırılırlar. Dubleks paslanmaz çelik grubunda bulunan AISI 329 (Dubleks 1.4460, SS2324, UNS S32900) östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere (AISI 304, 316 vb.) göre daha fazla korozyona karşı dayanıklıdırlar [2]. Yüksek sertlik ve iyi korozyon direnci kombinasyonu nedeniyle AISI 329 dubleks paslanmaz çelikleri; korozyon, çukurluk, aralık korozyonuna karşı yüksek direnç, iyi kaynak yapılabirlik, yüksek mekanik mukavemeti, tasarım avantajları sunmaktadır. Tüm bu avantajlarının yanında AISI 329 düşük ısı iletkenlik ve kesici kenarında yığıma talaş oluşumu gibi dezavantajları yüzünden şekillendirilmesi zor malzeme olarak da bilinirler [3]. Özellikle frezeleme gibi darbeli şekillendirme proseslerinde işleme verimliliğini artırmak için işleme koşullarının çok iyi seçilmesi gerekmektedir [4].

Frezelemede işleme verimliliğini artırmanın en bilinen yöntemi metal işleme sıvılarının kullanılmasıdır [5]. Ancak sürdürülebilir imalat sürecinde ekolojik kaygılar yüzünden petrol bazlı metal işleme sıvılarının kullanımının azaltılması veya tamamen kullanımının sonlanması çalışmaları hız kazanmıştır [6]. Hem işleme verimliliğini artırma hem de zararlı petrol bazlı metal işleme sıvılarının etkisini azaltma adına son yıllarda minimum miktarda yağlama (MMY) sıkça duyulmaya başlanmıştır [7]. MMY yöntemi ile sistemde bulunan yağ (genellikle bitkisel esaslı yağ) basınçlı hava ile aerosol sis buharı oluşturmaktadır [8,9]. Bir nozul vasıtasıyla ise kesme bölgesine tatbik edilmektedir [10]. Ancak MMY işleme performansı açısından metal kesme sıvılarının gerisinde kalmaktadır. Bu durumu geliştirmeye çalışan araştırmacılar MMY sistemindeki yağa hacimce veya ağırlıkça tribolojik performansı yüksek farklı şekillere sahip (küresel, yassı, lamel, silindirik vb.) katı haldeki nanopartiküller (genelde >100 nm) eklemektedir [6]. Hazırlanan bu nanoakışkanlar hem performans olarak metal işleme sıvılarının önüne geçmekte hem de toksik olmamaları yüzünden kullanılabilirlik sunmaktadırlar. Ne var ki tüm bu üstün performansları yüzünden kullanımı yaygınlaşmaya başlasa da raf ömürlerinin kısa olması yüzünden dezavantajlı olabilmektedirler [11]. Kolloidal karışım olan nanoakışkanlarda nanopartiküller sıvı içerisinde askıda durmaktadırlar [12]. Zamanla çökeltme veya topaklanma gibi olumsuz koşullar meydana geldiğinden işleme esnasında da dezavantaj oluşturabilmektedirler. Homojen bir karışım oluşturma adına nanoakışkan karışımlara farklı özellikli yüzey aktif maddeleri (surfaktan) eklenebilmektedir [13]. Literatürde surfaktanların nanoakışkan karışımlara eklendiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazılarına aşağıda değinilmiştir.

Şirin vd. yaptıkları çalışmada Hastelloy X süperalaşım malzemeye karbür matkaplarla delme operasyonu uygulamışlardır. Çalışmada hBN ve grafen katkılı nanoakışkanlara Gum Arabik (GA) ve Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) surfaktanlarını ekleyerek delme performanslarını incelenmiştir. hBN+SDS karışımının kuru, MMY, hBN, grafen, grafen+SDS, grafen+GA ve hBN+GA nanoakışkan karışımlara göre daha iyi performans gösterdiği iddia edilmiştir [13]. Geetha vd. AISI 4340 malzemeyi kuru, MMY, Triton X100 surfaktan katkılı Cu, grafen ve Cu + grafen koşulları altında kaplamasız karbür takımlarla tornalamıştır. Çalışma sonunda araştırmacılar grafen nanoakışkanının daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir [14]. Eltaggaz vd. Ti6Al4V malzemeyi ağırlıkça %0.2 ve %0.4 Al₂O₃ katkılı nanoakışkan koşulları altında tornalamışlardır. Nanoakışkan hazırlarken araştırmacılar SDS surfaktanı ekleyerek karışımı stabil hale getirmişlerdir. Çalışmada nanopartikül konsantrasyon oranının artmasının takım ömrünü ve yüzey kalitesi kalitesini olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir [15]. Musavi vd. A286 süperalaşım malzemeyi kaplamalı sementid karbür takımlarla tornalamıştır. Tornalama işlemi; ıslak, MMY, SiO₂, CuO nanoakışkan koşullarında, hacimce farklı CuO nanoakışkan koşulları (hacimce %0, %0.1, %0.4, %0.7 ve %1) ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşullarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında araştırmacılar, CuO nanoakışkanının diğer koşullara göre

üstün performans gösterdiğini ve SDS surfaktan katkısı eklenmesiyle yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma görüldüğünü iddia etmişlerdir [16].

Literatür değerlendirildiğinde, nanoakışkanların işleme performansı üzerinde olumlu sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Ayrıca nanoakışkanların homojen dağılım sergileyerek, topaklanma ve çökme gibi sorunların önlenmesinde surfaktanlar kullanılmaktadır. Literatür araştırmasında her ne kadar nanoakışkan karışımların işlenebilirlik performansları incelense de AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin frezelenmesinde farklı surfaktan katkıları içeren nanoakışkan karışımların performans değerlendirilmesinin henüz yapılmadığı anlaşılmaktadır. Yapılan bu çalışma ile farklı surfaktan (CTAB, PVP ve SDS) katkılı CuO nanoakışkan karışımların AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin frezeleme operasyonu sırasında tribolojik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda Taguchi L9 deney tasarımı kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ANOVA analizi yapılarak kontrol faktörlerin etki düzeyleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Son olarak farklı surfaktan koşulların kesici takım ömründeki değişimleri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. İş parçası, Takım ve Tutucu (Workpiece, Cutting Tool and Holder)

Bu çalışmada, herhangi bir fiziksel veya kimyasal işlem (ısıtma işlemi vb.) uygulanmamış ticari halde $100 \times 150 \times 16$ mm ölçülerinde AISI 329 dubleks paslanmaz çeliği (1.4460, SS2324, UNS S32900) kullanılmıştır. Üretici firmadan alınan bilgiler doğrultusunda AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğine ait kimyasal bileşim ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 329 dubleks paslanmaz çelik kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI 329 duplex stainless steel)

Element (% ağırlıkça)							
C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
0.10	2	1	25-30	3-6	0.045	0.03	1-2

Tablo 2. AISI 329 dubleks paslanmaz çelik mekanik özellikleri (Mechanical specification of AISI 329 duplex stainless steel)

Yoğunluk	Poisson Oranı	Elastikiyet Modülü	Gerilme Direnci	Akma Dayanımı	Uzama
(kg/m ³)		(GPa)	(MPa)	(MPa)	(%)
7.8	0.27-0.30	1920-210	724	550	25

Frezeleme deneylerinde PVD AlTiCrN kaplamalı 1130 kalite Sandvik 490R-08T308M karbür takımlar kullanılmıştır. Kesici takımlar 25 mm süpürme çapında, Sandvik 490-025A20-08L takım tutucuya rijit bir şekilde bağlanmıştır.

2.2. Nanoakışkan Karışımlar ve Karışım Prosesi (Nanofluids and Preparation of Mixtures)

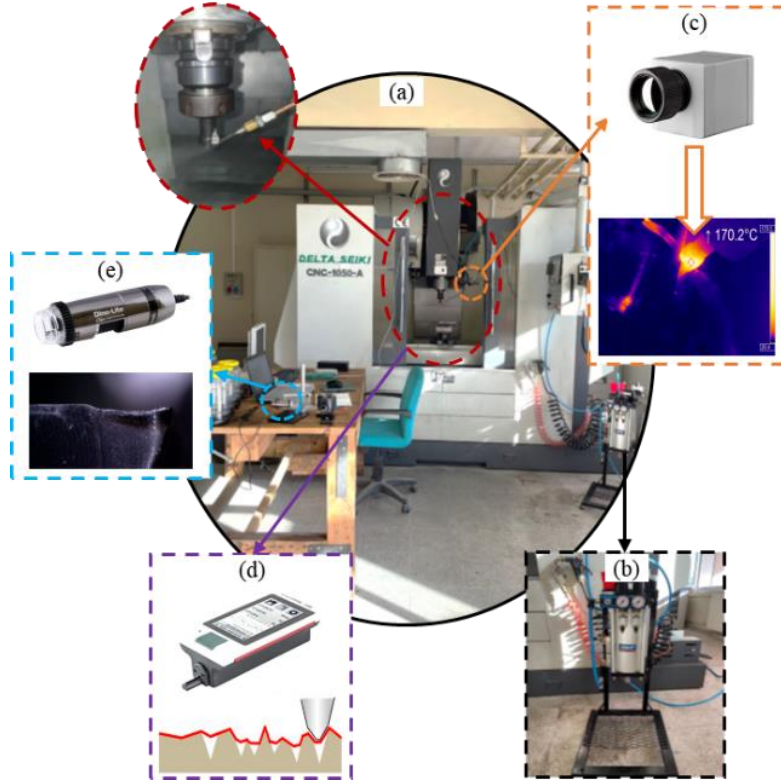
Nanoakışkan karışımların hazırlanmasında baz sıvı olarak Opet Fuchs PlantoCut SR10 bitkisel esaslı yağ kullanılmıştır. Nanopartikül olarak bakır oksit (CuO) kullanılmıştır. Nanopartiküle ait özellikler Tablo 3’te verilmiştir. Nanoakışkan karışımlar için ilk aşamada bitkisel esaslı yağ içerisine hacimce %0.6 oranında CuO nanopartikül ve nanopartikül ağırlığının %0.25 oranında (CTAB, PVP ve SDS) surfaktan eklenmiştir. İkinci aşamada Daihan HS100D mekanik bir karıştırıcıyla 60 dakika karıştırılmıştır. Üçüncü aşamada 20 kHz frekansında 200 W maksimum gücünde Bandelin marka HD 3200 ultrasonik homojenizatörde karışıma devam edilmiştir. Dördüncü ve son aşamada ise Termal N11151M manyetik karıştırıcıyla 2 saat karıştırılarak nanoakışkan karışımlar elde edilmiştir.

Tablo 3. CuO nanopartikül özellikleri (Kaynak; Üretici) (Specifications of CuO nanoparticle (Source: manufacturer))

Saflık	Renk	Biçim	Boyut	Özgül Yüzey Alanı	Kitle Yoğunluğu	Gerçek Yoğunluk
%99.99	Siyah	Kürelese Yakın	38 nm	>20 m ² /gr	0.8 gr/cm ³	6.5 gr/cm ³

2.3. Takım Tezgahı ve Deneysel Ölçümler (Machine Tool and Experimental Measurements)

Frezeleme deneyleri Delta Seiki CNC 1050-A dik işleme merkezinde (Şekil 1-a) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deneysel düzeneği; a) CNC dik işleme merkezi, b) MMY cihazı, c) Termal kamera, d) Pürüzlülük ölçüm cihazı, e) Dijital mikroskop (Experimental setup: a) CNC vertical machine, b) MQL device, c) Thermal camera, d) Roughness measurement instrument, e) Digital microscope)

Nanopartikül ve surfaktan ağırlıkların ölçülmesinde KERN PCB hassas terazi kullanılmıştır. Hazırlanan nanoakışkan karışımların kesme bölgesine tatbik edilmesinde SKF Vario MMY sistemi kullanılmıştır (Şekil 1-b). Tüm deneylerde 8 bar basınç ve 75 mL/saat debi sabit alınmıştır. Kesme bölgesine nanoakışkanlar 2 mm çapında bir nozul ile gönderilmiştir. Nozul kesici takım üst bölgesine 20 mm mesafede konumlandırılmıştır. Deneyler esnasında kesme bölgesindeki azami sıcaklığın tespit edilmesinde termografik görüntüleme yapan Optris PI 450 kızılötesi termal kamera kullanılmıştır (Şekil 1-c). Termal kamera talaşlardan etkilenmeyecek şekilde kesme bölgesine 300 mm mesafede ve 45 derece açıda konumlandırılmıştır. Frezelenen yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde taşınabilir Mahr Marsurf PS10 pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 1-d). Yüzey pürüzlülük ölçümleri ISO 4287 standardına göre gerçekleştirilmiş olup aritmetik yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) dikkate alınmıştır. Her yüzey pürüzlülük ölçüm öncesinde taşınabilir pürüzlülük ölçer doğrulama blok yardımıyla kalibre edilmiştir. Ölçümler işlenen yüzeylerin farklı bölgelerinden alınan üç ölçümün aritmetik ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Deneyler sonrası aşınan kesici takımların ölçüm ve görüntüleme işlemlerinde, Dino Lite AM791MZT dijital mikroskop kullanılmıştır (Şekil 1-e).

2.4. Deneysel Tasarım ve Optimizasyon (Experimental Design and Optimization)

Metal işlemede zamandan ve maliyetten tasarruf sağlama adına farklı optimizasyon yöntemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. En bilinen optimizasyon yöntemlerinden biri de Taguchi yöntemidir. Bu çalışmada da zaman ve maliyetten tasarruf sağlanması adına yüzey pürüzlülük ve kesme sıcaklığının optimizasyonunda Taguchi yöntemi tercih edilmiştir. Taguchi L9 deney tasarımının kullanıldığı çalışmada deney faktörleri ve parametreleri Tablo 4’te verilmiştir. Deney tasarımında üç farklı surfaktan katkılı (CTAB, PVP ve SDS) CuO nanoakışkanı, üç farklı kesme hızı (120, 160 ve 200 m/dak), üç farklı ilerleme (0.10, 0.15 ve 0.20 mm/dev) kontrol faktörü olarak kullanılmıştır. Deney parametreleri ön deney sonuçlarından elde edilen veriler ve takım firmasının tavsiyesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Kesme derinliği (0.5 mm) ve radyal kesme derinliği (15 mm) tüm deneylerde sabit alınmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve grafik çiziminde Minitab paket programı kullanılmıştır.

Tablo 4. Deneysel tasarım ve kontrol faktörleri (Experimental design and control factors)

Kontrol Faktörleri	Sembol	Birim	Seviyeler		
			1	2	3
Nanoakışkan karışımlar	A	(<i>Surfaktan</i>)	CTAB	PVP	SDS
Kesme Hızı (Vc)	B	(<i>m/dak</i>)	120	160	200
İlerleme (f)	C	(<i>mm/dev</i>)	0.10	0.15	0.20

Taguchi yönteminde “en büyük en iyi”, “nominal iyi” ve “en küçük en iyi” yaklaşımları bulunmaktadır. Yüzey pürüzlülük Ra değerlerinin ve kesme sıcaklığı değerlerinin düşük olması arzu edildiğinden bu çalışmada Taguchi “en küçük iyi” yaklaşımı tercih edilmiştir. En küçük en iyi fonksiyonu Eş.1’de verilmiştir.

$$\eta = S / N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Eş. 1’de “n” deney sayısını, “y” ise gözlemlenen verileri ifade etmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Yüzey Pürüzlülük Ra Sonuçları (Surface Roughness Ra Results)

Gerçekleştirilen frezeleme deneyleri sonrası elde edilen Ra değerleri ve sinyal/gürültü (SN) değerleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Ra değerleri ve SN oranları (Ra values and SN ratios)

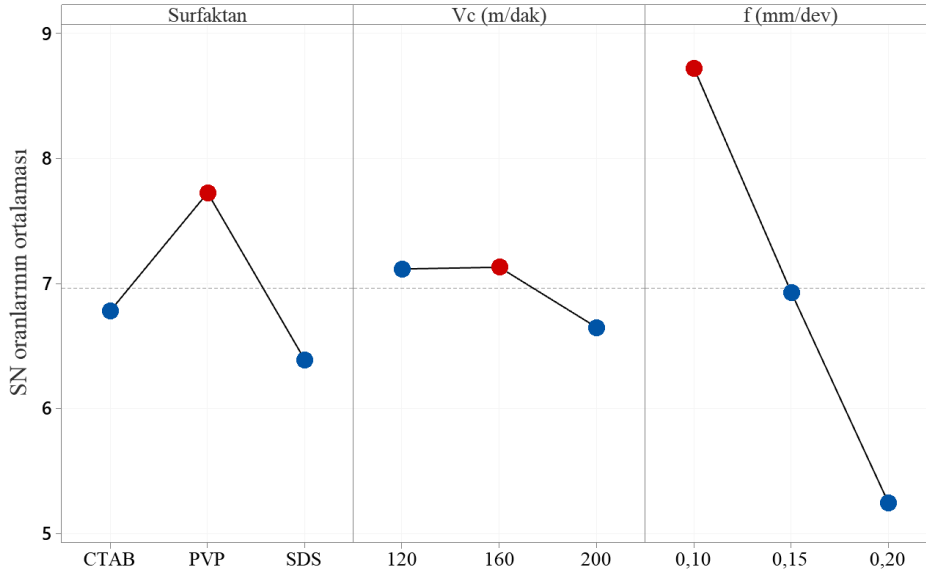
No	A Surfaktan	B (Vc, m/dak)	C (f, mm/dev)	(Ra) (μm)	SN (dB)
1	CTAB	120	0.10	0.386	8.26825
2	CTAB	160	0.15	0.437	7.19037
3	CTAB	200	0.20	0.570	4.88250
4	PVP	120	0.15	0.399	7.98054
5	PVP	160	0.20	0.516	5.74701
6	PVP	200	0.10	0.337	9.44740
7	SDS	120	0.20	0.556	5.09850
8	SDS	160	0.10	0.378	8.45016
9	SDS	200	0.15	0.524	5.561337

Tablo 5’te yer alan veriler yardımıyla, Ra değerlerinin aritmetik ortalaması 0.456 μm ve SN değerlerinin aritmetik ortalaması 6.95845 dB şeklinde hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen analizler ışığında Ra değerlerinin SN yanıt sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Ra değerlerinin SN yanıt sonuçları (SN response results of Ra values)

Seviyeler	Kontrol Faktörleri		
	Nanoakışkanlar (Sürfaktan)	Kesme Hızı (Vc - m/dak)	İlerleme (f - mm/dev)
	A	B	C
1	0.4643	0.4470	0.3670
2	0.4173	0.4437	0.4533
3	0.4860	0.4770	0.5473
Delta	0.0687	0.0333	0.1803

Tablo 6’da verilen koyu kırmızı değerler kontrol faktörlerinin optimum parametrelerini ifade etmektedir. Ra değerleri için SN etki grafiği Şekil 2’de verilmiştir.

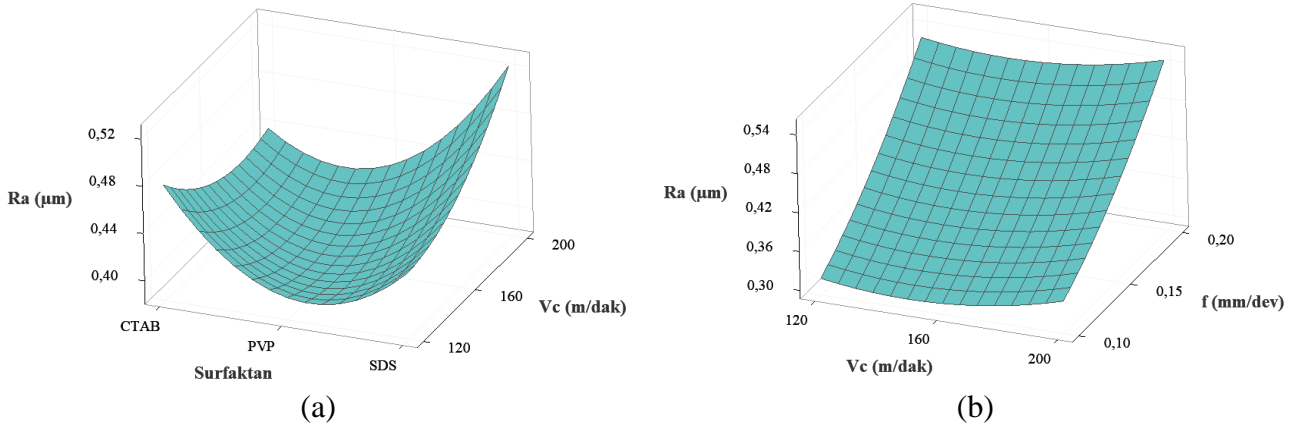


Sinyal-gürültü: Daha küçük daha iyidir

Şekil 2. Ra değerleri için SN etki grafiği (SN effect plot for Ra values)

Tablo 6 ve Şekil 2 değerlendirildiğinde optimum kesme koşulunun A2B2C1 olduğu anlaşılmaktadır. Bir başka deyişle AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin işlenmesinde PVP surfaktan katkılı nanoakışkanın, 160 m/dak kesme hızının ve 0.10 mm/dev ilerlemenin en uygun kesme koşulu olduğu ifade edilebilir. Surfaktan katkılı nanoakışkan, kesme hızı ve ilerlemeye bağlı Ra değişimleri Şekil 3’te verilmiştir.

Şekil 3 incelendiğinde en düşük Ra değerlerine PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşulunda elde edildiği bunu sırasıyla CTAB ve SDS surfaktan katkılı nanoakışkanların takip ettiği anlaşılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda PVP surfaktan katkılı nanoakışkanların daha iyi stabilite performansı gösterdiği ifade edilmiştir [17]. Benzer şekilde bu çalışmada, diğer surfaktanlara göre hem stabilite hem de tribolojik olarak üstün özellik gösterdiği düşünülen PVP surfaktanın daha iyi performans sergilediği yorumu yapılabilir. Ra üzerine en etkili parametrenin ilerleme değeri olduğu bilinmektedir [18]. İlerlemenin artmasıyla kesici takım yarıçapının oluşturduğu izler artmakta bunun sonucunda ise yüzey pürüzlülük değerleri de artış göstermektedir. Bu durumu Tablo 7 ANOVA tablosu doğrular niteliktedir.



Şekil 3. Elde edilen Ra değişimleri; a) Surfactant-kesme hızı değişimi, b) Kesme hızı-ilerleme değişimi (Ra values; a) Surfactant-cutting speed variation, b) Cutting speed-feed variation)

Tablo 7. Ra değerleri için ANOVA yanıt tablosu (ANOVA response table for Ra values)

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Surfaktan	2	0.007394	12.33	0.007394	0.003697	4.23	0.191
Vc (m/dak)	2	0.002022	3.37	0.002022	0.001011	1.16	0.464
f (mm/dev)	2	0.048810	81.38	0.048810	0.024405	27.90	0.035
Hata	2	0.001750	2.92	0.001750	0.000875		
Toplam	8	0.059975	100				

Ra değerlerine ait ANOVA yanıt tablosu (Tablo 7) incelendiğinde, Ra üzerine en etkili parametrenin %81,38 oranı ile ilerleme olduğu anlaşılmaktadır. Ra üzerine etki eden diğer önemli parametreler ise %12,33 oran ile surfaktan ve %3,37 oran ile kesme hızı olmuştur. Hata değeri %2,92 olarak düşük mertebelerde gerçekleşmiştir.

3.2. Kesme Sıcaklığı Sonuçları (Cutting Temperature Results)

Talaş kaldırma operasyonlarında kesici takım iş parçası ile sürekli temas halinde olduğundan sürtünmenin de etkisiyle kesme bölgesinde ısı artışı meydana getirmektedir. Kesme bölgesinde yükselen sıcaklık değerlerinin özellikle kesici takım aşınması üzerine olumsuz etkileri bulunmaktadır [19]. Bu yüzden kesme bölgesinde bulunan sıcaklığın kontrol altına alınması son derece önem arz etmektedir. Frezeleme operasyonu esnasında gerçek zamanlı kayıt altına alınan değerlerle elde edilen kesme sıcaklığı değerleri (T) Tablo 8’de verilmiştir.

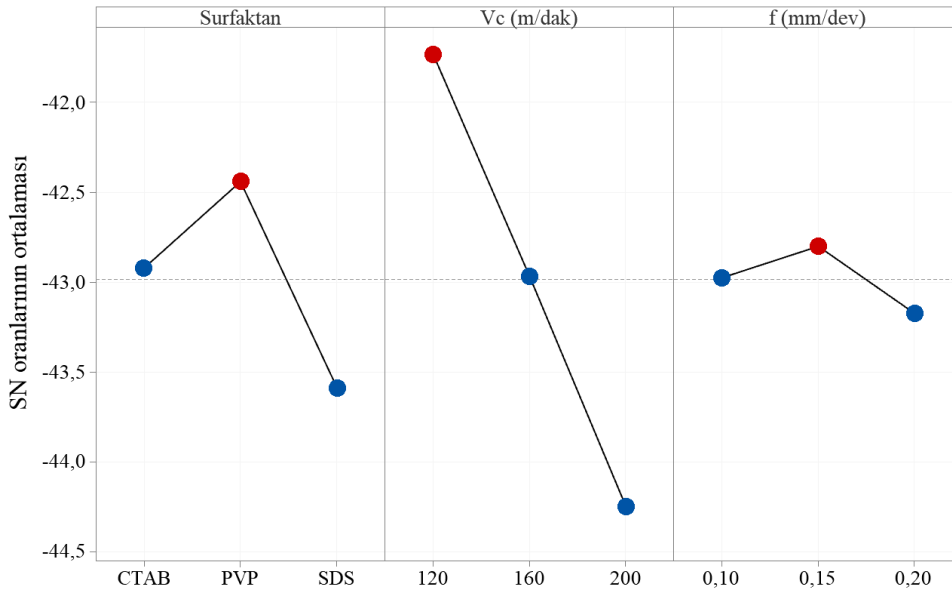
Tablo 8. Kesme sıcaklığı T değerleri ve SN oranları (Cutting temperature T values and SN ratios)

No	A Surfaktan	B (Vc, m/dak)	C (f, mm/dev)	T (°C)	SN (dB)
1	CTAB	120	0.10	121	-41.6557
2	CTAB	160	0.15	135	-42.6067
3	CTAB	200	0.20	168	-44.5062
4	PVP	120	0.15	114	-41.1381
5	PVP	160	0.20	135	-42.6067
6	PVP	200	0.10	151	-43.5795
7	SDS	120	0.20	132	-42.4115
8	SDS	160	0.10	153	-43.6938
9	SDS	200	0.15	171	-44.6599

Tablo 8 kesme sıcaklığı sonuçlarından yararlanılarak, T değerlerinin ve S/N değerlerinin aritmetik ortalaması sırasıyla 142.2 °C ve -429.842 dB olarak hesaplanmıştır. Analiz programı yardımıyla elde edilen T sonuçlarının S/N yanıt sonuçları ise Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Kesme sıcaklığı T değerlerinin SN yanıt sonuçları (SN response results of cutting temperature T values)

Seviyeler	Kontrol Faktörleri		
	Nanoakışkanlar (Sürfaktan)	Kesme Hızı (Vc - m/dak)	İlerleme (f - mm/dev)
	A	B	C
1	141.3	122.3	141.7
2	133.3	141.0	140.0
3	152.0	163.3	145.0
Delta	18.7	41.0	5.0

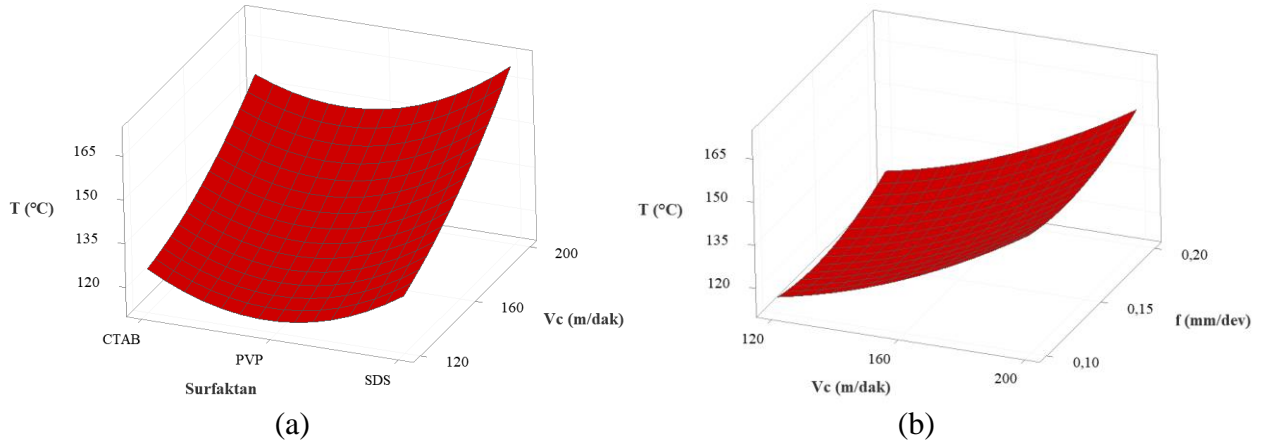


Sinyal-gürültü: Daha küçük daha iyidir

Şekil 4. Kesme sıcaklığı T değerleri için SN etki grafiği (SN effect plot for cutting temperature T values)

Şekil 4 grafiklerden ve Tablo 9’daki değerlerden faydalanılarak kesme sıcaklığı T için optimum koşulların A2B1C2 olduğu ifade edilebilir. Bu deneysel çalışmada, kesme sıcaklığı için PVP surfaktanı, 120 m/dak kesme hızı ve 0.15 mm/dev ilerleme optimum koşullardır, sonucuna varılmıştır. Farklı koşullar ve parametrelerde kesme bölgesinde gözlemlenen maksimum sıcaklık değerlerinden elde edilen grafikler Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5 kesme sıcaklığı grafikleri incelendiğinde en düşük kesme sıcaklığının PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkanında elde edildiği anlaşılmaktadır. Bunu sırasıyla CTAB ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkanları takip etmiştir. Ra sonuçlarında olduğu gibi kesme sıcaklığı T sonuçlarında PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkanı daha iyi performans göstermiştir. Bu noktadan hareketle, PVP surfaktanın diğer surfaktanlara göre nispeten homojen dağılım göstermesi, kesme bölgesinde yağlayıcı tribo film tabakasının daha iyi nüfuz etmesini sağlamıştır yorumu yapılabilir. Şekil 5-b incelendiğinde kesme sıcaklığının artışına en fazla kesme hızının etki ettiği anlaşılmaktadır. Kesme hızı değerlerinin artmasıyla kesme sıcaklığı değerleri, ilerlemeye göre daha fazla artış göstermiştir. Kesme sıcaklığı ANOVA tablosu (Tablo 10) da bu durumu doğrulamaktadır.



Şekil 5. Elde edilen kesme sıcaklığı T değişimleri; a) Sürfaktan-kesme hızı değişimi, b) Kesme hızı-ilerleme değişimi (Cutting temperature T variations; a) Surfactant-cutting speed variation, b) Cutting speed-feed variation)

Tablo 10. Kesme sıcaklığı T değerleri için ANOVA yanıt tablosu (ANOVA response table for cutting temperature T values)

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Surfaktan	2	526.22	16.75	526.22	263.11	10.91	0.084
V_c (m/dak)	2	2528.22	80.48	2528.22	1264.11	52.43	0.019
f (mm/dev)	2	38.89	1.24	38.89	19.44	0.81	0.554
Hata	2	48.22	1.53	48.22	24.11		
Toplam	8	3141.56	100				

Tablo 10 ANOVA yanıt tablosu incelendiğinde kesme sıcaklığı T üzerinde %80.48 oranla en fazla kesme hızının etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bunu %16.75 oranla surfaktan koşulları ve %1.24 oranla ilerleme takip etmiştir. ANOVA analizi sonucunda ise hata oranı sadece %1.53 düzeylerinde kalmıştır.

3.3. Doğrulama Deneyi Sonuçları (Validation Experiment Results)

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülük R_a ve kesme sıcaklığı T için optimum parametreler sırasıyla A2B2C1 ve A2B1C2 olarak hesaplanmıştır. Taguchi ile elde edilen optimizasyon sonuçları bazen deney setinin içinde çıkarken bazen de farklı bir parametre olarak çıkabilmektedir. Bu çalışmada optimum parametreler R_a için deney setinin dışında çıkarken T için deney setinin içinde çıkmıştır. Optimum parametrelerin belirlenmesinde R_a için Eş.2'den T için Eş.3'ten faydalanılmaktadır.

$$R_{a_{optimum}} = (A2 - T_{Ra}) + (B2 - T_{Ra}) + (C1 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (2)$$

$$T_{optimum} = (A2 - T_T) + (B1 - T_T) + (C2 - T_T) + T_T \quad (3)$$

Eş.2 ve Eş.3'te A2B2C1 ve A2B1C2 R_a ve T için optimum koşulları, T_{Ra} ve T_T ise Tablo 5 ve Tablo 8'de yer alan R_a ve T değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Değerler denklemlerde yerlerine konulduğunda, $R_{a_{optimum}}$ 0.316 μm , $T_{optimum}$ 111.2 °C olarak hesaplanmıştır.

Taguchi ile elde edilen optimum değerlerin ardından gerçekleştirilen doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen değerler, optimizasyon sonuç aralığında olmalıdır. Elde edilen optimum değerler ve doğrulama değerleri sonuçlarının değerlendirilmesinde Eş.4 ve Eş.5 kullanılmaktadır.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1;f_e} \times V_e \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (4)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + [T_{dof}]} \quad (5)$$

Eş.4'te $F_{\alpha;1;f_e}$, α önem düzeyini, f_e hata serbestlik derecesini, V_e varyans hatasını, n_{eff} deney tekrar sayısını ve r doğrulama deneyi tekrar sayısını göstermektedir. Eş.5'te ise N toplam deney sayısını ve T_{dof} serbestlik düzeyinin toplam ana faktörlerini belirtmektedir.

Ra ve T için $F_{0.05;1;2} = 18,51$ (F test tablosundan faydalanılarak), V_e Ra için 0.000875, T için 24.11 olarak bulunmuştur. Ra ve T için $r = 3$, $N = 9$, $T_{dof} = 6$, $n_{eff} = 1.29$ olarak hesaplanmıştır. Eş.4'te değerler yerlerine konulduğunda Güven Aralığı (CI) Ra için ± 0.134 , T için ise ± 22.24 olarak bulunmuştur. %95 güvenirlilikte tahmini ortalama optimal yüzey pürüzlülüğünün güven aralığı Ra için Eş.6'dan, T için Eş.7'den faydalanılarak hesaplanmıştır.

$$[Ra_p] - [CI] < Ra_{deneysel} < [Ra_p] + [CI] \quad (6)$$

$$[T_p] - [CI] < Ra_{deneysel} < [T_p] + [CI] \quad (7)$$

Eş.6'daki Ra için değerler yerlerine konulduğunda;

$$[0.316 - 0.134] < 0.326 < [0.316 + 0.134] = [0.182] < \mathbf{0.326} < [0.450]$$

Eş.7'deki T için değerler yerlerine konulduğunda ise;

$$[111.2 - 22.24] < 114 < [111.2 + 22.24] = [88.96] < \mathbf{114} < [133.44] \text{ sonuçlarına ulaşılmaktadır.}$$

Deneyler sonucunda elde edilen Ra için 0.326 μm , T için 114 $^{\circ}\text{C}$ değerleri güven aralığı değerleri arasında çıkmıştır. Bir başka deyişle Taguchi deney tasarımı 0.05 anlamlılık düzeyinde gerçekleşmiştir. Başarılı bir şekilde uygulanan Taguchi optimizasyonu için elde edilen optimum değerler ve deneysel değerler arasındaki farklar Tablo 11'de verilmiştir.

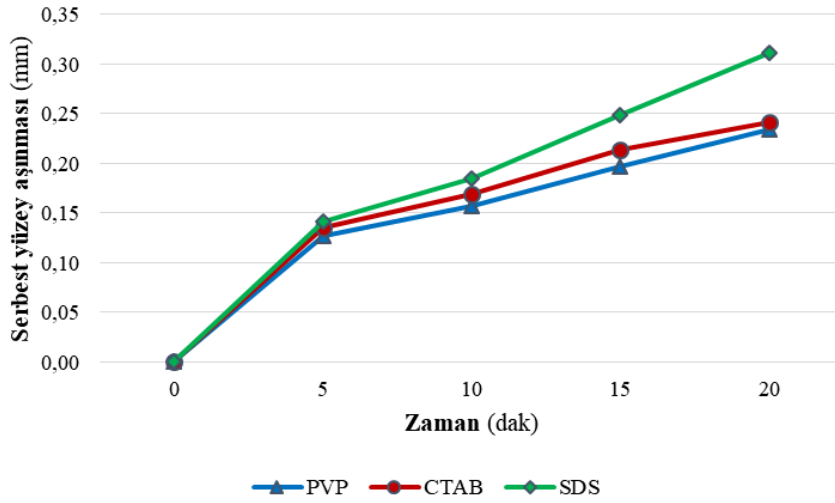
Tablo 11. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar (Results from the validation experiments)

Kaynak	Sonuçlar		Hata
	Deneysel	Tahmini	%
<i>Yüzey pürüzlülüğü Ra</i>			
A2B2C1 (optimum)	0.326	0.316	3.07
A1B3C3 (rastgele)	0.570	0.577	1.23
<i>Kesme sıcaklığı T</i>			
A2B1C2 (optimum)	114	111.2	2.46
A3B3C2 (rastgele)	171	170.9	0.06

Tablo 11 incelendiğinde Ra için yapılan doğrulama deneyi ve tahmini değerleri arasındaki fark %3.07 mertebelerinde kalırken, T için yapılan doğrulama deneyi ve tahmini değerleri arasındaki fark %2.46 mertebelerinde kalmıştır. Ayrıca Ra ve T için rastgele seçilen seviyeler arasındaki fark ise sırasıyla %1.23 ve %0.06 düzeyindedir. Bir başka deyişle sonuçlardan yola çıkılarak optimizasyonun başarılı olduğu ifade edilebilir.

3.2. Takım Ömrü ve Aşınma Sonuçları (Tool Life and Wear Results)

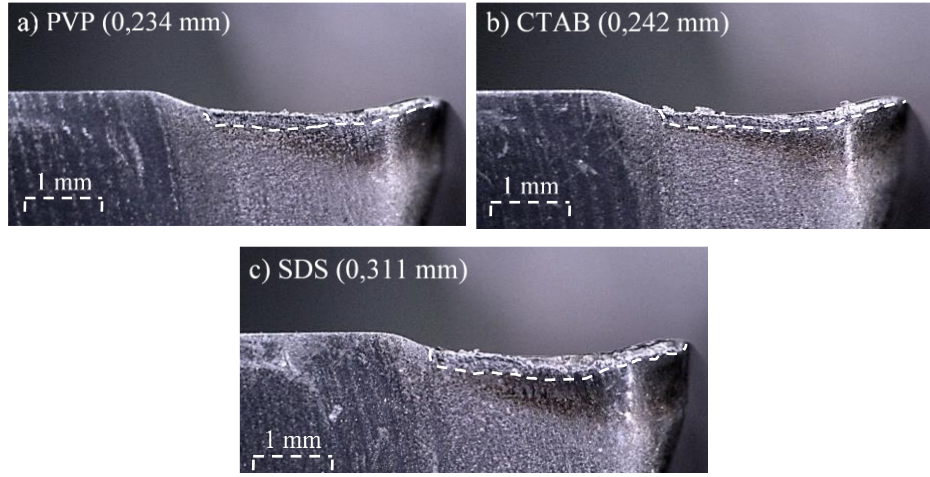
Talaşlı imalat operasyonlarında takım aşınması, zaman ve üretim maliyetleri dikkate alındığında son derece önemli bir parametredir. Kesici takım aşınma mekanizmalarını etkileyen çok sayıda faktör vardır [20]. Sürfaktanların tribolojik performans değerlendirilmesinde yüzey pürüzlülüğü Ra, kesme sıcaklığı T deneyleri Taguchi L9 tasarımına göre gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde surfaktanların aynı parametrelerde Ra ve T için benzer koşulları olmadığından, kesici takım aşınma deneyleri kesme parametrelerinin aritmetik ortalamaları (160 m/dak kesme hızı, 0.15 mm/dev ilerleme) kullanılarak sabit koşullarda yürütülmüştür. Kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin (0.5 mm) sabit alındığı çalışmada 20 dakika süreyle takım ömrü deneyleri yapılmıştır. Her beş dakikalık sürelerde takım serbest yüzey aşınması ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Deneyler PVP, CTAB ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı surfaktan koşulları altında kesici takım ömrü sonuçları (160 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerlemede) (Cutting tool life results under different surfactant conditions (160 m/min cutting speed and 0.15 mm/rev feed))

AISI 329 dubleks paslanmaz çelik malzemeye 20 dakika frezeleme işlemi sonrasında PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşulunda kesici takım 0.234 mm aşınırken, CTAB ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşullarında sırasıyla 0.242 mm ve 0.311 mm aşınmıştır. Bir başka deyişle PVP surfaktanı CTAB ve SDS surfaktanına göre kesici takım serbest yüzey aşınmasını sırasıyla %3.3 ve %27.8 oranlarında azaltmıştır. PVP surfaktanın diğer surfaktanlara göre takım aşınmasında iyi performans sergilemesini Şekil 3 yüzey pürüzlülük Ra sonuçları ve Şekil 5 kesme sıcaklığı T sonuçları destekler niteliktedir. PVP surfaktan koşulu diğer surfaktan koşullarına göre nispeten homojen karışım olmasına [21], kesici takım-talaş-ış parçası ara yüzeylerine daha iyi nüfuz etmesi, çökme ve topaklanmanın düşük mertebelerde seyretmesi [13] Ra, T ve takım aşınma sonuçlarında daha iyi performans göstermiştir sonucuna varılabilir. Şekil 7’de farklı surfaktan koşulları altında kesici takım serbest yüzey aşınma görüntüleri verilmiştir.

Şekil 7 incelendiğinde PVP ve CTAB surfaktan koşullarında serbest yüzey aşınmasının düzgün şekilde devam ettiği görülmektedir. SDS surfaktan koşulunda ise serbest yüzey aşınmasıyla birlikte takımın kopmaların meydana geldiği ve 0.3 mm (ISO 3685’e göre) eşik değerinin aşıldığı görülmektedir. Sürfaktanların aynı parametrelerde Ra ve T için benzer koşulları olmadığından, kesici takım aşınma deneylerinin sabit koşullarda yürütüldüğü bu bölümde; PVP katkılı CuO nanoakışkanı gerek optimizasyon gerekse kesici takım aşınma sonuçlarına göre diğer surfaktanlara göre nispeten daha iyi performans göstermiştir yorumu yapılabilir. Benzer şekilde yapılan çalışmalarda çökme ve topaklanma daha düşük seviyelerde olduğundan surfaktanın tribolojik performansı daha etkili olduğu ifade edilmiştir [13, 21].



Şekil 7. Farklı surfaktan koşulları altında kesici takım serbest yüzey aşınması: a) PVP, b) CTAB, c) SDS (Vc 160 m/dak, f 0.15 mm/dev) (Cutting tool flank wear results under different surfactant conditions: a) PVP, b) CTAB, c) SDS (Vc 160 m/min, f 0.15 mm/rev))

4. GENEL DEĞERLENDİRME (GENERAL CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğinin PVP, CTAB ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkanları kullanarak MMY koşulları altında frezelenmesinde yüzey pürüzlülük Ra, kesme sıcaklığı T ve kesici takım serbest yüzey aşınması performans kriteri olarak seçilmiştir. Deneysel sonuçlarda Ra ve T için Taguchi L9 deney tasarımı, sonuçların etki düzeylerinin belirlenmesinde ise ANOVA analizi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Yüzey pürüzlülüğünde en optimum parametre A2B2C1 (PVP surfaktan katkılı nanoakışkan, 160 m/dak kesme hızı ve 0,10 mm/dev ilerleme) olarak belirlenmiştir. ANOVA analizleri sonucunda ise yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre %81.38 oran ile ilerleme olurken bunu %12.33 oran ile surfaktan ve %3.37 oran ile kesme hızı takip etmiştir.
- Kesme bölgesinde gözlenen sıcaklık sonuçlarına göre PVP surfaktanı, 120 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme (A2B1C2) optimum koşulları oluşturmaktadır. Kesme sıcaklığı üzerinde %80.48 oranla en fazla kesme hızının etkili olduğu bunu ise %16.75 oranla surfaktan koşulları ve %1.24 oranla ilerlemenin takip ettiği ANOVA sonuçlarından elde edilmiştir.
- PVP (0.234 mm) surfaktan koşulunun CTAB (0.242 mm) ve SDS (0.311 mm) surfaktan koşullarına göre kesici takım serbest yüzey aşınmasını sırasıyla %3.3 ve %27.8 oranında azaltmıştır. PVP ve SDS surfaktan koşullarında kesici takım serbest yüzey aşınması düzlemsel olarak devam ederken, SDS surfaktan koşulunda ise kesici takım ömrünü tamamlamıştır.

Genel olarak çalışma değerlendirildiğinde; AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin frezelenmesinde, MQL sistemine eklenen PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkanların yüzey pürüzlülük, kesme sıcaklığı ve takım aşınmasında CTAB ve SDS surfaktanlı nanoakışkanlara göre üstün performans sergilemiştir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda PVP surfaktanın farklı katkı oranlarıyla ve farklı nanopartiküllerle tribolojik performans değerlendirmesi yapılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destek Programı kapsamında desteklenmiştir. Proje Numarası: 2021.06.05.1179.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. B. Aydemir, 17-4 PH çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelik kuvvet dönüştürücü yay elemanlarının iç yapısal özelliklerinin performans üzerine etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, 2003.
2. E. Çelik, Ş. Şirin, T. Kıvak, AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğinin hibrit soğutma/yağlama yöntemleri altında tornalanmasında yüzey kalitesinin incelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9: 929–42, 2021.
3. F. Zucchi, E. Angelini, Influence of heat treatments between 400–750 °C on the corrosion resistance of Duplex 329 stainless steel, British Corrosion Journal, 17 (4):184–187, 1982.
4. I. Lazoglu, Y. Altintas, Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42: 1011–22, 2002.
5. Ç.V. Yıldırım, Ş. Şirin, T. Kıvak, Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde nanopartikül katkılı yağlamanın takım aşınması üzerindeki etkisinin araştırılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7:466–76, 2019.
6. E. Şirin, Ş. Şirin, Investigation of the performance of ecological cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel, Manufacturing Technologies and Applications, 2:75-84, 2021.
7. Ç.V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya, F. Erzincanlı, Determination of MQL parameters contributing to sustainable machining in the milling of nickel-base superalloy waspaloy, Arabian Journal for Science and Engineering, 42: 4667–81, 2017.
8. A. Şencan Çakır, A. Duran, U. Şeker, The effect of different cooling methods to hole quality and tool life in the drilling of AA7075 and AA2024 aluminum alloys, Manufacturing Technologies and Applications, 1: 1-13, 2020.
9. Ç.V. Yıldırım, M. Sarıkaya, T. Kıvak, Ş. Şirin, The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625, Tribology International, 134: 443–56, 2019.
10. Ş. Şirin, Ç.V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya, Performance of cryogenically treated carbide inserts under sustainable cryo-lubrication assisted milling of Inconel X750 alloy, Sustainable Materials and Technologies, 29: e00314, 2021.
11. E. Şirin, Hastelloy X süper alaşımının delinmesinde nanopartikül katkılı kesme yağlarının işleme performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
12. A.K. Sharma, A.K. Tiwari, A.R. Dixit, Rheological behaviour of nanofluids:A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53:779–91, 2016.
13. E. Şirin, T. Kıvak, Ç.V. Yıldırım, Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X, Tribology International, 157:106894, 2021.
14. C.H. Tanmai Sai Geetha, A.K. Dash, B. Kavaya, M. Amrita, Analysis of hybrid nanofluids in machining AISI 4340 using minimum quantity lubrication, Materials Today: Proceedings, 43:579–86, 2020.
15. A Eltaggaz, I Nouzil, I. Deiab, Machining Ti-6Al-4V alloy using nano-cutting fluids: investigation and analysis, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 5: 42, 2021.
16. S.H. Musavi, B. Davoodi, S.A. Niknam, Effects of reinforced nanoparticles with surfactant on surface quality and chip formation morphology in MQL-turning of superalloys, Journal of Manufacturing Processes, 40:128–39, 2019.
17. Y. Zhai, L. Li, J. Wang, Z. Li, Evaluation of surfactant on stability and thermal performance of Al₂O₃-ethylene glycol (EG) nanofluids, Powder Technology, 343:215–24, 2019.
18. Ş. Şirin, Sürdürülebilir imalat için Inconel X 750 süper alaşımının frezelenmesinde yenilikçi soğutma/yağlama tekniklerinin işleme performansı üzerindeki etkileri, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi, 2020.
19. N. Khanna, P. Shah, R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, H. Hegab, Experimental investigation and sustainability assessment to evaluate environmentally clean machining of 15-5 PH stainless steel, Journal of Manufacturing Processes, 56:1027–38, 2020.
20. U. Şeker, M. Günay, İM 322-Kesici takım tasarımı, Ders Notları, Ankara, 2008.
21. W.T. Urmi, M.M. Rahman, K. Kadirgama, D. Ramasamy, M.A. Maleque, An overview on synthesis, stability, opportunities and challenges of nanofluids. Materials Today: Proceedings, 41:30–7, 2021.

AISI 8620 (20NiCrMo2) Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Kriyojenik İşlemin Etkisinin İncelenmesi

Furkan GÜNEY^{1,*} , Menderes KAM¹ 

¹Düzces Üniversitesi, Cumayeri Meslek Yüksekokulu, Düzce, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 28.06.2022

Kabul: 08.08.2022

Anahtar Kelimeler:

AISI 8620 çeliği

Kriyojenik işlem

Mekanik özellikler

Mikroyapı

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, günümüzde imalat, savunma sanayinde, yüksek zorlamalara maruz kalan dişliler, miller, makine ve otomobil parçalarının imalatında yaygın olarak kullanılan AISI 8620 (20NiCrMo2) çeliğinin, gaz sementasyon işlemi yapıldıktan sonra uygulanan derin kriyojenik işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda hazırlanan çelik numunelere sementasyon yöntemi belirlenen sıcaklık-zaman değerlerinde uygulanmıştır. Bu işleme tamamlayıcı bir işlem olan derin kriyojenik işlem -196 °C sıcaklık değerinde ve sonrasında numunelere 200 °C'de 2 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için çekme, mikro-makro sertlik ve darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen bulgular analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kriyojenik işlemin mekanik özellikler üzerinde önemli etkileri olduğunu, kriyojenik işlemlenmiş numunelerin diğer numunelere göre daha yüksek sertlik ve çekme dayanımlarına sahip olduğunu göstermiştir. Derin kriyojenik işlemlenmiş numuneler sementasyon işlemlenmiş numunelere göre çekme dayanımı, kopma dayanımı ve sertlik değerlerinde sırasıyla %7, %8 ve % 3.5'lük, darbe direnci değerinde ise % 2'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca mikroyapısına bakılan numunelerin, kriyojenik işlemin etkisi ile yapının homojen ve ince taneli olarak değiştiği görülmektedir.

Investigation the Effect of Cryogenic Treatment on Mechanical Properties of AISI 8620 (20NiCrMo2) Steel

ARTICLE INFO

Received: 28.06.2022

Accepted: 08.08.2022

Keywords:

AISI 8620 steel

Cryogenic Treatment

Mechanical Properties

Microstructure

ABSTRACT

In this experimental study, the effect of deep cryogenic treatment applied after gas cementation of AISI 8620 (20NiCrMo2) steel, which is widely used in the manufacture of gears, shafts, machinery and automobile parts that are exposed to high stresses, on the mechanical properties. In this context, the cementation method was applied to the steel samples prepared at the determined temperature-time values. Deep cryogenic treatment, which is a complementary process to this process, was applied at a temperature of -196 °C. After the treatment, the samples were tempered at 200 °C for 2 hours. Tensile, micro-macro hardness and impact tests were carried out to determine the mechanical properties of the samples. Findings obtained from these tests were analyzed and compared. The results showed that cryogenic treatment had significant effects on mechanical properties, the cryogenically treated samples had higher hardness and tensile strength than the other samples. It was observed that there was a 7%, 8% and 3.5% increase in the tensile strength, breaking strength and hardness values of the deep cryogenic treated samples compared to the cementation treated samples, and a 2% increase in the impact resistance value. In addition, it is seen that the microstructure of the samples changes as homogeneous and fine-grained with the effect of the cryogenic process.

*Sorumlu yazar, e-posta: furkanguney01@outlook.com

To cite this article: F. Güney, M.Kam, Investigation the Effect of Cryogenic Treatment on Mechanical Properties of AISI 8620 (20NiCrMo2) Steel, Manufacturing Technologies and Applications, 3(2), 22-31, 2022.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1137112>, This paper is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Düşük karbonlu çelik sınıfında yer alan AISI 8620 (20NiCrMo2) sementasyon çeliğine uygulanan ısıt işlemler sayesinde yüzeyde yüksek mukavemet, çekirdekte daha yumuşak ve tok, mekanik özellikleri kazandırılarak kullanım sırasında yüksek zorlanmalara maruz kalan dişliler, miller, makine ve otomobil parçalarının üretiminde kullanılmaktadır [1]. Metalurjik bir yöntem olan ısıt işlemin günümüz endüstrisinde çok önemli bir yeri vardır. Uzun yıllardır, metal malzemelerin dayanımlarını arttırarak mekanik özelliklerini geliştirebilmek için çalışmalar sürdürülmektedir. Metallerin ısıt işlemlerinde kullanılan modern yöntemlerden birisi de kriyojenik (sıfır altı) işlemdir. Bu işlem, malzemelerin -50 °C ile -273 °C sıcaklık aralığında soğutulmuş yapısal değişim geçirinceye kadar bu ortamda bekletilmesi ve sonrasında çıkartılarak oda sıcaklığına kadar ısınması aşamalarını içerir [2].

Malzemelere ısıt işlem yöntemleri uygulanarak çeşitli mekanik özellikler kazandırmak mümkündür. Bu doğrultuda, geleneksel ısıt işlem yönteminin ardından malzemelerin mekanik özelliklerini daha fazla geliştirmek amacıyla soğuk bir ısıt işlem türü olarak uygulanan kriyojenik işlem günümüzde tamamlayıcı bir yöntem olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem, sıfırın altındaki uygulama sıcaklık değerine göre sığ ve derin kriyojenik işlem olarak iki ayrı şekilde malzemeye uygulanmaktadır. Sığ kriyojenik işlem, sertleştirme işleminin ardından malzemeleri -50 °C ile -80 °C sıcaklık aralığında sıvı azot içerisinde bekletme işlemidir. Derin kriyojenik işlem ise sığ kriyojenik işleme göre daha düşük sıcaklık değerlerinde (-125 °C ile -196 °C aralığında) malzemeyi soğutma ve bu sıcaklıklarda bekletilme işlemi olarak bilinmektedir. Düşük sıcaklıklarda uygulanan derin kriyojenik işlem malzeme yapısının tamamında martenzit dönüşümünü oluşturur. Bunun sonucunda yapısındaki sertlik ve tokluk artışı sağlanır. Kriyojenik işlem, kaplama işlemlerinden farklı olarak malzemeye tek bir kez uygulanan ve bütün yapısını iyileştiren kalıcı bir işlemdir [1-3].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; çelik malzemelere uygulanan ısıt işlemler ve kriyojenik işlemin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma vardır [3, 4]. Sementasyon, çeliğe yüksek sıcaklıklarda karbon verilmesinin (emdirilmesi) ardından su verme işlemiyle martenzite dönüşümü sonucu sertleşme kabiliyetidir [5]. Çeliğin sahip olduğu karbon oranı sertleştirilmesinde oldukça önemlidir [6]. Literatür çalışmaları tarandığında sertleştirme işlemi uygulanan AISI 8620 çeliğin mekanik özellikleri incelenmiş ve üzerindeki etkiler belirlenmeye çalışılmıştır [7]. Sharma ve arkadaşları, gaz karbürüzyasyonu yöntemi ile sertleştirilmiş AISI 8620 çeliğin sertlik derinliği ile yorulma özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir [8]. Asi ve arkadaşları, kriyojenik işlemin çelik malzeme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kriyojenik işlemin başlıca etkisinin östenitin martenzite dönüşerek ortaya çıkan sertlik artışının olduğunu, malzemenin yapısındaki değişimlere sebep olarak da oda sıcaklığına gelmesinin ardından temperleme işlemi ile yapıda dağılmış olan karbürlerin çökmesi ve buna bağlı olarak tokluk ve aşınma dayanımlarının birlikte artış gösterdiklerini belirtmişlerdir [9]. Holm yapmış olduğu çalışmada farklı bekletme zamanındaki kriyojenik işlemler malzemelerin sertliği üzerindeki etkilerini incelemiştir [10]. Collins ve Dormer, kriyojenik işlemin paslanmaz çelikler üzerindeki etkilerini incelemişler ve uygulanan işlemin numunelerde sertlik artışı olurken tokluğunda düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir [11]. Li ve arkadaşları, derin kriyojenik işlem ve temperleme işleminin numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini çekme ve sertlik testleri yaparak incelemişlerdir. Numunelere uygulanan işlemlerin sertlik ve çekme dayanımı üzerindeki etkilerini karşılaştırdıklarında kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin mekanik özelliklerinin kayda değer oranda iyileştiğini görmüşlerdir [12]. Koneshlu ve arkadaşları, AISI 4140 çeliğine -40 °C sıcaklık değerinde 24 saat bekletme süreli uyguladıkları derin kriyojenik işlemin etkisini sertlik ve çekme testleri yaparak incelemişlerdir. Derin kriyojenik işlemin malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır [13]. Demirkaya, kriyojenik işlemin AISI 8620 çeliğinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sementasyon uygulaması yapılmış numunelere -145 °C' de 24 saat bekletme süreli derin kriyojenik işlem uygulamıştır. Mikrosertlik ölçümleri ve çekme testleri gerçekleştirmiş ve sonuç olarak kriyojenik işlem uygulanan numunelerde geleneksel ısıt işlem uygulanan numunelere göre olumlu

etkileri olduğunu görmüştür [14]. Kam ve Saruhan, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan AISI 4140 çeliğine geleneksel ısıtma işlemi ve tamamlayıcı olarak farklı bekletme sürelerinde (12, 24, 36 ve 48 saat) -140 °C sıcaklıkta uygulanan kriyojenik işlemin etkisini sertlik ve çekme testleri yaparak incelemişlerdir. Elde edilen verilere göre derin kriyojenik işlemin numunelerin mekanik özelliklerini kayda değer oranda iyileştirdiğini belirtmişlerdir [3]. Genel olarak literatür çalışmaları incelendiğinde AISI 8620 çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde 24 saat bekletme süreli derin kriyojenik işlemin etkisi ile ilgili fazla çalışma olmadığı görülmüştür. Bu nedenle bu deneysel çalışmada, farklı ısıtma süreçleri olarak sementasyon işlemi, 24 saat bekletme süreli derin kriyojenik işlem (-196 °C) ve temperleme işleminin AISI 8620 kalite çeliğinin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, günümüzde önemli endüstriyel çelik kalitesine sahip olan AISI 8620 çeliğinin, ısıtma işlem sürecinde uygulanan sementasyon, tamamlayıcı bir işlem olan 24 saat bekletme süreli derin kriyojenik işlem ve sonrasında uygulanan temperleme işlemlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilen AISI 8620 sementasyon çeliği malzemesinden deneysel çalışmada kullanılmak üzere çekme, sertlik ve darbe testi numuneleri hazırlanmıştır.

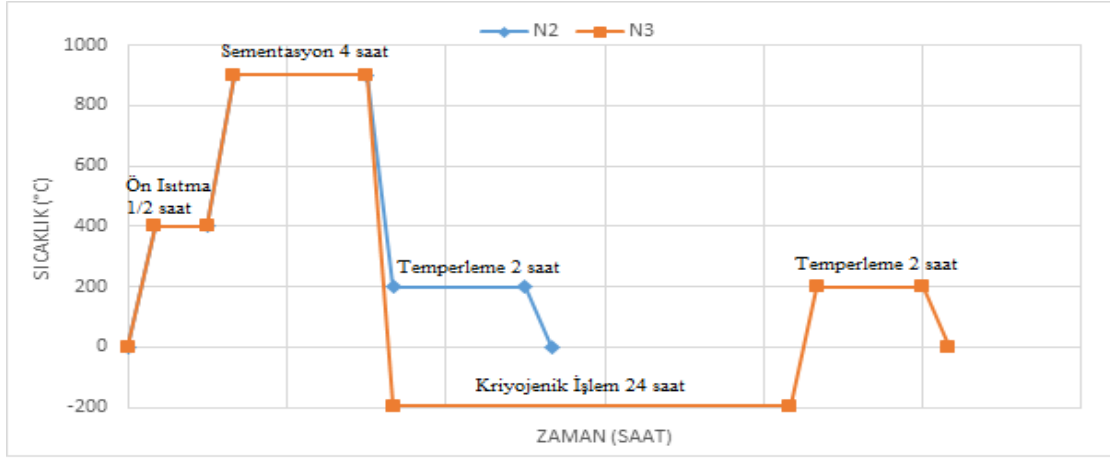
Tablo 1. AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI8620 steel)

Element	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S
(%)	0.19	0.75	0.22	0.47	0.19	0.43	0.005	0.004

Tablo 2’de AISI 8620 çeliğinden hazırlanmış numunelere uygulanan ısıtma işlem süreçleri durumlarıyla birlikte verilmiştir. Numunelerden, bir nolu (N1 kodlu) numune standart olup hiçbir işlem uygulanmamıştır. Diğer numunelere (N2 ve N3 kodlu) ise ilk adım olarak sementasyon işlemi uygulanmıştır. Sementasyon işlemi, %33 H₂, %28 CO, %0.8 CH₄ ile propan (C₃H₈) karışımı karbonlama gaz içeriği kullanılarak atmosfer kontrollü ısıtma işlem fırınında 400 °C sıcaklığa ısıtılarak ½ saat ön ısıtma, 900 °C sıcaklığa ısıtılmasının ardından 4 saat sementasyon işlemi ve ardından sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Sertleştirme işleminin ardından iki nolu (N2 kodlu) deney numunesi 200 °C’de 2 saat temperleme işlemine tabi tutulmuş, üç nolu (N3 kodlu) deney numunesi ise tamamlayıcı bir işlem türü olan derin kriyojenik işlem -196 °C’de 24 saat bekletme süreli olarak uygulanmıştır. Bu işlem sonrasında üç nolu deney numunesi de iki nolu deney numunesi gibi 200 °C’de 2 saat temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 1’de ise test numunelerine uygulanan ısıtma işlem süreçleri grafik olarak verilmiştir.

Tablo 2. AISI 8620 çeliği numunelerin ısıtma işlem süreci

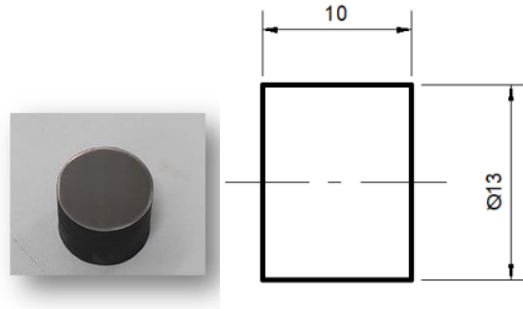
No	Numune Kodu	Uygulanan Isıtma İşlemler	
		Sementasyon (Sıcaklık /süre) Temperleme (Sıcaklık/süre)	Kriyojenik İşlem (Sıcaklık/süre)
1	N1	-	-
2	N2	900 °C / 4 saat	200 °C / 2 saat
3	N3	900 °C / 4 saat	-196 °C / 24 saat 200 °C / 2 saat



Şekil 1. Isıl işlem süreci (Heat treatment process)

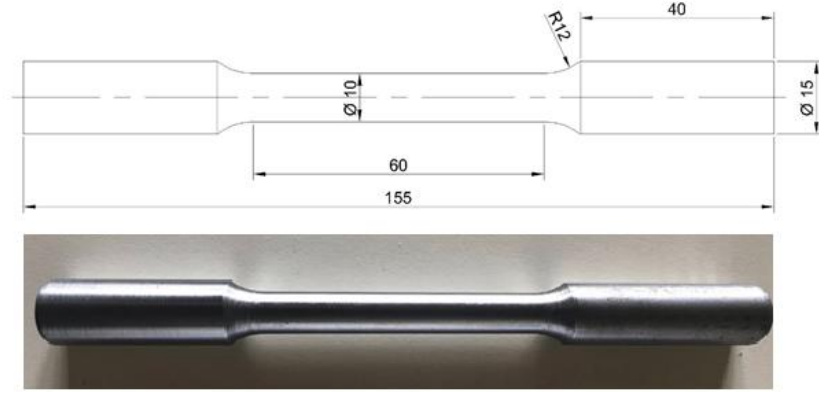
Sertlik ölçme testleri mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için daha fazla tercih edilmektedir. Bunun sebebi bu yöntemin diğer yöntemlere göre numuneler üzerinde daha az hasar oluşturması, kolay uygulanabilir olması ve basit oluşudur. Ayrıca, bir malzemenin sertliği ile o malzemenin mekanik özellikleri arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Bu sayede malzemenin bazı özellikleri hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Örneğin çeliklerde, çekme dayanımı değerleri sertlik değerleri ile orantılı olduğundan dolayı yapılan sertlik testi ile malzemenin dayanım değerleri hakkında da bir fikir elde edilebilir [1-3].

Test numunelerinin yüzey sertlik ölçümleri, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Bulut marka DIGIROCK model sertlik ölçme cihazında, konik elmas uca ön yük olarak 10 kg daha sonra 140 kg yük yüklenerek batma derinliği ISO 6508-2 standartlarına uygun olarak makro Rockwell (HRC) sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikro Vickers (Hv) sertlik ölçümleri ise aynı bünyede bulunan Metkon marka DUROLİNE-M model sertlik ölçme cihazda ASTM 2017 standartlarına uygun olarak kare piramit baticı uca 10 saniye boyunca 300 g yük uygulanarak ölçülmüştür. Şekil 2’de ise sertlik ölçme numunesi ve ölçüleri gösterilmiştir. Sertlik testlerinde her bir numuneye 6 farklı ölçüm yapılmış ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak numunenin ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir.



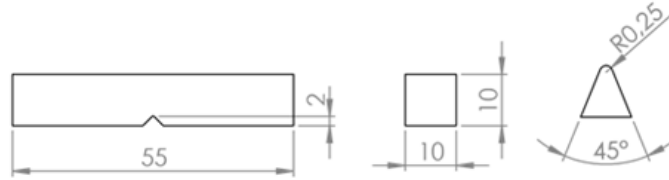
Şekil 2. Sertlik ölçme numuneleri (Çap 13x10 mm) (Hardness testing samples (Dia. 13x10 mm))

Çekme testleri TS 138A standardına göre Şekil 3’te verilen ölçülerde her numuneden üç adet olmak üzere toplam 9 adet test numunesi hazırlanmıştır. Çekme testleri 2 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan 50 ton kapasiteli BESMAK marka çekme test cihazında yapılmıştır.

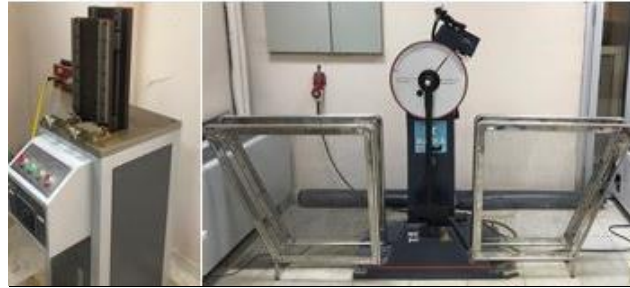


Şekil 3. Çekme testi numunesi ve teknik resmi (Tensile test sample and technical drawing)

Darbe testleri, derin kriyojenik işlemin etkisini belirlemek için TS EN ISO 148-1 standardına uygun olarak Şekil 4’te verilen ölçülerde her numuneden üçer adet hazırlanmıştır. Tokluk değerinin bir ölçüsü olan darbe direnci değerleri, oda sıcaklığında v çentikli Charpy darbe testi ile belirlenmiştir. Numuneler üzerine açılan “V” çentiğinin açısı 45° ve derinliği 2 mm olarak Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan çentik açma cihazında açılmış ve aynı merkezde bulunan Charpy darbe testi düzeneğinde testler gerçekleştirilmiştir. Çentik açma ve Charpy darbe test cihazları Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Darbe testi numuneleri (Impact test specimens)



Şekil 5. Çentik açma ve Charpy darbe cihazları (Notching and Charpy impact devices)

Isıl işlem sonrasında test numunelerinin yapılarındaki morfolojik değişimleri gözlemleyebilmek amacıyla Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan SEM Quanto FEG 250 model cihaz (FEI, Hollanda) ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 2’deki ölçülerde hazırlanmış olan numunelere sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 derece zımpara kâğıtları kullanılarak zımparalama işlemi yapılmıştır. İşlem sonrasında 1 μm elmas pasta ile parlatma işlemi uygulanmıştır. Dağlama işlemi %2 nital (HNO_3) çözeltisi kullanılarak yapılmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

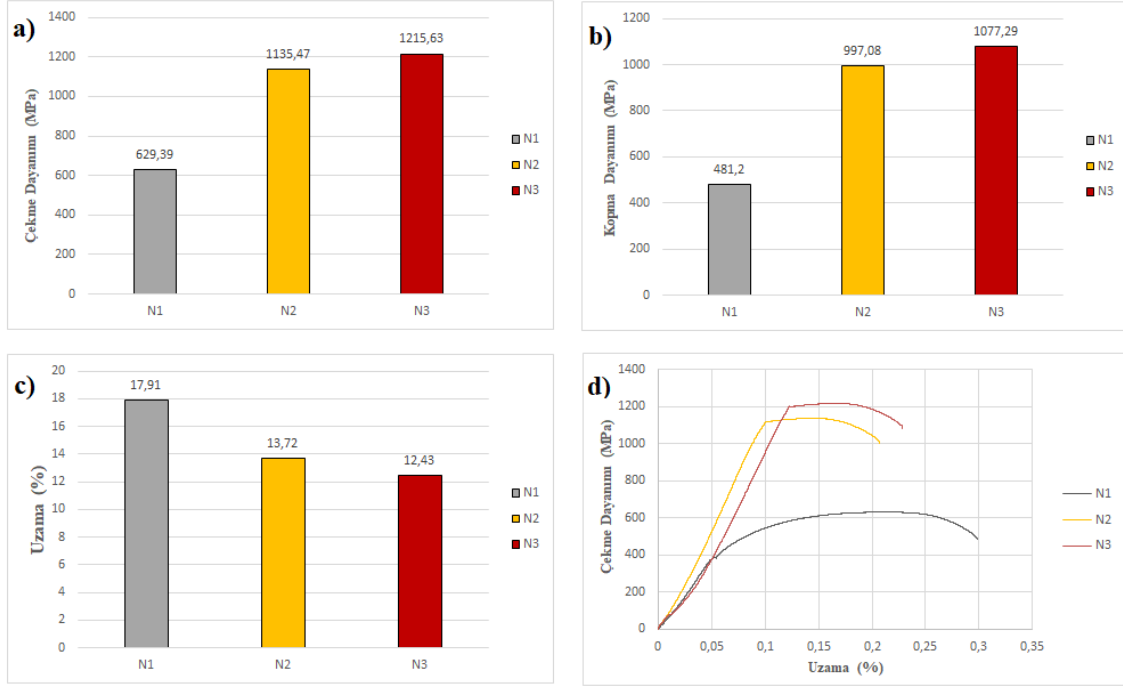
Bu çalışmada, AISI 8620 çeliği test numunelerine uygulanan ısıl işlemler sonrasında sertlik ölçme cihazında sertlik ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin ısıl işlem durumuna göre ortalama sertlik değerleri Tablo 3’te verilmiştir. Ortalama sertlik değerlerine baktığımızda sırasıyla en yüksek değerler N3, N2 ve N1 olduğu görülmektedir. N3 numunesinin en yüksek sertlik değerine sahip olmasının nedeni, sementasyon işleminin ardından derin kriyojenik işlem uygulanması ve bununla

birlikte malzemenin mikro yapısında gerçekleşen östenit fazının martenzit fazına dönüşümü ile ilişkilendirilmiştir [8, 9, 14].

Tablo 3. Numunelerin ortalama sertlik değerleri verileri (Average hardness values of the samples)

Numune Kodu	Rockwell sertliği (HRC)	Vickers sertliği (Hv)
N1	20	236.25
N2	60	709.30
N3	62	734.13

AISI 8620 çeliği numunelere uygulanan ısıtma işlemlerinin mekanik özellikleri (çekme dayanımı, kopma dayanımı, yüzde uzama) üzerinde etkisini incelemek için çekme testleri yapılmıştır. Çekme testleri her bir numune kodu için üç kez yapılmış ve verilerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Numunelerin elde edilen mekanik özellik (çekme dayanımı, kopma dayanımı, yüzde uzama, gerilim-uzama grafiği) verileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen çekme dayanımı verilerine göre sırasıyla en yüksek değerler N3, N2 ve N1 olmak üzere elde edilen sertlik değerleri ile doğru orantılı olduğu görülmektedir [1]. Derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin (N3) diğerlerine kıyasla çekme dayanımlarının daha yüksek değerlerde çıktığı görülmüştür. Ayrıca, derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemi uygulanmış numunenin sementasyon işlemi uygulanmış numuneye göre çekme dayanımı ve kopma dayanımında sırasıyla % 7, % 8 artış olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki en yüksek çekme dayanımı değerinin derin kriyojenik işlem uygulanmış numunede olmasının nedeni, malzemenin iç yapısında bulunan yumuşak yapıya östenit fazının kriyojenik işlemle birlikte sert yapıya martenzit fazına dönüşmesi ve oluşan karbür tanelerinin düzenli dağılımıyla malzemede homojen bir iç yapının oluşmasıdır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde derin kriyojenik işlemle birlikte malzemelerin mekanik özelliklerinde olumlu yönde iyileşmelerin olduğu görülmüştür [15]. Gu ve arkadaşları malzemeye -196 °C' de 24 saat bekletmeli olarak uyguladıkları derin kriyojenik işlemin çekme dayanımına %9.34 oranında olumlu etkisinin olduğunu görmüşlerdir [16]. Özden ve Anık, geleneksel ısıtma işlem uyguladıkları 52CrMoV4 çeliğine tamamlayıcı olarak -196 °C'de 24 saat süreli derin kriyojenik işlem uygulamışlardır. Sonuç olarak kriyojenik işlem görmüş numunelerin çekme dayanımlarında geleneksel ısıtma işlemli numunelere kıyasla % 7'lik olumlu bir artışın yaşandığını belirtmişlerdir [21]. Bu çalışmada elde edilen çekme testi sonuçlarının incelenen literatür verilerine yakın değerlerde olduğu görülmüştür [3,17-20].



Şekil 6. Çekme testi verileri; a) Çekme dayanımı, b) Kopma dayanımı, c) Yüzde uzama, d) Gerilme-uzama grafiği (Tensile test data; a) Tensile strength, b) Rupture strength, c) Percent elongation, d) Stress-strain graph)

Şekil 6'da verilen yüzde uzama değerlerine bakıldığında en düşük değer N3 numunesinde sonrasında N2 ve N1 numunelerinde olduğu görülmüştür. Uzama değerleri çekme dayanımlarına göre ters orantılı değişim göstermiştir. Bu durum malzemelerin sünekliğine bağlıdır [1, 3, 17-19]. Standart olan N1 numunesi diğer numunelere göre daha sünek bir yapıya sahip olduğu için daha yüksek uzama değerinde ve daha düşük çekme dayanımı değerinde kopmuştur. Derin kriyojenik işleme birlikte sertlik değeri artan N3 numunesi doğal olarak daha büyük dayanım değerinde kopmuştur ve bu duruma ters orantılı olarak daha az miktarda uzamaya maruz kalmıştır [1]. Şekil 7'de ise çekme testi numunelerine ait kopma bölgeleri gösterilmiştir. Numunelerin kopma bölgeleri görünüşleri de çekme dayanımı, kopma dayanımı ve yüzde uzama verilerini destekler nitelikte olduğu görülmüştür.



Şekil 7. Numunelerin kopma bölgeleri (The rupture regions of the samples)

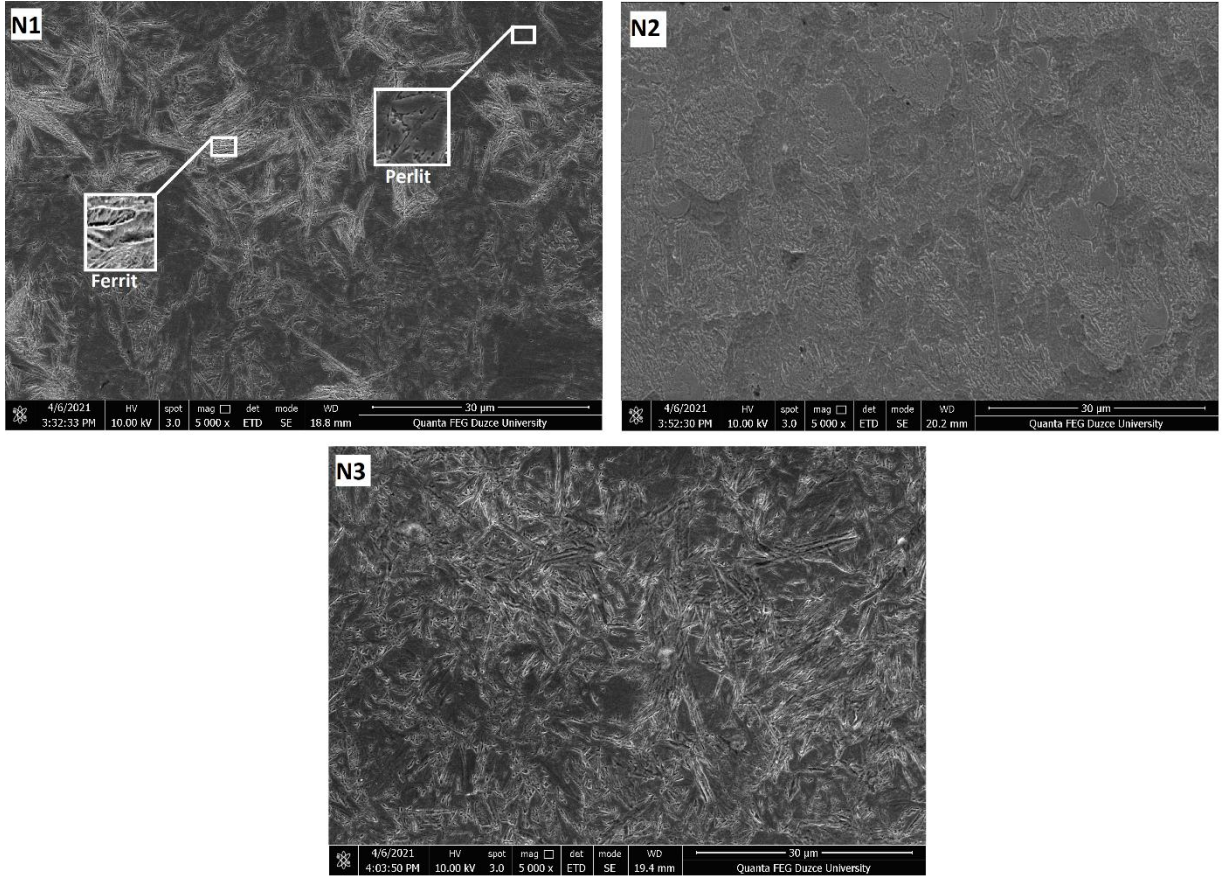
Numunelere uygulanan Charpy darbe testi sonucunda elde edilen darbe direnci değerleri grafik olarak Tablo 4'te verilmiştir. Bu verilere göre, en yüksek değer sünek olmasından dolayı standart (N1) numunede olduğu görülmüştür. İşlem görmüş numunelere bakıldığında, derin kriyojenik işlem uygulanmış N3 numunesinin sementasyon uygulanmış N2 numunesine kıyasla darbe direnci değerinde bir miktar artış yaşandığı görülmektedir. Bu durum derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemlerinin etkisi ile daha homojen bir yapının sağlanması ile ilişkilendirilebilir [15, 16]. Dhokey ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, kriyojenik işlemin etkisi ile sertlik ve darbe enerjisi

değerlerini birbirleriyle orantılı şekilde arttığını görmüştür [22]. Ayrıca, literatürde yapılan çalışmalarda derin kriyojenik işlemin numunelerin darbe direncinde iyileşmeler sağladığı bilinmektedir [9-12, 13, 17-19].

Tablo 4. Darbe direnci değerleri (Impact resistance values)

Numune Kodu	Darbe Direnci (kJ/m ²)
N1	901.25
N2	781.25
N3	796.87

Test numunelerinin ısıtılma işlem öncesindeki ve sonrasındaki mikroyapı görüntüleri Şekil 8’de X5000 büyütme olarak verilmiştir. Bu kapsamda numunelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, N1 numunesinde görülen koyu kısımlar perlit, beyaz kısımlar ferrittir ve belli bölgelerde yoğunluklu olarak bir arada görülmektedir. Sementasyon işlemi ile birlikte N2 numunesinde ince karbürlü bir yapının oluştuğu ve sementasyon sonrasında uygulanan kriyojenik işlem ile N3 numunesinde iğnemesi martensitik bir yapı oluşmuştur. Homojen olarak dağılmış ince taneler sertlik değerlerini arttırması ve kalıntı östenit oranını düşürmesi ile böylece tok bir yapı oluşumu sağlayacaktır [23, 24].



Şekil 8. Numunelere ait mikroyapı görüntüleri (Microstructure images of samples)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AISI 8620 çeliğine uygulanan sementasyon işlemi ve derin kriyojenik işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çeliğe sementasyon işlemi, derin kriyojenik işlem ve sonrasında temperleme işlemine tabi tutulmuştur. İşlemler sonrasında mekanik özelliklerin belirlenebilmesi amacıyla bütün test numunelerine sırasıyla makro-mikro sertlik ölçme, çekme ve darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, uygulanan ısıtılma işlemlerinin numunelerin mekanik özelliklerine önemli

derecede olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir. Derin kriyojenik işlemin, belirli oranda sertliği artırdığı görülmüştür. En yüksek sertlik artışı ve çekme dayanımı değerlerinin derin kriyojenik işlem uygulanan N3 numunesinde olduğu görülmüştür. Derin kriyojenik işlem uygulanmış olan numunelerde sertlik artışları ve çekme dayanımlarında önemli oranda kayda değer iyileşmelerin olduğu gözlenmiştir. Derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemi uygulanmış numunenin sementasyon işlemi uygulanmış numuneye göre çekme dayanımı, kopma dayanımı, sertlik değerlerinde sırasıyla %7, %8 ve %3.5'lük darbe direnci değerinde ise %2'lik bir artış olduğu gözlenmiştir. Ayrıca mikroyapısına bakılan numunelerin, kriyojenik işlemin etkisi ile yapının homojen ve ince taneli olarak değiştiği görülmüştür. Bu doğrultuda mekanik özellikleri iyileştirilen AISI 8620 çeliği, endüstride yüksek dayanımlara sahip olarak daha uzun ömürlerde kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. F. Güney, AISI 8620 çeliğinin farklı şartlar altındaki mekanik özellikleri, korozyon direnci ve mikroyapılarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye, 2021.
2. F. Güney, M. Kam, AISI 8620 Çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde kriyojenik işlemin etkisi üzerine bir değerlendirme, 6. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, 20-21 Kasım 2021, İstanbul.
3. M. Kam, H. Saruhan, Derin kriyojenik işlemin farklı bekletme sürelerinin AISI 4140 (42CrMo4) çeliğin mekanik özelliklerine etkisi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(3): 553-564, 2018.
4. D. Senthilkumar, I. Rajendran, Influence of shallow and deep cryogenic treatment on tribological behaviour of En 19 steel, International Journal of Iron and Steel Research, 18(5): 53-57,2011.
5. D. Senthilkumar, I. Rajendran, Optimization of deep cryogenic treatment to reduce wear loss of 4140 steel, Materials and Manufacturing Processes, 27(5): 567-572, 2012.
6. A. Tekin, Çelik ve Isıl İşlemi, Bofors El Kitabı, Hakan Ofset, İstanbul, 1984.
7. B. Uluğ, Sıfırlı / kriyojenik ısıtma işleminin 100Cr6 ve 8620 kalite çeliklerin özellikleri üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.
8. S.K. Sharma, S.A. Rizvi, R.P. Kori, Optimization of process parameters in turning of AISI 8620 steel using Taguchi and grey taguchi analysis, Journal of Engineering Research and Application, 4(3): 51-57, 2014.
9. O. Asi, A.Ç. Can, J. Pineault, M. Blassel, The relationship between case depth and bending fatigue strength of gas carburized SAE 8620 steel, Surface & Coatings Technology, 201(12): 5979-5987, 2007.
10. T. Holm, AGA report: Cryotreatment – State of the art, 1997.
11. D.N. Collins, J. Dormer, Deep cryogenic treatment of a D2 cold work tool steel, Heat Treatment of Metals, 3: 71-74, 1997.
12. S. Li, X. Yuan, W. Jiang, H. Sun, J. Li, K. Zhao, M. Yang, Effects of heat treatment influencing factors on microstructure and mechanical properties of a low-carbon martensitic stainless bearing steel, Materials Science and Engineering: A, 605: 229-235, 2014.
13. M. Koneshlu, K. Meshinchi, F. Khomamizadeh, Effect of cryogenic treatment on microstructure mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel, Cryogenics, 51(1): 55-61, 2011.
14. Z. Demirkaya, Sementasyon yapılan SAE 8620 kalite çeliğe kriyojenik soğutma uygulaması yapılarak kalıntı gerilmelerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2014.
15. D. Senthilkumar, I. Rajendran, M. Pellizzari, J. Siiriainen, Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel, Journal of Materials Processing Technology, 211(3): 96-401, 2011.
16. K. Gu, H. Zhang, B. Zhao, J. Wang, Y. Zhou, Z. Li, Effect of cryogenic treatment and aging treatment on the tensile properties and microstructure of Ti-6Al-4V alloy, Materials Science and Engineering: A, 584: 170-176, 2013.
17. M. Kam, Effects of deep cryogenic treatment on machinability, hardness and microstructure in dry turning process of tempered steels, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 235(4): 927-936, 2021.
18. M. Kam, H. Saruhan, Analysis of vibration damping ability of deep cryogenic treated AISI 4140 steel shaft supported by rolling element bearings, Materials Testing, 63(8): 742-747, 2021.

19. M. Kam, H. Saruhan, U. Kabasakaloğlu, T. Guney, Vibration damping capacity of a rotating shaft heat treated by various procedures, *Materials Testing*, 63(10): 966-969, 2021.
20. M. Kam, U. Kabasakaloğlu, Surface roughness analysis of cryo-treated and tempered steels in cylindrical grinding operation, *Surface Review and Letters*, 28(11): 2150107, 2021.
21. R.C. Özden, M. Anık, Effects of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of 52CrMoV4 steel, *UDCS'19 Fourth International Iron and Steel Symposium*, 4-6 April 2019.
22. N.B. Dhokey, A.R. Hake, V.T. Thavale, R. Gite, R. Batheja, Microstructure and mechanical properties of cryotreated SAE8620 and D3 steels, *Current Advances in Materials Sciences Research*, 1(1): 23-37, 2014.
23. B. Pekgöz, S. Sarıdemir, İ. Uygur, Y. Arslan, The effects of carburisation process on the hardness values and microstructure for steels, *Electronic Journal of Machine Technologies*, 10(1): 19-24, 2013.
24. N.B. Dhokey, A. Hake, S. Kadu, I. Bhoskar, G.K. Dey, Influence of cryoprocessing on mechanism of carbide development in cobalt-Bearing high-speed steel (M35), *Metall and Mat Trans A*, 4(3): 1508-1516, 2014.

Rene 41 Süper Alaşımının Tornalama Yöntemiyle İşlenebilirliğinin Araştırılması

Fatih MEYDANERİ^{1,*} , Gültekin UZUN² 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 08.08.2022

Kabul: 26.08.2022

Anahtar Kelimeler:

İşlenebilirlik

Rene 41

Takım aşınması

Yüzey pürüzlülüğü

Kesme kuvveti

ÖZET

Süper alaşımlar yüksek sıcaklığa karşı direnci olan ve yüksek sürünme dayanımları ile korozyona karşı direncinin yüksek olması sebebiyle uzay ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada Nikel esaslı Rene 41 süper alaşımının tornalanması sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri ve takım aşınması değerlendirilmiştir. Kesici takım olarak Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemi ile TiAlN kaplanmış sementit karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Çalışmada kesme parametreleri olarak beş farklı kesme hızı (15, 20, 30, 40, 45 ve 60 m/dak), sabit kesme derinliği (1 mm) ve sabit ilerleme hızı (0.10 mm/dev) seçilmiştir. Çalışma neticesinde artan kesme hızlarının kesme kuvvetini düşürdüğü görülmüştür. En yüksek kesme kuvvetleri (Fc) ve ilerleme kuvveti (Ff) için 20 m/dak kesme hızında oluşurken, radyal kuvvet (Fr) için 15 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. Üç kuvvette de 45 m/dak kesme hızına kadar kuvvetlerin düşüş eğilimi sergilediği görülmektedir. En iyi yüzey pürüzlülük değeri en düşük kesme hızında elde edilmiştir. 15 m/dak kesme hızında ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri 0.996 µm ölçülürken, 60 m/dak kesme hızında %98 artış göstererek 1.97 µm ölçülmüştür. Genel eğilime bakılacak olursa 15 m/dak kesme hızından 45 m/dak kesme hızına kadar %31'lik artışın olduğu görülmektedir. Kesme kuvvetlerinde de olduğu gibi kesme hızının 60 m/dak kesme hızına çıkışı ile yüzey pürüzlülüğünün aşırı artması söz konusu olmuştur.

Investigation Machinability of Rene 41 Superalloy in Turning Method

ARTICLE INFO

Received: 08.08.2022

Accepted: 26.08.2022

Keywords:

Machinability

Rene 41

Tool wear

Surface roughness

Cutting force

ABSTRACT

Superalloys are widely used in the aerospace industry due to their high temperature resistance, high frictional strength and high corrosion resistance. In this study, the cutting forces, surface roughness and tool wear obtained as a result of turning of Nickel-based Rene 41 super alloy were evaluated. TiAlN coated cemented carbide cutting tools were used as cutting tools. Five different cutting speeds (15, 20, 30, 40, 45 and 60 m/min), constant cutting depth (1 mm) and constant feed rate (0.10 mm/rev) were selected as cutting parameters in the study. As a result of the study, it was observed that increasing cutting speeds decreased the cutting force. While the highest cutting forces occurred at 20 m/min cutting speed for Fc and Ff, it was measured at 15 m/min cutting speed for Fr. It is seen that the forces exhibit a decreasing trend up to 45 m/min cutting speed in all three forces. The best surface roughness value was obtained at the lowest cutting speed. While the average surface roughness Ra value was measured as 0.996 µm at a cutting speed of 15 m/min, it was measured as 1.97 µm with an increase of 98% at a cutting speed of 60 m/min. If we look at the general trend, it is seen that there is a 31% increase from 15 m/min cutting speed to 45 m/min cutting speed. As with the cutting forces, the surface roughness increased excessively with the increase of the cutting speed to 60 m/min.

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

To cite this article: F. Meydaneri, G. Uzun, Investigation Machinability of Rene 41 Superalloy in Turning Method, Manufacturing Technologies and Applications, 3(2), 32-38, 2022.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1159336>, This paper is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek sıcaklık, korozyon ve yoğun aşınma mekanizmalarının mevcut olduğu şartlarda metal ve metal alaşımlarının, istenilen özellikleri sağlayamadığı noktalarda farklı malzeme grupları tercih edilmektedir. Süper alaşımlar ise bu grupların başında gelmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte; uygun teknik özelliklere sahip ve ekonomik olarak tercih edilebilir düzeyde olan malzemelerin elde edilmesi için mekanik özellikler açısından yüksek performans sergileyebilen, yüksek sıcaklıkta aşınma ve korozyona dayanıklı süper alaşımların üretimine ihtiyaç duyulmuştur. Malzeme bilimindeki gelişmeler havacılık ve uzay alanında uçuş menziline önemli oranda artış sağlamıştır. Mekanik ve termal gereksinimler sonucu, uçak motorunda kullanılan parçalar için nikel, titanyum, kobalt ve demir esaslı alaşımlar kullanılmaktadır. Nikel esaslı alaşımlar havacılık ve uzay uygulamalarında en çok tercih edilen malzemeler arasındadır. Jet motorlarında kullanılan sıcak bölge elemanları gibi yüksek sıcaklıklarda ciddi ölçüde gerilmelere maruz kalan malzemelerde yaygın olarak kullanılan çökelme sertleşmeli bir nikel esaslı süper alaşımı olan Rene 41, General Electric firması tarafından geliştirilmiştir. Bu alaşımın 980 °C'ye kadar varan yanma gazlarına çok iyi direnç sağlaması aşınmaya ve oksidasyona oldukça dirençli bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Uçak motorlarında türbin gövdeleri, tekerlekler, türbin kanatları, artçıl yakıcı (afterburner) parçaları, civatalar ve bağlantı elemanları malzemesi olarak tercih edilmektedir. Rene 41 her ne kadar yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik özellikler ve yüksek kimyasal kararlılığa sahip olsa da işlenebilirlik açısından zor bir malzemedir. Talaşlı imalat işlemlerinde yüksek yüzey kalitesi elde etmek amacıyla ısıl işlem uygulanmış veya yaşlandırma operasyonu gerçekleştirilmiş alaşımlar tercih edilir. Rene 41 alaşımı işleme açısından Inconel 718'le benzer özelliklere sahiptir fakat işlenebilirlik özellikleri Inconel 718 alaşımına kıyasla daha zordur [1,2].

Nikel esaslı süper alaşımlar kalite ve üretim gereksinimlerini sağlayabilmek bakımından işlenebilirliği en zor süper alaşımlardandır. Kötü işlenebilirlik özelliğinin nedenleri yüksek ısıl sertlik, deformasyon sertleşmesi, sert karbür taneli yapı, yüksek difüzyon aşınma oranı, talaş yapışması, sürekli talaş oluşumu ve ısıl iletkenliğin düşük olması gibi sıralanabilir [3,4]. Tüm bu sebepler nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde kullanılacak kesici takım malzemelerinin işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesini mecburi kılmaktadır.

Sementit karbür takımlar nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu takımlar tornalama, delme gibi sürekli talaş kaldırma işlemlerinde yoğun olarak tercih edilmektedir. Kesici takım teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, bazı seramik takım malzemeleri (Al_2O_3-TiC), Si_3N_4 silikon nitrit esaslı seramikler ve whisker takviyeli alüminyum oksit seramikler (%25 SiCw kapsarlar), nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde karbür takımlara nazaran daha çok kullanılmaktadırlar [5,6].

Kısa takım ömrü ve iş parçasının sert olması nikel esaslı süper alaşımların işlenebilirliğinde en önemli iki faktördür. Talaş kaldırma işlemi sırasında yüzeyde gerilim değişimleri meydana gelebilir ve bu da işlenen malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerinin (gerilme-korozyon gibi) değişmesine neden olur. Dolayısıyla işlenen parçanın yüzey bütünlüğünün korunması büyük önem arz etmektedir. Nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde oldukça düşük takım ömürleri ile karşılaşmaktadır. Yeterli takım ömrü elde edebilmek amacıyla işleme yöntemi, takım malzemesi, takım geometrisi, kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği gibi parametrelerin uygun seçilmesi gerekmektedir [3].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, Inconel 718 talaşlı imalat özellikleri açısından havacılık ve uzay alanında %75, jet motorlarında ise %50 oranında ortalama kullanım değerleri ile daha çok tercih edilen bir malzemedir [7]. Son yıllarda ise Rene 41 süper alaşım kullanımı kayda değer miktarda artmış olup, etkin üretim yöntemlerinin oluşturulması için işleme özelliklerinin iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Tali ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Rene 41 malzemesinin tornalanması sırasında oluşan yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını incelemiştir. Deneylerde kesme ve ilerleme hızı, değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak; yüzey pürüzlülüğünde ilk olarak ilerleme hızının büyük bir etken olduğu ve yüksek ilerleme hızı değerlerinin yüzey kalitesinde düşmeye neden olduğunu belirtmiştir. Kesme hızının, yüzey

pürüzlülüğünü belirlemede etken bir faktörü olduğunu ve kesme hızının artmasıyla birlikte yüzey kalitesinde azalma ihtimali olduğunu öngörmüşlerdir. Kesici takımın aşınma mekanizmasının, kesme ve ilerleme hızının artmasıyla doğru orantılı olduğunu vurgulamışlardır [8].

Yapılan literatür incelemesi sonucunda Rene 41 malzemesinin mikro yapısı, aşınma direnci, kaynakla birleştirilebilmesi gibi özellikleri üzerine çalışmaların daha yoğun olarak araştırıldığı görülmektedir [9-11]. Nikel esaslı süper alaşımlar üzerine çalışmaların çoğunluğunun Inconel 718 üzerine olduğu görülmüştür [12-14]. Rene 41 süper alaşımının işlenebilirliği hakkında çalışmaların çok az olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, Rene 41 süper alaşımının tornalanması işleminde, iş parçasının yüzey kalitesi, kesme kuvveti ve kesici takımın aşınma davranışı incelenmektedir. Malzemenin işlenebilirlik davranışını ve Takım ömrünü etkileyen parametre olması nedeniyle [15-17] kesme hızı değişken parametre olarak kullanılmış olup, etkileri tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda Rene 41 malzemesinin işlenebilirlik parametrelerinin kesme hızına bağlı değişiminin irdelenmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme (Material)

Deneylerimizde, endüstride yaygın olarak uygulanan bir Rene 41 süper alaşımı kullanılmıştır. Ø50 × 400 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. Kimyasal bileşim ve mekanik özellikler ile ilgili olarak, bunlar Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Yüksek sertlikleri nedeniyle, bu malzemelerin işlenmesi çok zordur, bu da onları havacılık, otomotiv ve askeri alanlar gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun hale getirir.

Tablo 1. Rene 41 süper alaşımının kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of Rene 41 super alloy)

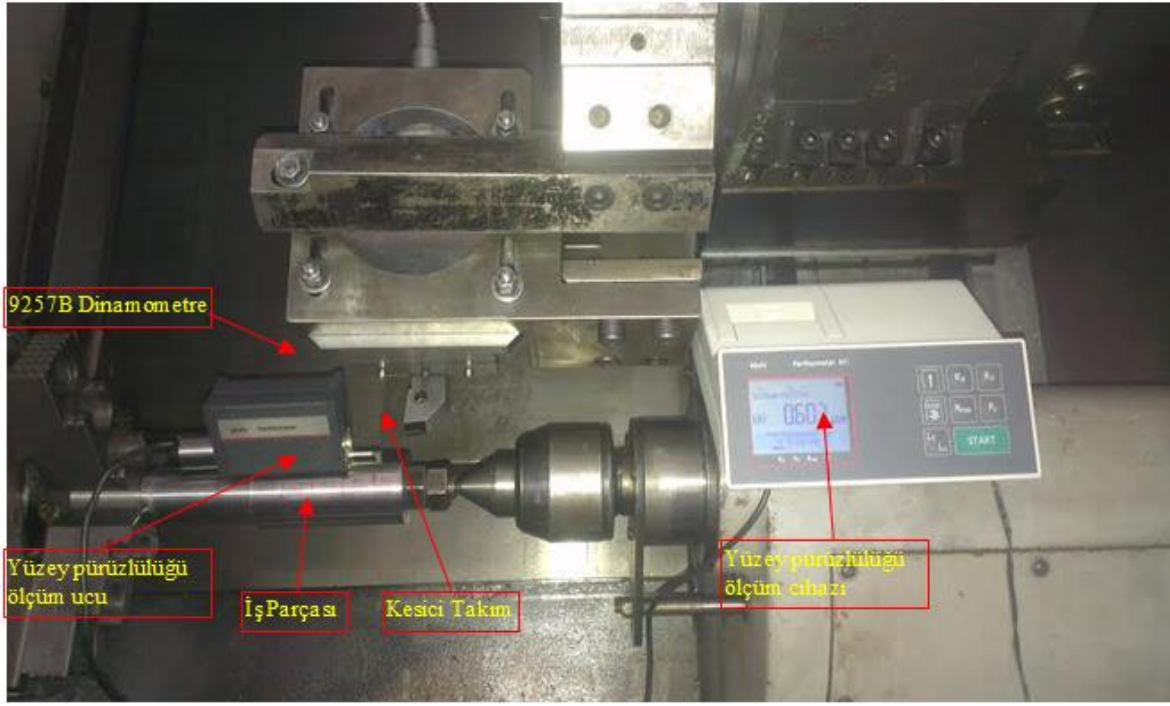
Element %	Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Fe	Al	C
	53.86%	18.53%	10.52%	9.53%	3.24%	2.37%	1.53%	0.062%
	Si	Zr	Mn	B				
	0.05%	0.03%	0.01%	0.006%				

Tablo 2. Rene 41 süper alaşımının teknik özellikleri (Technical characteristics of Rene 41 super alloy)

Özellik	Birim	Rene 41
Yoğunluk (20°C)	(g/cm ³)	8.25 g/cm ³
Erieme sıcaklığı	(°C)	1345°C
Brinel sertlik değeri	(HB)	334
Akma gerilmesi	(MPa)	579.2 MPa
Çekme gerilmesi	(MPa)	710.2
Elastikiyet modülü	(GPa)	1.65 x10 ⁵
Uzama katsayısı	%	11
Termal Genleşme Katsayısı	µm / m°C	15.5 µm
Termal İletkenlik	kcal / (hr.m. °C)	121.4

2.2. Takım Tezgahı ve Ölçüm Cihazları (Machine Tool and Measuring Device)

Talaşlı imalat testleri, maksimum gücü 10 kW'a eşit olan ve devir sayısı 50 ile 3500 dev/dk arasında olan JOHNFORD T35 endüstriyel tip CNC torna tezgâhında yapılmıştır (Şekil 1). Kuru kesme işlemi sırasında, üç ortogonal kesme kuvvetini (Fx, Fy, Fz) ölçmek için uygun yük yükseltici ile takım tutucu altındaki Kistler marka 9257B tipi üç bileşenli piezoelektrik dinamometre kullanılmıştır. Bu, üç kesme kuvvetinin doğrudan ve sürekli olarak kaydedilmesini ve eşzamanlı grafik olarak görselleştirilmesini sağlamaktadır (Şekil 1). Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için "MahrPerthometer M1" yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kesici takımların takım aşınması resimleri, 50X büyütme oranında AM413ZT Polarize Dijital Mikroskop kullanılarak çekilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental setup)

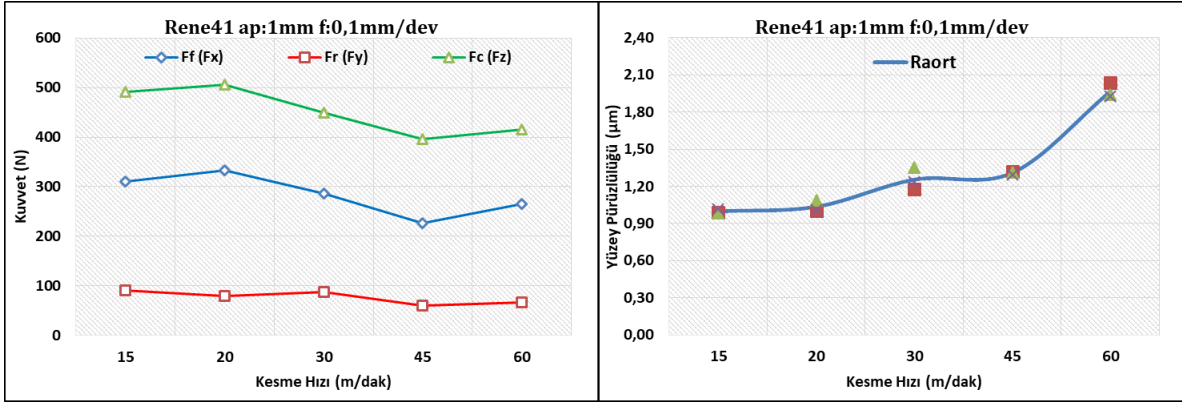
2.3. Kesme Parametreleri ve Kesici Takım (Cutting Parameters and Cutting Tool)

İşleme parametreleri ile ilgili olarak kesme hızları 15, 20, 30, 45 ve 60 m/dak, kesme derinliği sabit 1 mm, ilerleme hızı 0.10 mm/dev de 20 mm kesme boyunda gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, üretici firmalar tarafından tavsiye edilen ISO 3685 standardı dikkate alınarak seçilmiştir. Kesme işlemi sırasında, işleme testleri, Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemi ile TiAlN kaplanmış KCU10 kalite CNMG 120404 MS kodlu kesici takım ile gerçekleştirilmiştir. Takım tutucu olarak DCLNR 2525 M12 kodlu kater kullanılmıştır.

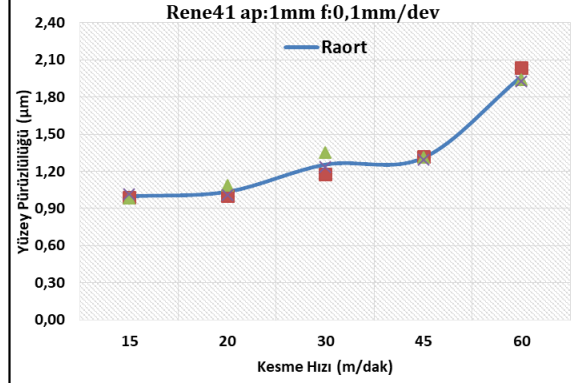
2. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada Nikel esaslı Rene 41 süper alaşımının tornalanması sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri ve takım aşınması için kritik kesme hızı belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen kesme hızına bağlı olarak kesme kuvveti değerleri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde kesme teorisine göre bir kuvvet oluşumu gözlenmektedir. Radyal kuvvet F_r en düşük kuvvet bileşeni olarak oluşurken, ilerleme kuvveti F_f yaklaşık olarak F_r kuvvetinin üç katı olarak oluşmuştur. F_r 'ye göre esas kesme kuvveti ise yaklaşık beş katı olarak ölçülmüştür. Bu durum talaş kesitine bağlı olarak değişebilmektedir.

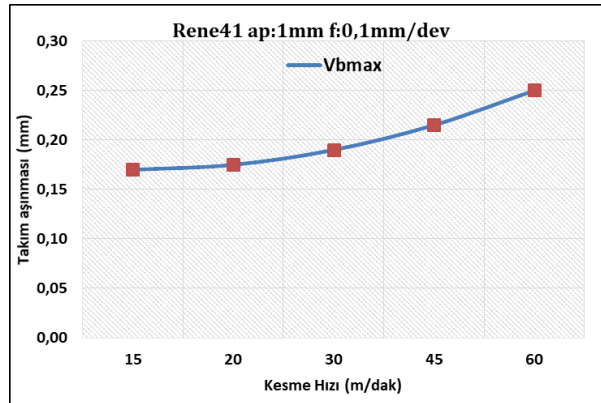
Kesme hızının artışı ile genel olarak bütün kuvvetlerin düşüş eğilimi sergilediği görülmektedir. En yüksek kesme kuvvetleri F_c ve F_f için 20 m/dak kesme hızında oluşurken, F_r için 15 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. Üç kuvvette de 45 m/dak kesme hızına kadar kuvvetlerin düşüş eğilimi sergilediği görülmektedir. Bu durum kesme hızına bağlı olarak kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın kesme işlemini rahatlatması ile açıklanabilir [11]. 45 m/dak kesme hızından 60 m/dak kesme hızına geçildiğinde ise F_r de %12, F_f de %16 ve F_c de ise %4 lük artış görülmektedir. Kesme hızının artışı ile sıcaklığın aşırı artışı kesici takımın hızlı bir şekilde aşınma eğilimine girmesine sebep olmuş ve bu durumun kesme kuvvetlerinin artış göstermesine neden olduğu kanısına varılmıştır. Bu durum takım resimlerindeki aşınma eğilimi farkları ile anlaşılmaktadır (Şekil 5). Kesme hızı artışı ile yan yüzeydeki ve kesici üst yüzeyinde oluşan abrasif aşınmanın arttığı gözlemlenmiştir.



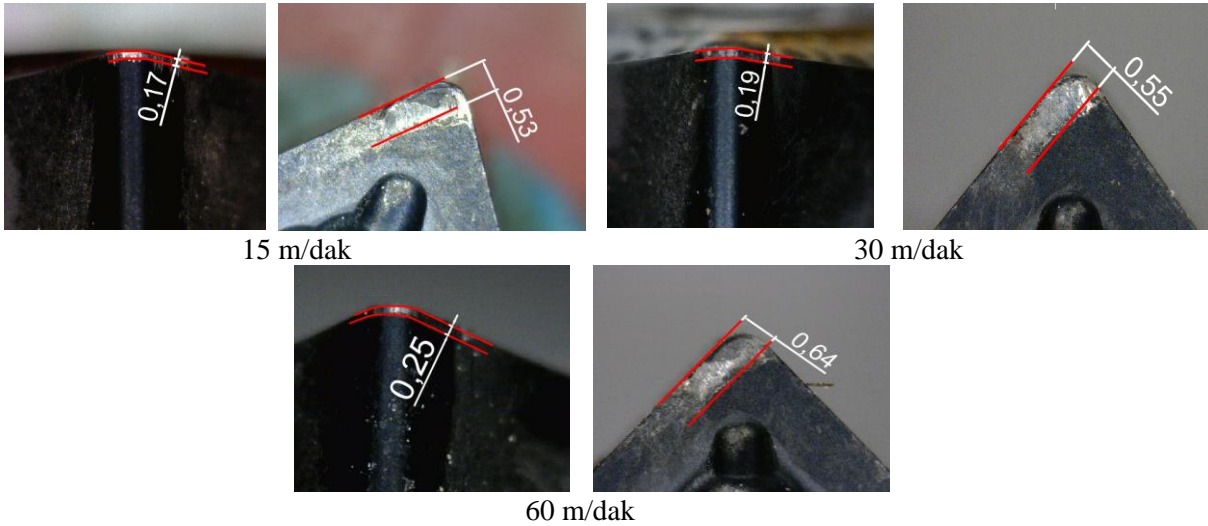
Şekil 2. Kesme hızı-Kesme kuvvetleri grafiği (Graphic of cutting speed-Cutting force)



Şekil 3. Kesme hızı-Yüzey pürüzlülüğü grafiği (Graphic of cutting speed-Surface roughness)



Şekil 4. Kesme hızı-Takım aşınması grafiği (Graphic of cutting speed-Tool wear)



Şekil 5. Takım aşınması resimleri (50X) (Tool wear pictures (50X))

Şekil 3'te kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları verilmiştir. Her deneyde üç ölçüm alınmış olup bu ölçümlerin ortalamaları genel eğilim grafiği oluşturulmuştur. Kesme hızının artışı ile yüzey pürüzlülük değerinin kötüleştiği tespit edilmiştir. 15 m/dak kesme hızında ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra değeri 0.996 μm ölçülürken, 60 m/dak kesme hızında %98 artış göstererek 1.97 ölçülmüştür. Genel eğilime bakılacak olursa 15 m/dak kesme hızından 45 m/dak kesme hızına kadar %31'lik artışın olduğu görülmektedir. Kesme kuvvetlerinde de olduğu gibi kesme hızının 60 m/dak kesme hızına çıkışı ile yüzey pürüzlülüğünün aşırı artması söz konusu olmuştur. Bu durum takım aşınması artışının yüzey kalitesini olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Kesici takımındaki aşınmanın artması ile birlikte işlenen parça yüzey pürüzlülüğünde de artış meydana gelir. Bu durum yüksek sertliğe sahip malzemelerde daha çok görülmektedir [18-19].

Şekil 4'te kesme hızına bağlı olarak takım aşınması grafiği verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde olduğu gibi kesme hızına bağlı olarak takım aşınmasının arttığı belirlenmiştir. En düşük aşınma değeri 15 m/dak kesme hızında oluşurken, 20 m/dak kesme hızında %3 lük bir artış tespit edilmiştir. Kesme hızının 30 m/dak kesme hızına çıkışı ile %12, 45 m/dak kesme hızına çıkışı ile %26 ve 60 m/dak kesme hızına çıkışı ile %47'lik bir artış görülmüştür. Bu durum kesme bölgesinde kesme hızına bağlı olarak oluşan sıcaklığın takım aşınmasına neden olması ile açıklanabilir. Takım aşınma oranı yoğun kuvvet ve sıcaklığın olduğu alanlarda daha yüksektir. Artan sıcaklık kobalt bağlayıcılardan oluşan karbür takımları negatif etkiler [13].

Bütün grafikleri işlenebilirlik açısından yorumlamak gerekirse 20 ile 45 m/dak kesme hızı aralığında Rene 41 malzemesinin işlenebileceği görülmektedir. Süper alaşımların kesme dirençlerinin yüksek oluşu bu malzemelerde yüksek kesme hızlarının kullanımını engellediği görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışma ile Nikel esaslı Rene 41 süper alaşımının tornalanması sonucunda kesme hızına bağlı olarak elde edilen kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri ve takım aşınması sonuçları kısaca aşağıda verilmiştir.

- Kesme hızının artışı ile kesme kuvvetlerinin %14 ile %25 arasında düştüğü, yüzey pürüzlülüğünün %97 ve takım aşınmasının ise % 47 arttığı tespit edilmiştir.
- Kesme kuvvetlerin esas kesme kuvveti en yüksek oluşurken, esas kesme kuvvetine göre ilerleme kuvveti ikinci sırada %36 daha düşük ve radyal kuvvet ise %82 ile en düşük kuvvet olarak tespit edilmiştir.
- 45 m/dak kesme hızı, yüzey kalitesi ve takım aşınması açısından kritik bir hız sınırı olarak belirlenmiştir.
- Takım aşınması olarak takımın yan yüzeyinde ve üst yüzeyinde abrasif aşınma tipi görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. D. Tali, H. Gaşan, M. Güleşen, S. Gürgen, M.C. Kuşhan, Nikel esaslı süperalaşım Rene 41'in tornalama işlemi, The IIER International Conference Czech Republic, Prague, 2017.
2. E. O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, An overview of the machinability of aeroengine alloys, Journal of Materials Processing Technology, 134(2): 233-253, 2003.
3. E. O. Ezugwu, Z.M. Wang, A.R. Machado, The machinability of nickel-based alloys: a review, Journal of Materials Processing Technology, 86(1-3): 1-16, 1999.
4. A. Güllü, Ş. Karabulut, Dynamic chip breaker design for Inconel 718 using positive angle tool holder, Materials Manufacturing Processes, 23(8): 852-857, 2008.
5. N. Richards, D. Aspinwall, Use of ceramic tools for machining nickel-based alloys, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 294: 575-588, 1989.
6. A. Altın, M. Nalbant, A. Taskesen, The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools, Materials and Design, 28(9): 2518-2522, 2007.
7. D.G. Thakur, B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan, Machinability investigation of Inconel 718 in high-speed turning, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 45(5-6): 421-429, 2009.
8. D. Tali, Rene 41 süperalaşımının işlenebilirliğinin farklı torna parametrelerinde incelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 2016.
9. E.J. Vermilyea, E.D. Green, W.L. Carr, Fabricability of Materials R-235, L-605, Rene 41, M-252 and J-1650 as Pertaining to Part No. 8-26054. General Dynamics/Convair San Diego Calif, 1961.
10. Z. Norman, M. Field, V.A. Tipnis, R.C. Garrison, J.D. Christopher, Establishment of Production Machinability Data. Metcut Research Associates Inc. Cincinnati Ohio, 1975.

11. H.P. Hack, Mechanical, Corrosion and Fatigue Properties of 15-5 PH, Inconel 718, and Rene 41 Weldments, David W. Taylor Naval Ship Research And Development Center Bethesda Md., 1975.
12. S.R. Singh, R.G. Mote, S.K. Mishra, The effect of microstructures and precipitates (γ' , γ'' , δ) on machinability of Inconel-718 nickel-based superalloy in turning process, Journal of Manufacturing Processes, 82:374-389, 2022.
13. D. Palanisamy, K. Lakshmikala, D. Umapathi, Machinability studies on nickel based super alloys using cryo-treated tungsten carbide inserts, Materials Today: Proceedings, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.017>
14. C. Djordje, D. Kramar, Machinability investigation and sustainability analysis of high-pressure coolant assisted turning of the nickel-based superalloy Inconel 718, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2022. <https://doi:10.1177/09544054221092939>
15. G. Uzun, S. Yağmur, İ. Korkut, U. Şeker, Hastelloy X süper alaşımının tornalanmasında kriyojenik işlem uygulanan PVD ve CVD kaplamalı takımın performansının incelenmesi, Tasarım ve Teknoloji, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 5(2): 231–239, 2017.
16. G. Uzun, S.A. Yaşar, İ. Korkut, Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve delik kalitesine etkisinin incelenmesi, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 7(2): 469–475, 2017.
17. F. Okay, S. Islak, Y. Turgut, Investigation of machinability properties of aluminium matrix hybrid composites, Journal of Manufacturing Processes, 68: 85-94, 2021.
18. Y. Özçatalbaş, Kesici takım aşınması ve iş malzemesi mekanik özelliklerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etkisi, Politeknik Dergisi, 4: 47-52, 2002.
19. E. Kaya, B. Akyüz, Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys, Open Engineering, 7: 330–342, 2017.