

# AISI D2 Çeliğine Uygulanan Farklı Bekletme Sürelerindeki Derin Kriyojenik İşlemin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi

\*<sup>1</sup>Eylül DEMİR ve <sup>2</sup>İhsan TOKTAŞ

\*<sup>1,2</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü,  
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

## Özet

AISI D2 çeliği maliyeti ve özelliklerinden dolayı presle şekillendirme kalıplarında yıllardır en çok kullanılan çeliktir. Yapılan araştırmalar, takım/kalıp çeliklerinin servis ömrünün, klasik sertleştirme ve temperleme işlemine ek olarak kriyojenik işlemle önemli derecede iyileştirileceğini kanıtlamıştır. Bu çalışmada, farklı bekletme sürelerindeki kriyojenik işlemin AISI D2 çeliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Bir şekillendirme elemanının yüzey pürüzlülüğü şekillendirilen malzemeyi de etkilediğinden, yüzey pürüzlülüğü göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur. Sonuçlar, klasik ısıtma işlem numunesine kıyasla yüzey pürüzlülüğünün sırası ile; 24 saat kriyojenik işlemde %4.5, 4 saat kriyojenik işlemde %12, 30 dakika kriyojenik işlemde %20 azaldığını göstermiştir. 16 saat kriyojenik işlemde pürüzlülükte belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Kriyojenik işlem numunelerinin sertliğinde düşük sayılabilecek bir azalma meydana gelmiştir. Numunelerin sertliği bekletme süresine göre sırası ile; 24 saatte %0.83, 30 dakika da %0.98, 4 saatte %1.2 ve 16 saatte %1.42 azalmıştır. Mikro yapıda en yoğun karbür dağılımı 24 saat bekletme süresinde oluşurken, diğer bekletme süreleri için belirgin bir fark oluşmamıştır.

**Anahtar kelimeler:** AISI D2 takım çeliği, kriyojenik işlem, yüzey pürüzlülüğü.

## Abstract

AISI D2 steel is a cold work tool steel which is widely used in dies for press forming for many years because of its cost and features. Research works performed have proved that the service life of tool/die steels can be immensely enhanced by applying cryogenic treatment to engineering materials after conventional hardening and tempering. In this study, the effects of deep cryogenic treatment in various holding times on surface roughness of AISI D2 steel is examined. Due to the fact that surface roughness for forming members affects the material formed, surface roughness must be taken into account. Results show that reduction in surface roughness in comparison to specimen conventionally treated are 4.5% for holding time ( $t_{CT}$ ) of 24 h, 12% for  $t_{CT} = 4$  h, 20% for  $t_{CT} = 30$  min, respectively. It is not observed significant difference in surface roughness for  $t_{CT} = 16$  h. Reduction in hardness of specimens cryotreated are considered marginally. Reduction of hardness occur 0.83% for  $t_{CT} = 24$  h, 0.98% for  $t_{CT} = 30$  min, 1.2% for  $t_{CT} = 4$  h, 1.42% for  $t_{CT} = 16$  h, respectively. While most intensive carbide distribution in microstructure occurs for  $t_{CT} = 24$  h, there is marginally variation in carbides for other holding times.

**Key words:** AISI D2 tool steel, cryogenic treatment, surface roughness.

## 1. Giriş

Üretim maliyetini düşürmek ve daha yüksek verimlilik için artan talep, takım ömrünü ve performansını iyileştirmeye yönelik araştırmalar yapmayı gerektirir. Güncel çalışmalar, daha uzun servis ömrü olan mühendislik parçaları için imalat yöntemlerini değiştirerek, var olan malzemelerle beraber yeni malzemeler geliştirmeye yönelik yürütülmektedir [1]. Takımların servis ömrünün artması sadece takım maliyetini azaltmaz, aynı zamanda takımların aksaklık süresini azaltarak verimliliğin artmasına yardımcı olur [2].

Bu çalışmada soğuk iş takım çeliği olan AISI D2 çeliği kullanılmıştır. AISI D2 çeliği maliyeti ve özelliklerinden dolayı presle şekillendirme kalıplarında yıllardır en çok kullanılan çeliktir [3]. Bu çeliğin seçilmesinin sebepleri ise şöyle sıralanabilir:

- (i) AISI D2 çeliği, çapak alma, dilme makinelerinde, çekme, damgalama, kesme, zımba kalıplarında geniş ölçüde kullanılan en yaygın soğuk iş takım çeliklerinden biridir [4].
- (ii) AISI D2 çeliği, sıfır altı işlemlerde aşınma dayanımı araştırılan takım/kalıp çeliklerinin en çok çalışılan malzemelerinden biridir [5].
- (iii) Kriyojenik işlem uygulanan takım/kalıp çeliklerinin aşınma dayanımındaki iyileşme derecesi AISI D2 çeliği için oldukça yüksektir [6].

Son yirmi yıldır yapılan araştırmalar, takım/kalıp çeliklerinin servis ömrünün, klasik sertleştirme ve temperleme işlemine ek olarak kriyojenik işlemle önemli derecede iyileştirileceğini kanıtlamıştır [7]. Sıfır altı işlemler yaygın olarak soğuk işlem (-50)-(-80) °C ve kriyojenik işlem (-80)-(-196) °C olarak ikiye ayrılır. Kriyojenik işlem de sığ kriyojenik işlem (-80)-(-160) °C ve derin kriyojenik işlem (-160)-(-196) °C olarak sınıflandırılır [8]. Derin kriyojenik işlemin, (-125)-(-196) °C arasındaki sıcaklık değerleri değerler için kabul edildiği çalışmalar da mevcuttur [9-11]. Kriyojenik işlemde malzeme sıfırın altındaki sıcaklıklara soğutulur ve belirlenen bir süre zarfında o sıcaklıkta bekletilir. Sonrasında sıcaklık tekrar ortam sıcaklığına getirilir. Kriyojenik işlemin amacı, en az olumsuz etkiyle, malzemenin mikro yapısında kalıcı değişiklikler yaparak, malzemede istenen özelliklerin elde edilmesini sağlamaktır [12]. Yüksek karbon ve yüksek alaşım elementleri içeren takım/kalıp çeliklerinde martenzit bitiş sıcaklığı oda sıcaklığının altına düşer. Klasik sertleştirme işlemi istenmeyen miktarda kalıntı östenite neden olur. Kalıntı östenit yumuşak bir yapı olduğundan sertlik ve aşınma direnci gibi özellikleri olumsuz etkiler [13, 14]. Bu nedenle, takım/kalıp çeliklerinin ısıl işlemlerinin ana amaçlarından biri kalıntı östeniti en aza indirmek ya da tamamen ortadan kaldırmaktır [1,2,7,15-20].

Yapılan bir çalışmada kriyojenik işlemin, karbürlerin çekirdeklenmesi için gerekli gücü artırdığını ve daha çok sayıda daha ince karbür çökelyimini kolaylaştırdığını, sonuç olarak tokluğu artırdığını ve bunun sonucunda da aşınma dayanımını arttırdığını göstermiştir [21].

Servis sırasında oluşan hataların büyük çoğunluğunun aşınma davranışı, yorulma kırılması, korozyon ve erozyon gibi nedenlerden dolayı, yüzeylerden başladığı bilinmektedir. Bu yüzden bir malzemenin yüzeyinin uygunluğunu belirlemek büyük önem taşımaktadır. Gerek imalatla işleme ile elde edilen yüzeyler, gerekse parçaların beraber çalışmalarında ya da işlenmiş bir yüzeyin diğer bir malzeme ile beraber çalışması durumunda oluşan problemler konunun önemini artırmıştır [22]. Bir şekillendirme elemanının yüzey pürüzlülüğü, şekillendirilen malzemeyi de etkilediğinden, yüzey pürüzlülüğü, kalıp gibi ağır koşullar

altında çalışan şekillendirme elemanları için göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur [22].

Çekme ve akma dayanımının çok altındaki gerilmelerde bile malzemede kırılma meydana gelebilmektedir. Bunun nedeni yorulma olayıdır. Uygulamaların çoğunda yorulma kırılması yüzeyde başladığından, yorulmaya etki eden faktörlerin başında malzemenin yüzey özellikleri gelir. Yüzeyin düzgünlüğü yorulma dayanımının da yüksek olmasını sağlar [22]. Yüzey pürüzlülüğü, makine parçalarının çalışması sırasında aşınma, sürtünme, yağlama, ısı ve elektrik iletimi gibi faktörleri etkileyen önemli bir olaydır [23, 24].

En 353 çeliğine uygulanan klasik ısı işlemin, sıg kriyojenik işlemin ve derin kriyojenik işlemin taşlamaya etkisi incelenmiştir. Temperlenmeyen sıg kriyojenik işlemin ve derin kriyojenik işlemin parçanın ömrü açısından iyi sonuçlar doğurmayan yüzey çatlaklarına neden olduğu optik mikroskop fotoğraflarında görülmüştür. Temperlenmemiş numunelerin yüzeylerinde çatlakların oluşumu, düşük sıcaklığa maruz kalan parçalarda kalıntı östenitin martenzite dönüşümünün yapıyı kırılğan hale getirmesiyle açıklanmıştır. Temperlenmiş örneklerde, klasik ısı işlem görmüş örnekler sıfırtı işlem görmüş örneklerden daha kırılğandır, sebebi ise, karbür çökeliminin klasik işlem görmüş örneklerde daha az olmasıdır [25].

Bu çalışmada, AISI D2 çeliğine uygulanan farklı bekletme sürelerindeki derin kriyojenik işlemin malzemenin servis ömrünü doğrudan etkileyen yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Kriyojenik işleminde bekletme süreleri 30 dakika, 4 saat, 16 saat ve 24 saat olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne olumlu etkileri açısından, AISI D2 çeliği için en uygun bekletme süresinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1 Numunelerin Hazırlanması

AISI D2 çeliği, yüksek aşınma direnci, basma dayanımı, tokluk, ısı işleminde mükemmel boyutsal kararlılık, nitrürleme, PVD gibi yüzey işlemlerine uygunluk gösteren yüksek karbon ve krom içeren soğuk iş takım çeliğidir. Tokluk istenen 6 mm'ye kadar metal saç kesme, koparma, ezme, sıvama, derin çekme kalıplarında, soğuk ekstrüzyon takımlarında, alüminyum, çinko tüp imal kalıplarında, cıvata, somun, perçin üretiminde delici-şişirici olarak, ezme ve profil ile boru imal makaralarında kullanılır [26]. Deneylerde kullanılacak olan AISI D2 çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 1 ve fiziksel özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

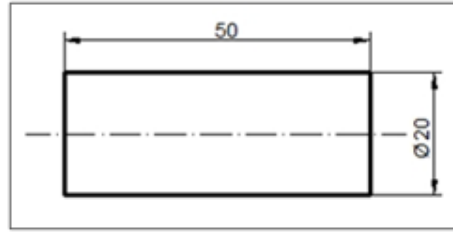
**Tablo 1.** AISI D2 çeliğinin kimyasal bileşenleri [26]

ISO/DIN	AISI	%C	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%Si
1.2379	D2	1.55	0.4	11.8	0.8	0.8	0.3

**Tablo 2.** AISI D2 çeliğinin fiziksel özellikleri [26]

Sıcaklık	20 °C	200 °C	400 °C
Yoğunluk (kg/ m <sup>3</sup> )	7700	7650	7600
Isıl genleşme katsayısı	-	12.3 * 10 <sup>-6</sup> 11.2 * 10 <sup>-6</sup>	12 * 10 <sup>-6</sup>
Isıl iletkenlik (W/m °C)	20	21	23
Elastisite modülü (MPa)	210000	200000	180000
Özgül ısı (J/kg °C)	460	-	-

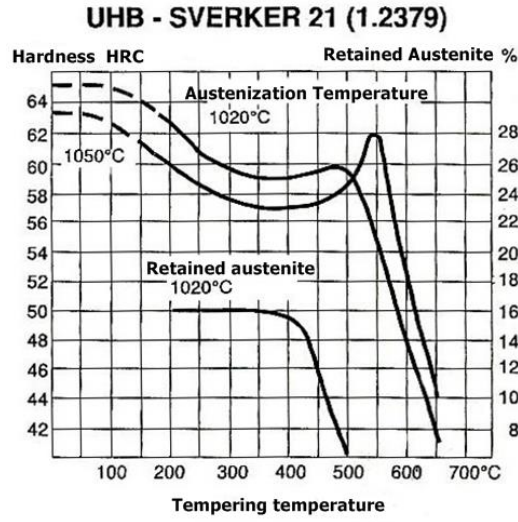
Deneylerde kullanılan AISI D2 çeliği, sertifikalı olup Assab Çelik firmasından temin edilmiştir. Numuneler aynı şartlarda ve eşit boyutlarda CNC torna tezgahında, Şekil 1'de görülen 20 mm çapında, 50 mm uzunluğunda silindirik parçalar haline getirilmiştir.

**Şekil 1.** Malzemenin boyutları

Deneylerde kullanılacak numuneler 5 farklı gruba ayrılmaktadır (Tablo 3). 1. gruptaki numunelere, klasik ısıl işlem olarak adlandırılan sertleştirme ve temperleme işlemleri uygulanmış olup kriyojenik işlem uygulanmamıştır Diğer gruptaki numunelere ise sırası ile sertleştirme, farklı bekletme sürelerinde kriyojenik işlem ve temperleme uygulanmıştır. Temperleme sıcaklığı Şekil 2'ye göre belirlenmiştir.

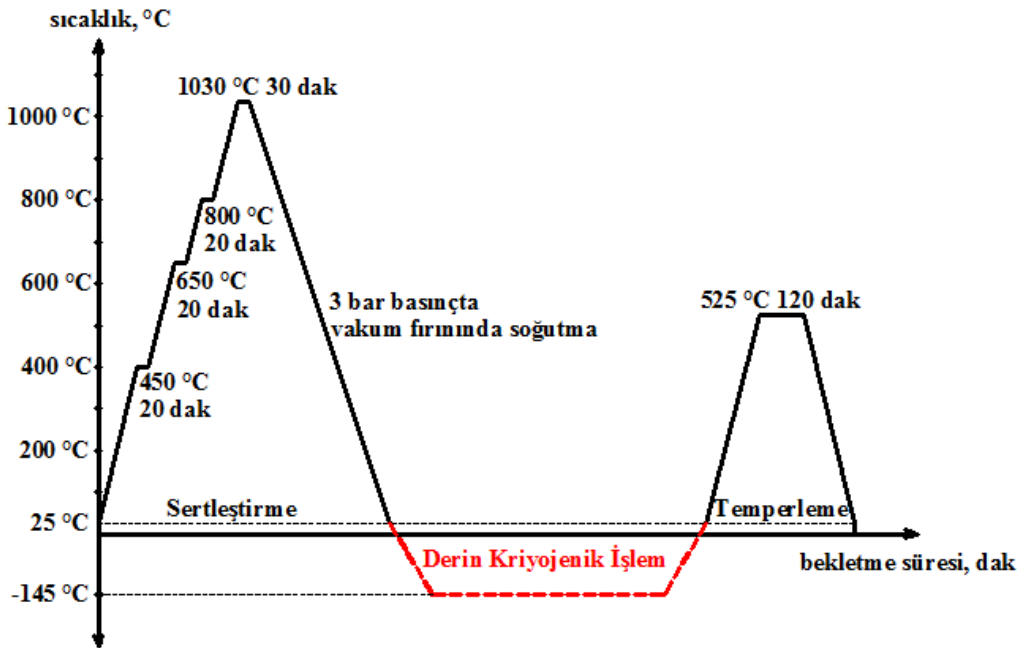
**Tablo 3.** Numunelere uygulanan işlemler

Numune	Sertleştirme	-145°C'de kriyojenik işlem	Temperleme
1	1030°C'de 30 dak	Uygulanmadı.	525°C'de 2 saat
2		30 dak	
3		4 saat	
4		16 saat	
5		24 saat	



Şekil 2. Temperleme sıcaklığının belirlenmesi [26]

Sertleştirme işlemi için numuneler öncelikle 650 °C'ye ısıtılmış fırına atılmıştır ve numunelerin sıcaklığı 650 °C'ye ulaştığında fırın 850 °C'ye ısıtılıp bu sıcaklıkta 20 dakika beklendikten sonra östenitleme sıcaklığı olan 1030 °C'ye sıcaklık çıkarılmıştır ve östenitleme işlemi 30 dakika bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 3 bar basıncındaki vakum fırınında, martenzit başlama ( $M_s$ ) sıcaklığının altına kadar hızlı bir şekilde soğuması sağlanmıştır. 60 °C'ye kadar vakum fırınında soğutulan numuneler daha sonra oda sıcaklığında (25 °C) soğumaya bırakılmıştır. Östenitleme işlemi tamamlanan, klasik ısıl işlem grubundaki numunelere 525 °C'de 2 saat temperleme uygulanmıştır.



Şekil 3. Derin kriyojenik işlem (östenitleme+kriyojenik işlem+temperleme)

Östenitleme işleminin ardından kriyojenik işlem grubundaki numunelere farklı bekleme sürelerinde  $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de derin kriyojenik işlem ve ardından  $525\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat temperleme işlemi uygulanmıştır (Şekil 3). Kriyojenik işlem fırını Şekil 4'te görülmektedir. Kriyojenik işlemde bekleme süreleri 30 dakika, 4 saat, 16 saat ve 24 saat olarak belirlenmiştir. Belirlenen süre zarfında kriyojenik işlem sıcaklığında bekletilen numunelerin soğutma fırınından çıkarılarak, tekrar oda sıcaklığına gelmeleri sağlanmıştır. Numunelerin sıcaklığı oda sıcaklığına ulaştığında  $525\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Temperleme işlemi sonrasında numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 4. Kriyojenik işlem fırını ve sıcaklık-basınç göstergesi

## 2.2 Numunelerin mikro yapılarının incelenmesi

Malzemelerin mikro yapı incelemeleri, uygulanan farklı ısıl işlemlerin malzemenin iç yapısına etkilerini karşılaştırmak açısından oldukça büyük önem taşır. Numuneler, aşağıdaki işlem basamakları uygulanarak mikro yapı incelemesi için hazırlanmıştır:

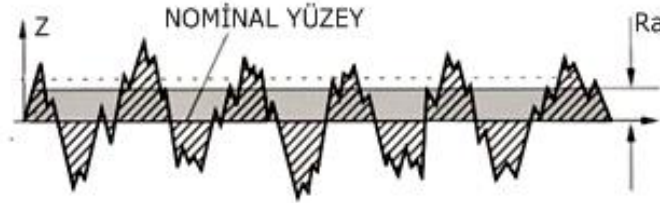
- 20 mm çapında 50 mm uzunluğundaki numuneler, Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme ve Mükemmeliyet Merkezi laboratuvarında *Sodick CNC* tel erozyon ile boyu 7 mm olacak şekilde kesilmiştir.
- Kesilen numuneler sırası ile 180-320-600-800-1000-1200  $\mu\text{m}$  zımparalar kullanılarak zımparalanmıştır.
- Zımparalanan numuneler 3  $\mu\text{m}$ 'lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemleri Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Malzeme Mühendisliği laboratuvarındaki *Struers Dap-7* zımparalama/parlatma cihazı ile yapılmıştır.
- Parlatılan yüzeyler %2'lik nital çözeltisi ile dağlanmıştır.
- Metalografik incelemeye hazır hale getirilen numunelerin mikro yapı görüntüleri Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Malzeme Mühendisliği laboratuvarındaki *Nikon* marka optik mikroskopta alınmıştır.

### 2.3 Sertlik Ölçümü

Numunelerin sertlik ölçümü yapılmadan önce yüzeyleri 180-320  $\mu\text{m}$ 'lik zımparalar ile zımparalanarak, sağlıklı ölçüm yapabilmek için yüzeyin parlaklaşması sağlanmıştır. Daha sonra Yıldırım Beyazıt Üniversitesi laboratuvarındaki *Q-ness* marka makro sertlik ölçüm cihazında, ölçüm birimi olarak Rockwell C (150 kg), belirlenerek, sertlik ölçümü yapılmıştır. Yükün uygulanma süresi 10 saniye olup, 10 farklı noktadan ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

### 2.4 Numunelerin taşlanması ve yüzey pürüzlülüğünün ölçümü

Profilometre ile yüzey pürüzlülüğü ölçme yöntemi endüstride de yaygın olarak kullanılan tekrarlanabilir, maliyeti düşük ve değerlendirilmesi kolay bir yöntemdir. Yüzey pürüzlülüğünün ortalama değeri  $R_a$  sembolü ile gösterilmektedir.  $R_a$  değeri Şekil 5'te gösterildiği gibi, yüzeyin nominal ölçüden eksi ve artı yöndeki yükselti ve çukur ölçülerinin ortalamasını milimetrenin binde biri cinsinden ( $\mu\text{m}$ ) veren değerdir [27].



Şekil 5. Yüzey pürüzlülüğünün ortalama değeri  $R_a$  [27]

$R_a$  değeri Denklem 1 ile hesaplanmaktadır:

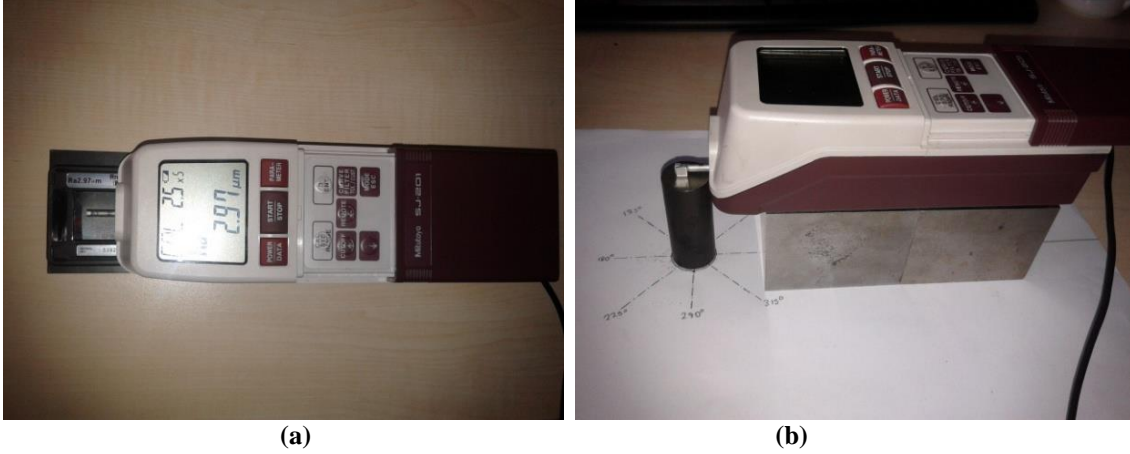
$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^1 |Z(x)| dx \quad (1)$$

Burada,  $R_a$  ortalama yüzey pürüzlülüğü,  $l_r$  örnek alma uzunluğu,  $Z$  ortalama pürüzlülük yüksekliği,  $x$  profil yönü olarak tanımlanmaktadır [28].

Taşlama işlemi BE-TA Motor-Kapak Yenileme Atölyesi'nde *ELB* marka satıh taşlama tezgahında yapılmıştır. Taşlama taşı olarak tane büyüklüğü 60 olan Alüminyum Oksit ( $Al_2O_3$ ) taş seçilmiştir. Taş çapı 200 mm ve kalınlığı 20 mm'dir. Taşlama parametreleri her bir numune için aynı olup, numuneler 1450 dev/dakika'da 0.2 mm kesme derinliğinde taşlanmıştır. Taşlama sırasında soğutucu olarak bor yağı kullanılmıştır. Bütün numuneler aynı şartlar altında taşlanmıştır. Her bir numune taşlandıktan sonra taşlama taşı bilenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü *SJ-201 Mitutoyo* marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla yapılmıştır. İlk olarak kalibrasyon mastarı kullanılarak cihaz kalibre edilmiştir. Kalibrasyon mastarının yüzey pürüzlülük değeri 2.97  $\mu\text{m}$  elde edilene kadar ölçüm yapılmıştır (Şekil 6

(a). Kalibrasyon işleminden sonra pürüzlülük ölçümlerine başlanmıştır. Ölçümler  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $135^\circ$  açılardan 4 farklı doğrultudan alınmış olup, ölçülen değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülüğü değeri belirlenmiştir (Şekil 6 (b)). Ölçüm uzunluğu,  $0.8 \times 5 = 4$  mm olarak belirlenmiştir.

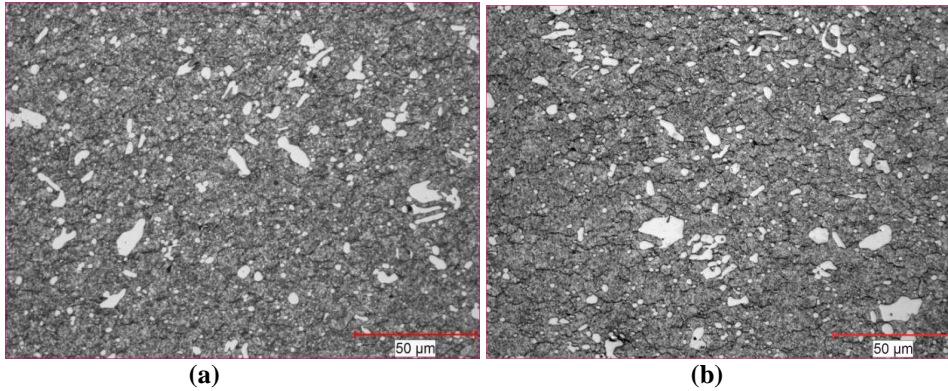


Şekil 6. (a) Cihazın kalibre edilmesi (b) yüzey pürüzlülüğü ölçümünün yapılması

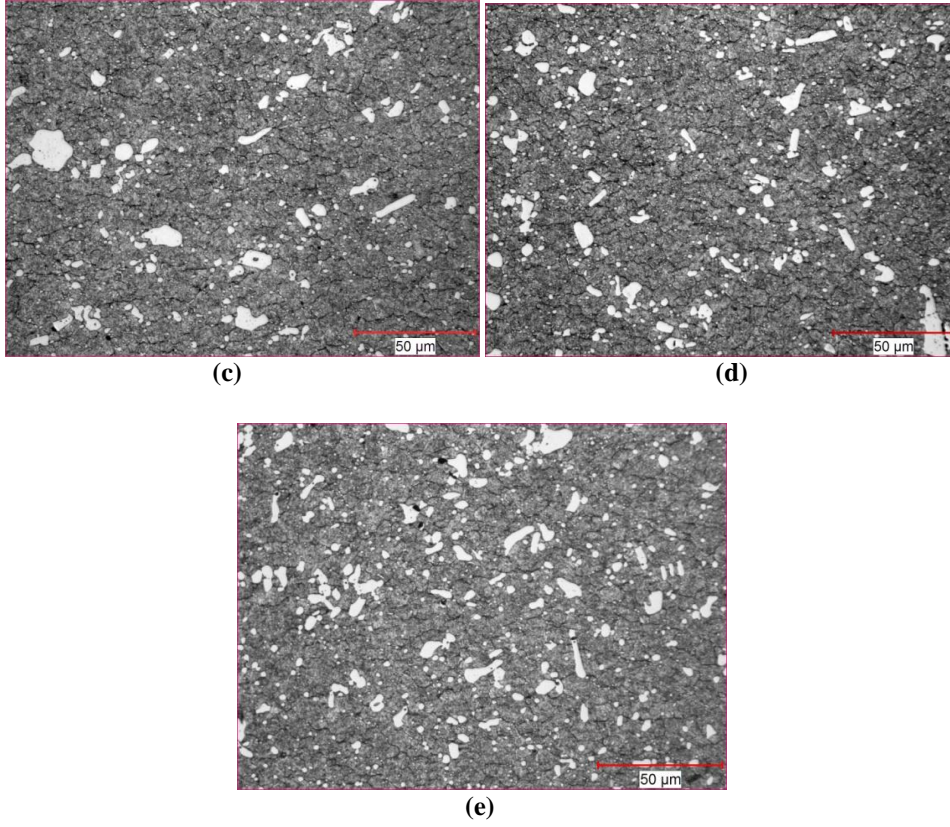
### 3. Bulgular

#### 3.1 Mikro yapı görüntüleri

Kriyojenik işlemin AISI D2 çeliğinin mikro yapısındaki ikincil karbür miktarını artırdığı ve daha yoğun dağılım sağladığı daha önce yapılan çalışmalarda görülmektedir [1,2,5-8,15-20]. Kriyojenik işlemin bekletme süresi arttıkça ince karbür çökeliminin de arttığı gözlemlenmiştir [10,29]. Klasik ısıl işlemle karşılaştırıldığında karbürlerde, 30 dakika, 4 saat ve 16 saat için çok az değişim oluşurken, 24 saatte daha belirgin değişim meydana gelmiştir. Şekil 7 (d)'de görüldüğü gibi 24 saatlik bekletme süresinde daha küresel ve daha ince ikincil karbür dağılımı oluşmuştur.



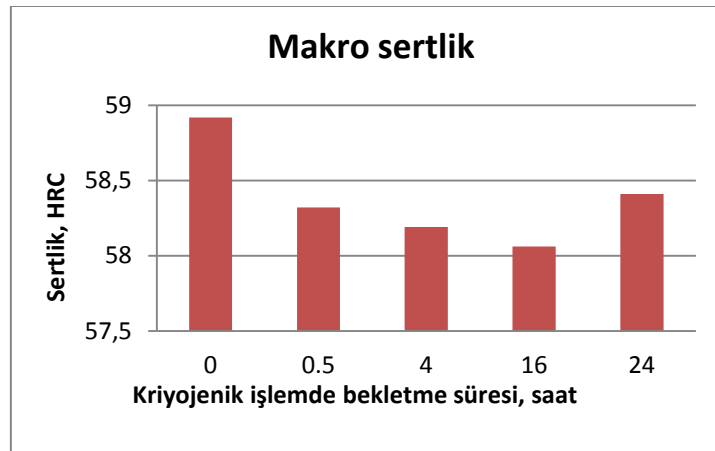




Şekil 7. (a) Klasik ısı işlem (b) 30 dak kriyojenik işlem (c) 4 saat kriyojenik işlem (d) 16 saat kriyojenik işlem (e) 24 saat kriyojenik işlem

### 3.2 Sertlik sonuçları

Numunelerin Rockwell C (HRC) makro sertlik değeri Şekil 8’de görülmektedir. Sonuçlar gösteriyor ki; kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin sertlikleri ile klasik ısı işlem uygulanmış numunelerin sertliği arasında belirgin bir fark oluşmamıştır.

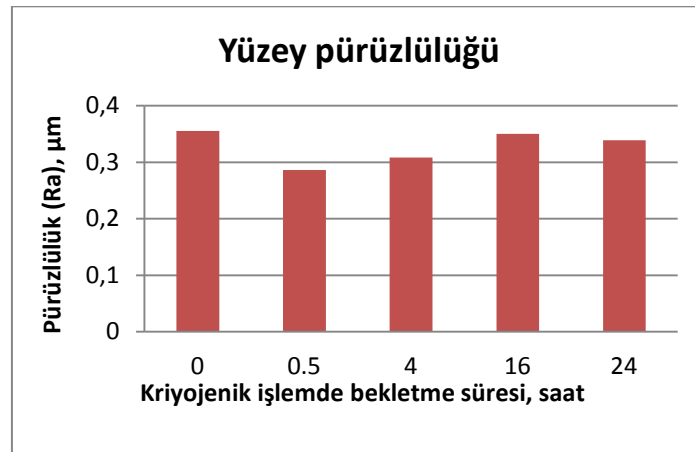


Şekil 8. Farklı bekleme sürelerinde kriyojenik işlem uygulanmış AISI D2 çeliğinin makro sertlik değerleri

Numunelerin dış çapından merkezine doğru sertlikte değişim görülmemiştir. Sertlikteki azalma sırası ile 24 saat (%0.83), 30 dakika (%0.98), 4 saat (%1.2) ve 16 (%1.42) saatte meydana gelmiştir. Kriyojenik işlemde 24 saat bekletme süresi klasik ısıtılma göre sertliğin en az azaldığı bekletme süresidir.

### 3.3 Yüzey Pürüzlülüğü sonuçları

Sonuçlar kriyojenik işlem ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştiğini göstermiştir. Pürüzlülük değerleri klasik ısıtılma işlem numunesi için 0.355  $\mu\text{m}$ , kriyojenik işlemde 30 dakika bekletme süresi için 0.286  $\mu\text{m}$ , 4 saat bekletme süresi için 0.308  $\mu\text{m}$ , 16 saat bekletme süresi için 0.35  $\mu\text{m}$  ve 24 saat bekletme süresi için 0.339  $\mu\text{m}$  pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Şekil 9'daki grafikte, taşlanmış yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerini klasik ısıtılma ile karşılaştırıldığında, 30 dakika bekletme süresinde pürüzlülük %20 azalırken, 4 saatte %12 azalmıştır. 16 saatlik bekletme süresinde pürüzlülükte belirgin bir değişim gözlenmemiştir ve 24 saatlik bekletme sürelerinde pürüzlülük değeri klasik ısıtılma göre %4.5 azalmıştır. Pürüzlülükteki maksimum azalma 30 dakikada meydana gelmiştir.



Şekil 9. Farklı bekletme sürelerinde kriyojenik işlem uygulanmış AISI D2 çeliğinin taşlama sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra,  $\mu\text{m}$ )

### Sonuç

Sonuçlar gösteriyor ki;

1. Kriyojenik işlem sonrası uygulanan temperleme işleminin, bir miktar sertlik kaybıyla beraber ikincil karbür çökelişini de artırdığı ve bunun sonucu olarak da gerilmeleri azalttığı bilinmektedir. Malzemedeki gerilmelerin ve sertliğin azalması; kırılabilirliğin ve yüzeyde çatlak oluşumu riskinin de azalmasını sağlar. Bunun sonucu olarak da malzeme yüzeyinin pürüzlülük değeri düşecektir.
2. 30 dakika kriyojenik işlem uygulanmış numunenin mikro yapısında karbür dağılımında belirgin bir değişim söz konusu olmaz iken, sertliği %0.98 azalmış ve yüzey pürüzlülüğü ise %20 iyileşmiştir.

3. 4 saat bekletme süresinde, karbür dağılımında belirgin bir değişim söz konusu değil iken, sertliği %1.2 azalmış ve yüzey pürüzlülüğü %12 iyileşmiştir.
4. 16 saat bekletme süresinde pürüzlülükte ve mikro yapıda klasik ısıtma işlem numunesine kıyasla belirgin bir fark oluşmamıştır. Sertlikte % 1.42 azalma meydana gelmiştir.
5. 24 saat bekletme süresinde mikro yapıda en belirgin değişim meydana gelmiştir. Karbürlerin daha yoğun ve homojen dağıldığı, aynı zamanda daha küresel yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Pürüzlülükteki azalma %4.5 iken sertlikte %0.83 azalma görülmüştür.
6. Kriyojenik işlem uygulanan numunelerin tümünde yüzey pürüzlülüğü klasik ısıtma işlemine kıyasla iyileşmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki en iyi iyileşme 30 dakika bekletme süresinde meydana gelmiştir. Sertlikteki düşüş malzemenin servis koşullarını olumsuz etkileyecek büyüklükte olmadığından en uygun bekletme süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir.
7. Kriyojenik işlemde bekletme süresinin kısa olması malzemeye uygulanan işlem maliyetinin de düşük olması yönünden avantaj sağlayacaktır.

## Teşekkür

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, 'Farklı Bekletme Sürelerindeki Kriyojenik İşlemin AISI D2 Çeliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi' isimli 344 numaralı projeye destek sağlamıştır.

## Kaynaklar

- [1] Das D, Dutta AK, Ray KK. On the refinement of carbide precipitates by cryotreatment in AISI D2 steel. *Philosophical Magazine* 2009; 89:55-76.
- [2] Das D, Ray KK. Structure–property correlation of sub-zero treated AISI D2 steel. *Materials Science and Engineering* 2012; 541:45-60.
- [3] Gauthier MM. *Engineered Materials Handbook*. Desk ed. OH: ASM International; 1995.
- [4] Sen S, Ozbek I, Sen U, Bindal C. Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel. *Surface Coating Technology* 2001; 135:173-177.
- [5] Das D, Dutta AK, Ray KK. On the enhancement of wear resistance of tool steels by cryogenic treatment. *Philosophical Magazine Letters* 2008; 88:801-811.
- [6] Das D, Dutta AK, Ray KK. Inconsistent wear behaviour of cryotreated tool steels: role of mode and mechanism. *Materials Science and Technology* 2009; 25:1249-1257.
- [7] Das D, Dutta AK, Ray KK. Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI D2 steel. *Wear* 2009; 266:297-309.
- [8] Das D, Ray KK, Dutta AK. Influence of temperature of sub-zero treatments on the wear behaviour of die steel. *Wear* 2009; 267:1361-1370.
- [9] Collins DN. Deep cryogenic treatment of tool steels: a review. *Heat Treatment of Metals* 1996; 23 (2):40–42.
- [10] Collins DN, Dormer J. Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel. *Heat Treatment Met.* 1997; 3:71-74.
- [11] Moore KE, Collins DN. Cryogenic treatment of three heat-treated tool steels. *Key Engineering Materials* 1993; 86–87:47–54.

- [12] Thornton R, Slatter T, Jones AH, Lewis R. The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs. *Wear* 2011; 271:2386–2395.
- [13] Roberts G, Krauss G, Kennedy R. *Tool Steels*. 5th ed. ASM International, Metals Park, OH, 1998.
- [14] Thelning KE. *Steel and Its Heat Treatment*. 2nd ed. London: Butterworths; 1984.
- [15] Das D, Dutta AK, Ray KK. Correlation of microstructure with wear behaviour of deep cryogenically treated AISI D2 steel. *Wear* 2009; 267:1371-1380.
- [16] Das D, Dutta AK, Ray KK. Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2 steel. *Cryogenics* 2009; 49:176–184.
- [17] Das D, Dutta AK, & Ray KK, Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness. *Materials Science and Engineering* 2010; 527:2182–2193.
- [18] Das D, Dutta AK, Ray KK. Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part II. Wear behavior. *Materials Science and Engineering* 2010; 527:2194–2206.
- [19] Das D, Ray KK. On the mechanism of wear resistance enhancement of tool steels by deep cryogenic treatment. *Philosophical Magazine Letters* 2012; 92 (6):295-303.
- [20] Das D, Sarkar R, Dutta AK, Ray KK. Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel. *Materials Science and Engineering* 2010; 528:589-603.
- [21] Rhyim YM, Han SH, Na YS, Lee JH. Effect of deep cold cryogenic treatment on carbide precipitation and mechanical properties of tool steels. *Solid State Phenomena* 2006; 118:9-14.
- [22] Nomak Akdoğan A. Kalıp yüzeylerinin ve proses sırasındaki değişimlerinin geometrik mamul şartları temelinde incelenmesi ve modellenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği, Doktora tezi, 2005.
- [23] Choudhury SK, Bajpai JB. Investigation in orthogonal turnmilling towards beter surface finish, *Journal of Materials Processing Technology* 2005; 170:487-493.
- [24] Özay Ç, Ballıkaya H, Savaş V. 304 östenitik paslanmaz çeliğinin teğetsel tornalama-frezeleme yöntemi ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün araştırılması. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11) Elazığ, 2011.
- [25] Bensely A, Venkatesh S, Mohan Lal D, Nagarajan G, Rajadurai A, Junik K. Effect of cryogenic treatment on distribution of residual stress in case carburized En 353 steel. *Materials Science and Engineering* 2008; 479 (1-2):229–235.
- [26] Takım Çelikleri El Kitabı, Assab & Korkmaz.
- [27] <http://www.muhandislikbilgileri.com/?pnun=119&pt=Y%C3%9CZEY%20%C4%B0%C5%9ELEME%20%C4%B0%C5%9EARETLER%C4%B0> / 03.05.2014.
- [28] İşbilir F. Takım ömrünün sebep-sonuç diyagramları ile açıklanması, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrüne etkili faktörlerin analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [29] Yun D, Xiaoping L, Hongshen X. Deep cryogenic treatment of high-speed steel and its mechanism. *Heat Treatment of Metal* 1998; 3:55–59.