



AISI M2 Takım Çeliğinin Mikroyapısı ve Mekanik Davranışları Üzerine Derin Kriyojenik İşlemin ve Temperlemenin Etkisi

Effect of Deep Cryogenic Treatment and Tempering on Microstructure and Mechanical Behaviors of AISI M2 Tool Steel

Abdullah Sert * 

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: asert@ogu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 10.02.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 29.04.2020

Atıf şekli/ How to cite: SERT, A., (2020). AISI M2 Takım Çeliğinin Mikroyapısı ve Mekanik Davranışları Üzerine Derin Kriyojenik İşlemin ve Temperlemenin Etkisi. DEUFMD 22(66), 801-811.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2020226615

Öz

Bu çalışmada, AISI M2 takım çeliğinin farklı ısıl işlemler sonucunda mikroyapı ve tribolojik özelliklerindeki değişimi incelenmiştir. Bu amaçla, su verme + temperleme, su verme + derin kriyojenik işlem + temperleme, su verme + temperleme + derin kriyojenik işlem + temperleme şeklinde üç farklı ısıl işlem prosesi uygulanmıştır. Mikroyapı sonuçlarına göre derin kriyojenik işlem sonrasında mikroyapıdaki karbür tanelerinin boyut ve dağılımlarında iyileşme olduğu belirlenmiştir. Üç farklı ısıl işlem sonrasında elde edilen sertlik değerlerinde ise belirgin farklılıklara rastlanmamıştır. Ayrıca triboloji testleri sonrasında ise kriyojenik işlemlenmiş malzemelerin aşınma oranlarında ve sürtünme katsayılarında düşüş gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlemden hemen önce uygulanan temperleme işleminin sürtünme katsayısını düşürücü etkisi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kriyojenik işlem, Temperleme, AISI M2, Sürtünme

Abstract

In this study, the change of AISI M2 tool steel in microstructure and tribological properties as a result of different heat treatments were investigated. For this purpose, three different heat treatment processes were applied: quenching + tempering, quenching + deep cryogenic treatment + tempering, quenching + tempering + deep cryogenic treatment + tempering. According to the microstructure results, after deep cryogenic heat treatment, it was determined that the size and distribution of the carbide grains in the structure improved. No significant differences were observed in the hardness values obtained after three different heat treatments. In addition, according to the results of tribology tests, a decrease in wear rates and friction coefficients of cryogenic heat treated materials was observed. It was determined that the tempering process applied just before the cryogenic process reduces the coefficient of friction.

Keywords: Cryogenic treatment, Tempering, AISI M2, Friction

1. Giriş

Yüksek hız çelikleri adından da anlaşılacağı üzere özellikle yüksek proses hızlarında kullanılan kesici takımlarda tercih edilirler. Yüksek sıcaklıklardaki kızıl sertlikleri sayesinde geleneksel takım çeliklerine göre yüksek hızlardaki kesme kabiliyetleri, içerisindeki tungsten, molibden, vanadyum ve kobalt gibi alaşım elementlerinin meydana getirdiği karbürler sayesinde daha iyidir [1]. Yüksek hız takım çeliklerinin kullanım alanı, talaşlı imalatın verimliliğinin artırılmasında, özellikle de broşlama ve frezeleme gibi karmaşık hassas aletlerin imalatında önemli bir rol oynar [2]. Çoğu yüksek hızlı çelik takım için, hizmet ömürleri istenildiği gibi değildir ve bunun yanı sıra hizmet ömrünü kısa sürede tamamlamasına bağlı olarak üretimin durmasına ve verimliliğin azalmasına da neden olmaktadır. Bu durum imalat endüstrisini fazlasıyla kötü biçimde etkilemektedir.

Son birkaç on yıldır, özellikle metalik malzemelerin mekanik ve tribolojik özellikleri açısından dayanımlarının artırılması amacıyla kullanılan konvansiyonel yöntemler yerine günümüzde tercih edilen bir yöntem olan derin kriyojenik işlem prosesi ile aşınma direncinin daha fazla arttığını belirten birçok yayın literatürde yer almaktadır [3-6]. Derin kriyojenik işlem uygulanan malzemelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerinde iyileşmeye ve bunun neticesinde ise malzemelerin kullanım ömründe artış meydana geldiği belirtilmektedir.

Birçok yüksek alaşımlı takım çeliğinde yapılarında yer alan yüksek C nedeniyle su verme sonrasında yapısında kalıntı östenit kalmaktadır [7]. Derin kriyojenik işlem ile martenzit bitiş sıcaklığının oldukça altındaki sıcaklıklarda malzeme tutularak yapısındaki kalıntı östenitin martenzite dönüşümü mümkün olabilmektedir. Ayrıca yeni ufak boyuttaki karbürlerin oluşması (M_6C türünde) ve homojen dağılımı da bu yöntem ile mümkün olabilmektedir. Su verme işlemi esnasında martenzit yapısı meydana gelirken, kristal kafesin boyutlarının değişmesine bağlı olarak karbon atomları dislokasyonların yoğun olduğu bölgelere geçiş yapabilirler. Bu sürecin hemen ardından uygulanan temperleme ile dislokasyonların yoğun olduğu bölgelerde yeni karbürler meydana gelmektedir. Oluşan yeni karbürler sayesinde aşınma direncinde önemli ölçüde iyileşme olduğu bilinmektedir [8]. Takım

çeliklerinde en yaygın görülen karbür türleri ve yapı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [9].

M2 yüksek hız takım çeliği üzerine yapılan kriyojenik işlemler detaylı bir çalışmada [10]; kriyojenik işlemin sıcaklığı (-80, -120, -160 ve -196 °C), bu sıcaklığa inilme hızı (1, 2, 3, 4 ve 10 °C/dk) ve bu sıcaklıkta bekletme süresinin (1, 4, 12 ve 24 sa) aşınma direnci üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında, konvansiyonel ısıtma işlemi ile kriyojenik işlem arasında bir temperleme prosesi yer almamaktadır. Oda sıcaklığından kriyojenik sıcaklığa inilme hızı olarak 2 °C/dk'lık parametrenin tribolojik açıdan en ideal durum olduğu belirlenmiştir. Buna ilave olarak kriyojenik sıcaklığın daha düşük sıcaklıklarda yapılması ve bu sıcaklıklarda bekletme süresinin artması ile malzemelerdeki tribolojik özellikler iyileşmektedir. Farklı östenitleme sıcaklığı (980, 1080 °C), kriyojenik sıcaklığa inilme hızı (1, 5 °C/dk), kriyojenik sıcaklıkta bekletme süresi (1, 5 sa), kriyojenik sıcaklıktan oda sıcaklığına ısıtma hızı (yavaş, hızlı) ve temperleme sıcaklığı (430, 500 °C) parametrelerinin derin kriyojenik işlem üzerindeki etkisini araştıran bir çalışmada [11], AISI D2 takım çeliği üzerinde mekanik özellikleri etkileyen en etkin parametrelerin östenitleme ve temperleme sıcaklıkları olduğu belirlenmiştir. Yüksek östenitleme ve düşük temperleme sıcaklıklarının sertlik ve aşınma özellikleri üzerinde iyileştirici etki oluşturduğu bildirilmiştir. Yakın zamandaki bir çalışmada ise [12], yüksek karbonlu çeliklerin östenitleme ve su verme ısıtma işleminden sonra temperlenmiş ve temperlenmemiş numuneleri inceleyerek kalıntı östenit üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Temperlenmiş numunelerde nano boyuttaki karbürlerin oluştuğunu ve kalıntı östenitin daha kararlı bir yapıya geldiği belirlenmiştir.

Derin kriyojenik işlem üzerine yapılan literatürdeki çalışmalarda temperleme işleminin araştırılmasından daha çok kriyojenik işlem parametrelerinin malzemeler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Literatürdeki kriyojenik işlemler çalışmalarının geneline bakıldığında, su verme ısıtma işleminden hemen ardından derin kriyojenik işlem uygulanmaktadır. Yapılan bu çalışma kapsamında M2 takım çeliğine su verme ısıtma işleminden sonra temperleme uygulanmış ve uygulanmamış durumlarının derin kriyojenik işlem ile birlikte mikroyapı ve tribolojik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Tablo 1. Takım çeliklerinde bulunan karbür mikroyapıları [9].

Karbür Türleri	Karbürü Oluşturan Elementler	Kristal Yapı	Geometri
MC	V (genelde), W, Mo, Cr	Yüzey merkezli kübik	Kümeleşmiş
M ₂ C	Mo, W (genelde), V, Cr	Hekzagonal	İğnemsî
M ₆ C	Mo, W (genelde), V	Yüzey merkezli kübik	Lamelli
M ₇ C ₃	Cr (genelde), V, Mo, Fe	Hekzagonal	Lamelli
M ₂₃ C ₆	Cr (genelde), V, Mo, Fe	Kübik (kompleks)	Lamelli

2. Materyal ve Metod

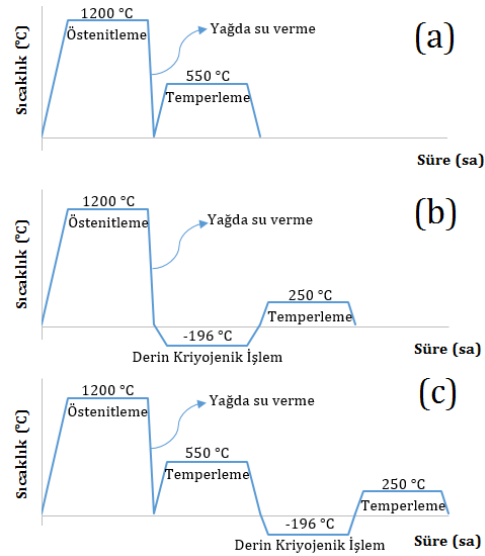
Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin ağırlıkça kimyasal bileşimi; % 0,9 C, % 0,37 Si, % 0,31 Mn, % 0,027 P, % 0,001 S, % 3,91 Cr, % 4,93 Mo, % 0,15 Cu, % 1,82 V, % 6,16 W, %81,422 Fe'dir. 25 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde bar şeklindeki AISI M2 takım çeliği kullanılmıştır. Numunelere uygulanan üç farklı ısıl işlem süreci (Şekil 1) ve numune kodları Tablo 2'de verilmiştir. Östenitleme ısıl işlemi 1200 °C'de 1 saat sürede gerçekleştirilmiştir ve ardından yağ ortamında su verilmiştir. Uygulanan temperleme işlemleri ise 30 dk süre ile gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik işlem sürecinde ise oda sıcaklığından 2°C/dk hız ile kontrollü soğutma ünitesi kullanılarak -196 °C sıcaklığa inilip 24 saat bekletildikten sonra yine 2 °C/dk hız ile oda sıcaklığına ısıtılmıştır.

Tablo 2. Isıl işlem prosesleri.

Numune Kodu	Isıl İşlem Detayı
HT1	Östenitleme (1200 °C) + yağda su verme + Temperleme (550 °C)
HT2	Östenitleme (1200 °C)+ yağda su verme + Derin kriyojenik işlem (-196 °C) + Temperleme (250 °C)
HT3	Östenitleme (1200 °C) + yağda su verme + Temperleme (550 °C) + Derin kriyojenik işlem (-196 °C) + Temperleme (250 °C)

Mikrosertlik testleri 200 grf kullanılarak FV-700 Future Tech sertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri 3'er kez tekrar edilerek ortalaması ele alınmıştır. Mikroyapı analizleri için numuneler parlatılıp pikral dağılayıcısı ile dağlandıktan sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM, ZEISS VP50, 20 kV)

ile incelenmiştir. SEM görüntüleri üzerinde yapılan kimyasal analizler için enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) kullanılmıştır. Mikroyapı içerisinde yer alan karbürlerin boyut ve miktar analizleri için ImageJ yazılımı kullanılmıştır. Faz analizleri için X-ışınları kırınımı (XRD, Bruker D8 Advance, CuK α radiation) cihazı 30°-90° 2 θ tarama aralığında kullanılmıştır.

**Şekil 1.** Numunelere uygulanan ısıl işlem süreçleri (a) HT1, (b) HT2, (c) HT3

Triboloji testleri ball-on-disk geometrisinde kuru sürtünme şartlarında CSM Tribometer cihazında 1 N yük altında ve 5 cm/s hızında gerçekleştirilmiştir. Testlerde aşındırma yarıçapı 2mm ve toplam aşındırma miktarı

10000 tur olarak ele alınmıştır. Aşınma esnasında sürtünme katsayısı değerleri bir yazılım tarafından kaydedilmiştir. Aşınma oranları, aşınan kanalların profillerinin Mitutoyo SJ-400 cihazı kullanılarak tespit edilmesi ile belirlenmiştir.

3. Bulgular

Şekil 2’de ısı işlem uygulanmış numunelere ait SEM mikroyapıları görülmektedir. Yapılan üç farklı ısı işlem sonucunda mikroyapıda meydana gelen farklı boyutlardaki karbürler martenzitik yapı üzerinde görülebilmektedir. Şekil 2a’da geleneksel su verme yöntemi ile elde edilen HT1 numunesi yer almaktadır. Isıl işlemler sonrasında meydana gelen irili ufaklı açık gri renkte karbürler görülebilmektedir. Özellikle tane sınırlarında karbürlerin kümeleştiği ve daha büyük boyutlarda olduğu görülmektedir. Şekil üzerinde bu bölgeler (iri boyuttaki karbürler) birincil karbürler olarak gösterilmiştir. Literatürde de özellikle yüksek alaşımli takım çeliklerinde geleneksel su verme ısı işleminden sonra büyük boyutlarda karbürlerin oluştuğu belirtilmiştir ve bu karbürlere birincil karbür adı verilmektedir [13]. Geleneksel ısı işlem sonucunda yüksek alaşımli takım çeliklerinde bir miktar kalıntı östenit kalmaktadır. Bu kalıntı östenit miktarını azaltmak ve yeni ufak boyutta ikincil karbürler oluşturmak maksadı ile kriyojenik işlem uygulanmaktadır [13]. Geleneksel takım çeliklerinin üretimi esnasında yarı kararlı M₂C karbürleri daha kararlı yapıdaki karbür formlarına dönüşebilmektedir. Literatürde M₂C türündeki karbürlerin daha kararlı duruma geçtikleri mekanizma “M₂C + matris → M₆C + MC” şeklinde bahsedilmektedir [14,15]. Temperleme işlemi sonrasında birincil ve ötektik karbürlerin difüzyon yoluyla kimyasal bileşimi değişir. Yüksek sıcaklıkta belirli bir süre bekletildiğinde serbest yüzey enerjisini azaltarak daha kararlı hale gelebilmek için bütün karbür türleri kümeleşebilir ve küreselleşebilir [16]. Özellikle Şekil 2b-c’de HT2 ve HT3 numunelerinde homojen dağılımlı ufak ve küresel karbürler yer almaktadır. HT1 numunesinde ise geleneksel su verme işleminden sonra karbürlerin kümeleştiği açıkça görülmektedir.

Peng ve diğerleri [17], S390 HSS malzemesine farklı sıcaklıklarda östenitleme ve temperleme işlemi uygulamışlardır. Yapılan ısı işlemler

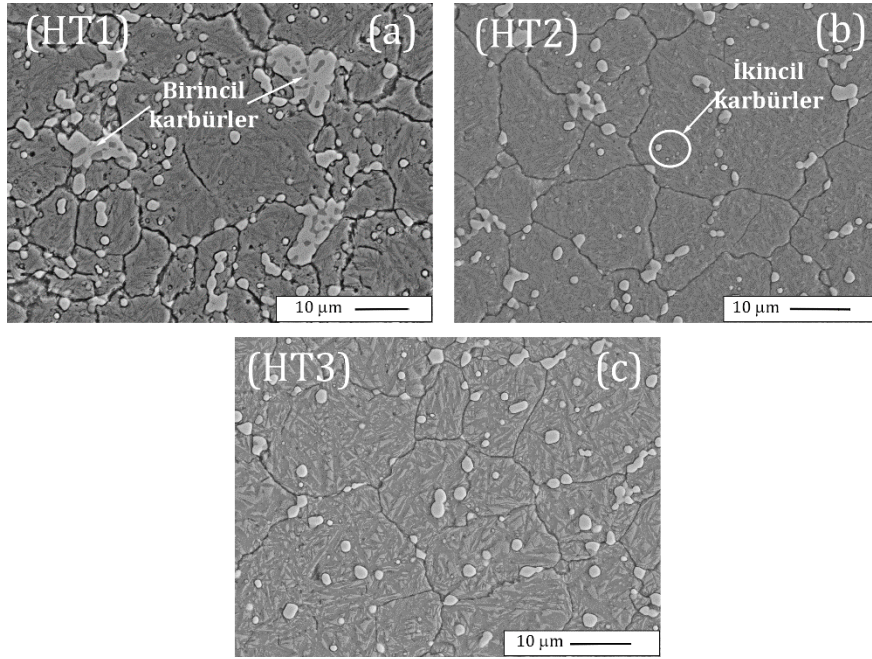
sonrasında yapıda sadece ufak MC ve M₆C karbürlerinin bulunduğunu ve bu karbürlerin yarı kararlı olduğunu ve östenitleme işlemi dahi yapı içerisinde çözünebileceğini belirtmişlerdir. Bunun sonucunda ise bu karbürlerin boyutlarının daha da küçülebileceğini büyük boyuttaki karbürler ise yüzey enerjisi küçük karbürlere nazaran daha az çözüldüğünü ve bunun sonucunda yapıda MC karbürleri (Vanadyum’ca zengin) büyük halde görüldüğünü bildirmişlerdir. Bunun yanı sıra temperleme işlemi sonrasında küresel ve birbirinden ayrık durumda karbürlerin oluştuğu belirtilmiştir. Ayrıca su verme sonrasında yapılan temperleme neticesinde ise yapıda tempersiz numuneye göre daha fazla oranda MC (VC - Vanadyum karbür) olduğunu belirlemişlerdir.

Şekil 3’te SEM analizleri sonrasında üç farklı ısı işlem ile elde edilen mikroyapılardaki karbür boyutlarının mikroyapıdaki hacimsel (mikroyapı da bulunan tüm karbürlerin, birbirlerine göre hacimsel oranı) oranları verilmiştir. Yapılan bu analizler mikroyapıların en az üç farklı bölgesinden alınan görüntülerden yapılmıştır ve çıkan sonuçların ortalaması ile grafik çizilmiştir. Literatürde karbür boyutları üç grupta incelenmiştir; boyutları 1 µm’den ufak olan küçük ikincil karbürler, boyutları 1 ile 5 µm arasında olan büyük ikincil karbürler ve boyutları 5 µm’den büyük olan birincil karbürlerdir [18]. Şekil 3 incelendiğinde, derin kriyojenik işlem uygulanan HT2 ve HT3 numunelerinde, HT1 numunesine göre 1 mikrondan küçük karbür oranı daha fazladır. HT1 numunesinde ise 1-5 µm arası ve 5 µm’den büyük karbür hacimsel oranı HT2 ve HT3 numunelerine göre daha fazladır. Derin kriyojenik işlem neticesinde küçük ikincil karbürler meydana geldiği analizler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Literatürde de yer alan benzer bir çalışmada, yüksek hız çeliğine farklı kriyojenik işlemler uygulanmış ve mikroyapıda kriyojenik işlemten sonra küçük ikincil karbürlerin ortaya çıktığını belirtmişlerdir [19]. 1 µm’den ufak karbür oranları incelendiğinde, en fazla oran HT2 numunesinde görülmektedir. HT3 numunesi kriyojenik işlemten önce temperlendiği için oluşan ikincil karbür oranı %46,8’dir ve HT2’nin ikincil karbür oranı %51,4’ten daha azdır. Derin kriyojenik işlem uygulanmayan HT1 numunesinde ise bu oranın en az olduğu görülmektedir. Bunların yanı sıra HT1, HT2 ve HT3 numunelerine ait ortalama

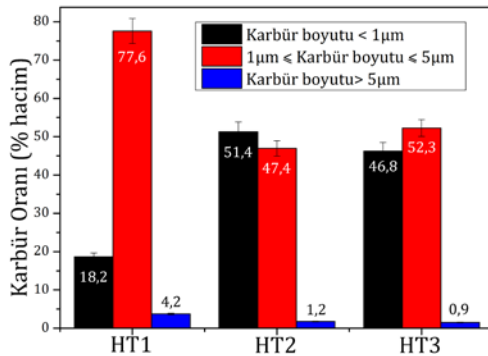
karbür boyutları sırasıyla 1,85, 1,29 ve 1,34 μm 'dir.. 1 mikrondan küçük karbür oranları ile uyumlu olarak HT2 nin ortalama karbür boyutunun en küçük, sonra sırasıyla HT3 ve HT1 olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4'te numunelere uygulanan ısıl işlemlerden sonra yapılan EDS analizleri verilmiştir. Karbürler üzerinden alınan EDS analizleri sonucunda, Şekil 4a'da yapılan analizde W ve Mo elementlerine ait % ağırlıkça oranlar sırasıyla 36,7 ve 25,78'dir. Şekil 4b-c de yapılan analizlerde de benzer oranlar elde edilmiştir.

Şekil 4d'de yapılan çizgisel EDS analizinde V elementine ait % 57,93 ağırlıkça orana sahiptir. Yapılan EDS analizleri sonucunda elde edilen kimyasal birleşimler ile Versaci'nin [20] çalışmasındaki AISI M2 çeliğine yaptığı ısıl işlemler sonucunda elde ettiği kimyasal bileşim oranları benzerlik göstermektedir. Bu oranlar neticesinde Şekil 3abc'de incelenen karbürlerin M_6C , Şekil 3d'de analizi yapılan koyu gri renkteki karbürün ise MC yapıdaki bir karbür olduğu söylenebilir. M_6C karbür yapıları $\text{A}_3\text{B}_3\text{C}$ ve $\text{A}_4\text{B}_2\text{C}$ formlarında olabildiği gibi A (Fe, Cr) ve B (W, Mo) elementlerinden oluşur.



Şekil 2. Farklı ısıl işlemlenmiş numunelere ait mikroyapı görüntüleri



Şekil 3. Farklı ısıl işlemler sonrasında farklı boyutlarda oluşan karbürlerin hacimsel oranları

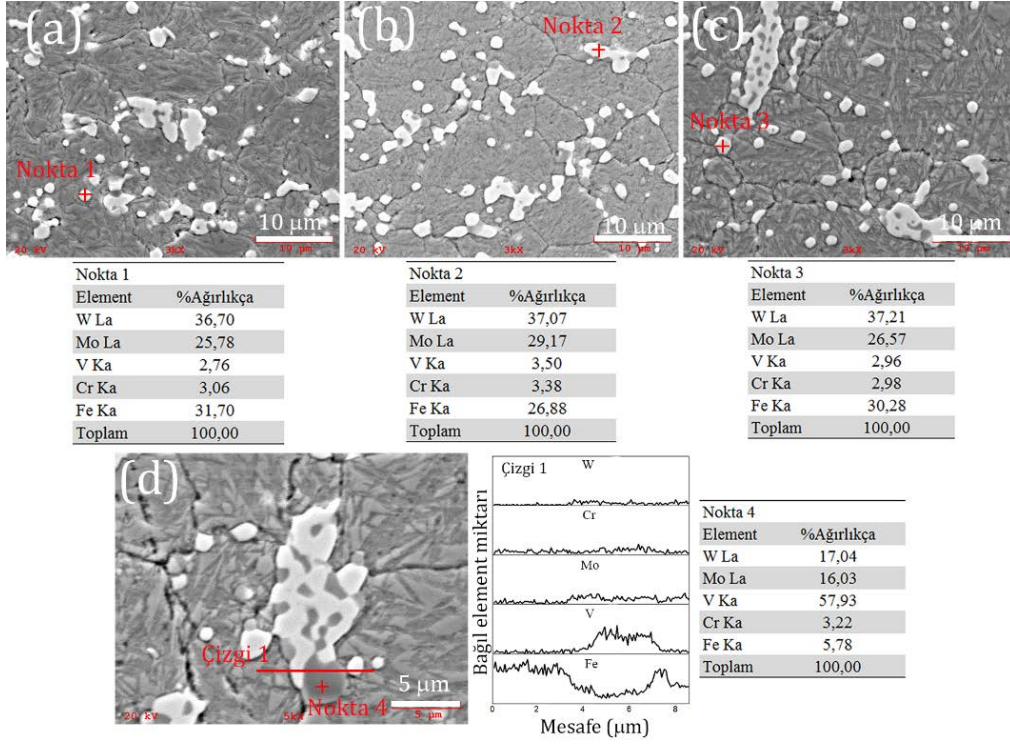
Farklı ısıl işlemler sonrasında numunelere ait elde edilen XRD spektrumları Şekil 5'te görülmektedir. Sadece M_6C , MC, martenzit ve kalıntı östenit fazları belirlenmiştir. Su verme işleminin hemen ardından derin kriyojenik işlem uygulanması ile HT2 nolu numunede kalıntı östenit fazına ait pik (49° - 50°) şiddetinin diğer numunelere göre çok düşük olduğu görülmektedir. Literatürde de yüksek alaşımli ve karbonlu takım çeliklerine uygulanan kriyojenik işlem ile su verme prosesinin hemen ardından yapıda bulunan kalıntı östenitin martenzite dönüştüğü belirtilmiştir [21]. HT3 nolu numunede derin kriyojenik işlem uygulanmasına rağmen kalıntı östenite pik şiddetlerinin HT2'ye ait pik şiddetlerinden fazla

olması, derin kriyojenik işlem öncesinde 550 °C temperleme işleminin uygulanması ile kalıntı östenitin daha kararlı hale geldiği [12] ve böylece derin kriyojenik işlemi uygulansa dahi yapının tamamının martenzite dönüşmediği söylenebilir. Yüksek hız çeliklerinde geleneksel su verme işleminden sonra temperleme işlemi yaklaşık olarak 550-560 °C yapılır. Bununla beraber temperleme işlemi genellikle kalıntı östenitin kalmaması amacıyla üç kez tekrar edilir [8,22]. Bu çalışma kapsamında su vermeden sonraki temperleme prosesi ısı işlem maliyetini azaltmak amacıyla 1 kez gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik işlemden sonra uygulanan 250 °C temperleme işlemi ise kriyojenik işlemden kaynaklı kalıntı gerilmelerin giderilmesi amacıyla yapılmıştır.

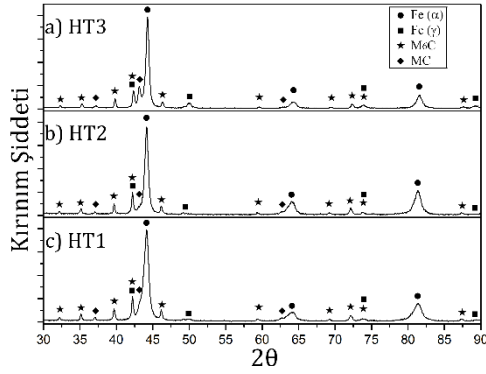
500-550 °C aralığında temperleme işlemi esnasında yüksek karbon içeriğine sahip kalıntı östenitten yeni karbürler meydana gelir ve martenzit dönüşüm sıcaklığı (Ms) yükselir. Sonuç olarak, martenzit dönüşümü temperleme sonrası soğutma esnasında da gerçekleşebilir [8]. Bu durumda konvensiyonel su verme işleminin ardından temperleme prosesinin yapılması ve ardından derin kriyojenik işlem uygulanması durumunda kararlı karbür yapılarının oluşması muhtemeldir. Godet ve diğerleri [1], AISI M42 yüksek hız çeliğinde karbür oluşumunu $M_2C + \text{matris} \rightarrow M_6C + MC + \text{matris}$ formunda gerçekleştiğinden bahsetmişlerdir. M_2C karbürünün V elementi açısından MC karbürüne göre daha zengin olduğunu belirtmişler ve buna göre karbür oluşum mekanizması sonucunda MC karbürünün V oranınca zengin olacağını açıklamışlardır. Ayrıca bu duruma bağlı olarak MC karbürlerinin çoğunlukla M_6C karbürlerinin tane sınırlarında görüldüğünü de belirtmişlerdir. Bu durum Şekil 4d'de çizgisel EDS analizinin olduğu karbür tanesinde görülebilir. Açık gri minik karbür tanelerinin kümeleştiği bölgede koyu gri renkte MC karbürüne rastlanmıştır.

Şekil 6'da numunelere ait makrosertlik değerleri verilmiştir. Isıl işlemsiz, HT1, HT2 ve HT3 numunelerine ait sertlik değerleri sırası ile 27,1, 64,4, 64,5 ve 66,2 HRC'dir. Isıl işlemler sonrasında HT1, HT2 ve HT3 arasında sertlik açısından kriyojenik işlemlerle numunelerde bir artış olmasına rağmen belirgin bir farklılık görülmektedir. Literatürde de benzer olarak farklı şekillerde kriyojenik işlem uygulanmış takım çeliklerinde belirgin bir farklılık görülmektedir. Sertlikte bariz farklılığın olmamasına rağmen aşınma özellikleri açısından belirgin farklılıklar olduğu belirtilmiştir [21,23].

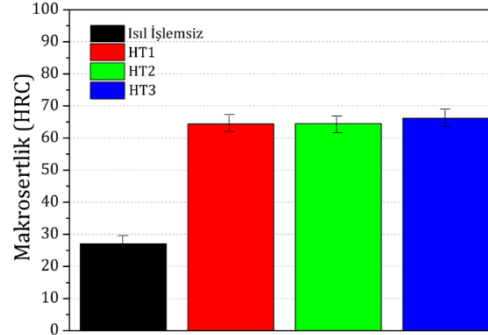
AISI M2 yüksek hız çeliği özellikle kesici takım olarak kullanılması durumunda aşınma en önemli hata durumudur. Bu amaçla uygulanan ısı işlemli numuneler aşınma deneylerine tabi tutulmuşlardır. Şekil 7'de 3 farklı ısı işlemli numuneye ait atmosferik şartlarda gerçekleştirilen aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme katsayısı grafiği görülmektedir. Geleneksel ısı işlemli HT1 numunesine ait sürtünme katsayısı değerinin derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde ise eğriler birbirine oldukça yakın değerlerdedir. Bununla birlikte HT3 nolu numunenin daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Aşınma testleri esnasında aşındırıcı bilye ile numuneler arasındaki sürtünme katsayısı ilk etapta yükseliş göstermektedir. Daha sonra bir geçiş aşamasından geçer ve yavaş yavaş kararlı bir duruma dönüşür. Bu geçiş aşamasında, sürtünme katsayısında bir düşüş gözlenir. Sürtünme katsayısındaki düşme ise karşılıklı temas eden yüzeylerin kayma esnasında yüzeyleri daha pürüzsüz hale getirmesi olduğu söylenebilir. Bu durumun ardından sürtünme katsayısında aşınma partiküllerinin kayma yüzeyleri arasına girmesi ile yine bir artış gözlenir. Yukarıda anlatılan olgu, detaylı olarak Grairia ve diğerleri tarafından ele alınmıştır [24].



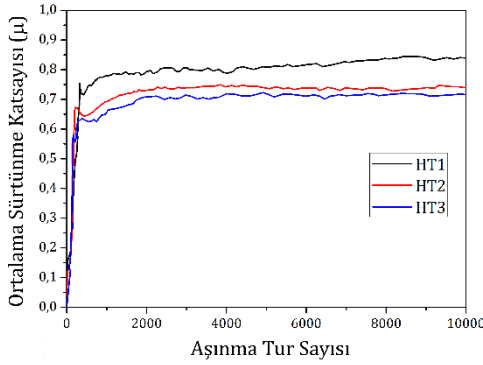
Şekil 4. Farklı ısıl işlemler sonrasında mikroyapıda meydana gelen karbürler (a) HT1, (b) HT2, (c) HT3, (d) HT3 detaylı



Şekil 5. Farklı ısıl işlemlenmiş numunelere ait XRD analizleri



Şekil 6. Farklı ısıl işlemlenmiş numunelere ait makrosertlik değerleri

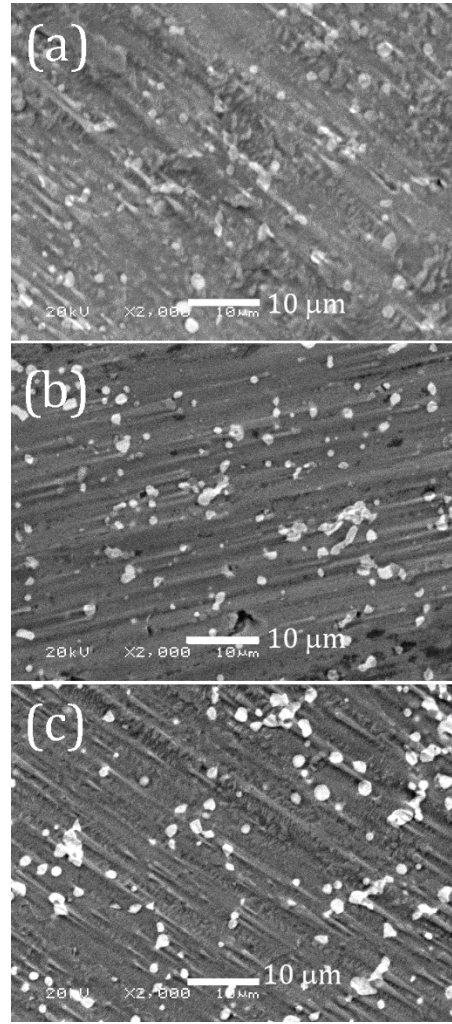


Şekil 7. Isıl işlemlenmiş numunelere ait aşınma tur sayısına bağlı ortalama sürtünme katsayısının değerinin değişimi

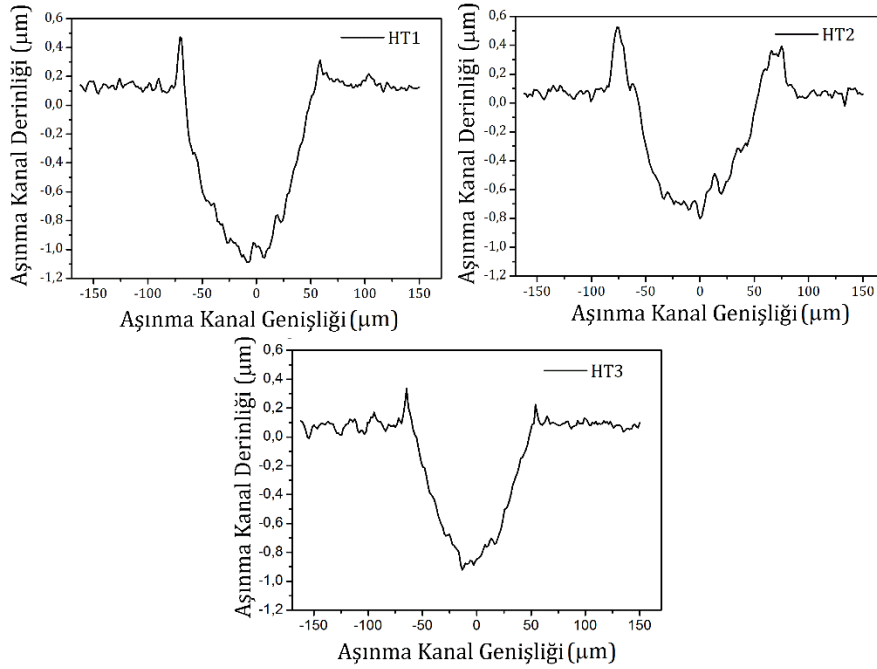
HT2 ve HT3 numunelerinde daha düşük sürtünme katsayısının oluşma sebebi ise, derin kriyojenik işlem neticesinde yapıda meydana gelen ikincil karbürlerin yapıya çok iyi tutunarak yüzeyin hem az aşınmasına hemde karşıt aşındırıcı malzemenin altlık malzeme üzerinde kayarak adhezif ve abrazif etkiyi azalttığı yapılan önceki çalışmalarda da belirtilmiştir [25]. En düşük sürtünme katsayısının HT3 numunesinde olması durumu ise, hem derin kriyojenik işlem sonrasında yapıda ufak ikincil karbürler oluşmasıdır hemde Zhang ve diğerlerinin [26] belirttiği üzere kalıntı östenitin yağlayıcı özelliğinden kaynaklıdır. HT3 numunesinde XRD sonuçlarında kalıntı östenit fazının HT2 numunesine göre fazla olduğu belirlenmiştir. HT3 numunesindeki kalıntı östenitin ise temperleme işleminden sonra kararlı bir yapıya sahip olduğu daha önceki bulgularda belirtilmiştir.

HT1, HT2, HT3 numunelerine ait aşınma kanalı görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8abc'deki görüntülerde aşınma doğrultusu boyunca aşınma kanalları ve bunun yanı sıra aşınmanın adhezif ve abrazif olduğu görülmektedir. HT1, HT2 ve HT3 numunelerindeki aşınma morfolojileri birbirine benzemektedir. HT1 numunesinde delaminasyon miktarının biraz daha fazla olduğu görülebilmektedir. Yapı içerisindeki minik karbürlerin HT2 ve HT3 numunelerindeki gibi fazla belirgin olmadığı, karbürlerin üzerine matrisin delamine olduğu görülebilmektedir. HT2 ve HT3 de ise kayma esnasında derin kriyojenik işlem sonucunda yapıda daha kararlı halde bulunan karbürlerin

matrisin kayma esnasında plastik deformasyona uğramasını önlediği söylenebilir. Zhang ve diğerleri [26], kümeleşmiş MC karbürlerin, M_2C karbürlerle kıyasla mikroyapıya güçlü bir şekilde sabitlendiğini ve ağır yükler tarafından kolayca ezilmediğini belirtmişlerdir. Yüksek hız çeliklerindeki VC karbürler yüksek serlik değerlerinden dolayı M_2C ve M_6C tipindeki karbürlerle kıyasla mükemmel aşınma özelliklerine sahiptir.



Şekil 8. Isıl işlemlenmiş numunelere ait aşınma kanalı görüntüleri (a) HT1, (b) HT2, (c) HT3



Şekil 9. Numunelere ait aşınma kanal profilleri

Şekil 9'da, aşınma kanallarının profilleri görülmektedir. Aşınma profillerinin alanları üzerinden yapılan aşınma oranı hesaplarına göre HT1, HT2 ve HT3 numunelerine ait aşınma oranları (mm³/N/m) sırasıyla 1.18E-05, 8.44E-06, 7.24E-06'dır. Şekil 9 üzerinde de açıkça görüleceği üzere HT1 numunesi en fazla aşınan, HT3 numunesi ise en az aşınan numune olduğu belirlenmiştir. Mikroyapı analizlerinde de bahsedildiği üzere derin kriyojenik işlem sonrasında yapıda oluşan kararlı karbürler numunelerin aşınma direncinde etkin bir rol oynadığı görülmektedir. Ayrıca XRD analizlerinde de bahsedildiği üzere HT3 numunesinde HT2 numunesine göre kalıntı östenit miktarının fazla olduğu belirlenmiştir. Literatürde de bahsedildiği üzere stabil kalıntı östenitin yağlayıcı etkisi ile bir miktar daha aşınma direncinin artması ile HT3 numunesi en iyi tribolojik özellikleri sergilemiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

AISI M2 yüksek hız çeliğine 3 farklı ısıl işlem uygulanarak mikroyapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Uygulanan derin kriyojenik işlem neticesinde yapıda ikincil karbür adı verilen ufak yeni karbürler homojen dağılım sergileyerek oluşmaktadır. Farklı ısıl işlemler sonrasında

sertlik değerlerinde kriyojenik işlem sonrasında bir miktar artmasına rağmen belirgin bir farklılık tespit edilmemiştir. Sertlik, aşınma davranışını etkileyen bir parametredir. Sertliğin artması ile aşınma dayanımında beraberinde artması beklenir. Literatürde de 1-2 HRC'lik sertlik değişimleri belirlenmiştir. Buna rağmen kriyojenik işlem sonrasında mikroyapıda meydana gelen karbürlerin, malzemenin aşınma davranışının iyileştirdiğinden bahsedilmektedir. Farklı ısıl işlemler sonrasında bütün numunelerin mikroyapıların da MC, M₆C karbürlerinin meydana geldiği belirlenmiştir. HT2 ve HT3 numunelerinde ise, kriyojenik işlem uygulanması sonucunda mikroyapılarında 1 µm'den de küçük yeni ikincil karbürlerin meydana geldiği belirlenmiştir. Kriyojenik işlemlen numunelerin konvansiyonel su verme yöntemine göre daha iyi tribolojik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Konvansiyonel su verme+temper+derin kriyojenik işlemi (HT3) uygulanmış numunenin yapısındaki yağlayıcı özellikli kalıntı östenit ve ikincil karbürler sayesinde en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu iyileşme sayesinde, özellikle sac metal imalat sektöründe kullanılan zımba takımlarının aşınma dirençlerinin artmasından dolayı,

kullanım ömürlerinin artması ve aynı zamanda düşük sürtünme katsayısından dolayı daha düşük enerji tüketimi ile imalatın gerçekleştirilebilmesi mümkün olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında uygulanan ısıl işlemler MMD Ltd. (www.mmdteknoloji.com) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Kaynakça

- [1] Godec, M., Vecko Pirtovsek, T., Setina Batic, B., McGuinness, P., Burja, L., Podgornik, B. 2015. Surface and Bulk Carbide Transformations in High-Speed Steel. *Scientific Reports*, Cilt. 5, s. 16202. DOI: 10.1038/srep16202
- [2] Gill, S. S., Singh, R., Singh, J., Singh, H. 2012. Adaptive neuro-fuzzy inference system modeling of cryogenically treated AISI M2 HSS turning tool for estimation of flank wear, *Expert Systems with Applications*, Cilt. 39, s. 4171-4180. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.09.117
- [3] Öteyaka, M.Ö., Çakır, F.H., Çelik, O.N. 2020. Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the corrosion behavior of Ti6Al4V alloy in isotonic solution, *Materials and Corrosion*, s. 1-10. DOI: 10.1002/maco.201911378
- [4] Özer, M. 2019. AISI H13 Takım Çeliğine Uygulanan Derin Kriyojenik İşlem ve Temperleme Isıl İşleminin Mikroyapı, Sertlik ve Darbe Enerjisine Etkisi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, Cilt. 7, s. 688-699. DOI: 10.29109/guisc.603355
- [5] Çiçek, A., Kivak, T., Uygur, I., Ekici, E., Turgut, Y. 2011. Performance of cryogenically treated M35 HSS drills in drilling of austenitic stainless steels, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 60, s. 65-73. DOI: 10.1007/s00170-011-3616-8
- [6] Chopra, S. A., Sargade, V.G. 2015. Metallurgy behind the Cryogenic Treatment of Cutting Tools: An Overview, *Materials Today: Proceedings*, Cilt. 2, s. 1814-1824. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.119
- [7] Shen, Y. F., Qiu, L.N., Sun, X., Zuo, L., Liaw, P.K., Raabe, D. 2015. Effects of retained austenite volume fraction, morphology, and carbon content on strength and ductility of nanostructured TRIP-assisted steels, *Materials Science and Engineering: A*, Cilt. 636 s. 551-564. DOI: 10.1016/j.msea.2015.04.030
- [8] Totten, G. E. 2006. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*: Taylor & Francis. Boca Raton, 848s.
- [9] Serna, M.M., Jesus, E.R.B., Galego, E., Martinez, L.G., Corrêa, H.P.S., Rossi, J. L. 2006. An Overview of the Microstructures Present in High-Speed Steel - Carbides Crystallography, *Materials Science Forum*, Cilt. 530-531, s. 48-52. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.530-531.48
- [10] Li, J., Yan, X., Liang, X., Guo, H., Li, D.Y. 2017. Influence of different cryogenic treatments on high-temperature wear behavior of M2 steel, *Wear*, Cilt. 376-377, s. 1112-1121. DOI: 10.1016/j.wear.2016.11.041
- [11] Oppenkowski, A., Weber, S., Theisen, W. 2010. Evaluation of factors influencing deep cryogenic treatment that affect the properties of tool steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt. 210, s. 1949-1955. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.007
- [12] Hossain, R., Pahlevani, F., Sahajwalla, V. 2019. Stability of retained austenite in high carbon steel – Effect of post-tempering heat treatment, *Materials Characterization*, Cilt. 149, s. 239-247. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.01.034
- [13] Das, D., Dutta, A.K., Ray, K.K. 2010. Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness, *Materials Science and Engineering: A*, Cilt. 527, s. 2182-2193. DOI: 10.1016/j.msea.2009.10.070
- [14] Pan, F.-s., Wang, W.-q., Tang, A.-t., Wu, L.-z., Liu, T.-t., Cheng, R.-j. 2011. Phase transformation refinement of coarse primary carbides in M2 high speed steel, *Progress in Natural Science: Materials International*, Cilt. 21, s. 180-186.
- [15] Zhou, X.F., Fang, F., Jiang, J.Q., Zhu, W.L., Xu, H.X. 2013. Refining carbide dimensions in AISI M2 high speed steel by increasing solidification rates and spheroidising heat treatment, *Materials Science and Technology*, Cilt. 30, s. 116-122. DOI: 10.1179/1743284713Y.0000000338
- [16] Zhou, B., Shen, Y., Chen, J., Cui, Z.-s. 2011. Breakdown Behavior of Eutectic Carbide in High Speed Steel During Hot Compression, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Cilt. 18, s. 41-48.
- [17] Peng, H., Hu, L., Ngai, T., Li, L., Zhang, X., Xie, H., Gong, W. 2018. Effects of austenitizing temperature on microstructure and mechanical property of a 4-GPa-grade PM high-speed steel, *Materials Science and Engineering: A*, Cilt. 719, s. 21-26. DOI: 10.1016/j.msea.2018.02.010
- [18] Ghasemi-Nanesa, H., Jahazi, M. 2014. Simultaneous enhancement of strength and ductility in cryogenically treated AISI D2 tool steel, *Materials Science and Engineering: A*, Cilt. 598, s. 413-419. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.065
- [19] Yan, X.G., Li, D.Y. 2013. Effects of the sub-zero treatment condition on microstructure, mechanical behavior and wear resistance of W9Mo3Cr4V high speed steel, *Wear*, Cilt. 302, s. 854-862. DOI: 10.1016/j.wear.2012.12.037
- [20] Versaci, R.A., 1988. Stability of carbides in M2 high speed steel, *Journal of Materials Science Letters*, Cilt. 7, s. 273-275. DOI: 10.1007/BF01730195
- [21] Li, H., Tong, W., Cui, J., Zhang, H., Chen, L., Zuo, L. 2016. The influence of deep cryogenic treatment on the properties of high-vanadium alloy steel, *Materials Science and Engineering: A*, Cilt. 662, s. 356-362. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.039
- [22] Serna, M.M., Rossi, J.L. 2009. MC complex carbide in AISI M2 high-speed steel, *Materials Letters*, Cilt. 63, s. 691-693. DOI: 10.1016/j.matlet.2008.11.035
- [23] Firouzidor, V., Nejati, E., Khomamizadeh, F. 2008. Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt. 206, s. 467-472. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.072

- [24] Grairia, A., Beliardouh, N.E., Zahzouh, M., Nouveau, C., Besnard, A. 2018. Dry sliding wear investigation on tungsten carbide particles reinforced iron matrix composites, *Materials Research Express*, Cilt. 5, s. 116528. DOI: 10.1088/2053-1591/aade07
- [25] Das, D., Dutta, A.K., Ray, K. K. 2009. Correlation of microstructure with wear behaviour of deep cryogenically treated AISI D2 steel, *Wear*, Cilt. 267, s. 1371-1380.
DOI: 10.1016/j.wear.2008.12.051
- [26] Zhang, M., Chen, C., Qin, L., Yan, K., Cheng, G., Jing, H., Zou, T. 2017. Laser additive manufacturing of M2 high-speed steel, *Materials Science and Technology*, Cilt. 34, s. 69-78.
DOI: 10.1080/02670836.2017.1355584