



X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinde menevişleme ve kriyojenik işlemin mikroyapı ve tribolojik özelliklere etkisi

Effect of tempering and cryogenic treatment on microstructure and tribological properties in X40CrMoV5-1 hot work tool steel

Fulya Kahrıman^{1,*} 

¹ Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 41001, Kocaeli, Türkiye

Öz

Bu çalışmada kalıp malzemesi olarak kullanılan bir X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinde öncelikli olarak farklı ısı işlemlerin mikroyapı ve sertlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Isıl işlem prosesleri, östenitleme, kriyojenik işlem ve üç farklı sıcaklıkta iki aşamalı menevişleme olarak uygulanmıştır. Isıl işlemler sonrasında numunelerin mikroyapıları ışık mikroskobu ile incelenmiş ve RockwellC sertlikleri ölçülmüştür. Daha sonra meneviş sıcaklığı ve kriyojenik işlem durumuna göre seçilen belirli numunelere gaz nitrasyon yöntemi ile nitrülleme yüzey işlemi uygulanarak tribolojik özellikler araştırılmıştır. Nitrülenmiş numunelerde kriyojenik işlemin tribolojik özelliklere etkisi kuru sürtünme aşınma testi uygulanarak spesifik aşınma oranı ve mikroskobik incelemeler ile araştırılmıştır. Sonuçlar, nitrülenmiş numunelerden derin kriyojenik işlemin uygulandığı numunede tribolojik özelliklerin spesifik aşınma oranı ve aşınma mekanizması açısından daha iyi özellikler sergilediğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Sıcak iş takım çeliği, Kriyojenik işlem, Nitrasyon, Triboloji

1 Giriş

Sıcak iş takım çelikleri, basınçlı döküm, dövme ve enjeksiyon kalıplama uygulamaları için kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadırlar [1, 2]. En yaygın kullanılan kalitelerinden birisi, tipik olarak Cr, Mo ve V içeriğinden dolayı menevişleme sırasında ikincil sertleşmeye uygun olan X40CrMoV5-1 takım çeliğidir [1, 2].

Bununla birlikte, kalıplar sıcak şekillendirme prosesleri sırasında sıcak metal ile doğrudan etkileşime girdiğinde yüksek mekanik gerilmelere, termal yorulmaya ve aşınmaya maruz kalmaktadır. Bu etkiler kalıpların sık sık bakımını veya değiştirilmesini gerektirdiğinden sınırlı kalıp ömrüne neden olmaktadır. Bu nedenle servis sıcaklıklarında sıcak iş takım çelikleri mekanik özelliklerin iyi bir kombinasyonuna sahip olmalıdır [3].

Takım çeliği bileşenlerinin metalurjik, mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli termal, mekanik ve termo-mekanik yöntemler bulunmaktadır. Dolayısıyla sıcak iş takım çeliklerinin özelliklerini iyileştirmek için uygulanabilecek yöntemlerden birisi de ısı

Abstract

In this study, the effect of different heat treatments on the microstructure and hardness of an X40CrMoV5-1 hot work tool steel used as a mold material was investigated. Heat treatment processes were applied as austenitization, cryogenic treatment and two-stage tempering at three different temperatures. After heat treatments, the microstructures of the samples were examined with a light microscope and RockwellC hardness was measured. Then, tribological properties were investigated by applying nitriding surface treatment with gas nitriding method to certain samples selected according to tempering temperature and cryogenic treatment condition. The effect of cryogenic treatment on the tribological properties of nitrided samples was investigated with the specific wear rate and microscopic examinations as a result of the dry friction wear test. The results showed that the tribological properties of the nitrided samples in terms of specific wear rate and wear mechanism were better in the deep cryogenic treatment applied sample.

Keywords: Hot work tool steel, Cryogenic treatment, Nitriding, Tribology

işlemlerdir [4]. Sıcak iş takım çeliklerinin ısı işlemi, kütleli özelliklerinin önemli ölçüde bağlı olduğu mikroyapısal bileşenlerin miktarını, boyutunu ve dağılımını değiştirmeye yardımcı olur. Isıl işlem sıcaklığı, tutma süresi ve soğutma hızı vb. faktörler mikroyapısal mekanizmaları etkileyen önemli proses parametreleridir.

Takım çeliklerinde sertleştirmeyi sağlamak için uygulanan östenitleme ve su verme işleminden sonra mikroyapıda martenzit ve bir miktar kalıntı östenit elde edilmektedir ve bu sırada oluşan iç gerilmelerden dolayı malzeme kırılma hale gelmektedir. Bu nedenle iç gerilmeleri ortadan kaldırmak ve aynı zamanda sertlik ve tokluğun kombinasyonunu sağlamak için su verme işlemi sonrasında menevişleme ısı işlemi uygulanmaktadır [5]. X40CrMoV5-1 takım çeliğinde beklenen mekanik özelliklere göre farklı sıcaklıklarda menevişleme ısı işlemi gerçekleştirilebilir [4]. Menevişleme sırasında, X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşiminde bulunan Cr ve Mo elementlerinin martenzitik matris içinde M₂C ve M₇C₃ formunda kararlı ikincil karbürleri

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fulya.kahrıman@kocaeli.edu.tr (F. Kahrıman)
Geliş / Received: 26.07.2023 Kabul / Accepted: 20.12.2023 Yayınlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1333357

oluşturmaları dislokasyon hareketini engelleyerek çeliğin sertliğinde artışa neden olur ve yüksek sıcaklık mekanik özelliklerini iyileştirir [6]. Menevişleme aşamasında bu ikincil karbürlerin oluşumu, takım çeliklerinin kimyasal bileşimi, alaşım elementlerinin difüzyon özellikleri ve öngörülen ısıl işlemle güçlü bir şekilde ilişkilidir. Örneğin, Cr elementinin varlığı genellikle dönüşümü engeller, bu nedenle menevişleme daha yüksek bir sıcaklıkta uygulanmalıdır [7-9]. Bu çalışmada X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin bileşimine bağlı olarak üç farklı menevişleme sıcaklığının etkisi incelenmiştir.

Geleneksel yöntem olarak uygulanan östenitleme, su verme ve menevişleme ısıl işlemleri sonrasında yapıda mevcut olan kalıntı östenitin, malzemenin sertliğini, mukavemetini, aşınma ve çentik darbe direncini düşürmesi gibi olumsuz etkileri bulunmaktadır. Kalıntı östenitin giderilmesi amacıyla her ne kadar yüksek sıcaklıkta menevişleme işlemi yapılırsa da bu işlem kriyojenik işlem kadar etkili değildir. Kriyojenik işlem süreci, geleneksel olarak sertleştirilmiş çeliğin sıfırın altında seçilen bir sıcaklığa kontrollü olarak soğutulmasını ve ardından belirli bir süre bekletildikten sonra sonraki menevişleme işlemi için numunelerin ortam sıcaklığına kontrollü bir şekilde ısıtılmasını içerir [10].

Kriyojenik işlem sırasında kalıntı östenitin martenzite dönüşümünde martenzit sertliğinin elde edilmesinin yanı sıra hacimsel artış nedeniyle martenzit kafesinde deformasyon meydana gelir. Deformasyona bağlı olarak yapıda dislokasyonlar oluşur. Bu dislokasyonlar, kriyojenik işlem sonrasında uygulanan menevişleme işleminde oluşacak ince ikincil karbür çökeltileri için çekirdeklenme yöreleri görevi görürler [11-14].

Sıcak iş takım çeliklerinin aşınma direncinin geliştirilmesinde ısıl işlemler sonucu oluşan martenzit, ikincil karbürler vb. mikroyapısal etkinin yanında yüzey sertliğinin iyileştirmesi de önemlidir [7]. Nitrasyon takım çeliklerine uygulanan en önemli termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden biridir. Nitrasyon ile sıcak iş takım çeliği yüzeyinde en dışta nitrürlerden oluşan bir tabaka ve bu tabakanın altından altlık malzemeye doğru difüzyon bölgesi oluşur. Difüzyon bölgesinde altlık malzemeye doğru azot miktarı ve sertlik giderek azalır. Demir nitrürlerin dışında M_xN_y olarak formüle edilen alaşım elementlerinin nitrürleri de difüzyon bölgesinde çökelebilir (M: Al, Cr, V, Mo, vb. gibi nitrür oluşturan elementleri temsil eder) [15]. X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinde alaşım elementlerinin CrN gibi çok sert ve termal olarak kararlı nitrürler oluşturması ile aşınma, erozyon ve termal yorulma özellikleri daha da artırılabilir [16, 17].

2 Materyal ve metot

Tablo 1’de çalışmada kullanılan ve endüstriyel bir kalıptan alınan sıcak iş takım çeliğinin optik emisyon spektrometre analiz sonucu verilmiştir. Değerler beş ölçümün ortalama sonucunu göstermektedir.

Sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş kalıptan altı adet numune alınarak, her bir numune için Tablo 2’de verilen ısıl işlem sıralaması uygulanmıştır. Numunelere uygulanan ısıl işlemler için proses parametreleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 1. Kalıp malzemesinin optik emisyon spektrometre analiz sonucu (ağırlık %)

DIN	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
X40CrMoV5-1	0,39	1,00	0,40	5,20	1,40	0,90

Tablo 2. Numunelere uygulanan ısıl işlem sıralaması

Numune	Östenitleme	Sıcak banyoda soğutma	Kriyojenik işlem	Meneviş-1	Meneviş-2	Nitrasyon
1. Numune	+	+		+	+(500°C)	
2. Numune	+	+	+	+	+(500°C)	
3. Numune	+	+		+	+(550°C)	
4. Numune	+	+	+	+	+(550°C)	
5. Numune	+	+		+	+(610°C)	+
6. Numune	+	+	+	+	+(610°C)	+

Tablo 3. Numunelere uygulanan ısıl işlem parametreleri

Isıl işlem	Sıcaklık (°C)	Süre (dk.)
Ön ısıtma-1	450	40
Ön ısıtma-2	700	40
Ön ısıtma-3	850	40
Östenitleme	1030	35
Su verme (sıcak banyo)	492	20
Havada pervane soğutma	25	30
Kriyojenik işlem	-196	120
Meneviş-1	500, 550, 610	120
Meneviş-2	500, 550, 610	120
Nitrasyon	500-550	720

Numunelerin tümüne östenitleme aşamasında bekletme süresini azaltmak ve ısıl gerilmelerin oluşmasını en aza indirmek için üç kademeli ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Östenitleme işlemi 1030 °C’de 35 dk. yapıldıktan sonra, numuneler önce 492 °C’de sıcak banyoda 20 dk. bekletilmiş ve ardından pervaneler önüne alınarak hava ortamında soğutulmuştur. Soğutma işleminden sonra 2., 4. ve 6. numunelere -196 °C’de 120 dk. tutma ve hava ortamında oda sıcaklığında bekletme ile kriyojenik işlem uygulanmıştır. Ardından numuneler 500, 550 ve 610 °C’de 2 saat olmak üzere iki kez menevişleme işlemine tabi tutulmuştur. Son olarak 5. ve 6. numunelerin yüzeyleri 550 °C’de 720 dk. gaz nitrasyon yöntemi ile nitrülendirilmiştir. Daha sonra, numunelerin yüzeyleri metalografik olarak hazırlanarak nital çözeltisi ile kimyasal dağlama işlemine tabi tutulmuş ve mikroyapılar ışık mikroskobu (IM) ile incelenmiştir.

Numuneler nitrasyon işlemi öncesinde sertlik testine tabi tutulmuştur. Metalografik olarak hazırlanmış numunelerin sertlikleri, RockwellC (HRC) ölçüm yöntemi kullanılarak ve beş ölçüm sonucunun ortalaması alınarak belirlenmiştir.

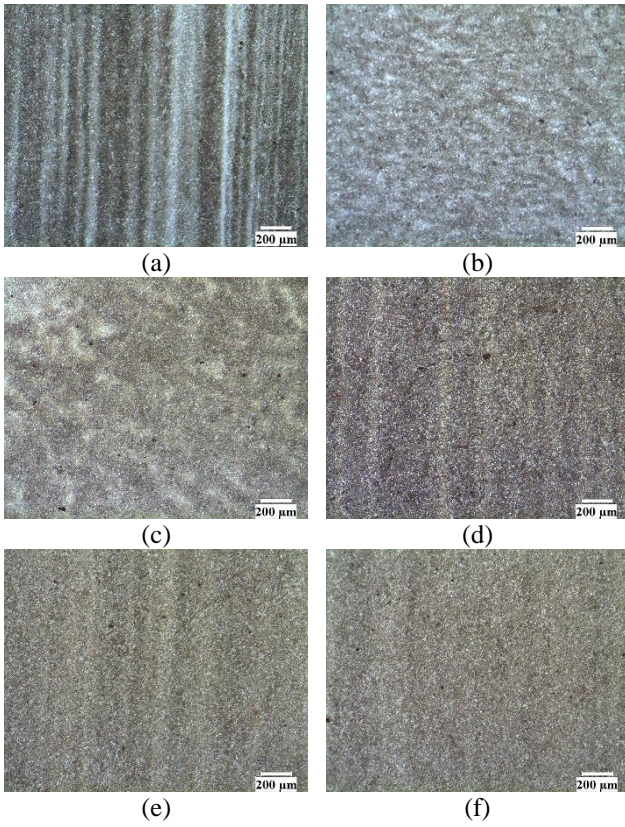
Nitrasyon işlemi menevişleme sıcaklığından en az 50 °C daha düşük sıcaklıkta uygulanması gerektiğinden 5. ve 6. Numunelere 500-550 °C’de 720 dk. gaz nitrülendirme yöntemi ile nitrasyon yüzey işlemi uygulanmıştır.

Nitrülenen numunelere kuru sürtünme koşullarında ball-on disk tribometre cihazı kullanılarak aşınma testi uygulanmıştır. Testlerde karşıt yüzey olarak sertleştirilmiş 1.3505 çelik bilye kullanılmış olup, 10 N yük 500 m kayma mesafesi ve 100 rpm hız test parametreleri kullanılmıştır. Tribolojik testler sonrasında mesafeye bağlı olarak spesifik aşınma oranları hesaplanmıştır. Nitrülendirilmiş numunelerde

derin kriyojenik işlemin tribolojik özellikler üzerindeki etkisini görmek ve aşınma mekanizmasını incelemek için numunelerin yüzeyleri IM ve tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Menevişleme ve kriyojenik ısı işlemlerden sonra metalografik olarak hazırlanmış numunelerin IM görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Kalıp malzemesi olarak kullanılan X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin standart mikroyapısı ferritik matriks içerisinde homojen dağılmış küçük küresel karbürler ve yer yer primer karbürlerden oluşmaktadır. Primer karbür ağı ana matris içerisinde heterojen bölgeler oluşturarak mikro segregasyona neden olmakta ve malzemenin mekanik özelliklerinde bölgesel farklılıklar göstermesine sebebiyet vermektedir.



Şekil 1. Numunelerin IM görüntüleri; (a) 1. numune, (b) 2. numune, (c) 3. numune, (d) 4. numune, (e) 5. numune, (f) 6. numune

Şekil 1a'da 500 °C'de menevişlenmiş 1. numunenin mikroyapısı martenzitik yapıya sahiptir ve yapıda belirgin şekilde bantlı mikro segregasyon görülmektedir. IM'de yüksek büyütmedeki mikroyapı incelemelerinde özellikle açık renk segregasyon bantı bölgelerinde primer karbürler görülmüştür. Şekil 1b'de kriyojenik işlemin uygulandığı 2. numunenin mikroyapısında mikro segregasyonun azaldığı görülmektedir ve mikroyapının martenzitten oluştuğu bulunmuştur. Şekil 1c'de 3. numunenin IM görüntüsü verilmiştir. Bu numuneye 550 °C'de uygulanan menevişleme işlemi ile X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin yapısında

var olan bantlı mikro segregasyon yapısı kısmen giderilmiş olmasına rağmen halen homojen olmayan bir yapı söz konusudur. Şekil 1d'de kriyojenik işlem uygulandıktan sonra 550 °C'de menevişlenen 4. numunenin IM görüntüsünde yapıdaki mikro segregasyonun diğer numunelerdekine oranla daha azaldığı ve yapının daha homojen olduğu görülmüştür. Mikroyapı temperlenmiş martenzitten oluşmaktadır. Şekil 1e'de verilen ve 610 °C'de menevişlenen 5. numunenin mikroyapısında yüksek menevişleme sıcaklığına bağlı olarak mikro segregasyon yapısının önemli ölçüde giderildiği görülmüştür. Şekil 1f'de kriyojenik işlem uygulanan ve 610 °C'de menevişlenen 6. numunenin mikroyapısı diğer numunelere kıyasla segregasyon açısından en homojen durumdadır.

Farklı ısı işlem prosedürleri uygulanan sıcak iş takım çeliği numunelerinin sertlik değerleri Tablo 4'de verilmiştir. X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliği üreticilerinin malzeme bilgisini içeren ürün kataloğu standartları ile karşılaştırıldığında, ısı işlem sonucu elde edilen sertlik değerlerinin 500 °C civarında bir pik sertliğe ulaştıktan sonra artan menevişleme sıcaklığı ile azaldığı görülmüştür. Sertlik sonuçlarından kriyojenik işlemin uygulandığı numunelerde menevişleme sonucu meydana gelen sertlik düşüşünün bir miktar daha az olduğu görülmektedir. Tüm prosedürler içinde en yüksek sertlik değerine, kriyojenik işlem yapılmış ve sonrasında 500°C'de menevişlenmiş yapıda ulaşılmıştır.

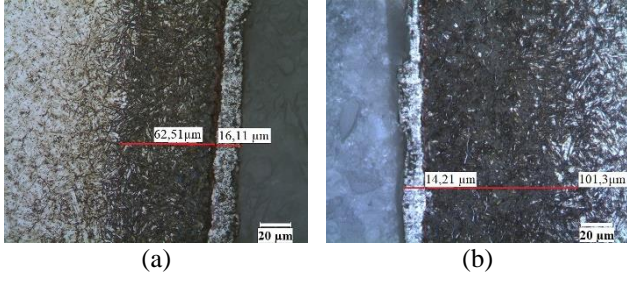
Tablo 4. Deneysel çalışmada kullanılan numunelerin uygulanan ısı işlemlere bağlı olarak elde edilen sertlik değerleri

	HRC					
	500 °C		550 °C		610 °C	
	1. Meneviş	2. Meneviş	1. Meneviş	2. Meneviş	1. Meneviş	2. Meneviş
1. Numune	55	50				
2. Numune	55	52				
3. Numune			55	43		
4. Numune			55	46		
5. Numune					47	41
6. Numune					49	43

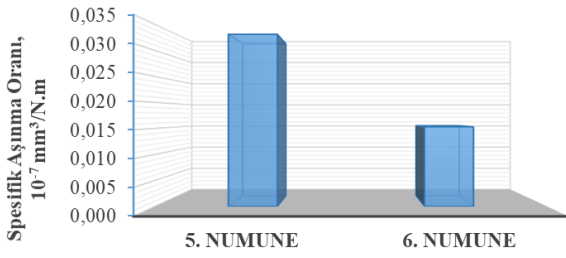
Şekil 2'de nitrasyon işlemi uygulanan numunelerin IM görüntüleri verilmiştir. Nitrasyon işlemi sonrası yüzeyden merkeze doğru beyaz tabaka, difüzyon bölgesi, geçiş bölgesi ve altlık malzeme şeklinde yapı sıralaması meydana gelmektedir. Nitrasyon işleminde en dış tabaka olarak oluşan beyaz tabakada iki farklı kristal kafes yapısına sahip olan ϵ -Fe₂3N (hegzagonal sıkı paket, hsp) ve γ '-Fe₄N (yüzey merkezli, ymk) demir nitrit fazlarının oluşması gerilim alanlarının oluşmasına ve herhangi bir yüklenme durumunda mikro çatlakların oluşumuna ve ilerlemesine neden olabilmektedir [18]. Şekil 2'de en üstte oluşan beyaz tabakanın ve geçiş bölgesinin derinlik ölçümleri verilmiştir. Derin kriyojenik işlemin uygulandığı 6. numunede beyaz tabaka kalınlığının daha ince olduğu bulunmuştur.

Tribolojik testler sonrasında hesaplanan spesifik aşınma oranı Şekil 3'de verilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmayan 5. numunede spesifik aşınma oranı daha fazla

iken kriyojenik işlemin uygulandığı 6. numunede spesifik aşınma oranının daha az olduğu bulunmuştur.

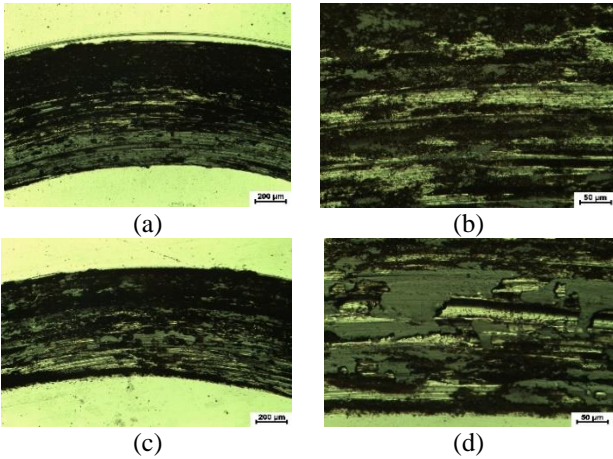


Şekil 2. Nitrasyon uygulanan numunelerin IM görüntüleri; (a) 5. numune, (b) 6. numune

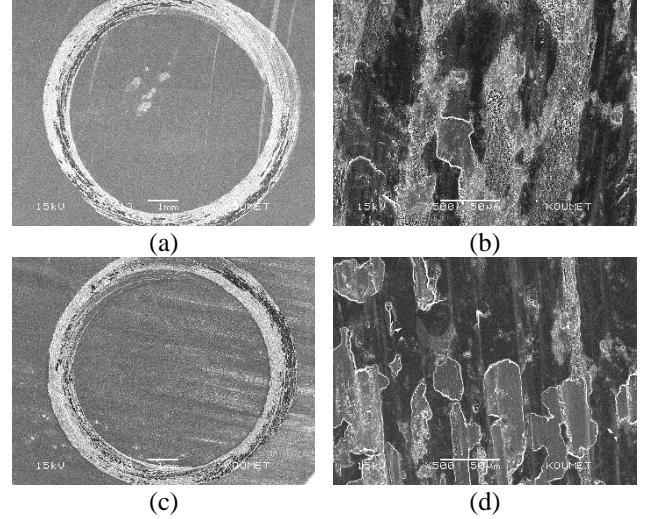


Şekil 3. Spesifik aşınma oranı diyagramı

Kuru sürtünme aşınma testine tabi tutulan numunelerin Şekil 4'de IM ve Şekil 5'de SEM görüntüleri verilmiştir. IM görüntülerinden 5. numunede baskın olarak adhezif aşınma mekanizmasının ve 6. numunede ise abrasif aşınma mekanizmasının baskın olarak meydana geldiği söylenebilmektedir. IM ve SEM görüntülerinden, yüzeyde oluşan aşınma izinin 5. numunede daha geniş olduğu görülmüştür. Ayrıca Şekil 4 ve 5'de b ve d görüntülerine bakıldığında, aşınma testi sırasında kayma mesafesinin artması ile birlikte adhezif aşınma sonucu oluşan kopan partiküllerin yüzeye kaynaklanarak adhezif tabakalar oluşturduğu ve bu tabakaların da zamanla yük etkisi ile kırıldığı görülmüştür. 5. numunede adhezif aşınma sonucu kopan partiküllerin arayüzeyde daha fazla oranda biriktiği ve oksitlendiği görülmektedir.



Şekil 4. Aşınmış yüzeylerin IM görüntüleri, (a) ve (b) 5. numune, (c) ve (d) 6. numune



Şekil 5. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri, (a) ve (b) 5. numune, (c) ve (d) 6. numune

4 Sonuçlar

Menevişleme sırasında, östenitleme ile yapıda çözülmüş karbür oluşturu elementlerin çökmesi ile ince martenzitik matriks içinde ikincil karbürler oluşarak sertliği arttırlar. 450-500 °C sıcaklık aralığında X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliği ikincil sertleşme ile en yüksek sertlik değerine ulaşmaktadır. Deneysel çalışmada görüldüğü gibi menevişleme sıcaklığının bu aralığın üstüne çıkması ile mevcut ikincil karbürlerin birleşerek büyümesi nedeniyle sertlikte düşüş görülmüştür. Ayrıca menevişleme sıcaklığının artması ile birlikte, örneğin 550-600 °C sıcaklık aralığında kararsız bir faz olan martenzit fazı ayrılmaya başlamaktadır. Menevişleme sıcaklığının 600 °C üzerine çıkması ile ferritik matriks içinde karbür yapısı oluşmaktadır. Ayrıca, kriyojenik işlem uygulanmamış numunelerin mikroyapılarında belirgin mikro segragasyon bantları ve heterojen yapı görülmüştür.

Deneysel çalışmada kullanılan numunelerinin sertlik sonuçları incelendiğinde, menevişleme işlemi sırasında östenitleme ile elde edilmiş olan martenzitik yapıdaki karbonun difüze olması ve ferritik yapının ayrışması söz konusudur. Menevişleme sıcaklığının artması ile bu olayların meydana gelmesi hızlandığından sertlikte düşüş görülmüştür. Ayrıca, kriyojenik işlem uygulanan numunelerde kalıntı östenitin hemen hemen hepsinin martenzite dönüştürülmesi nedeniyle bu numunelerde sertlik değerlerinin sadece menevişleme ısıl işlemi uygulanan numunelere kıyasla bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yüzeyi nitrülendirilen sıcak iş takım çeliği numunelerinin aşınma testi sonuçları, kriyojenik işlemin uygulanması ile spesifik aşınma oranının azaldığını ve aşınma mekanizmasının adhezif aşınmadan abrazif aşınmaya dönüştüğünü göstermiştir.

Sert ve gevrek olmasından dolayı beyaz tabaka kalınlığının ince olması, deneysel çalışmada kriyojenik işlemin uygulandığı numunede görüldüğü gibi tribolojik özellikler açısından avantaj sağlamaktadır. Bu durum ayrıca kriyojenik işlem uygulanmış olan 6. numunede neden abrazif

aşınmanın ve kriyojenik işlem uygulanmamış olan 5. numunede neden adhezif aşınmanın etkin mekanizma olduğunu da açıklamaktadır. Çünkü karşıt yüzey olan çelik bilya ile direkt olarak temasta bulunan gevrek beyaz tabakada yük etkisi ile kırılmalar meydana gelir. Kırılarak kopan partiküller, aşınma testinin ilerleyen mesafelerinde ara yüzeye kayma yönünde kaynaklanarak adhezif tabakaları oluştururlar ve zamanla arayüzeyde sıcaklığın da artmasının etkisi ile bu bölgeler oksitlenirler. Ayrıca aşınma yüzeylerinin IM görüntülerinden görüldüğü üzere, kriyojenik işlemin uygulandığı 6. numunede difüzyon bölgesi daha geniş bir derinliğe sahiptir. Bu bölgede nitrasyon işlemi sırasında γ '-Fe₄N tipi demir nitrüllere ek olarak, sıcak iş takım çeliği bileşiminde var olan nitrür oluşturu elementlerin nitrülleri de çökebilirler. Bu durum malzemenin tribolojik özelliklerine önemli bir katkı sağlamaktadır.

Kriyojenik işlem, yapıda kalıntı östenit kalmasını ve menevişleme esnasında bu kalıntı östenitin dönüşümünü engelleyecek yüksek oranlı martenzitik bir dönüşümü garantiye alarak potansiyel sertliği reel hale getirmektedir. Öte yandan yarattığı hacimsel genleşme sayesinde karbür-matris ara yüzeyindeki delaminasyonu engelleyerek karbürün aşınma esnasında matrise tutunmasını kolaylaştırır. Böylece sertlik ile birlikte toklukta da artış sağlanmış olmaktadır.

Sıcak iş takım çeliklerine uygulanan ısı işlem prosedürü nitrasyon tabakasının mekanik özellikleri açısından en az nitrasyon işlemi kadar büyük önem taşımaktadır. Çünkü nitrasyon işlemleri birçok uygulamada beklentileri karşılamakta ancak dövme, hafif metal ekstrüzyonu ve enjeksiyon döküm uygulamalarında meydana gelen mekanik yüklenmeler, nitrasyon nedeniyle esneme kabiliyeti ve kırılma tokluğu azalan takım çeliğinde makro kırılma hasarına neden olabilmektedir. Dolayısıyla nitrülleme sonrası elde edilen sert yüzeyin yeterli aşınma direnci ile birlikte gereken tokluğa ve esnekliğe sahip olması son derece arzulanır bir durumdur. Deneysel çalışma kriyojenik işlemin, nitrasyon sonucu oluşan beyaz tabaka derinliğinin azaltılmasında ve difüzyon tabakası derinliğinin artırılmasında rol oynarak tribolojik özellikleri olumlu olarak etkilediğini göstermiştir. Dolayısıyla sıcak iş takım çeliklerinin ısı işleminde ilgili alaşım kompozisyonu için uygun ısı işlemlerin uygulanması ve nitrülleme sonrası mekanik özelliklerin geliştirilmesi kalıp ömründe artışa neden olabilecektir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] N. B. Dhokey, S. S. Maske and P. Ghosh, Effect of tempering and cryogenic treatment on wear and mechanical properties of hot work tool steel (H13). *Materials Today: Proceedings*, 43(5), 3006-3013, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.361>.
- [2] E. B. Fonseca, J. D. Escobar, A. H. G. Gabriel, G. G. Ribamar, T. Boll and É. S. N. Lopes. Tempering of an additively manufactured microsegregated hot-work tool steel: A high-temperature synchrotron X-ray diffraction study. *Additive Manufacturing*, 55, 102812, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102812>.
- [3] F. Liu, C. Kang, R. Qian, Z. Jiang, X. Geng and H. Li. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of a new type of nitrogen-containing hot-work die steel 3Cr7Mo2NiSiVN. *Steel Research International*, 93, 2200013, 2022. <https://doi.org/10.1002/srin.202200013>.
- [4] R. Thakurai, H. Patle, B. R. Sunil and R. Dumpala. Effect of cryogenic treatment duration on the microhardness and tribological behavior of 40CrMoV5 tool steel. *Materials Today: Proceedings*, 38(5), 2140-2144, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.126>.
- [5] U. Al-Qawabeha. Effect of heat treatment on the mechanical properties, microhardness, and impact energy of H13 alloy steel. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 8(2), 100-104, 2017.
- [6] H. Ding, T. Liu, J. Wei, L. Chen, F. Cao, B. Zhang, R. Luo and X. Cheng. Microstructure and tempering softening mechanism of modified H13 steel with the addition of tungsten, molybdenum, and lowering of chromium. *Materials and Design*, 224, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111317>.
- [7] S. Farahany, M. Ziaie and N. A. Nordin. Effect of triple tempering temperature on microstructure, mechanical and wear properties of K340 cold work tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07791-4>.
- [8] Z. Cheng, L. Pu, W. Shizhong, Y. Long, W. Xiaodong, M. Feng, J. Dongliang, C. Chong, P. Kunming, L. Cheng and L. Jinghui. Effect of tempering temperature on impact wear behavior of 30Cr3Mo2WNi hot-working die steel. *Frontiers in Materials*, 6, 2019. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00149>.
- [9] M. Tayanç ve G. Zeytin. Yüksek hız çeliklerinin iç yapı ve ısı işlem özellikleri. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c.2, 1, 103-122, 2000.
- [10] D. Das, K. K. Ray and A. K. Dutta. Influence of temperature of sub-zero treatments on the wear behaviour of die steel. *Wear*, 267, 9-10, 1361-1370, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.029>.
- [11] K. Arslan ve A. Şelte. Takım çeliklerinde sıfırlı işlem mekanizması. *Metalurji Dergisi*, 167, 37-40, 2013.
- [12] M. Villa, K. Pantleon and M. A. J. Somers. Evolution of compressive strains in retained austenite during sub-zero celsius martensite formation and tempering. *Acta Materialia*, 65, 383-392, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.11.007>.
- [13] A. Antony, N. M. Schmerl, A. Sokolova, R. Mahjoub, D. Fabijanic and N. E. Stanford. Quantification of the dislocation density, size, and volume fraction of precipitates in deep cryogenically treated martensitic steels. *Metals*, 10(11), 1561, 2020. <https://doi.org/10.3390/met10111561>.

- [14] P. Jurči, I. Dlouhý, P. Priknerová and Z. Mrštný. Effect of sub-zero treatment temperatures on hardness, flexural strength, and fracture toughness of Vanadis 6 ledeburitic die steel. *Metals*, 8(12), 1047, 2018. <https://doi.org/10.3390/met8121047>.
- [15] M. Kaba, M. Altay, E. Akyıldız, F. Muhaffel, S. Ozkurt, E. Atar, M. Baydoğan and H. Çımenoğlu. Surface degradation of nitrided hot work tool steels under repeated impact-sliding contacts: Effect of compound layer. *Wear*, 498–499, 204300, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204300>.
- [16] V. Joshi, A. Srivastava, R. Shivpuri and E. Rolinski, Investigating tribochemical behavior of nitrided die casting die surfaces. *Proceedings of the 6th International Tooling Conference*, pp. 961-977, Karlstad, Sweden, 2002.
- [17] P. Ried, J. J. Moore, J. Lin, S. Carrera, S. Myers, A. Kunrath and B. Mishra, Design methodology for optimized die coatings used in aluminum pressure die casting. *CastExpo'05*, pp. 40-55, St. Louis, Missouri, ABD, 2005.
- [18] Y. Yamada, E. Hirohito and K. Takahashi. Influence of crystal structure of nitride compound layer on torsion fatigue strength of alloy steel. *Metals*, 9(12), 1352, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9121352>.

