

Investigation into Effects of Different Tempering Temperatures on Mechanical Properties of 51CrV4 Steel

 Hülya DURMUŞ^{ID} Fatma Gizem ÇAKIR^{ID} Canser GÜL*^{ID}

Manisa Celal Bayar University, Material and Metallurgy Engineering Department, 45100, Manisa, Türkiye

Graphical/Tabular Abstract

In this study, samples of 51CrV4 steel tempered at two different temperatures after annealing and oil cooling were examined. The changes in the morphology and mechanical properties of the samples processed at different temperatures were analyzed. The effects of tempering on wear resistance were discussed.

Article Info:

Research article
 Received: 20/05/2020
 Revision: 08/08/2020
 Accepted: 09/08/2020

Highlights

- 51CrV4.
- Heat Treatment.
- Optical and Mechanical Properties

Keywords

51CrV4
 Heat Treatment
 Dry sand rubber wheel
 Wear
 Mechanical Properties

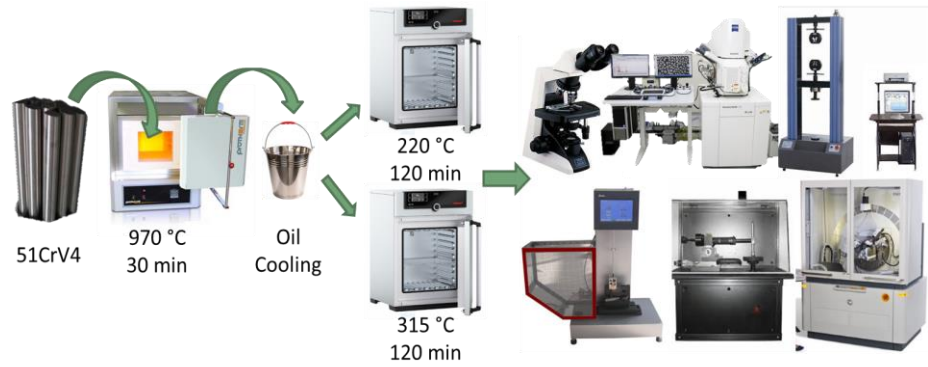


Figure A. Schematic representation of experimental studies

Purpose: The aim of the study is to discuss and compare the effects of different tempering temperatures on microstructure and mechanical properties.

Theory and Methods: Samples of 51CrV4 steel were annealed at 970 °C and oil cooled. Then, they were tempered at 220 °C and 315 °C and examined. Microstructures and morphological changes of steel samples were examined using optical microscope, SEM-EDS and XRD. Changes in mechanical properties were examined by tensile, Charpy impact and dry sand rubber wheel abrasion tests.

Results: Results show that two different microstructures consisting of carbide sediments in the ferritic matrix and containing a bainitic structure were reached. No significant difference was observed in the hardness measurements taken from the section and the surface. However, as a result of the tensile, Charpy impact, and dry sand rubber wheel abrasion tests, significant differences were observed between the sample groups and it was concluded that the most suitable tempering temperature was 315 °C.

Conclusion: 51CrV4 steel were tempered at two different temperatures after annealing and oil cooling and examined in this study. The changes in the morphology and mechanical properties of the samples processed at different temperatures were analyzed and presented.



Farklı Menevişleme Sıcaklıklarının 51CrV4 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi

Hülya DURMUŞ^{ID} Fatma Gizem ÇAKIR^{ID} Canser GÜL*^{ID}

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 45100, Manisa, Türkiye

Öz

Otomotiv ve makine endüstrilerinde, yorulma dayanımı yüksek olan birçok parçanın imalatında; yüksek mukavemetleri, yüksek darbe dayanımları ve mükemmel yorulma performansları nedeniyle 51CrV4 çelikleri tercih edilmektedir. Isıl işlem uygulanabilir ve sertleştirilebilir çelik grubunda yer alırlar. Yapılan bu çalışmada tavlama ve yağda soğutma yapıldıktan sonra farklı iki sıcaklıkta menevişleme işlemi uygulanan 51CrV4 çeliği numuneler incelenmiştir. Farklı sıcaklıkta işlem gören numunelerin, morfolojilerinde ve mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Menevişleme işleminin aşınma dayanımı üzerine olan etkileri tartışılmıştır. Çalışmanın sonucunda ferritik matris içinde karbür çökeltilerinden oluşan ve beyritik yapı içeren iki farklı mikroyapıya ulaşılmıştır. Kesit ve yüzeyden alınan sertlik ölçümlerinde belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Buna rağmen, yapılan çekme, çentik darbe ve kuru kum kauçuk aşınma testleri sonucunda numune grupları arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmiş ve en uygun menevişleme sıcaklığının 315 °C olduğu sonucuna varılmıştır.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
 Başvuru: 20/05/2020
 Düzeltilme: 08/08/2020
 Kabul: 09/08/2020

Anahtar Kelimeler

51CrV4
 Heat Treatment
 Dry sand rubber wheel
 Wear
 Mechanical Properties

Keywords

51CrV4
 Isıl İşlem
 Kuru Kum Kauçuk
 Tekerlek
 Aşınma
 Mekanik Özellikler

Investigation into Effects of Different Tempering Temperatures on Mechanical Properties of 51CrV4 Steel

Abstract

In the automotive and machinery industries; 51CrV4 steels are preferred due to their high strength, high impact strength, and excellent fatigue performance for the manufacturing of fatigue sensitive parts. They are included in the group of heat treatable and hardenable steels. In this study, samples of 51CrV4 steel tempered at two different temperatures after annealing and oil cooling were examined. The changes in the morphology and mechanical properties of the samples processed at different temperatures were analyzed. The effects of tempering on wear resistance were discussed. As a result of the study, two different microstructures consisting of carbide sediments in the ferritic matrix and containing a bainitic structure were reached. No significant difference was observed in the hardness measurements taken from the section and the surface. However, as a result of the tensile, charpy impact, and dry sand rubber wheel abrasion tests, significant differences were observed between the sample groups and it was concluded that the most suitable tempering temperature was 315 °C.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek mukavemetleri, yüksek darbe dayanımı ve mükemmel yorulma performansları nedeniyle 51CrV4 çelikleri kalıp çelikleri, yay çelikleri ve yüksek hız çelikleri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Otomotiv ve makine endüstrilerinde, yüksek yorulma dayanımına sahip olmasından dolayı birçok parça yay çeliğinden yapılmaktadır [4]. 51CrV4 çeliği öncelikle dişliler, çubuklar, miller, burçlar, mandreller, kamlar, kollar, elastik parçalar ve yaprak yağlar gibi yüksek mukavemetli makine parçalarının imalatında kullanılmaktadır [4,5].

Isıtma ve soğutma sırasında Cr bazlı karbürlerin morfolojileri ve dağılımı, Cr içeren çeliklerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. etkisi fazla olan veya orta düzeyde olan karbür oluşturuç elemanların (Nb, Ti ve V) eklenmesi, Cr bazlı karbürlerin çökme davranışını olumlu etkilemekte ve C atomlarının difüzyonunu etki yapmaktadır [2]. 51CrV4 çeliği krom ve vanadyum içeren, ısıl işlem görebilen, düşük alaşımli bir çeliktir. Isıl işlem görmüş durumda yüksek mukavemet elde edilmekte ve bu mukavemeti de

korumaktadır [5-7]. Kubit ve ark. (2016), 51CrV4'ten yapılan numunelere su verme işleminden sonra yorulma mukavemetini ve mekanik özellikleri geliştirilmesi konusunda çalışmışlardır. Araştırma, kullanılan teknolojik işlemlerin mekanik özelliklerin yanı sıra yorulma dayanımı sınırını arttırdığını göstermiştir [5]. Brinic ve ark. (2018), 51CrV4 çeliğinin farklı sıcaklıklarda nihai gerilme mukavemeti (770 MPa / 20 °C; 98 MPa / 700 °C) ve akma mukavemetini (642 MPa / 20 °C; 60 MPa / 700 °C) belirlemek üzere araştırmalar yapmışlardır. Şekil değiştirme diyagramları ve sıcaklıklara karşı değişikliklerinin geometrik gösterimi üzerine çalışmışlardır [8]. Dlouhy ve ark. (2016), beynitin, perlit gibi küreselleştirilebileceğini göstermiş, 51CrV4 yay çeliğinin beynitik yapısının hızlı karbür küreselleşmesini açıklamıştır. 51CrV4 çeliğinin çok iyi özelliklere ve ısıl işlem performansına sahip olduğu ve yay çeliği olarak kullanıldığı bilinmektedir. Yapılan çalışma ile mevcut testere bıçağı çeliğinin özelliklerini geliştirmek için, 51CrV4 çeliği elmas kaynaklı testere bıçağı matrisinin üretimi için yenilikçi bir şekilde geliştirilmiştir [9].

birimi, östenit tane sınırlarında çekirdeklenmektedir. Büyüme ani ve yer değiştirmelidir. Ayrıca östenitin plastik deformasyonu nedeniyle durmaktadır. Beynitik-ferrit başlangıçta karbon ile aşırı doymuş bir yapıdadır. Kalıntı östenit içine difüzyonu engellenen karbon, burada karbürler oluşturabilir. Dönüşüm sıcaklığının düşük olması nedeniyle difüzyon yeterli seviyede gerçekleşmiyorsa, karbon, beynitik ferrit alt birimi içinde karbürler şeklinde doğrudan çökebilir. Beynitik alt-birimler oluştuktan sonra, beynit oluşumu, daha önce oluşturulmuş alt-birimlerin ucunda yeni alt-birimlerin otokatalitik çekirdeklenmesi ve yer değiştirme büyümesiyle devam edebilir. Karbonun yanı sıra, Mn, Cr gibi ikame alaşım elementlerinin ve beynit oluşumunu farklı şekillerde etkilediği bilinmektedir. Bu elementlerin çelikte bulunması, çözünen bir sürüklenme etkisi indükleyerek, beynitin büyümesini yavaşlatır ve ayrıca belirli bir sıcaklıkta izotermal bir işlemde elde edilebilen maksimum beynit fraksiyonunu sınırlayabilir [10].

Çeliklerde az miktarda vanadyum içeriği, darbe dayanıklılığını önemli ölçüde artırmaktadır [11]. Ayrıca çelikte tane büyümesini engellemektedir [12]. Vanadyumun alaşım elementi olarak çelikte bulunması, yüksek dayanım değerlerine sahip olmasını sağlamaktadır. Bu alaşım elementinin oluşturmuş olduğu V(CN) gibi çökelti dislokasyonların hareketini engelleyerek malzemenin dayanımını arttırmaktadır [13].

Yapılan çalışmada, 51CrV4 çeliklerine yağda soğutma işleminden sonra farklı sıcaklıklarda temperleme işlemleri uygulanmış ve bu işlemlerin morfolojiye, mekanik özelliklere ve aşınma dayanımlarına etkisi incelenmiştir.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Tablo 1'de çalışmada kullanılan 51CrV4 malzemesinin kimyasal kompozisyonu verilmektedir. 51CrV4 numunelere 970 °C 'de 30 dakika boyunca tavlama işlemi yapılmıştır. Yağda soğutma işlemi yapıldıktan sonra ilk numune grubuna 220 °C 'de 120 dakika menevişleme işlemi yapılmıştır. İkinci numune grubuna ise, 315 °C 'de 120 dakika menevişleme işlemi yapılmıştır. Isıl işlem uygulanan numuneler testler için standart ölçülere getirilmiş ve böylece mikroyapı, çekme testi, charpy darbe testi ve aşınma testi numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılan alaşıma ait mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. 51CrV4 kimyasal kompozisyonu

<i>Element</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>V</i>
% ağı.	0,47	0,40	0,70	0,025	0,025	0,90	0,10

Tablo 2. 51CrV4 alaşımının mekanik özellikleri [14]

Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
700	550	9

Yüzey morfolojilerinin incelenebilmesi için Nikon Eclipse LV150 markalı optik mikroskop ve bu mikroskoba ait Clemex yazılımı ve ZEISS marka Gemini Sigma 300 VP taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bu cihaza ait enerji dağıtım spektrumu (EDS) kullanılmıştır. SEM görüntüleri alınırken 15 kV hızlandırma gerilimi kullanılmıştır.

X-Işını Difraksiyonu (XRD) analizi ise Malvern PANalytical marka cihaz kullanılarak 1.5418 (Å) CuK α dalgaboyu ile 2 θ 10° to 80° arasında 0.02 °s adım aralığı ile taranmıştır. Taramalarda 40 kV ve 30 mA kullanılmıştır.

Charpy darbe testi ASTM E23-18 e göre ve çekme testi ASTM E8:2016 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

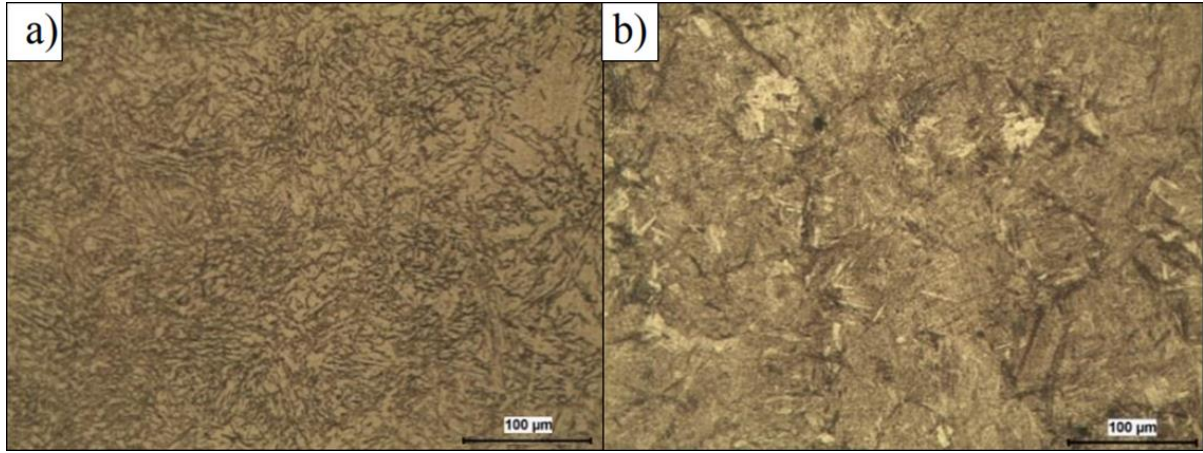
Aşınma testleri 130 N yük ve 300 g/dk kum akışında ASTM G65-04 standardına göre uygulanmıştır. Test cihazı, aşınmaya dayanıklı kauçuk kaplı paslanmaz çelik döner disk ile numunenin bağlanacağı bir koldan meydana gelir. 90 rpm hızla dönen ve çapı 228,6 mm olan bu tekerlek, tekerlek ve numune arasına 50/70 AFS ölçülerinde silika kum akışı olacak şekilde numuneye yük uygular. 30 dakika boyunca bu şekilde 300 g/dk kum akışı ile numuneler abrazif aşınmaya maruz bırakılmıştır. Test öncesi hassas terazi ile ağırlık ölçüm hassasiyeti için 0,1 mg hassasiyetindeki terazi ayarlanmış olup, test öncesi ve test sonrası ağırlıklar ölçülmüştür. Bütün numunelerin aşınma testi sonucuna göre ağırlık kayıpları karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar Şekil 1’de özetlenmiştir.

**Şekil 1.** Deneysel çalışmaların şematik gösterimi

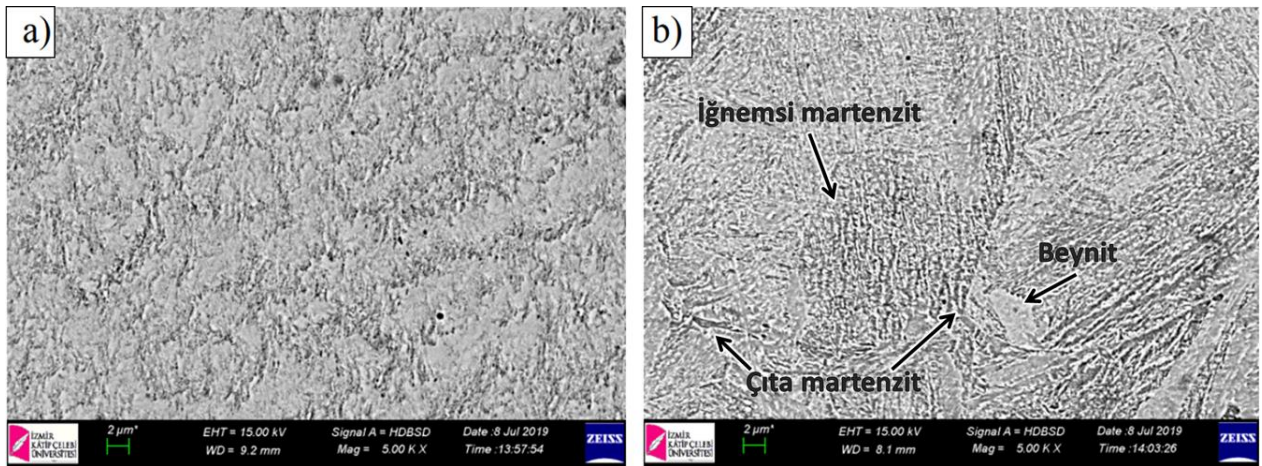
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Malzemelere uygulanan farklı menevişleme işlemlerinin mikroyapılarına olan etkileri Şekil 2’de gösterilmiştir. 51CrV4 malzemelerinin mikroyapı ve Şekil 3’te verilen SEM görüntüleri incelendiğinde menevişleme sıcaklığının artması ile karbür artışı meydana gelmiş ve karbürler ferrit içerisinde dağılmış şekilde olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artışı ile bu çeliklerde beynit ve martenzit yapıların arttığı bilinmektedir [15]. Bu yapılar 315 °C sıcaklıkta meneviş işlemi uygulanan Şekil 2.b ve 3.b’de gözlemlenen yapılar ile uyumluluk göstermektedir. Çıta martenzit, beynit ve iğnemsiz martenzit içeren bu yapılar Zhang ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada da gözlemlenmiştir [16]. Daha yüksek sıcaklıkta

temperlenen 51CrV4 çeliklerindeki izotermal işlemde sonra beynit morfolojisi daha düşük sıcaklıkta temperlenen çeliklere göre farklıdır. Beynitik ferrit plakalarının şekli ise asiküler değildir; karbürler daha kaba ve trombosit sınırlarında bulunur [10].

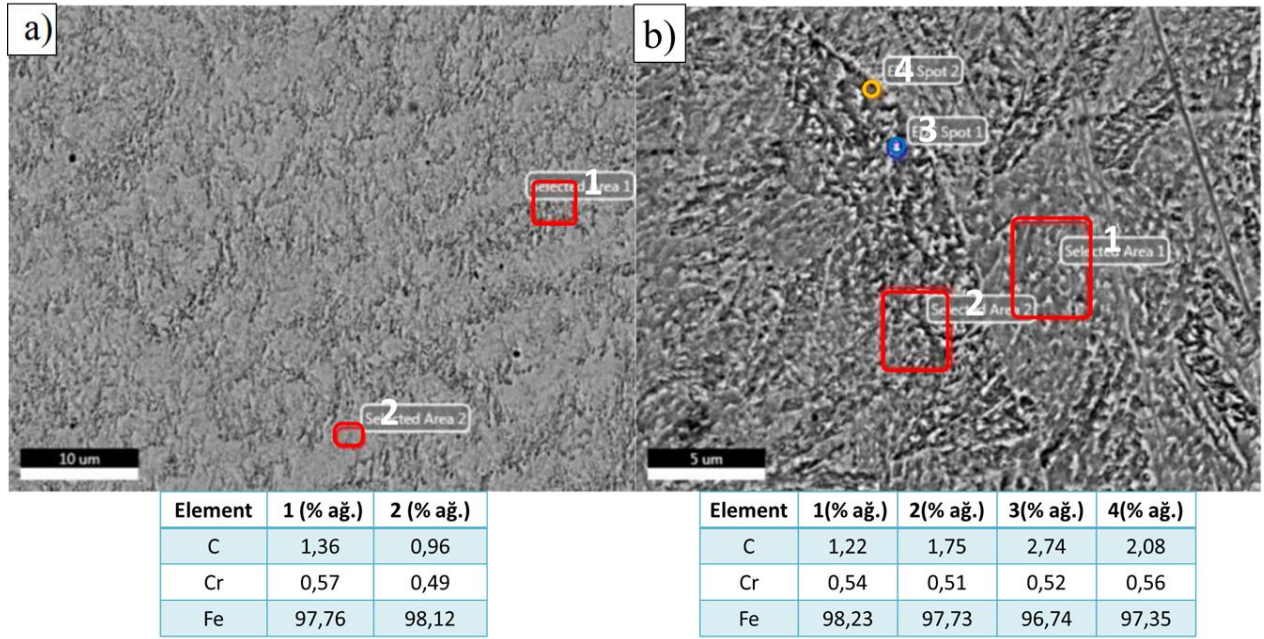


Şekil 2. Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin mikroyapıları **a)** 51CrV4-220 °C - 20X büyütme (100 µm) **b)** 51CrV4-315 °C - 20X büyütme (100 µm)



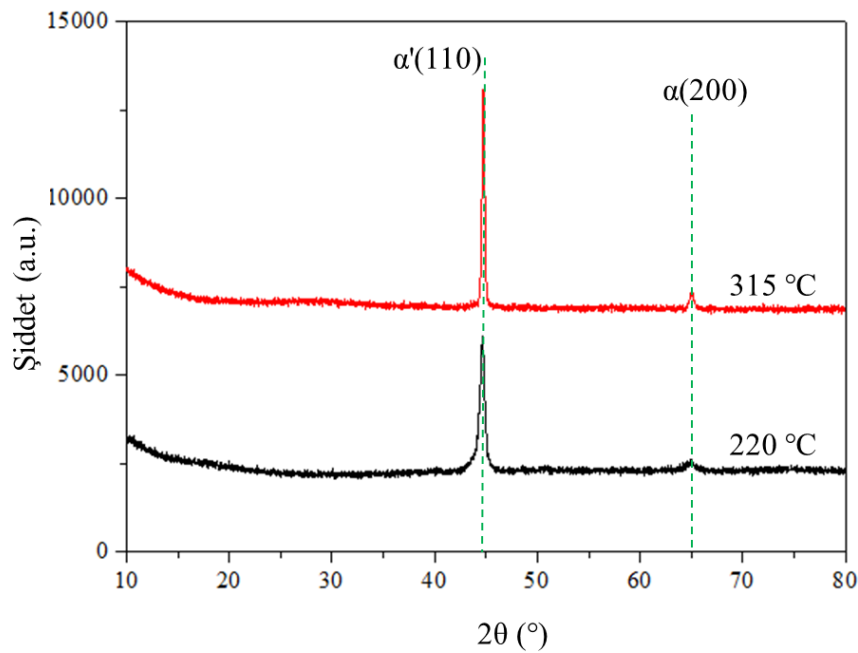
Şekil 3. Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin SEM Görüntüleri **a)** 51CrV4-220°C **b)** 51CrV4-315°

Şekil 4'te verilen EDS analizleri incelendiğinde, Cr elementlerinin homojene yakın bir dağılım gösterdiği fakat C elementinin belirli bölgelerde oluşan karbürler neticesinde bazı heterojenlikler mevcut olduğu görülmüştür. Şekil 4.a'da koyu renk ile görüntülenen kısımlarda karbon miktarının diğer bölgelere oranla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgelerde ferritik matris içinde karbürlerin çökelmiş olabileceği düşünülmektedir [10,15]. Şekil 4.b'de ise 3 ve 4 numaralı bölgelerde, diğer bölgelere kıyasla C elementi miktarında artış gözlemlenmiştir. Transformör seçimi ve tasarım işleminde, transformörün çıkış gücü, çalışma frekansı ve elde edilmesi beklenen hedef verim göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla seçilen transformör tasarım parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



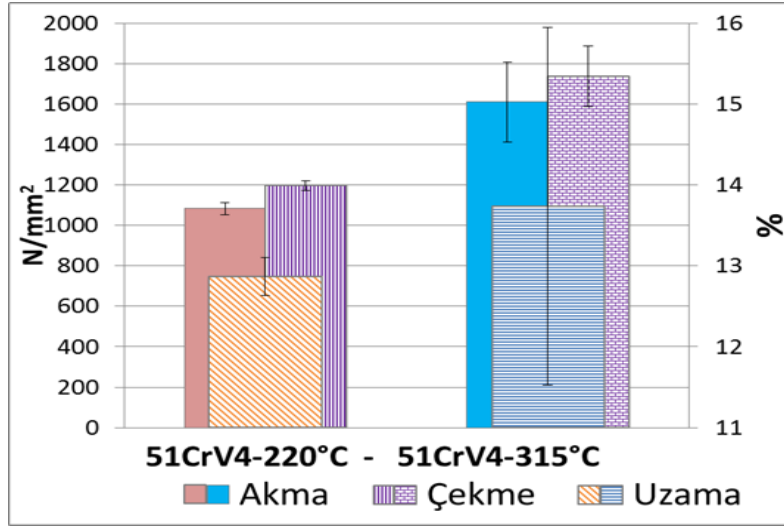
Şekil 4. Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin SEM-EDX analiz sonuçları a) 51CrV4-220°C b) 51CrV4-315°C SEM görseli ve EDX sonuçları

Şekil 5'te farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin XRD grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde α' ve α -Fe ana fazı gözlemlenmektedir. Zhang ve ark. (2018)[16], çalışmalarında da farklı sıcaklıklarda temperlenmiş 51CrV4 çeliklerinde benzer piklere rastlanmıştır. Yine aynı çalışmada, 90°C sıcaklıkta temperleme işlemi gerçekleştirilen numunelerde bu fazlara yani $50^\circ 2\theta$ değerindeki pike rastlanabilir. XRD analizinden temperlenen 51CrV4 malzemelerinde $2h = 44.803$ 'teki tepe martenzit fazına ve $2h = 65.023$ tepe noktasında ferrit fazına atanmıştır [16]. Oluşan karburlu fazlar, karbon pik şiddetinin demire göre çok düşük olması nedeni ile gözlemlenememiştir. Literatürden, ferritin daha yumuşak bir faz ve martenzitin daha sert bir faz olduğu iyi bilinmektedir. Çekme, çentik darbe ve aşınma dayanımlarında ferrit yumuşak yapısından dolayı toklukla birlikte artış olduğu görülmektedir.



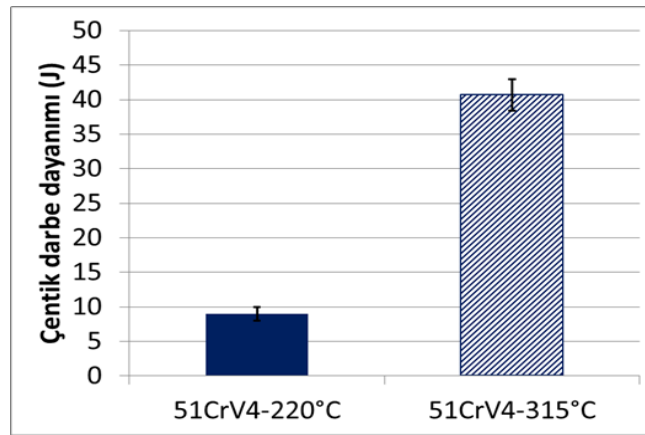
Şekil 5. Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin XRD grafiği

Yapılan çekme testleri sonucu elde edilen akma ve çekme mukavemetleri ve % uzama değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Kubit ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada farklı işlemler uyguladıkları 51CrV4 çeliklerinin mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. 480 °C'de temperleme işlemi uyguladıkları numunede 1217 ± 10 MPa akma gerilmesi, 1260 ± 2 MPa çekme gerilmesi ve $5,6 \pm 0,3$ toplam uzama değerleri elde edildiği gözlemlenmiştir [5]. 315 °C' de menevişleme işlemi yapılmış numunedeki çekme testi sonucunda elde edilen dayanım değerlerinin 220 °C' de menevişleme işlemi yapılmış numuneye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yay çeliklerine uygulanan menevişleme işlemleri genellikle 300-500 °C aralığında tercih edilmektedir [17]. 51CrV4 için 220 oC' de gerçekleştirilen menevişleme işleminin yeterli olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 6. Farklı işlemler uygulanmış 51CrV4 malzemelerin çekme testi sonuçlarını gösteren grafik

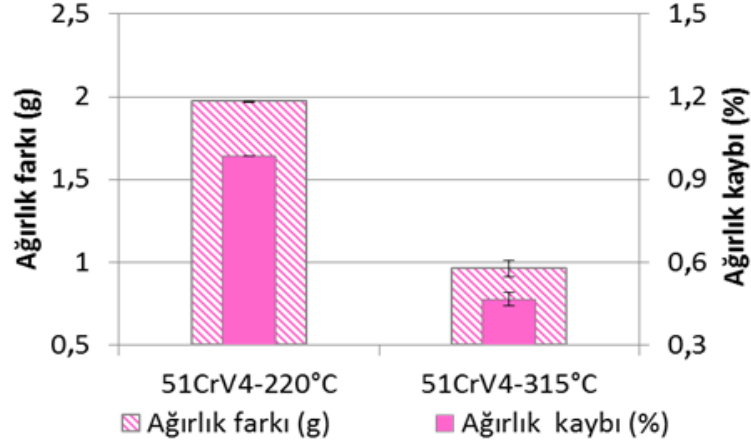
Şekil 7'de farklı sıcaklıklarda temperleme işlemleri uygulanmış 51CrV4 grubu çeliklerin çentik darbe dayanımı grafikleri görülmektedir. Sıcaklığın mekanik özelliklere olan etkisi sertlik bakımından incelendiğinde numunelerin sertlik değerlerinde çok büyük bir fark görülmesi de, çentik darbe dayanımları incelendiğinde daha yüksek sıcaklıkta menevişleme işlemi uygulanan numunenin darbe dayanımının ve dolayısı ile tokluğun daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İzotermal beynitik dönüşüm sırasında mevcut gerilme durumunun, çatlak büyüme yönü, faz dönüşümüne tabi tutulan orijinal numunenin yükleme eksenine dik olduğunda, eşik seviyesine yakın rejimdeki çatlak yayılma davranışı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [18].



Şekil 7. Farklı işlemler uygulanmış 51CrV4 grubu çeliklerin çentik darbe dayanımları grafiği

Numunelere uygulanan kuru kum kauçuk aşınma testi sonucu ağırlık farkları ve % ağırlık kayıpları Şekil 8'de verilmiştir. 51CrV4 e 220°C' de menevişleme uygulanmış numunelerin aşınma testi öncesi ve sonrası ortalama ağırlık farkı 1,97 g ve ortalama yüzde kayıp % 0,985 olarak hesaplanmıştır. 51CrV4 e

315°C’ de menevişleme uygulanmış numunelerin aşınma testi öncesi ve sonrası ortalama ağırlık farkı 0,97 g ve ortalama yüzde kayıp % 0,47 olarak hesaplanmıştır. Sünek yapının içinde sert fazların olduğu bir yapıda 315 °C’ de menevişlenmiş numunede aşınma direnci, çentik darbe testi sonucunda tokluğun düşük gevrek bir yapıya sahip olan 220 °C’ de menevişlenen numuneye göre daha yüksek elde edilmiştir.



Şekil 8. Farklı işlemler görmüş 51CrV4 malzemesinden numunelerin aşınma grafiği

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada, 51CrV4 çelik numunelere, 970 °C’de tavlandıkları sonra yağda soğutma işlemi ve ardından 220 °C ve 315 °C sıcaklıklarda 120 dk süre ile menevişleme işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemlerin morfolojiye, mekanik özelliklere ve aşınma dayanımlarına etkisi incelenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda iki farklı menevişleme sıcaklığında yapılan işlemler sonucunda numunelerde ferritik yapı içinde dağılmış halde karbür içeren ve beyritik bir yapıda iki farklı mikroyapıya rastlanmıştır. Yapılan EDS analizleri ile Cr elementlerinin homojene yakın bir dağılım gösterdiği, fakat C elementinin belirli bölgelerde oluşan karbürler neticesinde bazı heterojenliklerin mevcut olduğu görülmüştür. XRD analizi sonucunda martenzit ve ferrit fazlarının piklerine rastlanmıştır ve ferrit fazının yapıda bulunması, çekme, çentik darbe ve aşınma dayanımlarında numunelerin, ferrit yumuşak yapısından dolayı toklukla birlikte artış göstermesine neden olmuştur. 51CrV4 numunesinde menevişleme sıcaklığının artışı sertliğini çok etkilemese de, çentik darbe dayanımını ve aşınma direncini arttırmıştır. 220 °C’ de menevişleme işlemi uygulanmış numunedeki aşınma dayanımının, numuneden büyük parçaların koparak ayrılması sonucu daha az olduğu tespit edilmiştir. 315°C’ de menevişlenmiş numunede tokluğun daha yüksek olduğu tespit edilmiş ve aynı zamanda bu numunede 220 °C’ de menevişlenmiş numuneye göre daha yüksek bir aşınma direnci elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, bu çalışmadaki malzeme temini ve ısıl işlemlerin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Halit Ünlü Ziraat Aletleri Zirai ürünler San. ve Tic. A.Ş. firmasına teşekkür ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bocalini, M., Goldenstein, H. Solidification of high speed steels. International Materials Reviews, 46(2)(92–115), (2013).
- [2] Chen, R., Wang, Z., Zhu, F., Zhao, H., Qin, J., Zhong, L. Effects of rare-earth micro-alloying on microstructures, carbides, and internal friction of 51CrV4 steels. Journal of Alloys and Compounds, 824(153849), (2020).

- [3] Zhu, J., Zhang, Z., Xie, J. Improving strength and ductility of H13 die steel by pre-tempering treatment and its mechanism. *Materials Science and Engineering: A*, 752(101–114), (2019).
- [4] Śledź, M., Stachowicz, F., Zielecki, W. The effect of shot peening on the fatigue strength of steel sheets. *Redakcia Kovove Materialy, Kovove Materialy-Metallic Materials*, 2 (53)(91-95), (2015).
- [5] Kubit, A., Bucior, M., Zielecki, W., Stachowicz, F. The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel, 21st European Conference on Fracture (ECF), Catania, Italy, 24.6.2016, (ECF21), *Book Series: Procedia Structural Integrity*, 2(3330–3336), (2016).
- [6] Göken, J., Maikranz-Valentin, M., Steinhoff, K., Golovin, I. S., Ivleva, T. V., Flejszar, A., Riehemann, W. Mechanical spectroscopy study of thermo-mechanically treated 51CrV4 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 521-522(335–339), (2009).
- [7] Zabel, A., Rödder, T., Tiffe, M. Material testing and chip formation simulation for different heat treated workpieces of 51CrV4 steel, 16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, Burgundy, France 15.06.2017, *Procedia CIRP* 58, 181 – 186, (2017).
- [8] Brinic, J., Brcic, M., Krscanski, S., Lanc, D., Niu, J., Wang, P. Steel 51CrV4 under high temperatures, short-time creep and high cycle fatigue. *Journal of Constructional Steel Research*, 147(468-476), (2018).
- [9] Dlouhy, J., Hauserova, D., Motycka, P. Bainite austenitization in 51CrV4 spring steel: Accelerated cementite spheroidisation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 179 (2017), 1, Article number 012016, 4th International Conference Recent Trends in Structural Materials, COMAT, (2016).
- [10] Goulas, C., Kumar, A., Mecozzi, M.G., Castro-Cerda, F. M., Herbig, M., Petrov, R. H., Sietsma, J. Atomic-scale investigations of isothermally formed bainite microstructures in 51CrV4 spring steel. *Materials Characterization*, 152(67-75), (2019).
- [11] Pant, G., Singh, A. P., Sharma, H. K., Cooling rate characteristics of vanadium based micro alloyed steel, *Materials Today Proceedings*, 26(2)(1087-1090), (2020).
- [12] Karabulut, H., Türkmen, M., Temperleme işleminin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen mikroalaşımli çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3)(587-594), (2016).
- [13] Çalığülü, U., Aras, M., Türkmen, M. Temperleme işleminin yağda soğutulan çeliklerin mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkisi. In 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES), Antalya, Turkey, 3-5.11.2016, ISITES2016.
- [14] Uslular Hadde ®, www.uslularhadde.com
- [15] Hauserova, D., Dlouhy, J., Kotous, J. Structure refinement of spring steel 51CrV4 after accelerated spheroidisation." *Archives of Metallurgy and Materials*, 62, 2017.
- [16] Zhang, L., Gong, D., Li, Y., Wang, X., Ren, X., Wang, E. Effect of Quenching Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of 51CrV4 Spring Steel, *Metals*, 8(1056), (2018).
- [17] Bodycote ® www.bodycote.com
- [18] Lambers, H.-G., Gorny, B., Tschumak, S., Mainer, H. J., Canadic, D. Crack growth behavior of low-alloy bainitic 51CrV4 steel. *Procedia Engineering*, 2(1373–1382), (2010).