

Klasik Su Verme-Temperleme Isıl İşlemine Göre Yenilikçi Su Verme-Ayrıştırma Isıl İşleminin Orta Karbonlu Çeliğin Mikroyapı ve Sertlik Özelliklerine Etkisi

Merve Şehnaz IŞYARLAR^{1*}, Ferhat GÜL¹¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara

Geliş Tarihi (Received): 24.03.2019, Kabul Tarihi (Accepted): 13.05.2019

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author*): nmisyarlar@hotmail.com

☎ +90 312 2028801 📠 +90 312 2028947

ÖZ

Çeliklerin şekillendirilebilirliği bakımından süneklik, istenen bir malzeme özelliğidir. Sanayide sıkça kullanılan bir işlem olan klasik su verme-temperleme ısıl işlemi ile istenilen sünekliğin elde edilmesi mümkündür. Fakat sünekliğin artmasıyla çeliğin sertliğinin azalması istenmeyen bir etkidir. Yenilikçi su verme-ayrıştırma ısıl işlemi ile süneklik ve mukavemetin iyi bir kombinasyonunun elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada 0,38 karbon miktarına sahip çeliğe uygulanan su verme-temperleme ve su verme-ayrıştırma ısıl işlemlerinin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Mikroyapıda varlığı gözlemlenen kalıntı östenite rağmen su verme-ayrıştırma ısıl işlemi ile elde edilen sertlik değerlerinin, klasik su verme-temperleme ısıl işlemine göre yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Temperleme, Karbon ayrıştırma, Kalıntı östenit

Effect of Innovative Quenching-Partitioning Heat Treatment on Microstructure and Hardness Properties of Medium Carbon Steel According to Traditional Quenching-Tempering Heat Treatment

ABSTRACT

Ductility in the formability of the steels is the desired material property. It is possible to obtain the desired ductility by the traditional quenching-tempering heat treatment which is often used in industry. However, decreasing the hardness of steel with increasing ductility is an undesirable factor. It is aimed to obtain a good combination of ductility and strength with the innovative quenching-partitioning heat treatment. In this study, microstructure and hardness properties of quenching-tempering and quenching-partitioning heat treatments applied to steel having 0.38 carbon content were compared. Despite the retained austenite observed in the microstructure, it was concluded that the hardness values obtained by the quenching-partitioning heat treatment were higher than the traditional quenching-tempering heat treatment.

Keywords: Tempering, Carbon partitioning, Retained austenite

GİRİŞ

Otomotiv ve diğer endüstriler tarafından yüksek süneklik ve şekil verilebilirlik ile yüksek mukavemet özelliklerinin birleşimi aynı zamanda daha düşük maliyetle üretilmesi gibi sebeplerden dolayı kullanım talebinin artması, 3. Nesil Geliştirilmiş Yüksek Dayanımlı Çeliklerin geliştirilmesi için çalışmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur (Wang ve ark., 2011; Qu, 2013; Kolk, 2014; Tariq ve Baloch, 2014; De Diago-Calderón ve ark., 2015). Bu nedenle, daha iyi mekanik özellikler için faz dönüşümü yoluyla mikroyapının geliştirilmesi üzerinde durulmuştur (Wang ve ark., 2011). Bu tip çelik üretiminin olası yollarından biri, Su verme ve Ayrıştırma (Quenching and Partitioning, Q-P) adlı yenilikçi bir tavlama ısıl işlemidir (Arlazarov ve ark., 2015). Q-P işlemi, 2003 yılında Speer ve arkadaşları tarafından ortaya konulmuştur (Gao ve ark., 2013; Arlazarov ve ark., 2015). Bu ısıl işlemin amacı, yüksek dayanımlı çeliklerin mekanik özelliklerini geliştirmek için mikroyapıda martenzitik matris ve karbonca zengin kalıntı östenit elde etmektir (Liu ve ark., 2011; Wang ve ark., 2016).

Q-P işlemi su verme ve ayrıştırma olarak iki adımdan oluşur. İlk olarak çelik tamamen östenit mikroyapı veya kritik sıcaklıklar arası (Ac1-Ac3) mikroyapıyı ($\alpha+\gamma$) elde etmek için tavllanır. Ardından çelik, martenzit başlama (M_s) ve martenzit bitiş (M_f) sıcaklıkları arasında ki bir sıcaklığa su verilerek mikroyapıda martenzit ve dönüşmemiş östenit meydana gelmesi sağlanır. Ayrıştırma adımı için çelik ya su verildiği sıcaklıkta izotermal olarak ya da su verildiği sıcaklığın üzerinde ki bir sıcaklıkta ayrıştırma süresi olarak belirlenen sürede o sıcaklıkta tutulur. Daha sonra çeliğe oda sıcaklığında su verilmesiyle ısıl işlem tamamlanmış olur (Bagliani ve ark., 2013; Hao ve ark., 2016; HajyAkbariy ve ark., 2016). Ayrıştırma aşamasında, karbon aşırı doymuş martenzitten kısmı dönüşmemiş östenit içerisine yayılır ve oda sıcaklığında su verme adımı sırasında karbon kazanmış halde ki östenitin yeni martenzitlere dönüşmeden oda sıcaklığında kararlı halde kalması sağlanır (Gao ve ark., 2013; Wang ve Speer, 2013; De Diago-Calderón ve ark., 2015). Bu yöntemle, mikroyapıda karbon kaybetmiş martenzit ve karbon kazanmış östenitin varlığı, dayanım ile sünekliğin bir arada oluşmasını sağlamak için elde edilir (Gao ve ark., 2013; Speer ve ark., 2015).

Su verme ve ayrıştırma ısıl işlemi, mekanik özellikleri esas olarak temperlenmiş martenzit mikroyapısına bağlı olan geleneksel su verme-temperleme (Quenching and Tempering, Q-T) ısıl işleminden oldukça farklıdır (Wang ve ark., 2011). Q-P ısıl işlemi uygulanan çelikler, geleneksel Q-T çeliklerine kıyasla önemli miktarda kalıntı östenit miktarına sahiptirler (Hao ve ark., 2016).

Q-P ısıl işleminde, ayrıştırma adımı sırasında dönüşmemiş östenitlerin tamamının oda sıcaklığında kararlı halde kalması için karbonca zenginleşmesinin yetersiz kalması halinde, oda sıcaklığına su verme süresince dönüşmemiş östenitlerin bir kısmının yeni martenzitlere dönüşmesi kaçınılmazdır. Bu yeni oluşan martenzitler yüksek karbon içeriğine sahiptir ve çeliğin sünekliği için zararlıdır (HajyAkbariy ve ark., 2016).

Ayrıştırma adımı sırasında martenzitten östenite yayılması istenen karbonu tüketme eğiliminde olan östenitin ferrit ve sementite ayrışması (beynit ve perlit oluşumu) ve karbür (geçiş karbürleri) çökmesi gibi rekabetçi reaksiyonları engellemek için uygun alaşımlama yapılmıştır (Edmonds ve ark., 2006; De Diago-Calderón, 2015).

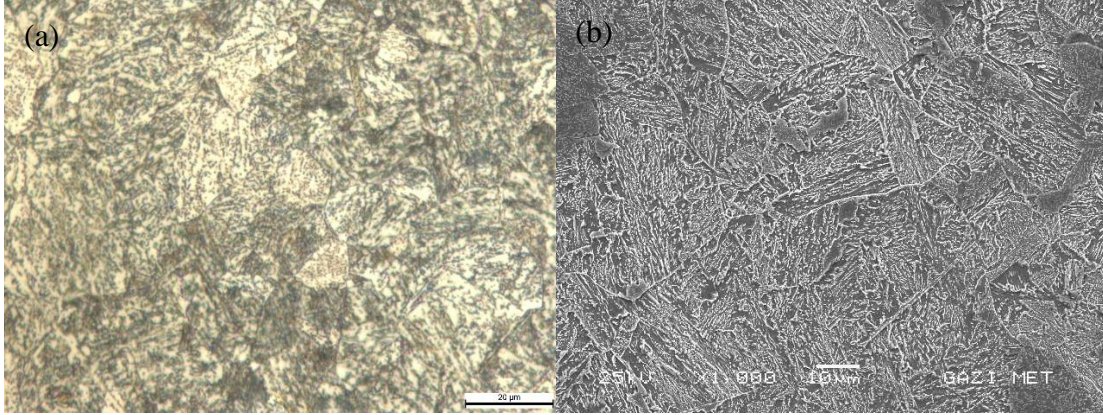
Karbonca zengin yarı kararlı kalıntı östenitin yararlı özelliklere sahip olduğu düşünülmektedir. Çünkü kalıntı östenit, deformasyon sırasında Dönüşüm Etkili Plastisite (Transformation Induced Plasticity, TRIP) etki göstermesiyle önemli ölçüde malzemenin enerji emme ve şekil verilebilirliğini destekleyici özelliğe sahiptir (Santofimia ve ark., 2009).

Kalıntı östenitin kararlılığının olabildiğince fazla karbon içeriğiyle sağlamak için çelik içerisine silisyum, alüminyum, fosfor, nikel gibi karbür oluşumunu engelleyen elementler eklenir (Yang ve ark., 2011; Hauserova ve ark., 2011; Karam-Abian ve ark., 2016). Çelik içerisine silisyum ilavesi sementit oluşumunu geciktirebilir, hatta bunu engelleyebilir. Alüminyum ve fosfor elementlerinin de temperleme reaksiyonlarını geciktirmede silisyum ile benzer özellikler gösterir. Bu gibi elementler, Q-P ısıl işleminde kritik rol oynamaktadır (De Diago-Calderón, 2015). Ayrıca karbür oluşumuna neden olan niyobyum, molibden ve vanadyum gibi elementlerin çelik içerisine eklenmesinden kaçınılmalıdır (Wang ve ark., 2010; Zhou ve ark., 2011).

Bu çalışmada orta-karbonlu çelik malzemeye uygulanan klasik su verme-temperleme ısıl işlemi ile yenilikçi su verme-ayrıştırma ısıl işleminin, sertlik ve mikroyapı özellikleri karşılaştırılmıştır. Su verme-ayrıştırma ısıl işlemi ile elde edilen mikroyapının, klasik su verme-temperleme ısıl işlemine göre sahip olduğu farklılıklar Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy-SEM) mikroyapı görüntüleri ile incelenmiştir. Klasik su verme-temperleme ısıl işlemi ile elde edilen temperlenmiş martenzit mikroyapısından farklı olarak su verme-ayrıştırma ısıl işlemiyle, mikroyapıda sahip olunan kalıntı östenitin varlığına rağmen su verme-temperleme ısıl işlemine göre sertlik değerlerine ilişkin bulgular grafikler halinde verilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Isıl işlemlerde kullanılan çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 1’ de, SEM ve optik mikroskop mikroyapı görüntüleri Şekil 1’ de gösterilmektedir. Bu çelikten, ısıl işlem deneylerinde kullanılmak üzere 40 mm çapında ve 10 mm boyunda 5 tane numune hazırlanmıştır.



Şekil 1. Isıl işlemler öncesi orta karbonlu çeliğin perlitik mikroyapısı: (a) optik mikroskop ve (b) SEM görüntüleri

Bu numunelerden bir tanesine, Şekil 2’ de gösterildiği gibi klasik su verme-temperleme ısıl işlemi (QT numunesi) ve diğer 4 numuneye Şekil 3’ te gösterildiği gibi farklı sıcaklık ve sürelerde su verme-ayrıştırma ısıl işlemleri uygulanmıştır. Su verme-temperleme ısıl işlemi için QT numunesi, 885 °C’ de 30 dakika östenitlendikten sonra oda sıcaklığında suda su verilmiştir. Daha sonra temperleme işlemi için 555 °C’ de fırında 1 saat bekletilip havada soğutmaya bırakılmıştır.

Deneylerde kullanılan çeliğin martenzit başlangıç sıcaklığı (M_s) aşağıda verilen formüle göre hesaplanmıştır (Denklem 1) (Chipalkatti, 1999).

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 539 - 423(\text{Ağ}\% \text{C}) - 30.4(\text{Ağ}\% \text{Mn}) - 17.7(\text{Ağ}\% \text{Ni}) - 12.1(\text{Ağ}\% \text{Cr}) - 7.5(\text{Ağ}\% \text{Mo}) - 7.5(\text{Ağ}\% \text{Si}) \quad (1)$$

Bu formül hesabına göre su verme-ayrıştırma ısıl işlemi uygulanan çeliğin martenzit başlangıç sıcaklığı 317 °C olarak kullanılmıştır.

Su verme-ayrıştırma işlemi için tüm numuneler 885 °C’ de 30 dakika östenitleme işlemine tabi tutulduktan sonra

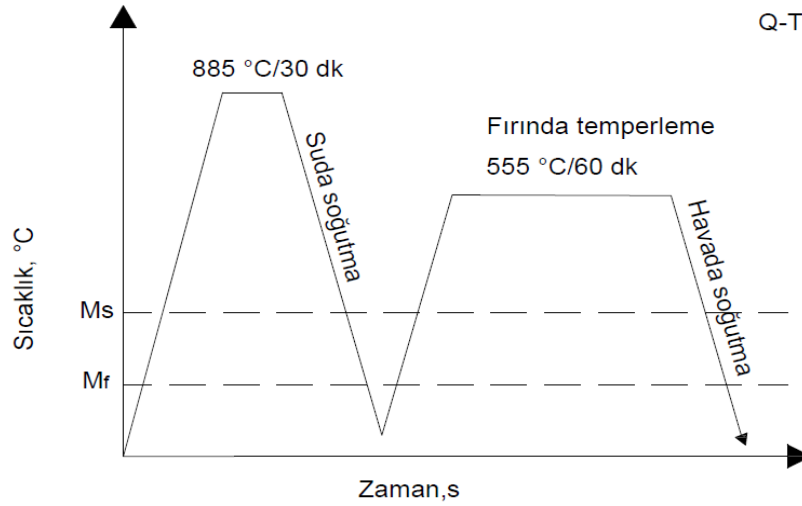
Tablo 1. Isıl işlemlerde kullanılan çeliğin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0.38	0.34	0.70	0.76	0.19	1.52

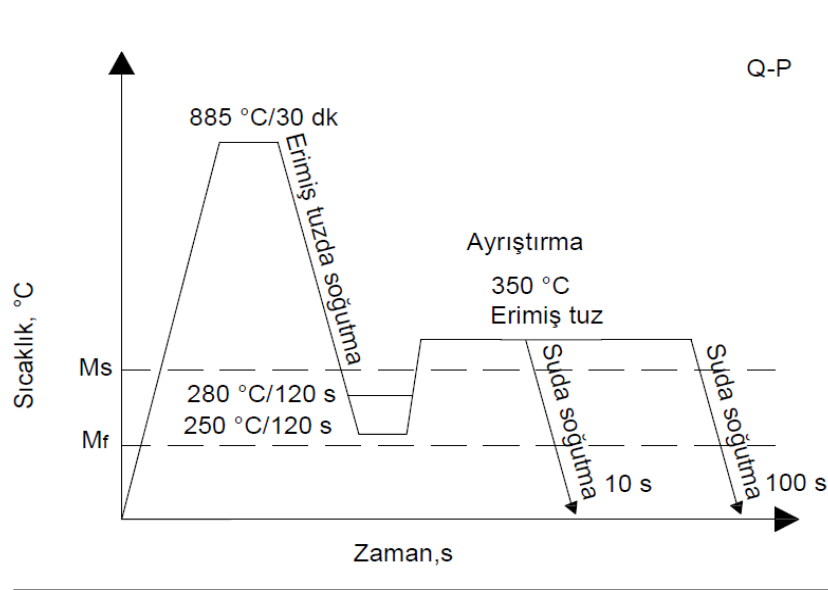
QP1 ve QP2 numuneleri 250 °C’ ye, QP3 ve QP4 numuneleri ise 280 °C’ ye su verilmiştir. Tüm Q-P numuneleri ilk su verme adımında 120 s tutulmuştur. Daha sonra ayrıştırma adımı için tüm Q-P numuneleri 350 °C’ ye ısıtılıp hepsi için sırasıyla 10 s ve 100 s bekletilmiştir. Tablo 2’ de su verme-ayrıştırma ısıl işlemi uygulanmış numunelerin işlem değişkenleri verilmektedir. Isıl işlemlerde östenitleme için kutu tipi tav fırını, ısıtma ve soğutma işlemleri için içerisinde %50 sodyum nitrat, %50 potasyum nitrat karışımından oluşan iki adet tuz banyosu kullanılmıştır.

Tablo 2. Su verme-ayrıştırma ısıl işlem değişkenleri (T_Q ve T_P sırasıyla ilk su verme sıcaklığını ve ayrıştırma sıcaklığını temsil etmektedir)

	$T_Q(^{\circ}\text{C})$	$T_P(^{\circ}\text{C})$	Ayrıştırma süresi(s)
QP1	250	350	10
QP2	250	350	100
QP3	280	350	10
QP4	280	350	100



Şekil 2. Klasik su verme-temperleme ısıl işlemi sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 3. Su verme-ayrıştırma ısıl işlem sıcaklık-zaman grafiği

Tüm numuneler, zımparalama ve parlatma yüzey işlemlerinden sonra %2' lik Nital ile dağlanarak metalografik inceleme için hazır hale getirilmiştir. Numunelerin mikroyapı görüntüleri, Jeol JEM 6060LV Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak elde edilmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri, 2.5 mm karbür bilya ile 187.5 kgf yük kullanılarak Brinell Sertlik yöntemiyle yapılmıştır.

İlk su verme sıcaklığındaki martenzit miktarı Koistinen-Marburger eşitliği ile tahmin edilmiştir (Denklem 2) (Wang ve ark., 2010; Tan ve ark., 2014).

$$f_i^M = 1 - \exp[-1.1 \times 10^{-2} \times (M_s - T_Q)] \quad (2)$$

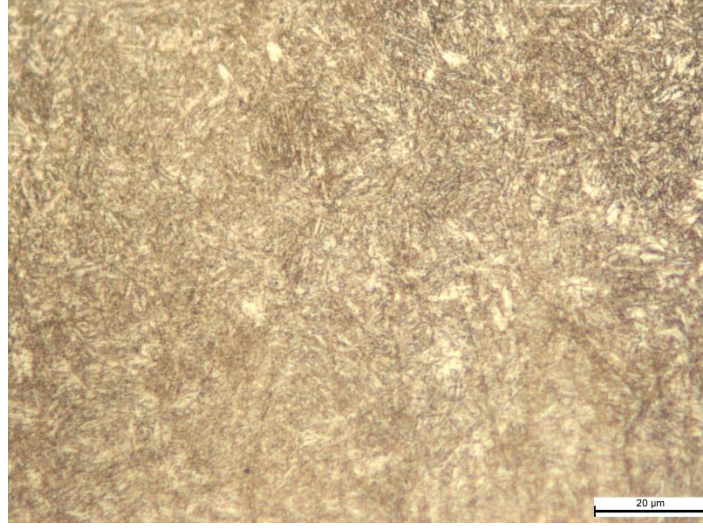
Eşitlikte f_i^M martenzitin hacim oranını, T_Q ise ilk su verme sıcaklığını temsil etmektedir. M_s , deneyde kullanılan çelik için martenzit başlama sıcaklığını ifade etmektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

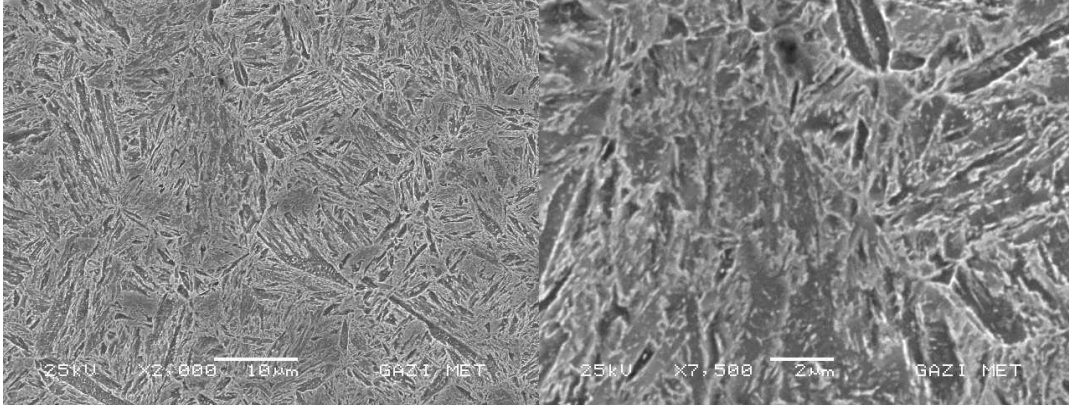
Orta karbonlu çeliğe uygulanan klasik su verme-temperleme ısıl işlemi sonucunda sahip olduğu mikroyapı optik mikroskop görüntüsü Şekil 4' te ve SEM mikroyapı görüntüleri farklı büyütmelerde Şekil 5' te gösterilmektedir. Su verme-temperleme ısıl işleminden sonra mikroyapı, temperlenmiş martenzit yapıdadır. Şekil 5' te gösterildiği gibi martenzit bloklar içerisinde dağılmış sementit taneleri gözlenmektedir. Su verilerek martenzit yapıya sahip

Klasik Su Verme-Temperleme Isıl İşlemine Göre Yenilikçi Su Verme-Ayrıştırma Isıl İşleminin Orta Karbonlu Çeliğin Mikroyapı ve Sertlik Özelliklerine Etkisi

olan çeliklerin, temperleme işlemiyle sertliğinde azalma olurken tokluğunda artış gerçekleşmektedir (Digges ve ark., 1966).



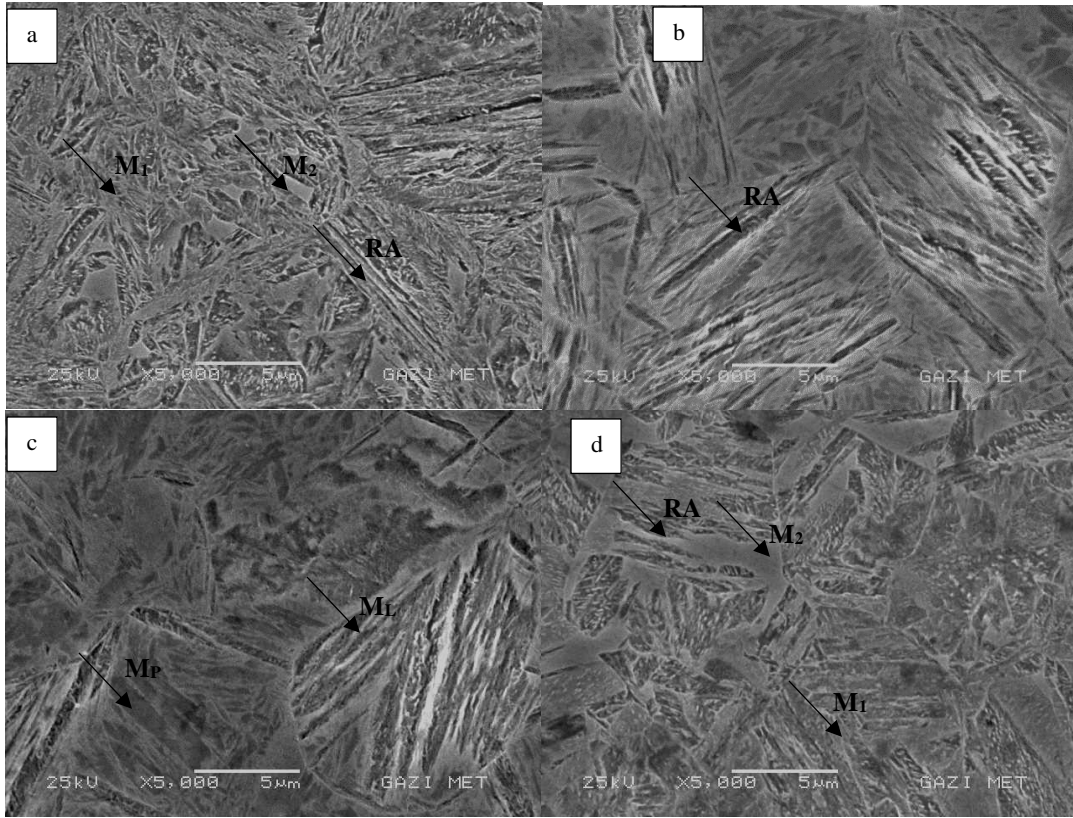
Şekil 4. Klasik su verme-temperleme ısıl işlemi uygulanan çeliğin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 5. Klasik su verme-temperleme ısıl işlemi uygulanan çeliğin SEM mikro fotoğrafları

Şekil 6' da su verme-ayrıştırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Mikroyapılar, iğnemsiz martenzit (M_L), plaka martenzit (M_P) ve martenzit bloklarının sınırlarında film şeklinde kalıntı östenitlerden (RA) oluşmaktadır. İlk su verme adımında

oluşan martenzitler, ayrıştırma adımında karbon kaybederek temperlenmiş martenzitlere (M_1) ve ayrıştırma adımında ise yeterli karbon alımı gerçekleşemeyen dönüşmemiş östenitler, ikinci su verme adımında karbon oranı yüksek blok şeklinde yeni martenzitlere (M_2) dönüşmektedir (Bagliani ve ark., 2013; HajyAkbari ve ark., 2016).



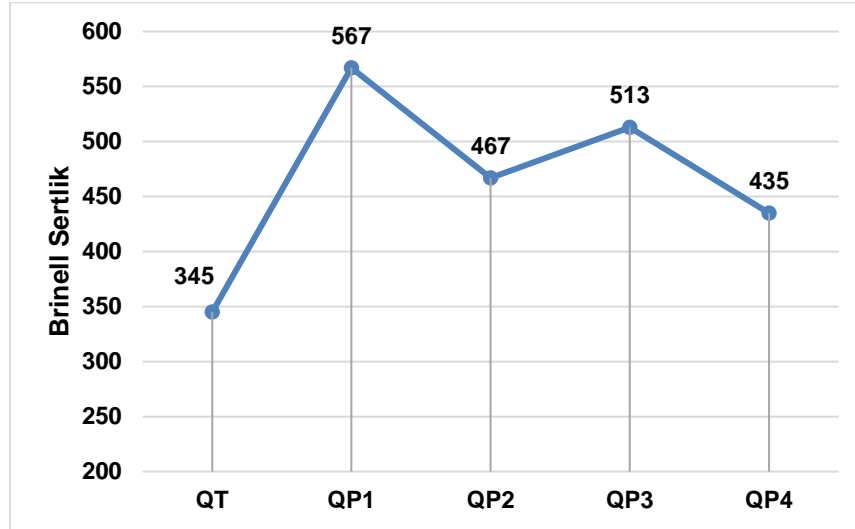
Şekil 6. Su verme-ayırıştırma ısıl işlemi uygulanan çeliklerin SEM görüntüleri: (a) QP1 (250/350 °C-10 s), (b) QP2 (250/350 °C-100 s), (c) QP3 (280/350 °C-10 s) ve (d) QP4 (280/350 °C-100 s)

Su verme-temperleme ısıl işlemi sonucunda elde edilen mikroyapı ile su verme-ayırıştırma sonucunda elde edilen mikroyapılar birbirlerinden farklı olduğu Şekil 5' te ve 6' da açıkça görülmektedir. Su verme-ayırıştırma ısıl işlemi sonucunda farklı yapılarda martenzit fazı ve kalıntı östenitten oluşan karmaşık mikroyapı, çeliğin sahip olduğu mekanik özellikleri etkilemektedir (Liu ve ark., 2011). Mikroyapıda ince film şeklinde bulunan kalıntı östenit fazı çeliğin sahip olması istenen TRIP etki için yararlıdır. Bunun nedeni film şeklindeki östenitlerin daha fazla yüzey alanına sahip olmasıdır ve bu, izotermal ayırıştırma adımında daha fazla karbon toplayarak ikinci su

verme adımı sırasında yeni martenzitlere dönüşmeden kararlı halde kalmasını sağlar (Dong ve ark., 2018). Blok tipi östenitler, ayırıştırma adımı sırasında yeterli karbonu toplayamadıklarından ikinci su verme adımında yeni martenzitlere (M_2) dönüşmektedir (Karam-Abian ve ark., 2016).

Şekil 7' de bütün numunelerin sertlik değerleri gösterilmektedir. Sertliğin, su verme-ayırıştırma ısıl işlemiyle su verme-temperleme ısıl işlemine göre arttığı görülmektedir.

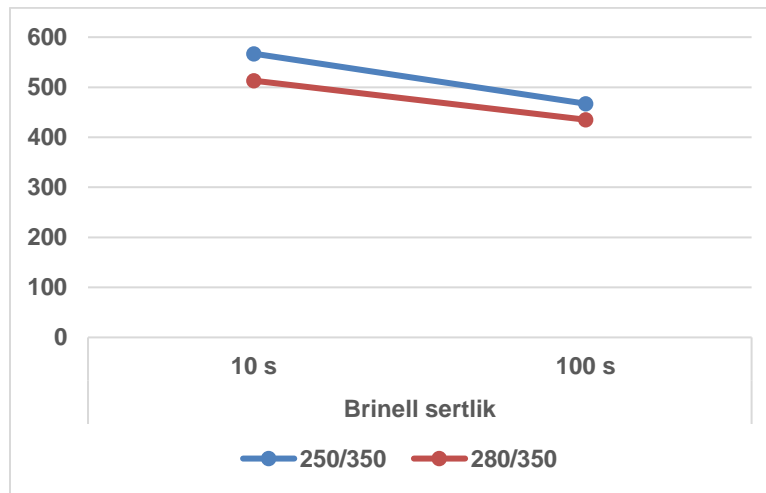
Klasik Su Verme-Temperleme Isıl İşlemine Göre Yenilikçi Su Verme-Ayrıştırma Isıl İşleminin Orta Karbonlu Çeliğin Mikroyapı ve Sertlik Özelliklerine Etkisi



Şekil 7. Su verme-temperleme ve su verme-ayrıştırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin sertlik değerleri

Su verme-ayrıştırma ısıl işlemi uygulanan çeliklerin, ısıl işlem değişkenlerine göre değişen sertlik değerleri Şekil 8’ de gösterilmektedir. İlk su verme sıcaklığının artmasıyla ve artan ayrıştırma süresiyle sertlik değerlerinde azalma gözlemlenmektedir. İlk su verme sıcaklığının 250 °C’ den 280 °C’ ye yükseltilmesi, ayrıştırma adımından önce bu su verme sıcaklıklarında dönüşmemiş östenit miktarlarının sırasıyla, %36 ve %50 olduğu denklem 1 ile hesaplanmış ve oda sıcaklığında elde edilecek dönüşmemiş östenit miktarının artmasına neden olduğu

sonucuna varılmıştır. Ayrıştırma süresinin artmasıyla ilk su verme adımında oluşan martenzitlerden dönüşmemiş östenitlere karbon difüzyonu için gerekli süre artmakta ve bu süre içerisinde karbon kaybeden martenzitlerin sahip olduğu gerinim enerjisi azalmaktadır. Martenzitlerin karbon kaybederek kademeli olarak temperlenmiş martenzite dönüşmesi çeliğin sertliğinin azalmasına neden olmaktadır (Krauss, 1999; Karam-Abian ve ark., 2016).



Şekil 8. Su verme-ayrıştırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin ayrıştırma süresine göre değişen sertlik değerleri

SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde aşağıda verilmiştir;

- Karbon oranı %0.38 olan alaşımlı çeliğin, 550 °C’ de 1 saat temperlenmesiyle temperlenmiş martenzit mikroyapısı elde edilmiştir.

- Su verme-ayrıştırma ısıl işlemiyle elde edilen çeliğin mikroyapısı, kalıntı östenitten, temperlenmiş martenzitten ve blok şeklinde yeni martenzitlerden oluşmaktadır.
- QP numunelerinin QT numunesine göre sahip oldukları yüksek sertlik değerleri, mikroyapıda çoğunlukta bulunan martenzit fazının varlığıyla açıklanmaktadır.

- QP numunelerinin SEM görüntülerinde, mikroyapıda martenzit levhaları sınırlarında ince film halinde kalıntı östenitlerin bulunduğu gözlemlenmiştir.
- Su verme-ayrıştırma ısıl işleminde ilk su verme sıcaklığının artırılması (250 °C' den 280 °C' ye), izotermal ayrıştırma adımından önce elde edilen dönüşmemiş östenit miktarını arttırmaktadır. Buna göre ayrıştırma adımından sonra oda sıcaklığında elde edilecek kalıntı östenit miktarının daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir.
- Su verme-ayrıştırma ısıl işleminde ayrıştırma süresinin artırılmasıyla (10s' den 100s' ye), sertlik değerleri düşmektedir.

Klasik su verme-temperleme ısıl işleminden farklı olarak su verme-ayrıştırma ısıl işlemi ile elde edilen yüksek sertlik değerlerinin yanında mikroyapıda bulunan kalıntı östenitlerin, çeliğin sünekliğine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Arlazarov, A., Bouaziz, O., Masse, J. P., Kegel, F. (2015). Characterization and modeling of mechanical behavior of quenching and partitioning steels. *Materials Science and Engineering: A* 620: 293-300.
- Bagliani, E. P., Santofimia, M. J., Zhao, L., Sietsma, J., Anelli, E. (2013). Microstructure, tensile and toughness properties after quenching and partitioning treatments of a medium-carbon steel. *Materials Science and Engineering: A* 559: 486-495.
- Chipalkatti, J. (1999). Modeling of Austenite Decomposition in an AISI 4140 Steel. Doctoral Dissertation, University of British Columbia.
- De Diego Calderón, M. I. (2015). Mechanical Properties of Advanced High-Strength Steels Produced via Quenching And Partitioning. Doctoral Dissertation, Universidad Carlos III de Madrid.
- De Diego-Calderón, I., De Knijf, D., Monclús, M. A., Molina-Aldareguia, J. M., Sabirov, I., Föjer, C., Petrov, R. H. (2015). Global and local deformation behavior and mechanical properties of individual phases in a quenched and partitioned steel. *Materials Science and Engineering: A* 630: 27-35.
- Digges, T. G., Rosenberg, S. J., Geil, G. W. (1966). Heat Treatment and Properties of Iron and Steel. National Bureau of Standards Gaithersburg Md.
- Dong, H. Y., Wu, K. M., Wang, X. L., Hou, T. P., Yan, R. (2018). A comparative study on the three-body abrasive wear performance of Q&P processing and low-temperature bainitic transformation for a medium-carbon dual-phase steel, *Wear* 402: 21-29.
- Edmonds, D. V., He, K., Rizzo, F. C., De Cooman, B. C., Matlock, D. K., Speer, J. G. (2006). Quenching and partitioning martensite—A novel steel heat treatment. *Materials Science and Engineering: A* 438: 25-34.
- Gao, G., Zhang, H., Tan, Z., Liu, W., Bai, B. (2013). A carbide-free bainite/martensite/austenite triplex steel with enhanced mechanical properties treated by a novel quenching–partitioning–tempering process. *Materials Science and Engineering: A* 559: 165-169.
- HajyAkbari, F., Sietsma, J., Miyamoto, G., Furuhashi, T., Santofimia, M. J. (2016). Interaction of carbon partitioning, carbide precipitation and bainite formation during the Q&P process in a low C steel. *Acta Materialia* 104: 72-83.
- Hao, Q., Qin, S., Liu, Y., Zuo, X., Chen, N., Huang, W., Rong, Y. (2016). Effect of retained austenite on the dynamic tensile behavior of a novel quenching-partitioning-tempering martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A* 662: 16-25.
- Hausarová, D., Nový, Z., Dlouhý, J., Motýčka, P. (2011). Q-P processing of high-strength low-alloyed steel sheets. *Metal'2011*, Brno, Czech Republic, 1-5.
- Karam-Abian, M., Zarei-Hanzaki, A., Abedi, H. R., Heshmati-Manesh, S. (2016). Micro and macro-mechanical behavior of a transformation-induced plasticity steel developed by thermomechanical processing followed by quenching and partitioning. *Materials Science and Engineering: A* 651: 233-240.
- Kolk, A. J. (2014). Is retained austenite controlling the mechanical properties of Q&P steels?. Delft University of Technology, Faculty Mechanical, Department Materials Science and Engineering, Master Thesis 1 s. Netherlands.
- Krauss, G. (1999). Martensite in steel: strength and structure. *Materials Science and Engineering: A* 273: 40-57.
- Liu, H., Jin, X., Dong, H., Shi, J. (2011). Martensitic microstructural transformations from the hot stamping, quenching and partitioning process. *Materials characterization* 62(2): 223-227.
- Qu, H. (2013). Advanced high strength steel through para-equilibrium carbon partitioning and austenite stabilization. Doctoral Dissertation, Ph. D. Thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, OH.
- Santofimia, M. J., Zhao, L., Sietsma, J. (2009). Microstructural evolution of a low-carbon steel during application of quenching and partitioning heat treatments after partial austenitization. *Metallurgical and Materials Transactions A* 40(1): 46.
- Speer, J. G., De Moor, E., Clarke, A. J. (2015). Critical assessment 7: Quenching and partitioning. *Materials Science and Technology* 31(1): 3-9.
- Tan, X., Xu, Y., Yang, X., Wu, D. (2014). Microstructure–properties relationship in a one-step quenched and partitioned steel. *Materials Science and Engineering: A* 589: 101-111.
- Tariq, F., & Baloch, R. A. (2014). One-step quenching and partitioning heat treatment of medium carbon low alloy steel. *Journal of materials engineering and performance* 23(5): 1726-1739.
- Wang, C. Y., Shi, J., Cao, W. Q., Dong, H. (2010). Characterization of microstructure obtained by quenching and partitioning process in low alloy martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A* 527(15): 3442-3449.
- Wang, X. D., Xu, W. Z., Guo, Z. H., Wang, L., Rong, Y. H. (2010). Carbide characterization in a Nb-microalloyed advanced ultrahigh strength steel after quenching–partitioning–tempering process. *Materials Science and Engineering: A* 527(15): 3373-3378.
- Wang, X. D., Guo, Z. H., Rong, Y. H. (2011). Mechanism exploration of an ultrahigh strength steel by quenching–partitioning–tempering process. *Materials Science and Engineering: A* 529: 35-40.

**Klasik Su Verme-Temperleme Isıl İşlemine Göre Yenilikçi Su Verme-Ayrıştırma Isıl İşleminin
Orta Karbonlu Çeliğin Mikroyapı ve Sertlik Özelliklerine Etkisi**

- Wang, L., Speer, J. G. (2013). Quenching and partitioning steel heat treatment. *Metallography, Microstructure, and Analysis* 2(4): 268-281.
- Wang, C. Y., Chang, Y., Yang, J., Cao, W. Q., Dong, H. (2016). Work hardening behavior and stability of retained austenite for quenched and partitioned steels. *Journal of Iron and Steel Research International* 23(2): 130-137.
- Yang, L. I., Lu, Y. P., Chong, W. A. N. G., Li, S. T., Chen, L. B. (2011). Phase stability of residual austenite in 60Si2Mn steels treated by quenching and partitioning. *Journal of Iron and Steel Research, International* 18(2): 70-74.
- Zhou, S., Zhang, K., Wang, Y., Gu, J. F., Rong, Y. H. (2011). High strength-elongation product of Nb-microalloyed low-carbon steel by a novel quenching-partitioning-tempering process. *Materials Science and Engineering: A* 528(27): 8006-8012.
-