

ÇİFT FAZLI ÇELİKLERDE MARTENZİT MORFOLOJİSİNİN STATİK DEFORMASYON YAŞLANMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ

Mustafa TÜRKMEN* ve Süleyman GÜNDÜZ**

*Kocaeli Üniversitesi, Hereke M.Y.O, Metalürji Programı, Hereke, 41800, Kocaeli

**Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Balıklarkayası, 78050, Karabük

mustafa.turkmen@kocaeli.edu.tr, sgunduz@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 27.03.2012; Kabul/Accepted: 04.04.2013)

ÖZET

Bu çalışmada, farklı martenzit morfolojisine sahip çift fazlı bir çeliğin statik deformasyon yaşlanma davranışı incelenmiştir. Kritik sıcaklık bölgesinde (775 °C) üç farklı ısıl işlem türü (kritik çift faz, ara su verme ve kademeli su verme) uygulanmıştır. Yaşlanma deneyleri % 4 öndeformasyondan sonra 180 °C'de 10 dakika ile 160 dakika arasında bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Uygulanan farklı ısıl işlemler sonrası yapılan mikroyapı çalışmaları ile ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojileri tespit edilmiştir. Martenzit morfolojisinin 180 °C'de farklı yaşlanma sürelerinde ΔY (yaşlanmadan dolayı dayanımda artış), akma dayanımı ve maksimum çekme değerlerinin eğilimini etkilemediği bulunmuştur. Belirli yaşlanma sürelerinde fiber martenzit morfolojisine sahip numuneler, ağ veya kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelere göre daha yüksek ΔY , akma dayanımı, maksimum çekme ve sertlik değerleri göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Çift fazlı çelik, Martenzit, Mekanik özellikler

THE EFFECT OF MARTENSITE MORPHOLOGY ON STATIC STRAIN AGEING BEHAVIOUR OF DUAL PHASE STEELS

ABSTRACT

In this study, strain ageing behaviour of dual phase steel with different martensite morphology was investigated. Three different types (Intercritical annealing, intermediate quenching and step quenching) of heat treatment was applied in the critical temperature (775 °C). Ageing experiments after 4 % prestrain were carried out at 180 °C for different times ranging from 10 to 160 min. The microstructure after different heat treatments applied to the work pieces with the network, fiber, and the bulky martensite morphologies have been identified. It was found that the martensite morphology has no effect on the trend of ΔY (an increase in strength due to strain ageing), YS and UTS at different ageing times for 180 °C. However, at a given ageing time for 180 °C ΔY , YS, UTS and hardness values of fibrous martensite are higher than network or bulky martensite.

Keywords: Dual phase steel, Martensite, Mechanical properties

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv endüstrisinde yakıt ve maliyet tasarrufu sağladığı için en büyük hedeflerden biri, otomobil gövdesinde kullanılan çelik sacların şekillendirilebilirlik ve mukavemet özelliklerini koruyarak ağırlıktan tasarruf sağlamaktır [1-3]. Çift fazlı çelikler yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çelikler gibi benzer dayanım göstermelerine karşın şekillendirilebilirlik özelliklerinin çok daha iyi

olduğu görülmüştür [4]. Bu nedenle HSLA çeliklerinin bir çeşidi olan çift fazlı çelikler otomotiv endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [3].

Çift fazlı çelikler esasen yumuşak ferrit matris içerisinde dağılmış sert martenzit tanelerinin oluşturduğu mikroyapılar ile tanımlanmaktadır [5-7]. Çift fazlı çelikler üstün mekanik özellikler göstermektedir. Sürekli akma davranışı, yüksek deformasyon sertleşmesi üssü, iyi şekillenebilirlik ve

yüzey kalitesi ile HSLA çelikleri ile karşılaştırılabilmektedir [8-10]. İnterkritik sıcaklıklara tavlama ve su verme ile çift faz mikroyapısı üretmek mümkündür. Bu işlem, düşük alaşımlı çeliği Ac_1 ve Ac_3 sıcaklıkları arasında ferrit-östenit oluşumunu takiben hızlı soğutma ile östeniti martenzite dönüştürerek gerçekleştirmektedir. Ferritik matris içerisinde martenzitin tane boyutu, dağılımı ve miktarının kontrolü mümkündür [11].

Otomobilde çelik sacların geniş kullanım yeri bulunduğu gövde kısmındaki sacların inceltilmesi ile büyük oranda hafifleme sağlanabilmektedir. Geleneksel yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımıyla mukavemet değerleri yüksek ince saclar üretilebilmektedir. Ancak bu çelik grubunun sınırlı şekillendirilebilme özelliği günümüz karmaşık otomobil gövde paneli ihtiyacını karşılayamamaktadır. Fırında sertleşebilen çeliklerin geliştirilmesi, hem şekillendirilebilirlik hem de mukavemet gereksinimlerini yerine getirerek bu soruna etkili bir çözüm olmuştur. Otomotiv endüstrisinde kullanılan çift fazlı çelikler soğuk deforme edildikten sonra boyanarak kurutulmaktadır. Teknolojik olarak şekillendirilmiş ve boyanmış sacın boya pişirme işlemi sırasında akma mukavemetinde görülen artış (fırınlama sertleşmesi) deformasyon yaşanması mekanizması ile açıklanmaktadır [12,13].

Bu çalışmada farklı ısıl işlem rotaları izlenerek üretilen ağ, fiber ve kütsel martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çeliklerde statik deformasyon yaşanma davranışının mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneylerde, tablo 1'de kimyasal bileşimi verilen ve 400x400x4 mm ebatlarında OYAK Ereğli Demir ve Çelik Fabrikalarından temin edilen 3237 kalite çelik kullanılmıştır. Isıl işlem öncesi malzeme 18x80x4 mm ebatlarında olacak şekilde kesilmiştir.

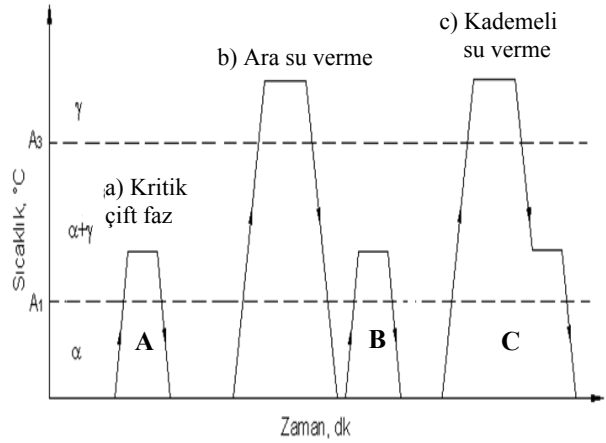
Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan çelik malzemenin kimyasal bileşimi (% Ağırlık). (Chemical composition of steel wt %)

| Malzeme | C | Si | Mn | P | S | Fe |
|---------------|-----|-----|-----|------|------|-------|
| S235JR (3237) | 0.1 | 0.4 | 1.2 | 0.02 | 0.03 | Kalan |

Kritik bölge sınır sıcaklıkları (Ac_1 ve Ac_3), Andrews'in [14] ampirik formülü ile yapılan hesaplama sonucunda 721 - 861 °C olarak bulunmuştur. Isıl işlemler, Protherm marka fırın kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Homojen bir yapı elde edebilmek için deneylerde kullanılan bütün çelik numuneler 1100 °C'de 60

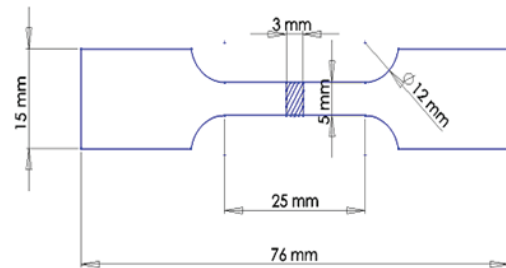
dakika tavlama ve fırında soğutma, ardından 980 °C sıcaklıkta 30 dakika tavlama ve havada soğutma ısıl işlemleri ile normalize edilmiştir. Normalizasyon ısıl işleminden sonra numunelere 775 °C'de 30 dakika süre için üç farklı ısıl işlem uygulanmıştır. Bunlar kritik çift faz (A grubu), ara su verme (B grubu) ve kademeli su verme (C grubu) olarak adlandırılmıştır. Numunelere uygulanan üç farklı ısıl işlem türü Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde uygulanan çift faz ısıl işlem türleri (Dual phase heat treatment applied in the experiments)

A grubu numuneler 775 °C'de 30 dakika tavlandıktan sonra suda soğutulmuştur. B grubu numuneler 980 °C'de 30 dakika tavlandıktan sonra suda soğutulup, ardından 775 °C'de tekrar 30 dakika tavlandıktan sonra suda soğutulup ara su verme işlemi uygulanmıştır. C grubu numuneler ise 980 °C'de 30 dakika tavlandıktan sonra 775 °C'ye havada soğutulup ardından 775 °C'de 30 dakika bekletildikten sonra suda soğutulmuşlardır.

Uygulanan ısıl işlemler sonrası numunelerin yüzeyleri düzlem taşlama makinası ile taşlanarak ısıl işlem sonucu oluşan oksitler ve dekarbürizasyon bölgeleri ortadan kaldırılmıştır. Yüzeyleri taşlanan numunelerden CNC freze tezgâhında TS EN ISO 6982 standardına göre hazırlanan çekme deney numunesi Şekil 2'de gösterilmiştir [15].



Şekil 2. Çekme deney numunesi (Tensile test sample)

Hazırlanan numuneler, 5 kN kapasiteli Shimadzu Trapezium Single marka test cihazı kullanılarak % 4 oranında ön deforme edilmiştir. Ön deformasyon

işleminde ekstansometre kullanılarak numunelerin tam deforme olması sağlanmıştır.

% 4 ön deformasyonu tamamlanan çekme numuneleri 180 °C' de 10, 20, 40, 80 ve 160 dakika bekletilerek yaşlandırılmıştır. Her bir yaşlandırma işlemi için üçer adet numune kullanılmıştır. Yaşlandırılan numuneler daha sonra çekme test cihazında 2 mm/dakika çekme hızında kopuncaya kadar çekilmiştir.

Numunelerin sertlik değerlerinin belirlenmesinde Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri Buehler Micromet 5103 marka cihaz ile 1kg yük (HV1) altında gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için alınan 10 sertlik ölçümünün ortalaması sertlik sonucu olarak değerlendirilmiştir.

Mikroyapı incelemeleri için numuneler geleneksel metalografik yöntemler ile hazırlanmıştır. Bu numuneler daha sonra % 2'lik Nital çözeltisinde 4-6 sn sürelerde bekletilerek dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Dağlama işleminden sonra alkolle temizlenen numunelerin yüzeyleri kurularak mikroyapı fotoğrafı almak için hazır hale getirilmiştir.

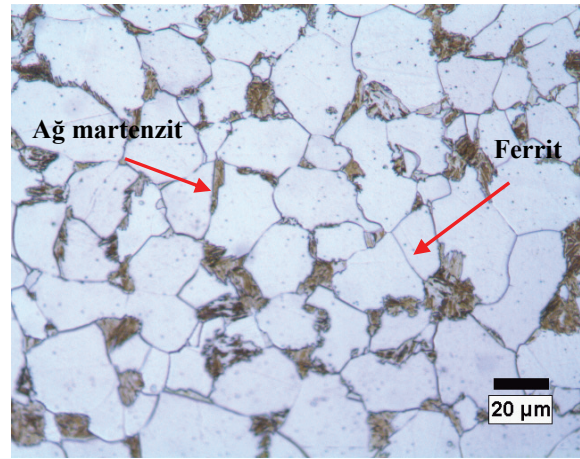
Mikroyapı incelemeleri Nikon Eclipse L150 marka optik mikroskopta 5x-100x objektifler kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen mikroyapılardan tane ebadı, ferrit ve martenzit fazlarının % oranları uygun büyütmede Clemex Vision Lite marka mikroyapı analiz sistemi kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca çekme deneyi sonucu elde edilen kırık yüzeylere ait görüntüler Jeol-100c marka tarama elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

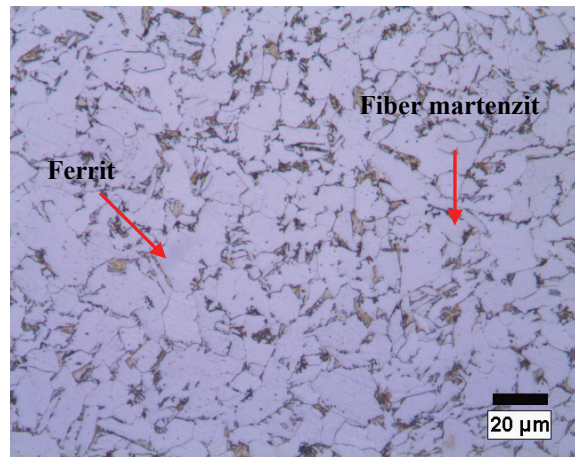
Deneysel çalışmada kullanılan çelik malzemenin orjinal yapısı ferrit ve perlit fazlarını içermektedir. A, B ve C grubu olmak üzere uygulanan üç farklı ısıl işlem sonucunda her bir gruba ait farklı martenzit morfolojisi elde edilmiştir (Şekil 3). Şekilden görüldüğü üzere martenzit koyu renkte, ferrit ise açık renkte ortaya çıkmıştır. Kritik çift faz işlemi uygulanan A grubu numuneler ağ şeklinde tane sınırlarında dağılmış martenzit morfolojisi (Şekil 3.a) göstermişlerdir. Ara su verme işlemi uygulanan B grubu numunelerde fiber martenzit morfolojisinin olduğu ve ferrit matris içerisinde uniform olarak dağılım gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 3.b). C grubu numunelerde uygulanan kademeli su verme sonrası kaba ferrit ve kütleli martenzit morfolojisi gözlenmiştir (Şekil 3.c). Kritik çift faz ısıl işlemi öncesi numunelerin mikroyapısal durumundaki farklılığın martenzit morfolojisini etkilediğini Das ve

Chattopadhyay yaptıkları çalışmada göstermişlerdir [16].

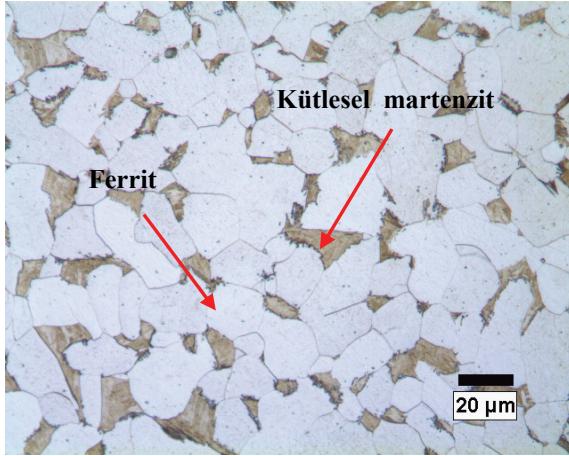
Mikroyapı incelemeleri sonucunda A, B ve C grubu numunelerde martenzit hacim oranı % $21 \pm 1,8$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Bu sonuç aynı sıcaklıkta yapılan üç farklı ısıl işlemin martenzit morfolojisini değiştirirken hacim oranını etkilemediğini göstermiştir. Ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojileri üzerinden yapılan ferrit ve martenzit tane ebadı ölçümlerinden morfoloji değişikçe tane ebadının değiştiği tespit edilmiştir. Buna göre ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojisinde sırasıyla ferrit tane ebadı $20 \pm 0,62 \mu\text{m}$, $12 \pm 0,37 \mu\text{m}$ ve $22 \pm 0,68 \mu\text{m}$ ölçülürken martenzit tane ebadı $9 \pm 0,28 \mu\text{m}$, $4 \pm 0,12 \mu\text{m}$ ve $11 \pm 0,34 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Tane ebadında oluşan bu farklılaşma uygulanan farklı ısıl işlem türlerinden kaynaklanmaktadır.



(a)



(b)



(c)

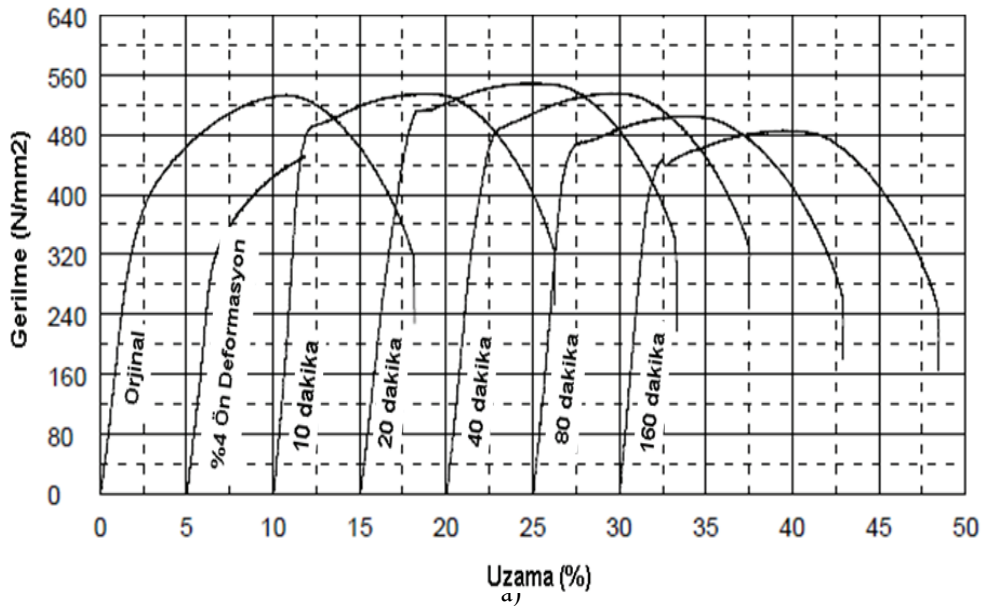
Şekil 3. Çift fazlı çelik mikroyapıları (a) ağ martenzit (b) fiber martenzit (c) kütleli martenzit (Optical micrographs of dual phase steels a) network, b) fibrous c) bulky martensite)

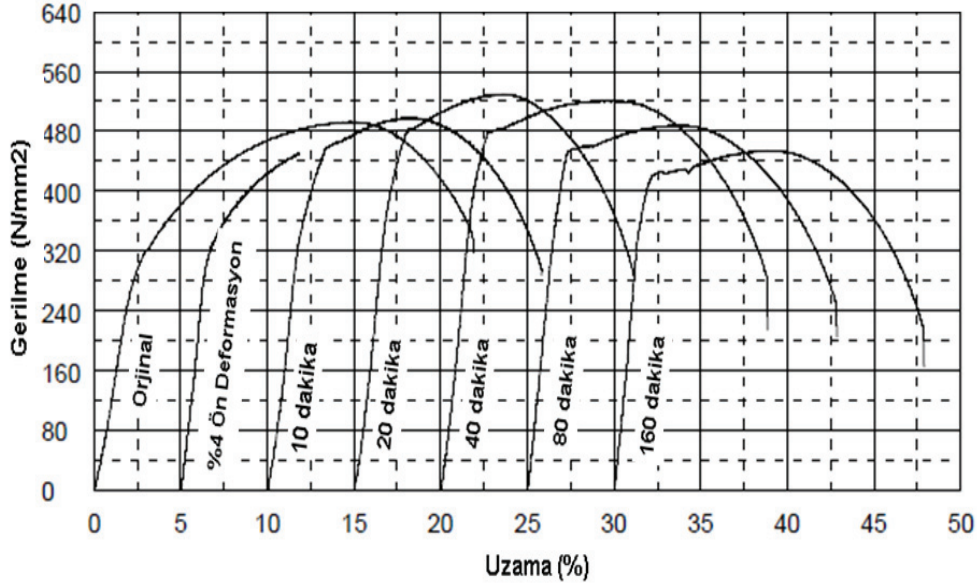
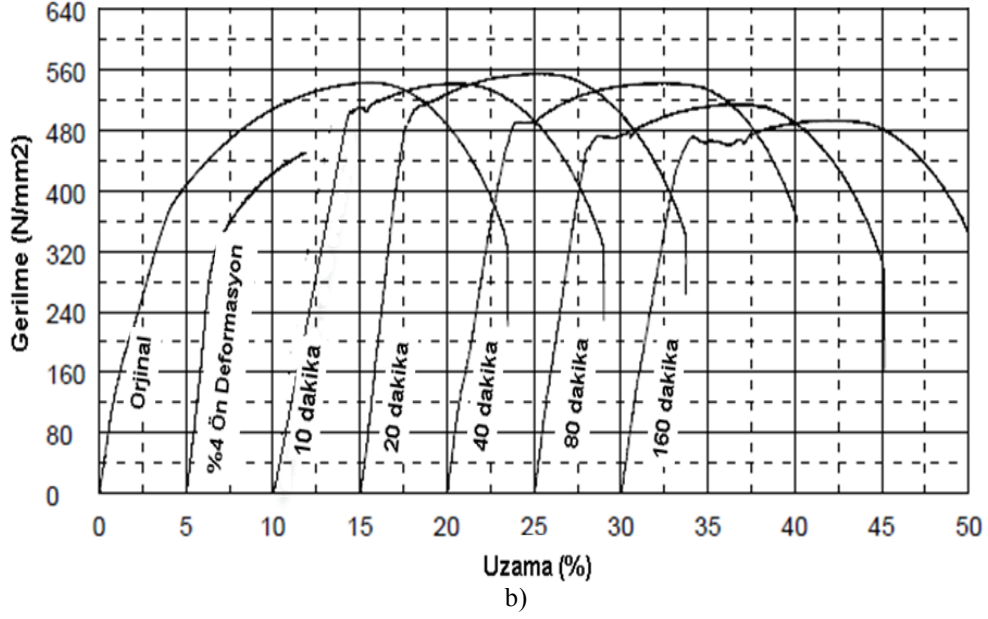
Isıl işlem sonrası ön deformasyonsuz ve % 4 ön deformasyon uygulandıktan sonra 180 °C’de 10, 20, 40, 80 ve 160 dakika sürelerde yaşlandırılan ağ, fiber ve kütleli martenzit yapıları sahip numunelerin gerilme uzama diyagramları Şekil 4’te gösterilmiştir. Yapılan deneylerde yaşlandırma işlemi uygulanmayan üç farklı martenzit morfolojisine sahip çift fazlı

yapıların belirgin bir akma davranışı göstermediği tespit edilmiştir (Şekil 4). Akma mukavemeti olarak % 0,2 akma noktası kullanılmıştır. Düşük karbonlu çeliklerin aksine çift fazlı çeliklerin sürekli akma davranışı göstermesi, martenzitik dönüşüm esnasında martenzite sınır olan ferrit tanelerinde oluşan dislokasyonların serbest halde hareket etmesinin bir sonucudur [17-18].

% 4 ön deformasyon uygulanan ve ardından 180 °C’de 10, 20, 40, 80 ve 160 dakika yaşlandırılan numuneler, ön deformasyon uygulanmayan numunelere göre belirgin akma noktası ve akma noktası uzaması göstermiştir. Belirgin akma noktasının ve akma noktası uzamasının tekrar ortaya çıkması, arayer atomlarıyla deformasyon sırasında oluşan veya ısıl işlem sonrası gerilmeden dolayı meydana gelen dislokasyonların etkileşiminden kaynaklanmaktadır [11].

Çift fazlı çeliklerde martenzitin oluşması kalıntı gerilmelerle birlikte ferrit içerisinde özellikle ferrit-martenzit arayüzeyine yakın bölgelerde dislokasyon yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Katı ergiyik içerisinde serbest halde bulunan C atomlarının bu dislokasyonlara difüz edip hareketini engellemesi belirgin akma noktasını ve akma noktası uzamasını oluşturmaktadır [19].





Şekil 4. Öndeformasyon uygulanmayan ve % 4 öndeformasyon sonrası 180 °C’de farklı sürelerde yaşlandırılan (a) ağ, (b) fiber ve (c) kütsel martenzit morfolojisine sahip numunelerin gerilme-uzama diyagramları. (Stress-strain diagrams of the steels with (a) network, (b) fibrous and (c) bulky martensite aged at 180 °C for different times of 10–160 min)

Ağ, fiber ve kütsel martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çeliklerin yaşlanma sonrası akma dayanımı (YS), deformasyon yaşlanmasından dolayı gerilmedeki artış (ΔY), maksimum çekme dayanımı (UTS) ve % uzama değerleri Tablo 2.’de görülmektedir.

Tablo 2 incelendiğinde 180 °C’de 10 ve 20 dakika yaşlandırılan ağ, fiber ve kütsel martenzit morfolojisine sahip numunelerin yaşlanmadan dolayı akma ve çekme dayanımının arttığı fakat % uzama değerinin ise düştüğü görülmüştür. Yaşlanma süresinin 40 dakikadan 80 yada 160 dakikaya çıkması numunelerin akma ve çekme dayanımını düşürürken % uzama değerini artırmıştır. Martenzit fazının temperlenmesi neticesinde meydana gelen bu durum aşırı yaşlanmanın bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır.

Aşırı yaşlanma süresince martenzit içerisindeki karbürlerin kabalaşarak dayanımdaki azalmaya katkıda bulunduğunu Rocha ve arkadaşları [20] rapor etmişlerdir. Ayrıca Tablo 2 ön deformasyon sonrası 180 °C’de farklı sürelerde yapılan yaşlandırma deneylerinin ΔY değerlerini etkilediğini göstermektedir. ΔY değeri, yaşlanmadan dolayı oluşan akma dayanımı ile % 4 öndeformasyon uygulandıktan sonra elde edilen dayanım arasındaki farktır. ΔY değerlerindeki en büyük artış ağ, fiber ve kütsel martenzit morfolojisi için 180 °C’de 10 ila 40 dakika yaşlandırılan numunelerde görülmüştür. ΔY ve akma dayanımında artış olması dislokasyonlar ile karbon ve azot gibi arayer atomlarının etkileşim içerisinde olduğunu ve dislokasyonların hareket edemediğini göstermektedir [21]. Davis [22] yapmış

olduğu çalışmada, 170 °C'de 20-30 dakika aralığında yaşlandırılan havada ve kumda soğutulmuş çift fazlı çeliğin akma dayanımında ve akma noktası uzamasında artış olduğunu görmüştür. Buna neden olarak arayer atomlarının veya çok küçük çökeltilerin dislokasyonların hareketini engellemesini göstermiştir.

Tablo 2'den 180 °C'de 10 ila 160 dakika arasında yapılan bütün yaşlanma sürelerine bakıldığında, B grubu fiber martenzit morfolojisine sahip 180 °C'de 20 dakika yaşlandırılan numuneler en yüksek ΔY (67 MPa) değerini göstermiştir. Aynı sürede yaşlandırılan ağ ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelerin ΔY değerleri sırasıyla 56 MPa ve 30 MPa olarak bulunmuştur. Yaşlanma süresince çift fazlı çelikte dislokasyonların hareketini engelleyen yüksek dislokasyon yoğunluğu fiber martenzit yapıda dayanımın artmasını sağlamıştır. Yaşlanma süresi 160 dakikaya çıktığında ΔY değeri fiber martenzit yapıda 15 MPa'a düşerken ağ ve kütleli martenzit numunelerde eksi değerlere inmiştir. Bu sonuçlar fiber martenzit gösteren numunelerde, ağ ve kütleli martenzit gösteren numunelere göre aşırı yaşlanmanın daha yavaş olduğunu göstermektedir. Bu martenzitin farklı morfolojileri ile ilgilidir.

Tablo 2 ve Şekil 4'ten martenzit morfolojisinin 180 °C'deki yaşlanma zamanına bağlı olarak çeliğin genel davranışı üzerine etkisinin olmadığı görülmüştür. Örneğin 180 °C'de 10 yada 40 dakika yaşlandırılan ağ, fiber ve kütleli martenzite sahip numunelerin hepsinde ΔY , YS ve UTS değerleri artmıştır. Yaşlanma zamanının 80 yada 160 dakikaya çıkması durumunda ise bu değerlerde düşme görülmüştür. Fakat fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerin ΔY , YS ve UTS değerleri 180 °C'de yapılan bütün yaşlandırma zamanları için ağ ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerde yaşlanma süresine bağlı olarak daha fazla dislokasyon kilitlenmesinin meydana geldiğini göstermektedir. ΔY , YS ve UTS değerlerinin fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerde en yüksek olması rasgele dağılmış martenzit fazının varlığından kaynaklanmaktadır. Fiber martenzit, yapıda rasgele ve homojen olarak dağıldığı için ağ ve kütleli martenzite göre daha fazla dislokasyon kilitlenmesine neden olmuştur. Bu durum çeliğin mekanik özelliklerini arttırarak aşırı yaşlanmanın hızını düşürmüştür.

Ayrıca üç farklı martenzit morfolojisinin % uzama değerleri incelendiğinde fiber martenzit morfolojisine sahip B grubu numunelerin % uzama değerleri bütün yaşlanma süreleri için en yüksek değeri gösterirken ağ ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelerde ise daha düşük değerler görülmüştür (Tablo 2). % uzamanın fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerde en yüksek değeri göstermesi çok küçük

ve boşluk büyümesini engelleyen rasgele dağılmış martenzit fazının varlığından kaynaklanmaktadır. Bayram ve arkadaşları [23] yapmış oldukları çalışmada benzer sonuçları rapor etmişlerdir. Numunelerin ince fiber martenzit morfolojisine sahip olması sünekliliğin artmasına sebep olmuştur. Koo ve Thomas [24] çift fazlı çelikleri sert martenzit fazı ile güçlendirilmiş metalik kompozitler olarak değerlendirmişlerdir.

Çift fazlı çeliklerde fiber martenzitin yapıda homojen olarak dağılması ağ ve kütleli martenzite göre çeliğin daha üstün mekanik özellikler sergilemesine neden olmuştur. Soğuma sırasında martenzitik dönüşüm ferrit tanelerinin çalışma sertleşmesine neden olur [11] ve bunun sonucunda ferrit tanelerinde dislokasyon yoğunluğu artar. Bu durum fiber martenzit yapıya sahip çift fazlı çeliğin akma ve çekme dayanımını artırır. Ayrıca ferritik yapı fiber martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çeliklerde süreklidir ve bu ağ ve kütleli martenzit morfolojisine sahip çeliklere göre daha yüksek uzamaya sebep olur. Uzamanın yüksek olması martenzitin yapı içerisinde çok küçük ve rasgele dağılmasının bir sonucudur. Çünkü fiber yapı boşlukların büyümesini engellemektedir. Ayrıca Gündüz ve arkadaşlarının [12] önerdiği gibi fiber morfolojisine sahip martenzit, ağ ve kütleli martenzit morfolojisine göre çok daha fazla miktarda mikro boşlukların çekirdeklenmesine yardımcı olarak büyümelerini geciktirir.

Çift fazlı çeliklerde fiber martenzitin yapıda homojen olarak dağılması ağ ve kütleli martenzite göre çeliğin daha üstün mekanik özellikler sergilemesine neden olmuştur. Soğuma sırasında martenzitik dönüşüm ferrit tanelerinin çalışma sertleşmesine neden olur [11] ve bunun sonucunda ferrit tanelerinde dislokasyon yoğunluğu artar. Bu durum fiber martenzit yapıya sahip çift fazlı çeliğin akma ve çekme dayanımını artırır. Ayrıca ferritik yapı fiber martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çeliklerde süreklidir ve bu ağ ve kütleli martenzit morfolojisine sahip çeliklere göre daha yüksek uzamaya sebep olur. Uzamanın yüksek olması martenzitin yapı içerisinde çok küçük ve rasgele dağılmasının bir sonucudur. Çünkü fiber yapı boşlukların büyümesini engellemektedir. Ayrıca Gündüz ve arkadaşlarının [12] önerdiği gibi fiber morfolojisine sahip martenzit, ağ ve kütleli martenzit morfolojisine göre çok daha fazla miktarda mikro boşlukların çekirdeklenmesine yardımcı olarak büyümelerini geciktirir. Bu çalışmada elde edilen deney numuneleri arasında fiber martenzit morfolojisine sahip deney numuneleri ağ ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numuneler ile kıyaslandığında açıkça daha çekici dayanım süneklilik kombinasyonu sergilemiştir. (bkz Tablo 2 ve Şekil 4) Ağ martenzit morfolojisine sahip numunelerin akma ve çekme dayanımları fiber martenzitten düşük fakat kütleli martenzitten yüksektir. Bu sonuçlar Ekrami'nin [25] elde ettiği sonuçlar ile tutarlıdır.

Tablo 2. Farklı martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çeliklerin yaşlanma sonrası YS, ΔY , UTS ve % uzama değerleri (YS, ΔY , UTS and elongation % of dual phase steel with different martensite morphologies after aging)

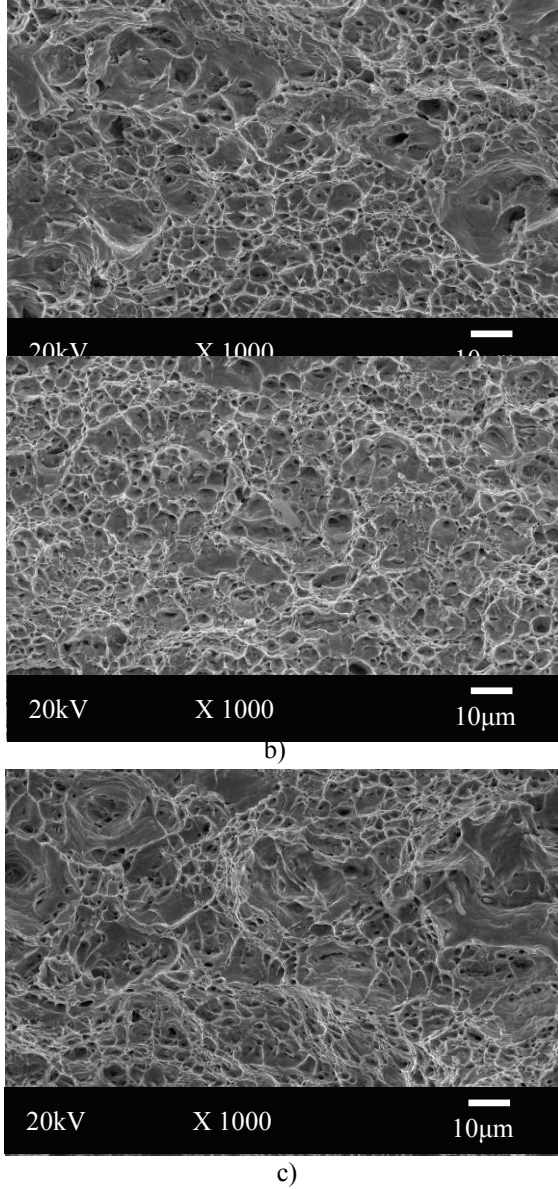
| Martenzit Morfolojisi | Yaşlanma Süresi (dak.) | Yaşlanma Sonrası Akma Dayanımı (MPa) | ΔY (MPa) | UTS (MPa) | Uzama (%) |
|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------|-----------|
| Ağ | Orjinal | 342 | - | 533 | 18 |
| | 10 | 483 | 33 | 535 | 16 |
| | 20 | 506 | 56 | 546 | 16 |
| | 40 | 487 | 37 | 533 | 17 |
| | 80 | 468 | 18 | 505 | 17 |
| | 160 | 445 | -5 | 485 | 18 |
| Fiber | Orjinal | 360 | - | 544 | 24 |
| | 10 | 508 | 58 | 544 | 19 |
| | 20 | 517 | 67 | 555 | 19 |
| | 40 | 490 | 40 | 545 | 20 |
| | 80 | 475 | 25 | 515 | 20 |
| | 160 | 465 | 15 | 494 | 21 |
| Kütlesel | Orjinal | 321 | - | 492 | 21 |
| | 10 | 461 | 11 | 498 | 16 |
| | 20 | 480 | 30 | 530 | 16 |
| | 40 | 476 | 26 | 518 | 18 |
| | 80 | 451 | 1 | 484 | 18 |
| | 160 | 421 | -29 | 451 | 18 |

Yaşlanmanın mekanik özelliklere etkisinin tespitinde en önemli göstergelerden birisi de sertlik değerlerinin belirlenmesidir. Farklı martenzit morfolojisine sahip numunelerin sertlik sonuçları yaşlanma zamanına bağlı olarak Tablo 3'te verilmektedir. Sertlik sonuçları incelendiğinde 180 °C'de farklı sürelerde yaşlandırılan numunelerin sertliği yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte bir artış göstermiştir. Ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numuneler 180 °C'de 20 dakika yaşlandırıldığında en yüksek sertlik değerlerine sahip olmuştur. Sertlik değerlerindeki bu artış dislokasyonlar ile katı ergiyik içerisinde serbest halde bulunan atom kümelerinin veya ikinci faz partiküllerinin etkisinin bir sonucudur. Bu atom kümeleri ve ikinci faz partikülleri dislokasyonların hareketini engelleyerek sertliğin artmasına neden olmuştur.

Tablo 3. 180°C'de 10-160 dakika aralığında yaşlandırılan farklı morfolojiye sahip çift fazlı çeliğin sertlik değerleri. (Hardness values of dual phase steel with different morphologies aged at 180 °C for different times of 10–160 min.)

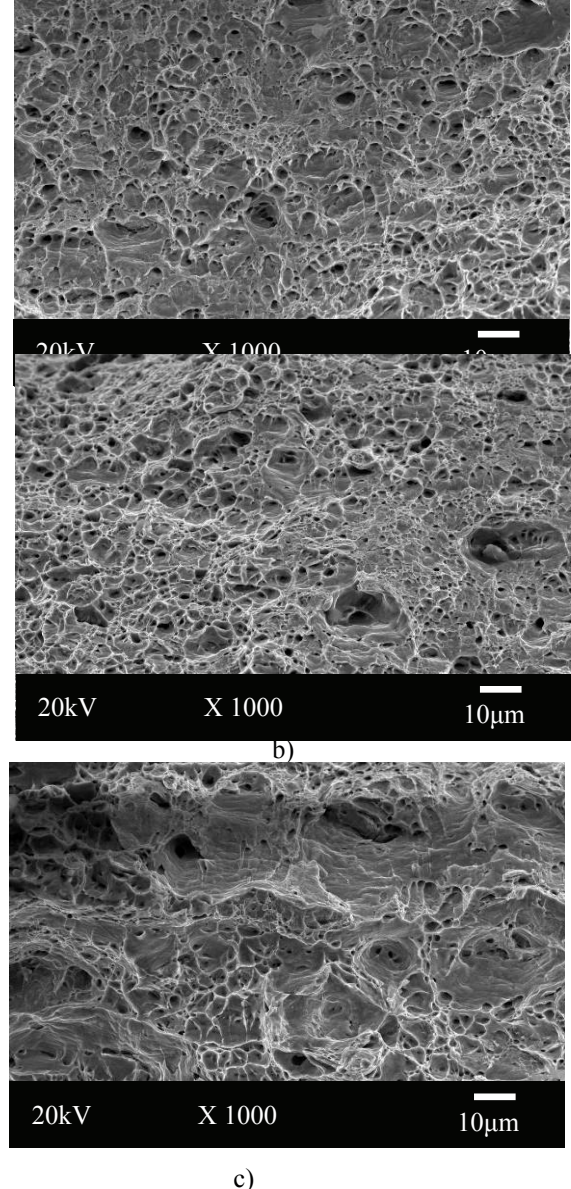
| Yaşlandırma Süresi (dakika) | Sertlik Değeri (HV ₁) | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------|
| | A grubu Ağ | B Grubu Fiber | C grubu Kütlesel |
| 0 | 164 | 170 | 151 |
| 10 | 164 | 172 | 154 |
| 20 | 170 | 175 | 164 |
| 40 | 164 | 172 | 160 |
| 80 | 158 | 162 | 150 |
| 160 | 150 | 155 | 139 |

Yaşlanma zamanının 40, 80 ve 160 dakikaya çıkması ile ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelerin sertlik değerleri kademeli olarak düşmüştür. Bunun nedeni olarak çökeltilerin büyümesi ve çökeltiler arasındaki mesafenin artması gösterilebilir. Çökeltilerin büyümesi ve aralarındaki mesafenin artması dislokasyonların engellenmeden rahat hareket etmesine neden olmuştur. Bu çalışmada elde edilen değerler, Abdalla vd.'nin yaptığı; sabit sıcaklıkta yaşlandırma süresinin artırılmasıyla elde edilen sertlik değerleri ile benzerlik göstermektedir [26].



Şekil 5. Yaşlandırma işlemi uygulanmayan a) Ağ, b) Fiber ve c) Kütleli martenzit numunelerin çekme deneyi sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri. (Fractographs (SEM) of fractured as annealed (without aging) tensile specimens of a) network, b) fibrous and c) bulky martensite)

Yapılan sertlik ölçümleri neticesinde fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerin sertlik değerleri 180 °C'de yapılan bütün yaşlandırma zamanları için ağ ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Kütleli martenzit morfolojisine sahip numuneler ise bütün yaşlandırma zamanları için en düşük sertlik değerlerine sahip olmuştur. Bu durum fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerde yaşlanma süresine bağlı olarak daha fazla dislokasyon kilitlenmesinin meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 6. 180 °C'de 20 dakika yaşlandırılan a) Ağ, b) Fiber ve c) Kütleli martenzit numunelerin çekme deneyi sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri. (Fractographs (SEM) of fractured tensile specimens of a) network, b) fibrous and c) bulky martensite aged at 180 °C for 20 min.)

Şekil 5 ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojisine sahip yaşlanma işlemi uygulanmamış çift fazlı çeliklerin kırık yüzey resimlerini göstermektedir. Şekil 6'da ise 180 °C'de 20 dakika yaşlandırılan ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelerin kırık yüzey resimleri görülmektedir. Şekil 5 ve 6'da görüldüğü gibi kırık yüzeylerin hepsi kısmen sünek (petekli yapı) ve kısmen gevrek (ayırılma düzlemleri) davranış göstermişlerdir. Fakat gevrek kırılmanın bir göstergesi olan ayırılma düzlemleri ağ martenzit morfolojisine sahip numunelerde en fazla, kütleli martenzite sahip numunelerde orta, fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerde ise en az olduğu tespit edilmiştir.

Sünek kırılmanın göstergesi olan petekli yapının oranı ise bunun tam tersi olarak gerçekleşmektedir. Örneğin fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerde yüksek oranda petekli yapıdan oluşan alanlar görülürken ağ martenzit morfolojisine sahip numunelerde düşük oranda görülmüştür. Kütleli martenzit morfolojisine sahip numuneler ise orta değerlerde petekli yapı göstermiştir. Ayrıca fiber martenzitte bulunan (Şekil 5b ve Şekil 6b) petekli yapının içerisindeki çukurcukların boyutları ağ martenzitten daha incedir (Şekil 5a ve Şekil 6a). Bu sonuçlar Tablo 1'de verilen % uzama değerleri ile uyum içerisinde. Fiber martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çelikte martenzit, ferrit matris içerisinde küçük boyutlarda ve homojen olarak dağıldığı için mikroboşlukların büyümesini engellemiştir. Bunun sonucunda fiber martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çelik yüksek uzama değerlerine sahip olmuştur.

Das ve Chattopadhyay [10] yapmış oldukları çalışmada ağ martenzit morfolojisine sahip çift fazlı yapıda mikroboşlukların özellikle ferrit-martenzit arayüzeyinde kolayca oluşup büyüdüğünü ve bunun sonucunda da kırık yüzeyde ayırılma düzlemlerinin çok fazla olduğunu görmüşlerdir. Kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelerdeki çukurcukların boyutları ağ martenzite göre küçük fakat fiber martenzite göre büyük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kütleli martenzite sahip çift fazlı çelikte kesit daralması biraz daha fazla görülmüştür. Bu durum, Besterci ve arkadaşlarının [27] önerdiği gibi dislokasyonların birleşmesi ile meydana gelen büyük açılı tane sınırlarında mikroboşlukların oluşması ve büyümesinin sonucunda meydana gelmektedir.

Yapılan deneysel çalışmada, fiber martenzit yapılı 180 °C'de 20 dakika yaşlandırılan B grubu numunelerin özelliklerinde optimum sonuçlar elde edilmiştir. Bundan dolayı, çift fazlı çeliklerde en iyi dayanım süneklik kombinasyonunu elde edebilmek için fiber martenzit yapının uygun olabileceği söylenebilir. Ayrıca bu çeşit çift fazlı çeliklerin dayanımının artırılmasında statik deformasyon

yaşlanması mukavemet artırma mekanizması olarak kullanılabilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çeliklere % 4 ön deformasyonun ardından 180 °C'de farklı sürelerde uygulanan yaşlandırma işlemi neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Farklı martenzit morfolojisine sahip çift fazlı numunelerin gerilme-uzama diyagramları, 180 °C'de yapılan yaşlanma işlemine bağlı olarak farklı davranış sergilemişlerdir. Bu durum statik deformasyon yaşlanmasının martenzit morfolojisinden bağımsız olarak oluştuğunu göstermektedir.

2. Ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojisine sahip yaşlandırma işlemi uygulanmamış numunelerin gerilme-uzama diyagramları sürekli akma davranışı göstermiştir. Bu durum martenzitik dönüşüm esnasında martenzite sınır olan ferrit içerisinde oluşan dislokasyonların serbest olarak hareket etmesiyle meydana gelmektedir.

3- 180 °C'de 10 ila 40 dakika yaşlandırılan ağ, fiber ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelerin ΔY , akma ve çekme dayanımlarında artma görülürken, % uzama değerlerinde azalma olmuştur. Fiber martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çelik 180 °C'de 20 dakika yaşlandırıldığında ΔY değeri en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durum yaşlanma sürecinde dislokasyonların arayer atomları tarafından veya karbonitrür gibi çökelti tarafından engellenmesiyle ortaya çıkmıştır. Bununla beraber fiber martenzit morfolojisine sahip çift fazlı çelik numuneler en iyi dayanım, sertlik ve şekillenebilirlik davranışı göstermişlerdir.

4- 180 °C'de yapılan yaşlanma zamanının 80 yada 160 dakikaya çıkması farklı martenzit morfolojisine sahip numunelerin akma dayanımını düşürürken % uzama değerini artırmıştır. Bu durum aşırı yaşlanmanın bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Aşırı yaşlanmanın fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerde ağ ve kütleli martenzit morfolojisine sahip numunelere göre daha yavaş olduğu tespit edilmiştir. Fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerde yüksek dislokasyon yoğunluğundan dolayı daha fazla dislokasyon kilitlemesi meydana gelerek aşırı yaşlanmanın hızını düşürmüştür.

5- Sertlik deneyi sonuçları çekme deneyi sonuçları ile paralellik göstermiştir. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda 180 °C'de 20 dakika yaşlandırılan numuneler en yüksek sertlik değerlerine sahip olmuştur. Fiber martenzit morfolojisine sahip numuneler bütün deney parametrelerinde en yüksek sertlik değerleri göstermiştir.

6. Yaşlandırma işlemi uygulanan ve uygulanmayan ağ, fiber ve kütsel martenzit morfolojisine sahip numunelerin kırık yüzeyleri petekli yapı ve ayrılma düzlemlerinden meydana gelmiştir. Bu durum bütün numunelerin kısmen sünek kismende gevrek bir davranış sergilediğini göstermektedir. Fakat fiber martenzit morfolojisine sahip numunelerde ayrılma düzlemleri en düşük oranda iken petekli yapıdan oluşan bölgelerin ise en yüksek oranda olduğu görülmüştür.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Akay K. S., **Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çift Fazlı Çeliklerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması**, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
2. Dehghani K. ve Jonas J.J., "Dynamic Bake Hardening of IF Steels", **Metallurgical and Materials Trans.**, 31A., 1375-1384, 2000.
3. Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys, **ASM Metals Handbook**, 10th Edition, Vol. 1, 1996.
4. Kadkhodapour J., Butz A. ve Ziaei Rad S., "Mechanisms of void formation during tensile testing in a commercial, dual-phase steel, **Acta Materialia**, 2575–2588 (59), 2011.
5. Rashid, M. S., "A Unique High-Strength Sheet Steel with Superior Formability", **SAE Technical Paper 760206**, Design Engineering and Styling, 938-949, 1976.
6. Coldren, A.P. ve Tither, G., "Development of a Mn-Si-Cr-Mo as-rolled Dual Phase Steel" **Journal of Metals**, vol.30, pp.6-9, 1978.
7. Erdogan. M, "The effect of austenite dispersion on phase transformation in dual phase steels", **Scripta Materialia**, 501-506 (48), 2003.
8. Davies R.G. The mechanical properties of zero-carbon ferrite-plus-martensite structures, **Metallurgical Transactions A**; 9A: 451-455, 1978.
9. Dzupon M., Parilak L., Kollarova M. ve Smaiova I., "Dual phase ferrite-martensitic steel micro alloyed with V-Nb", **Metallurgija**, 46, 15-20, 2007.
10. Mustafa Türkmen ve Süleyman Gündüz, "Martensite morphology and strain aging behaviours in intercritically treated low carbon steel ", **Ironmaking & Steelmaking**, Volume 38, Number 5, 346-352, 2011.
11. Gündüz S., "Static strain ageing behaviour of dual phase steels", **Materials Science and Engineering A**, 486/1-2: 63-71, 2008.
12. Turkoglu S., Kayalı E. S. ve Çimenoğlu H. "Çelik Saclarda Deformasyon Yaşlanma Davranışının İncelenmesi", **IV. Demir-Çelik Sempozyumu**, Karabük, 1-3 Kasım 2007.
13. De A.K., De Blauwe K., Vandeputte S. ve De Cooman B.C., "Effect of Dislocation Density on the Low Temperature Aging Behavior of an Ultra Low Carbon Bake Hardening", **Journal of Alloys and Compounds**, 310, 405-410, 2000.
14. Andrews, K.W., "Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures" **J. Iron Steel Inst.**, 203, 721-726, 1965.
15. TSE, Metalik malzemeler için çekme deneyleri, TS EN ISO 6892 Ocak/2010.
16. Das D. ve Chattopadhyay P.P., "Influence of Martensite Morphology on the Work-hardening Behaviour of Highstrength Ferrite-martensite Dual-Phase steel", **J Mater Sci.**, 44, 2957-2965, 2009.
17. Speich, G.R. ve Miller, R.L., "Mechanical Properties of Ferrite-Martensite Steels", **AIME**, New Orleans, 145-182, 19-21 Şubat 1979.
18. Gündüz S., Demir B. ve Kaçar R., "Effect of Aging Temperature and Martensite by Volume on Strain Aging Behaviour of Dual Phase Steel", **Ironmaking and Steel Making**, Vol 35, 63-68, 2008.
19. Speich GR., "Physical metallurgy of dual-phase steels", **AIME**, Warrendale, 3-45, 1981.
20. Rocha R.O., Melo T.M.F., Pereloma E.V. ve Santos D.B. "Microstructural Evolution at the Initial Stages of Continuous Annealing of Cold Rolled Dual-phase Steel". **Materials Science and Engineering A**, 391, 296-304, 2005.
21. Mohan R. ve Marshall C., "Cracking Instabilities in a Low-carbon Steel Susceptible to Dynamic Strain Aging" **Acta Mater.**, Vol.46, 1933-1948, 1998.
22. Davies R.G., "The Deformation Behavior of a Vanadium-strengthened Dual Phase Steel", **Metal. Trans. A**, 9A, 41-52, 1978.
23. Bayram A., Uğuz A. ve Ula M., "Effects of Microstructure and Notches on the Mechanical Properties of Dual-Phase Steels", **Mater. Charact.**, 43, 259-269, 1999.
24. Koo J.Y. ve Thomas G., "Formable HSLA and Dual Phase Steels", **TMS-AIME**, Chicago, Illinois, 40-58, 1977.
25. Ekrami A., "High Temperature Mechanical Properties of Dual Phase Steels", **Materials Letters**, 59, 2070-2074, 2005.
26. Abdalla A.J., Hein L.R.O., Pereira M.S. ve Hashimoto T.M., "Mechanical Behaviour of Strain Aged Dual Phase Steels", **Mater. Sci. Technol.**, Vol.15, 1167-1170, 1999.
27. Besterce, M., Sulleiovu, K. ve Kvackaj, T., "Fracture Micromechanisms of Copper Nanomaterials Prepared by ECAP", **Kovove Mater.**, 46, 309-311, 2008.