






The Effect of Double Strain Aging on the Mechanical Properties of DP600 Steel

Mustafa Can Topbaşoğlu¹  Sırma Dinler¹  Özlem Kaya¹  Onur Çavuşoğlu²  Onur Altuntaş^{3,*}  Ahmet Güral¹ 

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. İmalat Müh. Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

³Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O. Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 11/09/2020

Revision: 05/10/2020

Accepted: 23/10/2020

Highlights

- Double Strain Aging

Keywords

Static Strain Aging

Dual Phase Steel

Tensile Properties

Hardness

In this study, the effect of double strain aging behavior in DP600 steels was investigated. After strain aging in DP600 steels; microstructure, hardness, fractured surface and tensile properties were investigated

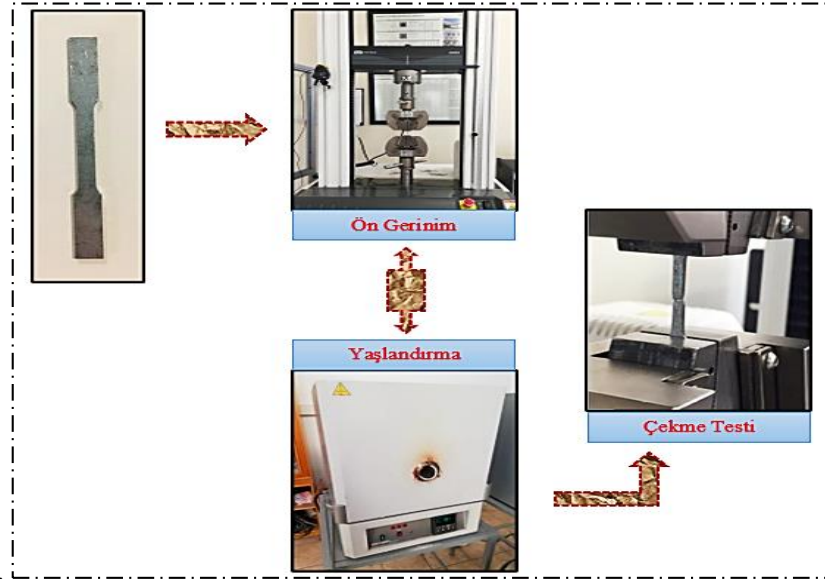


Figure A. Schematic representation of the strain aging process

Purpose: The aim of this study is to investigate the effect of double strain aging behavior on mechanical properties in commercial DP600 steels.

Theory and Methods: Specimens with single strain aging were statically aged for 30 and 60 minutes at temperatures of 140 °C and 190 °C after 2% prestrain. As a result of aging at 140 °C for 60 minutes, continuous yield behavior has been preserved, but discontinuous yield behavior has been observed at 190 °C. After aging the samples with 2% pre-strain for 30 minutes at 140 °C and 190 °C, second strain for 3% was applied and re-aging was performed at the same temperatures.

Results: While yield and tensile strength, hardness increased, uniform elongation and strain hardening exponent decreased at all temperatures. Continuous yield behavior was observed after 30 minutes at both ageing temperatures. It was determined that the yield and tensile strength and hardness of 30 minutes aged samples were higher than the 60 minutes aged sample, but the elongation (%) and strain hardening exponent values decreased.

Conclusion: Studies have shown that the results of double strain aging behavior at DP600 steels are compatible the mechanical tests.



DP600 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Çift Gerinim Yaşlanma İşleminin Etkisi

Mustafa Can Topbaşıođlu¹  Sırma Dinler¹  Özlem Kaya¹  Onur Çavuşıođlu²  Onur Altuntaş^{3,*}  Ahmet Güral¹ 

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. İmalat Müh. Bölümü,, Yenimahalle/ANKARA

³Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O. Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Bu çalışmada tek ve çift statik gerinim yaşlandırma işlemi uygulanan ticari DP600 çeliklerin çekme davranışı incelenmiştir. Tek statik gerinim yaşlandırması uygulanan numuneler %2 ön gerinimin ardından 140 °C ve 190 °C sıcaklıklarda 30 ve 60 dakika sürede statik yaşlandırılmışlardır. 140 °C'de 60 dakika yaşlandırma sonucunda sürekli akma davranışı korunurken 190 °C'de süreksiz akma davranışı görülmeye başlanmıştır. Bütün sıcaklıklarda akma ve çekme dayanımı, sertlik artarken, homojen uzama ve pekleşme üssü azalmıştır. Her iki sıcaklıktaki 30 dakikalık yaşlandırma sonrasında sürekli akma davranışı gözlemlenmiştir. 30 dakikalık yaşlandırma sonrası akma ve çekme dayanımı ile sertliğin 60 dakikalık numuneye göre yüksek olduğu ancak % uzama ve pekleşme üssü değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Daha sonra %2 ön gerinim uygulanan numunelerin 140 °C ve 190 °C sıcaklıklarda 30 dakika yaşlandırma işleminin ardından %3 ikinci gerinim uygulanmış ve aynı sıcaklıklarda tekrar yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Benzer şekilde birinci ön gerinim yaşlandırma işlemlerinde olduğu gibi akma gerilmesinin, çekme gerilmesinin ve sertliğin daha da arttığı, homojen uzama ve pekleşme üssü değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

The Effect of Double Strain Aging on the Mechanical Properties of DP600 Steel

Abstract

In this study, the tensile behavior of commercial DP600 steels with single and double static strain aging was investigated. Samples with single strain aging were statically aged for 30 and 60 minutes at temperatures of 140 °C and 190 °C after 2% prestrain. As a result of aging at 140 °C for 60 minutes, continuous yield behavior has been preserved, but discontinuous yield behavior has been observed at 190 °C. While yield and tensile strength, hardness increased, uniform elongation and strain hardening exponent decreased at all temperatures. Continuous yield behavior was observed after 30 minutes at both ageing temperatures. It was determined that the yield and tensile strength and hardness of 30 minutes aged samples were higher than the 60 minutes aged sample, but the elongation (%) and strain hardening exponent values decreased. After aging the samples with 2% pre-strain for 30 minutes at 140 °C and 190 °C, second strain for 3% was applied and re-aging was performed at the same temperatures. Similarly, it was determined that the yield stress, tensile stress and hardness increased, but uniform elongation and strain hardening exponent values decreased as in the first pre-strain aging processes.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/09/2020
Düzeltilme: 05/10/2020
Kabul: 23/10/2020

Anahtar Kelimeler

Statik Gerinim Yaşlanması
Çift Fazlı Çelik
Çekme Özellikleri
Sertlik

Keywords

Static Strain Aging
Dual Phase Steel
Tensile Properties
Hardness

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde otomotiv endüstrisinin en büyük sorunu yüksek yakıt tüketimi ve dolayısıyla CO₂ emisyonudur. Bunun için araçların ağırlığı azaltılmak istenmektedir [1]. Çift fazlı çelikler uzun yıllardır bu durumu karşılamaktadır. DP çelikleri yumuşak ferrit matris içinde % 20-30 oranında dağılmış sert martensit partiküllerinden oluşan bir tür gelişmiş düşük alaşımlı yüksek dayanımlı çeliktir. Bu mikroyapı, Ac1 ile Ac3 sıcaklıkları arasından su verilerek üretilmektedir. DP çeliklerinin temel özellikleri yüksek çekme, düşük akma gerilmesi, yüksek şekillendirilebilirlik ve sürekli akma davranışı göstermesi şeklinde

sıralanabilir [2-4]. Bahsedilen tüm bu özellikler, sahip oldukları martenzit parçacık hacim oranı ve morfolojisi ile doğrudan etkilenmektedir. Alaneme [5], ısı işlem parametrelerinin mikroyapı düzeni üzerine önemli etkileri olduğunu belirtmiştir. Dolayısı ile çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri için ısı işlem parametreleri çok önemlidir. Çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri başta; martenzitin hacim oranı ve morfolojisi [6], yeni ferrit içeriği [4], ferrit tane boyutundan önemli ölçüde etkilenmektedir [7].

Palkowski [8], çift fazlı çeliklerinin fırında sertleşme davranışı gösterdiğini bildirmektedir. Ön gerinim sonrası tavlama yapılarak çift fazlı çeliğin akma gerilmesinin artırıldığı görülmektedir. Bu durum, alaşımın yaşlanması ile açıklanabilir. Waterschoot [9], çift fazlı çeliklerde deformasyon yaşlanması sırasında mukavemetlenmeyi Cottrell atmosferinin oluşum aşaması, martenzit fazının katkısından kaynaklı çökeltme ve mukavemetlenme olarak 3 aşamalı süreç olarak açıklamıştır. Gündüz vd. [10] yaptıkları çalışmada, çift fazlı çeliklerin farklı sıcaklıklarda yaşlandırılmaları sonrası mekanik özelliklerini incelemiştir. Akma ve çekme değerlerinin 200 °C yaşlanma sıcaklığına kadar arttığını, bu değerlerin 250 °C'de yaşlanma sıcaklığının ile azaldığını belirtilmiştir. Gündüz'ün [11] başka bir çalışmada, yaşlanma sıcaklıklarının 150 °C, 200 °C ve 250 °C'ye artırılması sonrası akma dayanımında azalma, düzgün uzamada artışa neden olduğu belirtilmiştir.

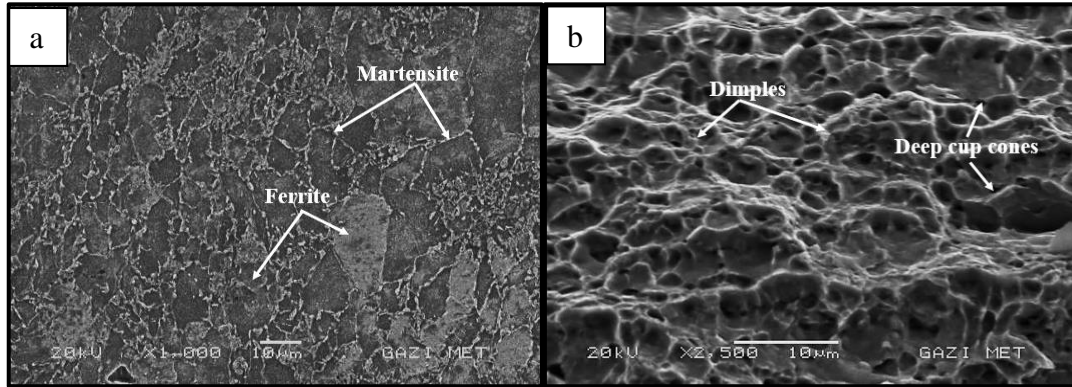
Bu çalışmada ise, ticari adı DP600 olarak bilinen çift fazlı çeliklerin önceki yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak çift statik gerinim yaşlandırmasının etkisi araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada kullanılan ticari DP600 çift fazlı çeliğinin kimyasal bileşimi ile orijinal mikroyapı ve kırık yüzey görüntüsü Tablo 1 ve Şekil 1 (a-b)'de sırasıyla verilmiştir.

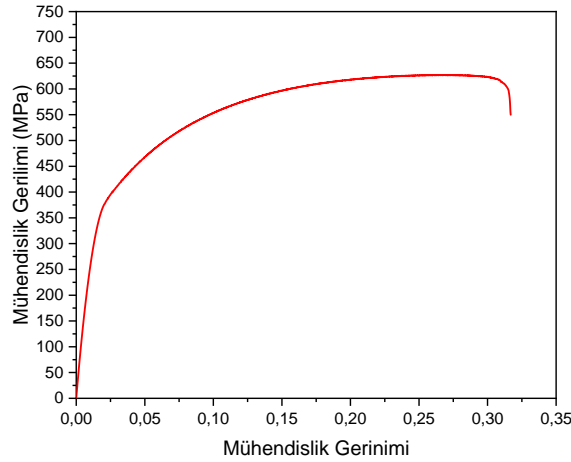
Tablo 1. DP600 çeliğinin kimyasal bileşimi (ağ. %)

Çelik Sınıfı	C	Mn	Al	Cr	Si	P	S	Cu
DP600	0,07	1,58	0,03	0,48	0,1	<0,02	<0,01	<0,001



Şekil 1. DP600 çift fazlı çeliğin; (a) orijinal, (b) kırık yüzey SEM mikroyapısı

DP600 çeliğinin gerilme-gerinim eğrisi Şekil 2'de verilmiştir. Test numunelerinin hazırlanması sırasında sac malzemede oluşabilecek termal etkileri en aza indirmek için numunenin kesme işlemi su jeti ile yapılmıştır. Ayrıca test numunelerinin yan yüzeyleri metalografik olarak parlatılarak gerilme sırasında oluşabilecek çentik etkisi giderilmiştir.

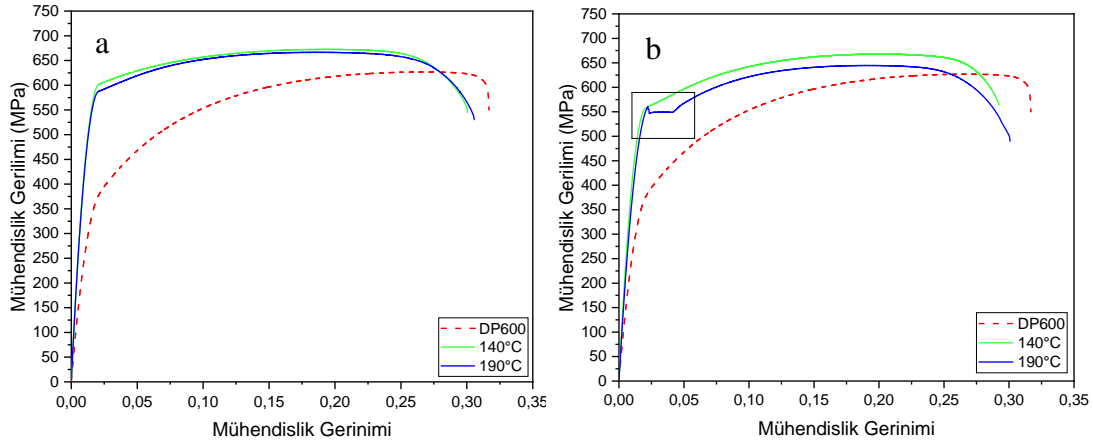


Şekil 2. Ticari olarak kullanılan DP600 çeliğinin gerilim-gerinim eğrisi

Mekanik özelliklerin tespiti için yapılan tek eksenli çekme testlerinde ASTM E8 standardına uygun 1.3 mm kalınlıktaki çekme test numuneleri kullanılmıştır. Standartlara uygun olarak üretilen numunelere Şekil 2’de verilen gerilim-gerinim eğrisi baz alınarak oda sıcaklığında 50 kN Instron 3369 çekme test cihazında %2 ilk ön gerinim uygulanmıştır. Daha sonra ısıl işlem fırınında (SFL sc 1206 marka yatay yüksek sıcaklık fırını) kullanılarak 30-60 dk süreyle 140 °C ve 190 °C’de statik gerinim yaşlandırılmıştır, ardından numunelere çekme test cihazında ikinci %3 ön gerinim uygulanmıştır. Tüm ön gerinim uygulamaları 2 mm.dk⁻¹ çekme hızında gerçekleştirilmiştir. İkinci gerinim sonrası statik yaşlandırma işlemleri 140 °C ve 190 °C sıcaklıklarda sadece 30 dk olarak yapılmıştır. Bu uygulamalar sonucunda akma dayanımı, çekme dayanımı, sürekli uzama ve pekleşme üssü değerleri belirlenmiştir. Metalografi işlem basamakları uygulanarak numuneler sırasıyla 120-1200’lik zımparalarda zımparalanarak pürüzsüz bir yüzeye sahip olması sağlanmıştır. Zımparalama işlemi bittikten sonra sırasıyla 3-1 µm’lik solüsyonlar kullanarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıların açığa çıkarılması amacıyla dağlayıcı olarak %3’lük Nital çözeltisi (3ml HNO₃-100ml ethanol) kullanılmıştır. Mikroyapı ve kırık yüzeylerin incelenmesinde JEOL JSM-6060LV marka SEM mikroskobu kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerde Emcotest Duravision 2000 sertlik cihazında Vickers yöntemi (HV30) sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin sertliğinin belirlenmesinde yüzey ve merkez bölgelerindeki 3 farklı noktadan sertlik değerleri alınarak aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 3(a-b)’de %2 ön gerinim uygulanmış çift fazlı çeliğin sırasıyla 140° C ve 190 °C’de 30 ve 60 dk yaşlandırma sonrası gerilim-gerinim diyagramlarını görülmektedir. Her iki zaman koşulunda da akma ve çekme gerilmesinde bir artış ve homojen uzamada bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, ön gerinim ile oluşan dislokasyonların etrafındaki arayer atomlarının dislokasyon hareketlerinin engellemesi ile ilişkilidir. Aynı zamanda sıcaklık ve yaşlandırma zamanının artışı ile gerilme değerlerinin nispeten azaldığı görülmüştür. Gündüz’ün [10,11] çalışmasında da benzer sonuç gözlenmiştir. Çift fazlı çelikteki martenzitin sıcaklığın artmasıyla temperlendiği düşünülmektedir. Yaşlanma süresinin ve/veya sıcaklığının artması, mukavemet artışının azalmasına sebep olmuştur. Wilson ve Russell [12], deformasyon yaşanmasının dört aşaması olduğunu bildirmektedirler. Bunlar; (1) Dislokasyonların etrafındaki C ve N atomlarının Cottrell atmosfer oluşumunun bir sonucu olarak mukavemeti artırır. (2) mukavemet artışı karbür ve nitür çökeltilerin oluşumu ile devam eder ve oluşan çökeltiler dislokasyonların hareketini bloke eder, (3) yeni hareketli dislokasyonların oluşumu ile deformasyon sertleşmesi oluşumuyla mukavemetleşmede artış gözlenir, (4) dislokasyon hareketini bloke eden çökeltiler çözüldükçe mukavemet azalır.

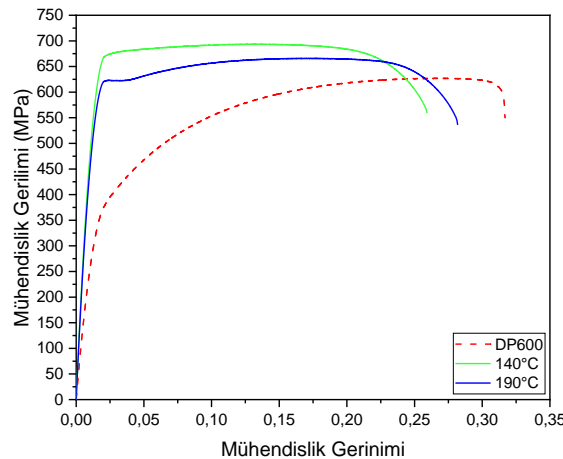


Şekil 3. DP600 çeliğin 140-190°C'de ;(a) 30dk, (b) 60dk süre statik gerinim yaşlandırılma sonrası gerilme-uzama diyagramları

Şekil 3 (a)'da hem 140 °C hem de 190 °C'de 30 dk sürede gerinim yaşlandırılmış numunelerde akma ve çekme değerleri orijinal işlem görmemiş numunenin değerlerine göre artarken sürekli akma davranışlarının hemen hemen korunduğu söylenebilir. Şekil 3 (b)'de aynı sıcaklıklarda 60 dk süre ile gerinim yaşlandırıldığında, 140 °C'de sürekli akma davranışı yine korunurken 190 °C sıcaklıkta tipik düşük karbonlu çeliğin çekme davranışı olan üst ve alt akma davranışı olan süreksiz akma özelliği gerçeklemiştir. Bu durumda bu özellik çift fazlı çeliklerin temel özelliğinin yitirilmesine neden olmuştur.

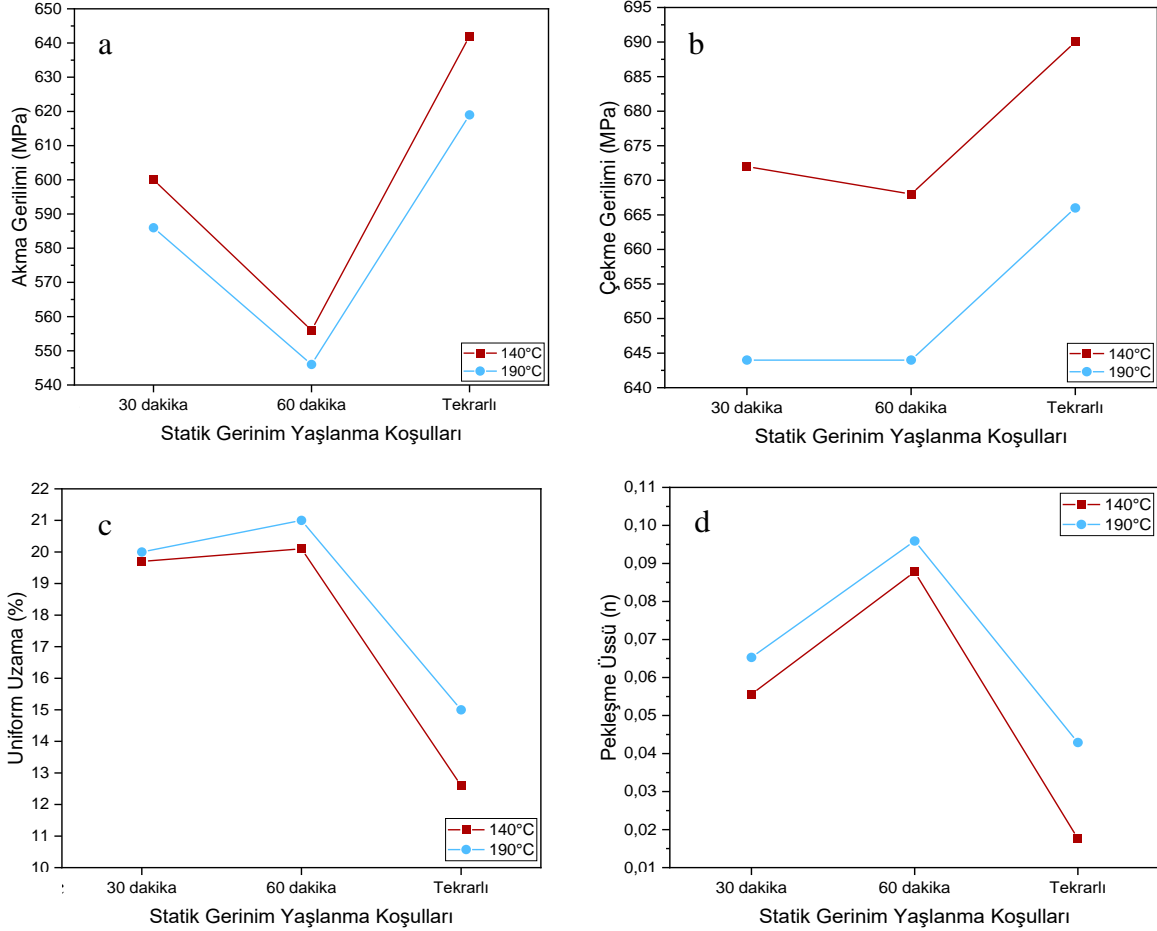
Östenitten martenzite dönüşüm sırasında hacim genişlemesinin neden olduğu ferrit-martenzit arayüzünde hareketli dislokasyonların varlığı nedeniyle çift fazlı çelikler sürekli akma davranışı sergilebilir. Bu durum elastik bölgeden plastiğe geçiş sırasında hareketli dislokasyonların martenzit çevresindeki temiz ferrit olarak bilinen epitaksiyel ferritte arayer atomlarının bulunmamasından dolayı Cottrell atmosferi etkisinin gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır [13].

Şekil 4'te, ikinci ön gerinim uygulanan DP600 çift fazlı çeliğinin gerilme-gerinim diyagramı verilmiştir. Şekil 3 (a)'da verilen tek ön gerinim uygulanmış numunelerin çekme gerilme eğrileri dikkate alındığında aynı sıcaklıklarda gerinim yaşlandırılmasında çift statik gerinim yaşlanması ile hem akma hem nihai çekme gerilme değerleri artarken, süneklik değerleri de kısmen azalmıştır. Çift statik gerinim yaşlanması ile 140 °C'de yüksek akma değerleri ile birlikte halen sürekli akma davranışı görülmüştür. Ancak 190 °C'de ise kısmen süreksiz akma davranışı görülmeye başlamıştır. Akma gerilmesindeki artışın temel nedeni olarak mobil olmayan (temiz ferritte bulunmayan) dislokasyon yoğunluğu, muhtemelen ikincil ön-gerinim ile artacaktır. Sonuç olarak, dislokasyonları hareket ettirmek için gereken itici güç ve aktivasyon enerjisi de artacaktır. Düzgün uzamanın azalması, hareketsiz dislokasyonların bir sonucu olarak düşünülmektedir.



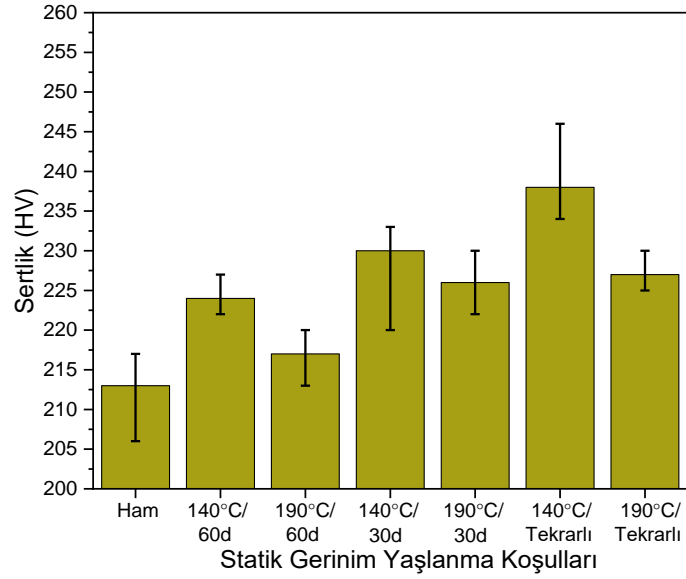
Şekil 4. DP600 çift fazlı çeliğinin 140° C ve 190 ° C' sıcaklıklarda 30 dk çift statik gerinim yaşlandırılma sonrası gerilme-gerinim diyagramları

Çift statik gerinim yaşlanmasında gerçekleşen akma gerilmesi, orijinal numunenin çekme geriliminden daha yüksektir. İkinci ön gerinme aşamasında, plastik deformasyonla oluşan dislokasyonların önceki statik gerinim yaşlanmasında arayer atomlarında kilitlemiş ve hareketi engellenmiş dislokasyonlar tarafından engellendiği düşünülmektedir. Bu aşamada akma dayanımının orijinal numunenin akma ve çekme gerilmesinden daha fazla oluşmasına neden olmuş olabilir.



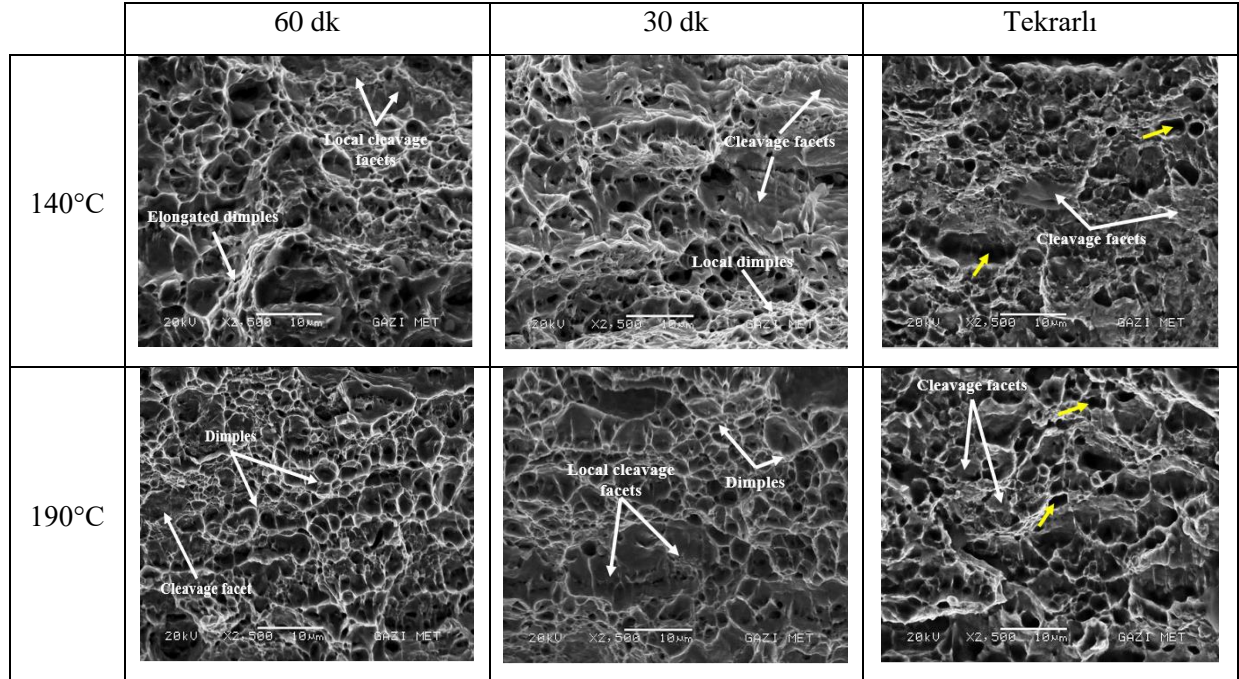
Şekil 5. Tek ve çift Statik gerinim yaşlanma koşuluna bağlı olarak (a) akma gerilmesi, (b) nihai çekme gerilmesi, (c) düzgün uzama, (d) pekleşme üssü grafikleri

Şekil 5'te farklı yaşlanma koşulları ile mekanik özelliklerdeki değişikliğin grafiksel durumları gösterilmektedir. Yaşlandırma süresinin 30 dakikadan 60 dakikaya yükselmesiyle akma dayanımında azalma, homojen uzama ve pekleşme üssü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Artan sürenin çekme mukavemetine önemli bir etkisi görülmemiştir. Artan sıcaklıkla birlikte akma dayanımı ve çekme dayanımı azalarak homojen uzama ve pekleşme üssü değerleri artmıştır. Tekrarlanan yaşlandırma ile klasik yaşlanmaya göre daha yüksek akma dayanımı ve çekme dayanımı, daha düşük homojen uzama ve pekleşme üssü elde edilmiştir. Statik gerinim yaşlanması ile çelikler kırılğan hale gelmekte ve numunenin homojen uzaması azalmaktadır.



Şekil 6. Farklı yaşlanma koşullarında DP600'ün sertlik değişim grafiği

Şekil 6'da farklı statik gerinim yaşlanma koşulları ile sertlikte meydana gelen değişiklikler gösterilmektedir. Statik gerinim yaşlanmasının bir sonucu olarak artan sertlik belirgin olarak gözlenmiştir. Artan zamanla/sıcaklıkla dislokasyonlarda çözünen izole arayer atomlarının [12] serbest kalması ile dislokasyon hareketini engelleyen unsur ortadan kalkmış ya da muhtemelen kısmi dinamik toparlanma süreci de başlamıştır. Sonuç olarak, sertlikte bir azalma gözlenmiştir. Tekrarlanan yaşlanmada artan sertlik, çift statik gerinim yaşlanması ile dislokasyon hareketinin bloke edilmesinin bir sonucu olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Numunelerin kırık yüzey fotoğrafları

Kırık yüzey fotoğrafları Şekil 7'de gösterilmektedir. Malzemelerin statik yaşlanma ile kırılma hale geldiği belirtilmiştir. Numunelerin kırık yüzey fotoğrafları bunu doğrulamaktadır. Yaşlanmanın artması, malzemenin klivaj yüzeylerini arttırmıştır. Tekrarlanan yaşlanmadaki bu artış kırılmanın biraz daha gevrek olarak gerçekleşmesine neden olmuştur. Tekrarlanan yaşlandırmada, sarı oklarla gösterilen boşlukların yoğunluğu önemli ölçüde artmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

- Statik gerinim yaşlanması ile akma ve çekme gerilmesi ile sertlikte artışı, homojen uzama ve pekleşme üssünde azalmaya neden olmuştur. Bu durum, dislokasyonlar etrafında Cottrell atmosferlerinin oluşması nedeniyle hareketli dislokasyonların sayısındaki azalma ile ilişkilidir.
- Yaşlanma sıcaklığının 140 °C'den 190 °C'ye yükselmesi, martenzitte başlayan temperlenme ve/veya toparlanma sürecinden dolayı tavlama ya da çekme gerilmesi ile sertlikte azalmaya neden olmuştur.
- Yaşlanma süresinin artmasıyla birlikte yaşlanmanın mukavemete etkisi azalmıştır. Artan zamanın bir sonucu olarak, mikro-çökeltilerin dislokasyonlarda çözünerek dislokasyon hareketinin başlamasına neden olabilir.
- Hareketsiz hale getirilmiş dislokasyon yoğunluğu muhtemelen tekrarlanan yaşlanma ile artacaktır. Sonuç olarak, dislokasyonları hareket ettirmek için gereken güç artmıştır. Homojen uzamadaki azalma, hareketsiz dislokasyonların artmasının bir sonucu olarak düşünülmektedir.
- Çift statik gerinim yaşlandırma sonucunda, tek statik gerinim yaşlandırmasına göre daha yüksek akma dayanımı ve çekme dayanımı, daha düşük homojen uzama ve pekleşme üssü elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 07/2018-05 ve 65/2019-05 numaralı proje kapsamında Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Galán J, Samek L, Verleysen P, Verbeken K, Houbaert Y. Advanced high strength steels for automotive industry. Rev Metal. 2012;48(2):118–31.
- [2] Davies RG, Magee CL. Physical Metallurgy of Automotive High-Strength Steels. J Met. 1979;31(11):17–23.
- [3] Ahmad E, Priestner R. Effect of Rolling in the Intercritical Region on the Tensile Properties of Dual-Phase Steel. J Mater Eng Perform. 1998;7(6):772–6.
- [4] Erdogan M, Priestner R. Effect of epitaxial ferrite on yielding and plastic flow in dual phase steel in tension and compression. Mater Sci Technol. 1999;15(11):1273–84.
- [5] Alaneme KK, Kamma CM. Phase transformation studies of a low alloy steel in the ($\alpha + \gamma$) phase region. Mater Res. 2010;13(1):113–7.
- [6] Erdogan M, Priestner R. Effect of martensite content, its dispersion, and epitaxial ferrite content on Bauschinger behaviour of dual phase steel. Mater Sci Technol. 2002;18(4):369–76.
- [7] Sun S, Pugh M. Properties of thermomechanically processed dual-phase steels containing fibrous martensite. Mater Sci Eng A. 2002;335(1–2):298–308.

- [8] Palkowski H, Anke T. Bake Hardening of Hot Rolled Multiphase Steels under Biaxial Pre-strained Conditions. 2006;77(9):675–9.
- [9] Waterschoot T, De AK, Vandeputte S, de Cooman BC. Static strain aging phenomena in cold-rolled dual-phase steels. Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci. 2003;34(13):781–91.
- [10] Gündüz S, Demir B, Kaçar R. Effect of aging temperature and martensite by volume on strain aging behaviour of dual phase steel. Ironmak Steelmak. 2008;35(1):63–8.
- [11] Gündüz S. Static strain ageing behaviour of dual phase steels. Mater Sci Eng A. 2008;486(1–2):63–71.
- [12] Wilson DV, Russell B. The contribution of precipitation to strain ageing in low carbon steels. Acta Metall. 1960;8(7):468–79.
- [13] Zhang J, Di H, Deng Y, Misra RDK. Effect of martensite morphology and volume fraction on strain hardening and fracture behavior of martensite-ferrite dual phase steel. Mater Sci Eng A. 2015;627:230–40.