

Araştırma Makalesi

DP600 Çeliğinin Farklı Süre ve Sıcaklıklarda Temperlenmesinin Mukavemet ve Delik Genişletme Oranına Etkisi

Nuri Şen^{a}, Tolgahan Civek^a, Oktay Elkoca^a, Süreyya Albayrakoğlu^a*

^aDüzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.

* Sorumlu Yazar: nurisen@duzce.edu.tr

ÖZET

Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler, araç gövdelerinin yüksek mukavemetli parçalardan üretilmesine olanak sağlayarak toplam araç ağırlığının azaltılmasına önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu çeliklerin mikroyapılarında bulunan çeşitli fazların birbirleri arasındaki yüksek mukavemet farklılıkları, şekillendirme işlemleri sırasında kenar yırtılma problemlerinin sıklıkla görülmesine yol açmaktadır. Çift fazlı (DP) çelikler, mikro yapılarında sertlik dereceleri birbirlerinden oldukça farklı olan ferrit ve martenzit fazlarından oluşan bir çelik olması sebebiyle kenar yırtılma problemlerinin sıklıkla görüldüğü bir AHSS çelik türüdür. Bu çalışmada, malzemenin mukavemetini önemli bir ölçüde korurken fazlar arasındaki mukavemet farkını azaltmak için DP600 çeliğine ılık sıcaklıklarda (75 °C, 375 °C) 300s, 900s, 1800s ve 3600s süreyle temperleme işlemi uygulanmıştır. Uygulanan temperleme işleminin DP600 çeliğinin mukavemetine ve delik genişleme oranına etkisini gözlemlemek amacıyla çekme testleri ve delik genişletme testleri yapılmıştır. DP600 çeliğinin 375 °C'de 900 saniye tavlınmasıyla delik genişleme oranının yaklaşık %55,12 oranında arttığı ve mukavemet azalmasının ise sadece %10,60 civarında olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çekme Testi, Delik genişletme testi, DP çeliği, Temperleme,

The Effect of Tempering Process at Various Temperatures ve Hold Times on the Strength ve Hole Expansion Ratio of DP600

ABSTRACT

Advanced High Strength Steels (AHSSs) provide a significant contribution for the weight reduction in vehicles by enabling to form the body-in-white parts of vehicles from high strength products. However, the high strength differences in their multiple phase microstructures, frequently causes the sheared edge tearing problems to be observed during forming operations. Dual phase (DP) steels, are one type of AHSSs that consist of ferrite and martensite phases in their microstructures, whose strengths are significantly different from one another, and thus, are one type of steels that the edge tearing problems are commonly observed. In this study, a tempering process for the DP600 steel has been implemented at warm temperatures (75 °C, 375 °C) for 300s, 900s, 1800s ve 3600s to reduce the strength difference in between the phases while preserving the strength of the material. The tensile tests and hole expansion tests have been conducted to observe the effects of the applied tempering process on the strength and hole expansion ratio of the DP600 steel. It has been shown that the hole expansion ratio of DP600 has improved by about 55.12% and the strength reduction has been only 10.60 % by tempering the steel at 375 °C for 900s.

Keywords: DP steel, Hole expansion ratio, Tempering, Tensile test

Makale Bilgileri/Article Info

Geliş/Received: 16/11/2023, Revizyon/Received in revised form: 06/12/2023, Kabul/Accepted: 15/12/2023

I. Giriş

Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler (GYMÇ), sağlamış oldukları oldukça yüksek mukavemet ve makul şekillendirilebilirlik seviyeleri sayesinde günümüzde Orijinal Ekipman Üreticileri (OEM) tarafından sıklıkla tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir (Demeri, 2013; Cora ve Koç, 2014). GYMÇ'lerin mikroyapılarında farklı faz türlerinin bir arada yer alabilmesi özelliği, bu çeliklerin çok farklı özellikler sergileyen çeliklerin üretilebilmesini sağlamaktadır. Böylelikle farklı amaçlar için farklı GYMÇ'ler üretilebilmektedir (Sen ve Civek, 2022). (DP) çeliklerin mikroyapısı ferrit ve martenzit fazlarından oluşmaktadır. Bu çeliğin yapısında bulunan ferrit fazı, çeliğe şekillendirilebilirlik özellikleri sağlarken, martenzit fazı ise çeliğin mukavemetini sağlamaktadır (Senuma, 2001; Queiroz, Cunha ve Gonzalez, 2012; Bayramin, Şimşir ve Efe, 2017). DP çeliğinde farklı oranlarda ferrit ve martenzit fazı oluşturularak, farklı mukavemet ve şekillendirilebilirlik özellikleri sergileyen DP çelikleri (DP600, DP700, DP1000, vs.) üretilebilmektedir (Keeler, Kimchi ve Mooney, 2017; Balisetty, Chakkingal ve Venugopal, 2021). DP çeliklerinin makul bir şekillendirilebilirlik ve kaza esnasında yüksek enerji sönümleme özelliklerine sahip olması sebebiyle, araç gövdelerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Mallick, 2010). Ancak, DP çeliğinin içyapısında yer alan ferrit ve martenzit fazlarının arasında oldukça yüksek bir mukavemet farklılığının olması, bu iki faz arasında yüksek gerilme yığılmalarına sebep olmakta ve bu durum kenar yırtılması olarak nitelendirilen bir probleme yol açmaktadır (Azuma ve ark., 2012). Karşılaşılan bu problem, birçok parçanın şekillendirilmesinde sorunlara yol açıp DP çeliğinin kullanım alanının kısıtlanmasına sebep olmaktadır.

Şekillendirme esnasında yırtılma problemlerinin azaltılabilmesi için farklı çelik üreticileri çeşitli GYMÇ türleri üretmişlerdir. Bu çelikler arasında karmaşık fazlı çelik (CP) ve TRIP Destekli DP çelikleri (DH) yer almaktadır. CP çeliğinin iç yapısında ferrit, beynit ve martenzit yapılarının bir arada bulunması, fazlar arasındaki sertlik farkının belirli bir oranda dengelenmesini sağlamaktadır (Karelova ve ark., 2009). Karelova ve ark. (Karelova ve ark., 2009), yapmış olduğu çalışmada CP çeliğinin delik genişletme oranının DP çeliğine göre daha yüksek olduğu saptamışlardır. DH çeliğinin içyapısında ise ferrit ve martenzit fazlarının yanı sıra içyapıda kalıntı östenit fazı da bulunmaktadır (Mirhosseini ve ark., 2022). Bu kalıntı östenit yapısı deformasyonla birlikte martenzit fazına dönüşerek çeliğin ekstra bir şekillendirilebilirlik kazanmasını sağlamaktadır. Kenar yırtılma problemine yol açan birçok etken olsa da, uygulanan sac kesim yöntemi sebebiyle sac kenarında oluşan pürüzlülük ve hasar, bu probleme doğrudan etki eden parametreler arasında yer almaktadır. Örneğin Balisetty ve ark. (Balisetty, Chakkingal ve Venugopal, 2021), dört farklı delik hazırlama yönteminin (Elektroerozyon, delme, delme + raybalama ve zımbalama) delik genişletme oranına etkisini incelemiş ve elektroerozyon yöntemi ile en yüksek delik genişletme oranının elde edildiği sonucuna varmışlardır. Benzer şekilde Xu ve ark. (Xu ve ark., 2012), farklı kesim yöntemlerinin (zımbalama, elektroerozyon, lazer kesim) DP980 çeliğinin delik genişletme oranına etkisini araştırmış ve elektroerozyon yöntemi ile yapılan delik genişletme testinin diğer kesim yöntemlerine göre en yüksek oranı sağladığı görülmüştür. Hance ve ark. (Hance, Comstock ve Scherrer, 2013), lazer kesim, su jeti ve zımbalama yöntemlerinin DP980 çeliğinin delik genişletme oranı üzerindeki etkisini incelemiş ve en yüksek oranın lazer kesim yöntemi ile elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Şen ve ark. (Şen, Helimergin ve Taşdemir, 2021), DP600 ve DP800 sacların kesimi işleminde hassas kesme yöntemini uygulamışlar ve elde ettikleri kesim yüzeylerini incelemişlerdir. Yazarlar çalışmada, hassas kesme yöntemi ile yapılan kesme işleminde kesim yüzey kalınlığının %90 oranında kesildiğini ve herhangi bir hasar yüzeyi görülmediğini belirtmişlerdir. Genel olarak uygulanan kesim yönteminin sac kenarı üzerinde pürüzsüz bir yüzey oluşturması ve daha az hasar oluşturması delik genişletme testinde önemli pozitif bir etki yaratmaktadır.

DP çeliğinin mikroyapısındaki ferrit ve martenzit faz oranlarının değişimi de çeliğin kenar yırtılma davranışına önemli bir etkisi olmaktadır. Balisetty ve ark. (Balisetty, Chakkingal ve Venugopal, 2021), yapmış oldukları çalışmada DP çeliğinde bulunan martenzit oranının %22 civarından %45 civarına arttırılmasının delik genişletme oranını düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Ayrıca Terrazas ve ark. (Terrazas, Findley ve Van Tyne, 2017), yapmış oldukları çalışmada DP çelik yapısındaki martenzit

morfolojisinin delik genişletme oranına etkisi olduğu anlaşılmış, homojen bir dağılım gösteren martenzit yapısına sahip DP çeliklerin daha yüksek delik genişletme oranına sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Literatürde incelenen birçok çalışma DP çeliklerin mikroyapısında bulunan ferrit ve martenzit fazları arasındaki yüksek sertlik farkının bu çeliğin delik genişletme testinde gözlemlenen hasarın ana etkenlerinden birisi olduğu belirtilmektedir (Azuma ve ark., 2012; Hu ve ark., 2013; Gao ve ark., 2019; Chen ve ark., 2020). DP çeliklerde sıklıkla görülen kenar yırtılma problemi, yüksek bir enerji sönümleme özelliğine sahip olan bu çeliğin karmaşık geometrilerde kullanımını sınırlamaktadır. Bu sebeple DP çeliğinin mukavemetinden önemli bir ölçüde ödün vermeden, kenar yırtılma kapasitesinin geliştirilmesi bu çeliğin daha karmaşık geometriler için kullanım alanlarının önemli ölçüde genişletilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada DP600 çelik yapısında bulunan iki farklı faz arasındaki sertlik farkının düşürülmesi ve böylelikle daha yüksek bir delik genişletme oranının elde edilmesi amacıyla 75 °C ve 375 °C sıcaklıklarda 300s, 600s ve 900s süreyle tavlama işlemi uygulanmıştır. Temperleme işleminin ardından çekme testleri ve delik genişletme testleri yapılarak, uygulanan temperleme işleminin DP600 çeliğin mukavemeti ve delik genişletme oranına olan etkileri incelenmiştir.

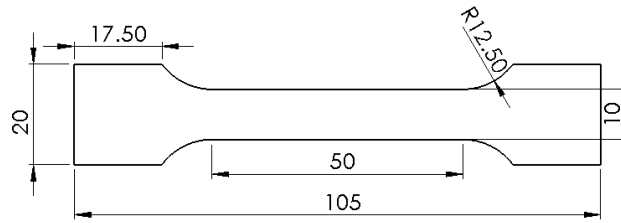
II. MATERYAL METOT

A. Malzeme

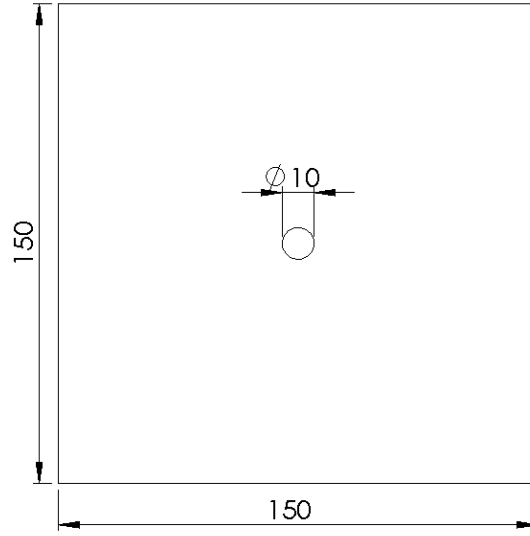
Bu çalışmada 1 mm kalınlığındaki, SSAB çelik firmasından temin edilmiş, DP çelik malzemeler kullanılmıştır. Çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 1. 'de verilmiştir. Sac malzemeden ISO 6892-1 standartlarında çekme testi numunesi ve ISO 16630 standartlarında delik genişletme test numunesi zımba ile kesilmiştir. Çekme testi numuneleri hadde yöneliminde kesilmiştir. Çekme testi ve delik genişletme test numunelerinin ölçüleri Şekil 1. ve Şekil 2.'de verilmiştir.

Tablo 1. DP600 çeliğinin kimyasal bileşimi

Malzeme	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	V
DP600	98,2	0,108	0,195	0,878	0,0129	0,0024	0,0454	0,0008	0,0160	0,0167



Şekil 1. Çekme test numunesinin teknik ölçüleri (ölçüler mm cinsindedir)



Şekil 2. Delik genişletme testi numune ölçüleri

B. Numunelerin Temperlenmesi ve Test Edilmesi

Şekil 1. ve Şekil 2.'de gösterilen numunelerin kesilmesinin ardından numuneler atmosfer kontrollü ısıtma fırınında 75 °C ve 375 °C sıcaklıklarda 300s, 900s, 1800s ve 3600s süreyle tavlansmıştır. Fırından çıkartılan numuneler havada soğutulmuştur. Temperlenen çekme test numuneleri Zwick/Roell çekme cihazı kullanılarak ISO 6892-1 standartlarına uygun olarak test edilmiştir. Elde edilen verilerden temperlenen DP600 numunelerinin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve toplam uzama değerleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Temperlenen delik genişletme test numuneleri, ISO 16630 standartlarına uygun olarak, Şekil 3.'de gösterilen Zwick/Roell BUP600 cihazında 60° açılı bir konik zımba kullanılarak genişletilmiştir. Delik genişletme işlemi sırasında BUP600 cihazının üst kısmında yer alan kameralar aracılığı ile anlık görüntüler alınmış ve delik etrafında ilk boyuna çatlak görüldüğünde test durdurulmuştur. Delik genişletme oranı Eş.1'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\frac{D_s - D_i}{D_i} \times 100 \quad (1)$$

Burada, D_s ve D_i delik genişletme test numunesinde bulunan sırasıyla son ve ilk çap boyutunu temsil etmektedir.



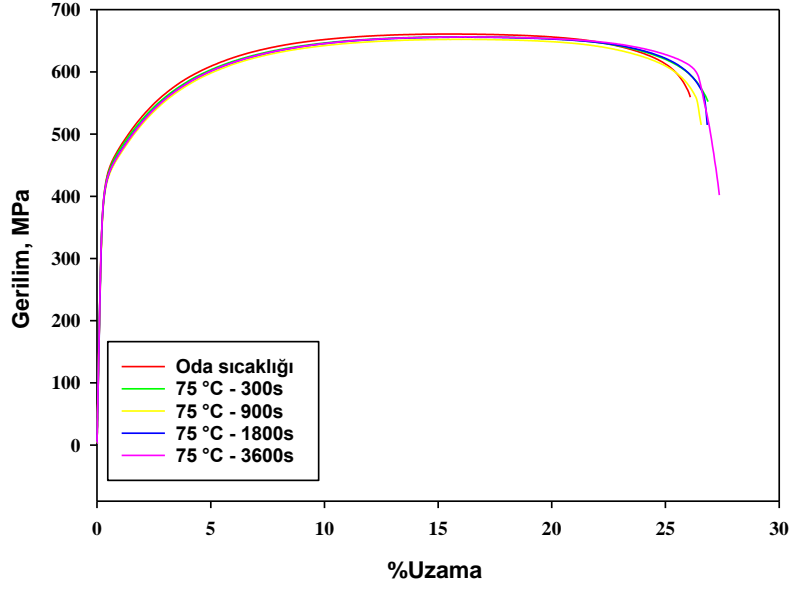
Şekil 3. Zwick/Roell BUP600 delik genişletme test cihazı

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

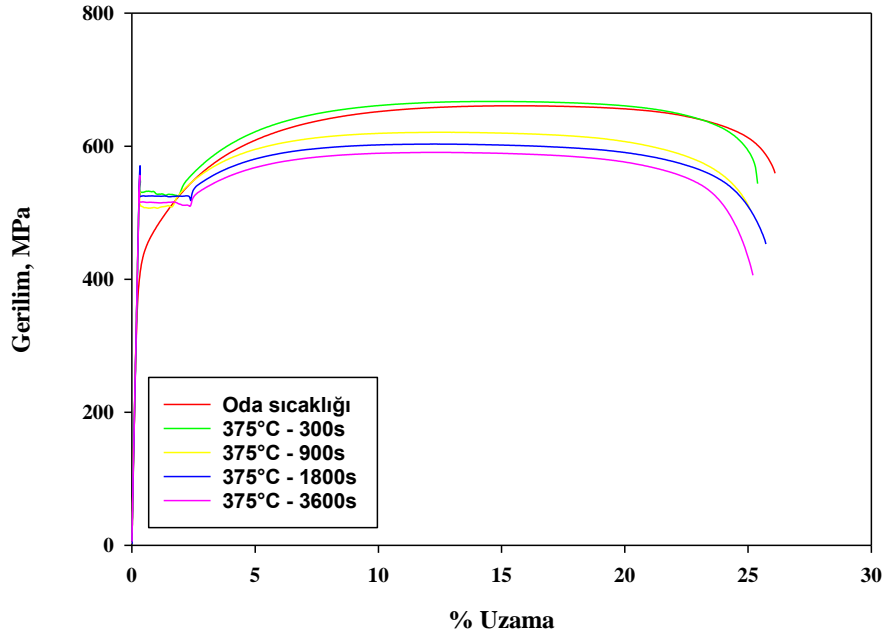
A. *Temperleme Uygulamasının Mekanik Özelliklere Olan Etkisi*

DP çeliklerin üretiminde genellikle çelik ara kritik sıcaklık bölgeye ısıtılır (Ac1 – Ac3), bu bölgede belirli bir süre bekletilerek ferritik-östenitik yapının elde edilmesi sağlanır ve sonrasında hızlı bir şekilde çeliğin soğutulması ile yapıdaki östenitin martenzite dönüştürülmesi sağlanır (Li ve ark., 2015; Tisza, 2021; Selova ve ark., 2023). Böylelikle ferrit ve martenzit yapısından oluşan çift fazlı bir çelik elde edilir. Elde edilen martenzit yapısının sertliğinin ferrit fazına göre çok fazla olması, deformasyon sırasında ferrit martenzit tane sınırlarında gerilme yığılması oluşturarak, bu bölgelerde boşluk oluşumlarına neden olmaktadır. Temperleme işlemi, malzemelerde genellikle su verilme işleminden sonra oluşan aşırı sertliğin veya gevrekliğin giderilmesi amacıyla, yeniden kristalleşme sıcaklıklarının altında uygulanan bir ısıtma işlemidir. Şekil 4. ve 5.'de DP600 çeliğine sırasıyla 75 °C ve 375°C'de farklı sürelerde uygulanan temperleme işleminin çekme testi sonuçlarına etkisi gösterilmiştir. Şekil 4'de görüldüğü üzere 75 °C 'de 3600s süreye kadar uygulanan temperleme işleminin çeliğin mekanik özelliklerine önemli bir etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Buna karşın, Şekil 5'de gösterildiği gibi 375°C'de uygulanan temperleme işleminde, temperleme süresinin ciddi bir etkisi olduğu görülmektedir. 375°C'de temperleme süresinin artması ile birlikte çeliğin çekme mukavemetinin gözle görülür bir seviyede düştüğü anlaşılmaktadır. Bununla birlikte çeliğin 375°C'de temperlenmesiyle birlikte malzemenin elastik deformasyondan plastik deformasyona geçişinde farklılık olduğu görülmektedir. DP çeliği oda sıcaklığında ve 75 °C'de tüm temperleme süreleri sonunda sürekli bir akış gösterirken, çeliğin 375 °C'de temperlenmesiyle birlikte çeliğin süresiz akma davranışı göstermeye başladığı görülmüştür. Bilindiği üzere östenit fazı yüzey merkezli kübik yapıya sahip iken, martenzit yapısı hacim merkezli tetragonal yapıya sahiptir (Guerrero ve ark., 2021). Çift fazlı çeliğin üretimi sırasında östenitik fazın (yüzey merkezli kübik yapının), martenzit yapıya (hacim merkezli tetragonal yapıya) dönüşmesi ile birlikte bir miktar hacim genişlemesi meydana gelmektedir (Moyer ve Ansell, 1975). Bu durum ferrit ve martenzit taneleri arasında "geometrik olarak gerekli" olarak adlandırılan dislokasyonların oluşmasına sebep olur (Kundu ve Field, 2016). DP çeliğin baz hali deformasyon öncesinde bir çok dislokasyon barındırdığı için sürekli bir akma davranışı gösterir (Li ve ark., 2015; Basoeki, 2018). Fakat uygulanan temperleme işlemi ile birlikte bu dislokasyonların dağılması, süresiz akma davranışının görülmesine neden olacaktır. Kamp ve ark. (Kamp, Celotto ve Hanlon, 2012), DP çeliğine uygulamış oldukları temperleme işleminde çeliğin süresiz bir akma davranışı göstermeye başladığını not etmişlerdir. Şekil 4'de gösterilen çekme testi eğrilerinde çeliğin tüm durumlarda sürekli akma gösterdiği görülmektedir. Bu durumda uygulanan 75 °C sıcaklığın DP çelik yapısındaki dislokasyonların dağılması için yeterli bir sıcaklık olmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 5'de gösterildiği üzere, 375 °C sıcaklığın ise DP çelik yapısındaki dislokasyonların dağılması için yeterli olduğu ve bu sebeple çeliğin süresiz bir akma gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 6. ve Şekil 7.'de sırasıyla 75 °C ve 375 °C uygulanan temperleme işlemi neticesinde çekme testleri sonucunda elde edilen % uzama değerleri gösterilmiştir. Her iki sıcaklık seviyesi içinde uygulanan temperleme işlemi ile birlikte % uzama değerlerinde ciddi bir değişim görülmemiştir. 75 °C'de temperleme neticesinde DP600 çeliğin % uzama değerlerindeki değişim 300s, 900s, 1800s ve 3600s için sırasıyla %3,90, %2,73, %3,90 ve %2,73 olarak elde edilmiştir. 375 °C'de temperleme neticesinde bu değerler sırasıyla %1,95, %-0,39, %0,39 ve %2,34 olarak elde edilmiştir. Şekil 8. Ve Şekil 9.'da temperleme işlemi neticesinde DP600 çeliğin çekme mukavemeti üzerindeki etkisi gösterilmiştir. 75 °C'de temperleme neticesinde DP600 çeliğin çekme mukavemetinde önemli bir değişim gözlemlenmezken, 375 °C'de temperleme işleminde süreye bağlı olarak çekme mukavemetinde önemli bir değişim meydana geldiği görülmüştür. 375 °C'de çeliğin 300s temperlenmesi, çeliğin mukavemetinde bir düşüşe sebep olmazken, temperleme süresinin artması ile birlikte, 3600s'ye kadar çekme mukavemetinin lineer bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. 375 °C'de uygulanan temperleme işlemi neticesinde, yapıda bulunan martenzit fazının temperlenmesi, bu düşüşün temel sebeplerinden birisi olabilir. Şen ve ark. (Sen ve Civek, 2022), DP600 ve DP800 çelikleriyle ilgili uygulamış oldukları ılık sıcaklık çekme testlerinde de mukavemet değerlerinin 375 °C sıcaklıktan itibaren düşmeye başladığını gözlemlemişlerdir. 75 °C'de maksimum çekme mukavemetindeki düşüş

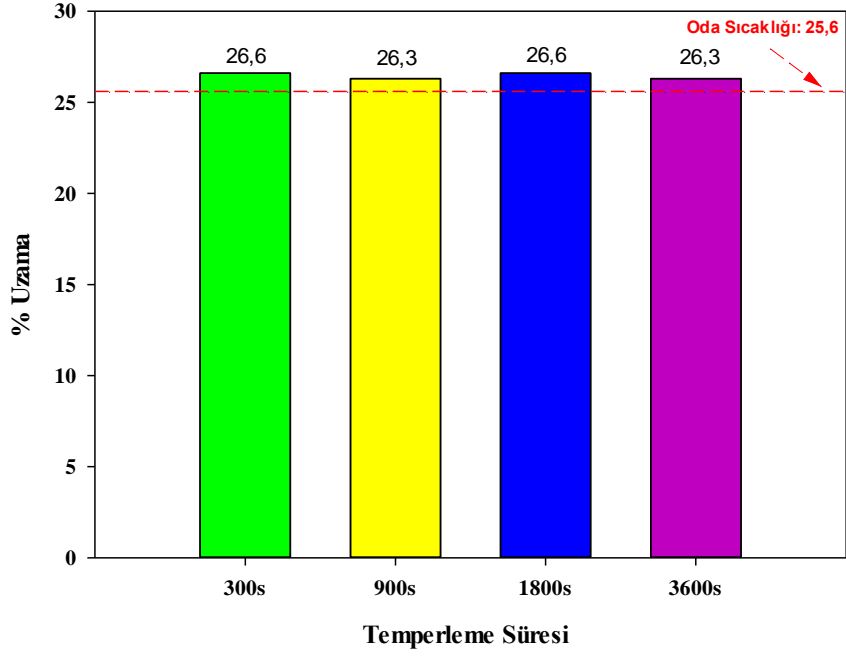
%1,36 olarak kaydedilirken, 375 °C'de çekme mukavemetindeki maksimum düşüş 3600s bekleme süresinde %10,59 olarak kaydedilmiştir.



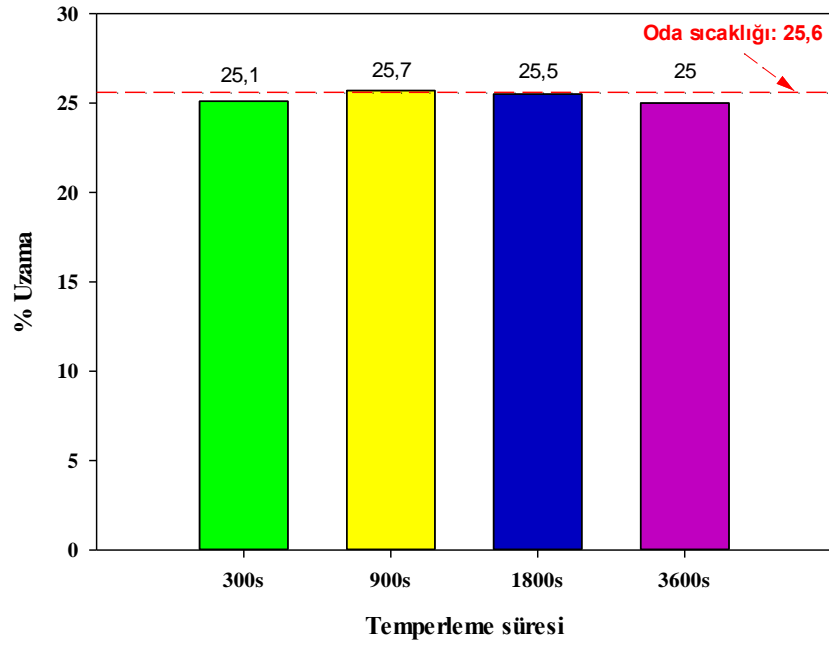
Şekil 4. 75 °C'de farklı sürelerde temperlenen DP600 çeliğinin çekme testi grafiği



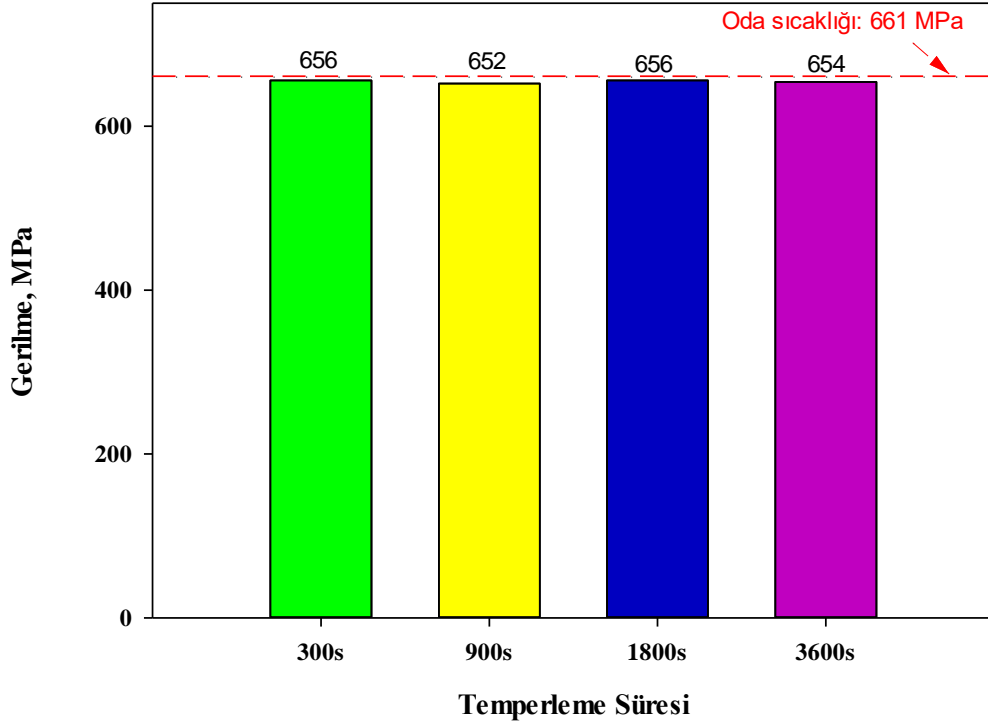
Şekil 5. 375 °C'de farklı sürelerde temperlenen DP600 çeliğinin çekme testi grafiği



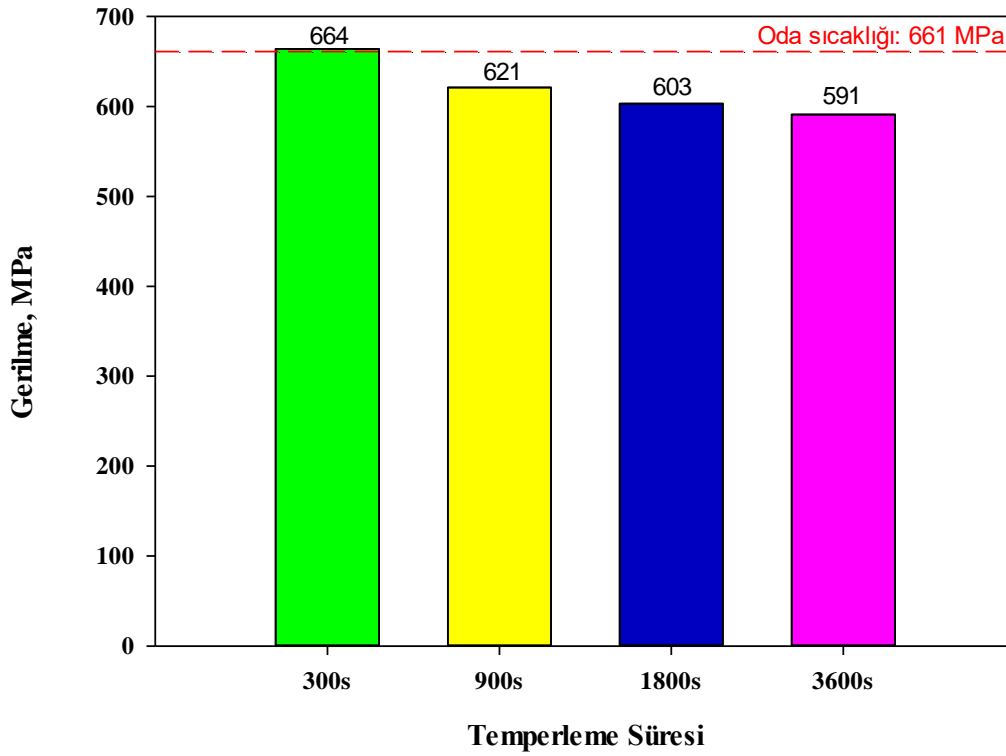
Şekil 6. 75 °C'de farklı sürelerde temperlenen DP600 çeliğinin % uzama değerlerindeki değişim



Şekil 7. 375 °C'de farklı sürelerde temperlenen DP600 çeliğinin % uzama değerlerindeki değişim



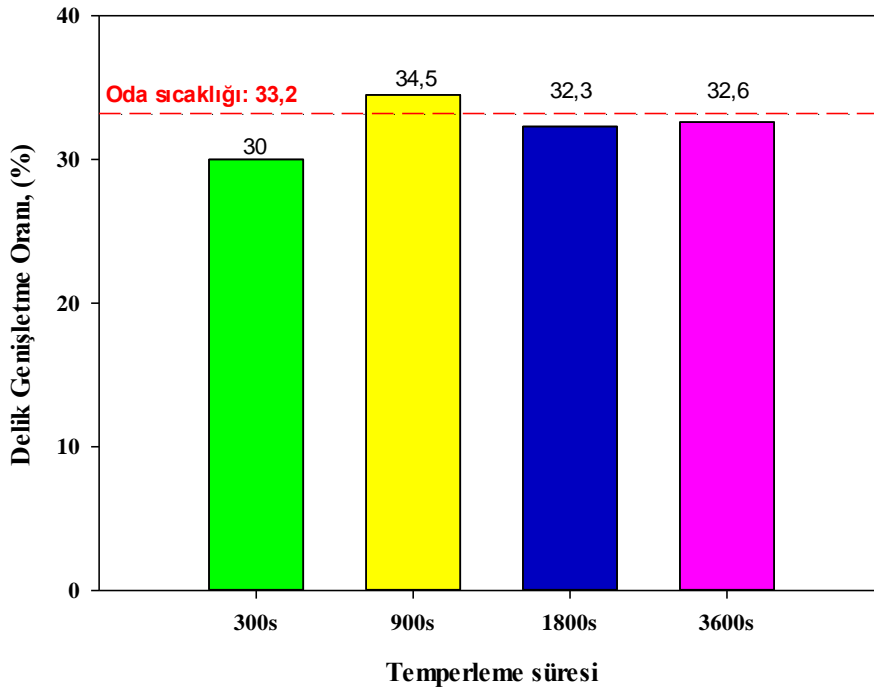
Şekil 8. 75 °C'de farklı sürelerde temperlenen DP600 çeliğinin çekme gerilmesi değerlerindeki değişim



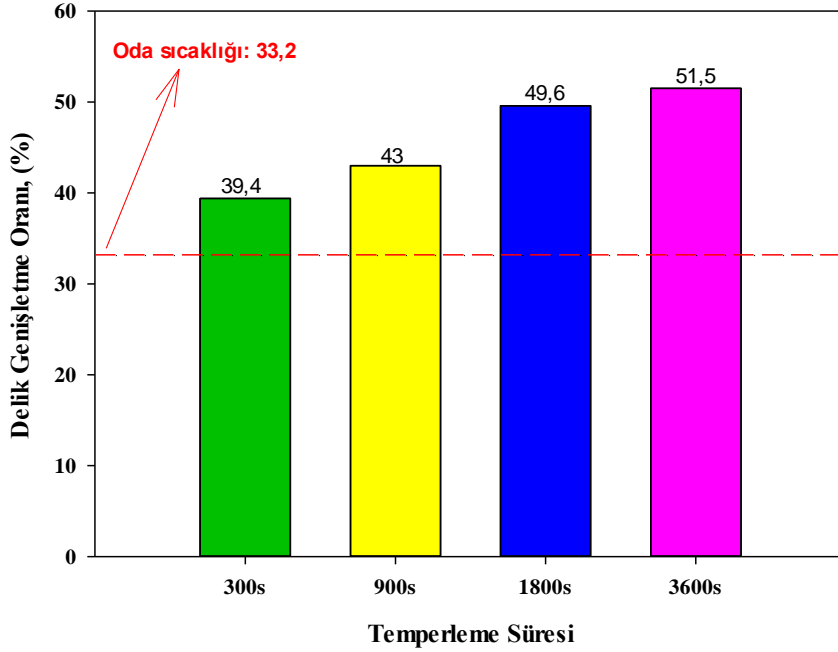
Şekil 9. 375 °C'de farklı sürelerde temperlenen DP600 çeliğinin çekme gerilmesi değerlerindeki değişim

B. Temperleme Uygulamasının Delik Genişletme Oranına Olan Etkisi

DP çeliklerin mikroyapısında bulunan ferrit ve martenzit yapıların arasındaki yüksek sertlik farkı bu çeliklerin şekillendirilmesi sırasında kenar yırtılma problemlerinin karşılaşılmasına sebep olmaktadır. İki yapı arasındaki sertliğin düşürülmesi, bir başka ifade ile daha homojen bir yapının elde edilmesi sağlanarak bu problem bir miktar azaltılabilmektedir (Terrazas, Findley ve Van Tyne, 2017). Şekil 10. ve Şekil 11.'de sırasıyla 75 °C ve 375 °C'de farklı bekleme sürelerinde uygulanan temperleme işlemi neticesinde delik genişletme testlerinde elde edilen delik genişletme oranları gösterilmiştir. Şekil 10'da görüldüğü üzere, 75 °C'de uygulanan temperleme işleminin DP600 çeliğin delik genişletme oranına önemli bir etkisi olmamıştır. Temperleme işlemi neticesinde delik genişletme oranının yaklaşık %32,3 değerinde bir değişim gösterdiği görülmüştür. 375 °C'de ise bekleme süresinin artması ile birlikte delik genişletme oranında da lineer bir artışın meydana geldiği görülmüştür. 375 °C'de çeliğin 3600s temperlenmesi sonucunda delik genişletme oranının %51,50 olarak elde edildiği görülmüş ve oda sıcaklığı değerine göre (%33,2) delik genişletme oranının %55,12 artış gösterdiği anlaşılmıştır. Elde edilen bu durumun sebebi, çeliğin temperleme işlemi neticesinde elde edilen çekme mukavemeti değerleri kıyaslandığında anlaşılabilir. Şekil 8.'de gösterildiği gibi 75 °C'de DP600 çeliğinin çekme mukavemetinde önemli bir değişim meydana gelmemekle birlikte, 375 °C'de ise bekleme süresine dayalı olarak çeliğin çekme mukavemetinde düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. 75 °C sıcaklık, çeliğin martenzit yapısında yeterli temperleme etkisini oluşturamamış olurken, 375 °C sıcaklıkta bekleme süresine dayalı olarak martenzit yapısının temperlendiği ve buna dayalı olarak da çekme mukavemetinde düşüş (maksimum %10,59) ve delik genişletme oranında artış (maksimum %55,12) meydana gelmiş olabilir.



Şekil 10. 75 °C'de farklı sürelerde temperlenen DP600 çeliğinin delik genişletme oranlarındaki değişim



Şekil 11. 375 °C'de farklı sürelerde temperlenen DP600 çeliğinin delik genişletme oranlarındaki değişim

IV. ÇIKARIM

Bu çalışmada DP600 çeliğine 75 °C ve 375 °C'de 300s, 900s, 1800s ve 3600s süre ile temperleme işlemi uygulanmıştır. Temperlenen DP600 çeliğinin mekanik özellikleri çekme testi ile incelenmiş ve temperlenen DP600 çeliğin kenar yırtılma hassasiyeti delik genişletme testi uygulanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen çıkarımlar aşağıda sıralanmıştır:

- Çekme testi sonuçlarına göre 75 °C'de temperlenen DP600 çeliğin çekme mukavemeti değerlerinde herhangi bir değişim görülmemiştir.
- Çekme testi sonuçlarına göre 375 °C'de temperlenen DP600 çeliğin çekme mukavemeti değerlerinde, temperlenme süresine dayalı olarak düşüş gözlemlenmiştir.
- Çekme mukavemetindeki maksimum düşüş (%10,56) çeliğin 375 °C'de 3600s süreyle temperlenmesi sonucu meydana gelmiştir.
- Her iki sıcaklık seviyesi için de, çeliğin % uzama değerlerinde önemli bir değişim görülmemiştir.
- 75 °C'de temperlenen DP600 çeliğinin delik genişletme oranlarında herhangi bir değişim görülmezken, 375 °C'de temperlenen DP600 çeliğin, temperlenme süresine dayalı olarak artış göstermiştir.
- Delik genişletme oranında maksimum artış (%55,12) DP600 çeliğinin 375 °C'de 3600s boyunca temperlenmesi neticesinde gerçekleşmiştir.

KAYNAKLAR

- Azuma, M. ve ark. (2012) 'Effect of hardness of martensite ve ferrite on void formation in dual phase steel', *Materials Science ve Technology (United Kingdom)*, 28(9–10), 1092–1100.
- Balisetty, V., Chakkingal, U. ve Venugopal, S. (2021) 'Evaluation of stretch flangeability of dual-phase steels by hole expansion test', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(1–2), 205–217.
- Basoeki, P. D. (2018) 'Effects of DP steel microstructure on the disappearance of discontinuous yielding', *MATEC Web of Conferences*, 204, 1–8.
- Bayramin, B., Şimşir, C. ve Efe, M. (2017) 'Dynamic strain aging in DP steels at forming relevant strain rates ve temperatures', *Materials Science ve Engineering A*, 704(July), 164–172
- Chen, C. Y. ve ark. (2020) 'A novel technique for developing a dual-phase steel with a lower strength difference between ferrite ve

- martensite', *Materials Today Communications*, 23(January), 100895.
- Cora, Ö. N. ve Koç, M. (2014) 'Promises ve Problems of Ultra/Advanced High Strength Steel (U/AHSS) Utilization in Automotive Industry', *7th Automotive Technologies Congress (OTEKON 2014)*, (May), 1–8.
- Demeri, M. Y. (2013) *Advanced High-strength Steels: Science, Technology, ve Applications*. 1st edn. Ohio: ASM International.
- Gao, B. ve ark. (2019) 'A high-strength heterogeneous structural dual-phase steel', *Journal of Materials Science*, 54(19), 12898–12910.
- Guerrero, L. M. ve ark. (2021) 'Strategies to increase austenite FCC relative phase stability in High-Mn steels', *Journal of Alloys ve Compounds*, 854, 156971.
- Hance, B. M., Comstock, R. J. ve Scherrer, D. K. (2013) 'The influence of edge preparation method on the hole expansion performance of automotive sheet steels', *SAE Technical Papers*, 2.
- Hu, J. ve ark. (2013) 'Microstructures ve mechanical properties of a new as-hot-rolled high-strength DP steel subjected to different cooling schedules', *Metallurgical ve Materials Transactions A: Physical Metallurgy ve Materials Science*, 44(11), 4937–4947.
- Kamp, A., Celotto, S. ve Hanlon, D. N. (2012) 'Effects of tempering on the mechanical properties of high strength dual-phase steels', *Materials Science ve Engineering: A*, 538, 35–41.
- Karelova, A. ve ark. (2009) 'Hole expansion of dual-phase ve complex-phase AHS steels - Effect of edge conditions', *Steel Research International*, 80(1).
- Keeler, S., Kimchi, M. ve Mooney, P. J. (2017) 'Advanced High-Strength Steels Guidelines Version 6.0', *WorldAutoSteel*, (September), p. 314. Available at: <https://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>.
- Kundu, A. ve Field, D. P. (2016) 'Influence of plastic deformation heterogeneity on development of geometrically necessary dislocation density in dual phase steel', *Materials Science ve Engineering: A*, 667, 435–443.
- LeventSelova OktayÇavuşoğlu, ÇiğdemDindar, HakanAydın, O. (2023) 'Elektrik direnç punta kaynağı ile üçlü birleştirilen FEP05/DP600/FEP05 çelik saclarda kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere ve mikroyapı üzerindeki etkilerin araştırılması', *Journal*, 39(2), 835–846.
- Li, C. S. ve ark. (2015) 'Microstructure ve mechanical properties of dual phase strip steel in the overaging process of continuous annealing', *Materials Science ve Engineering: A*, 627, 281–289.
- Mallick, P. K. (2010) *Materials, design ve manufacturing for lightweight vehicles, Materials, Design ve Manufacturing for Lightweight Vehicles*. Woodhead Publishing Limited. doi: 10.1533/9781845697822.
- Mirhosseini, S. ve ark. (2022) 'Effect of temperature ve heat generation on martensitic phase transformation in DH steels', 14(January). doi: 10.1016/j.rinma.2022.100281.
- Moyer, J. M. ve ANSELL, G. S. (1975) 'The Volume Expansion Accompanying the Martensite Transformation in Iron-Carbon Alloys', *Metallurgical Transactions A*, 6(September), 1785–1791.
- Queiroz, R. R. U., Cunha, F. G. G. ve Gonzalez, B. M. (2012) 'Study of dynamic strain aging in dual phase steel', *Materials Science ve Engineering A*, 543, 84–87.
- Sen, N. ve Civek, T. (2022a) 'Detailed deformation behaviour analysis of DP steels at warm forming temperatures via warm tensile tests', *Ironmaking & Steelmaking*, 49(6), 604–614.
- Sen, N. ve Civek, T. (2022b) 'Detailed deformation behaviour analysis of DP steels at warm forming temperatures via warm tensile tests Detailed deformation behaviour analysis of DP steels at warm forming temperatures via warm tensile tests', *Ironmaking & Steelmaking*, 1–11.
- Şen, N., Helimergin, F. ve Taşdemir, V. (2021) 'Effects of fine blanking process on cutting surfaces of high-strength DP600 ve DP800 sheets', *Ironmaking ve Steelmaking*, 48(9), 1083–1088.
- Senuma, T. (2001) 'Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets', *ISIJ International*, 41(6), 520–532.
- Terrazas, O. R., Findley, K. O. ve Van Tyne, C. J. (2017) 'Influence of martensite morphology on sheared-edge formability of dual-phase steels', *ISIJ International*, 57(5), 937–944.
- Tisza, M. (2021) 'Development of Advanced High Strength Automotive Steels', *Acta Materialia Transylvanica*, 4(1), 9–17.
- Xu, L. ve ark. (2012) 'Hole expansion of dual phase steels', *WIT Transactions on the Built Environment*, 124, 75–83.