



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Öndeformasyon ve Fırınlama Sıcaklığının Fırınlama Sırasında Şertleşen Çeliklerin Sertleşme Özelliğine Etkisi

Candan ŞEN ELKOCA<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>*Alaplı Meslek Yüksekokulu, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, TÜRKİYE*

\* *candansen@gmail.com*

### ÖZET

Yakıt tüketimini düşürmek ve bu şekilde egzoz gazlarının çevreye verdiği zararı en aza indirmek amacıyla otomotiv gövde ağırlığının azaltılması son yıllarda otomotiv sanayindeki en önemli beklentilerden birisidir. Arzu edilen özellikler fırınlama sırasında sertleşen çeliklerle elde edilmiştir. Ancak fırınlama sırasında sertleşme özelliği ön deformasyon miktarı ve fırınlama sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** *Fırınlama sırasında sertleşme, Fırınlama sırasında sertleşen çelik, Çelik*

## Effect of Predeformation and Baking Temperature on Hardening Property of Bake Hardening Steels

### ABSTRACT

The reduction of body weight of automotive in order to reduce the fuel consumption, thus gas emissions is one of the most important expectations in automotive industry. These properties have been achieved by bake hardening steels. However, bake hardenability property can be influenced by the amount of predeformation and baking temperatures.

**Keywords:** *Bake hardening, Baking hardening steel, Steel*

## I. GİRİŞ

Son yıllarda, çelik saclar üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarının çoğu gelişmiş ülkelerin ekonomisinde önemli bir motivasyon kaynağı olan otomotiv sanayindeki uygulamalara odaklanmıştır [1,2]. Bu eğilim, taşıt ağırlığını ve dolayısıyla emisyon ve yakıt tüketimini azaltmak için daha yüksek dayanımlı malzemelere gösterilen ilgiyle ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalardan birisi aracın yapısal elemanları için yüksek dayanımlı, diğeri ise dış gövde panelleri için kolay biçimlendirilebilir çelik sacların geliştirilmesidir [3].

Otomotiv sanayinde dış gövde panelleri için çelik saclardan beklenen malzeme özellikleri dayanım, biçimlenebilirlik, boyanabilirlik ve kaynaklanabilirliğin optimum kombinasyonu şeklindedir. Burada, boyama müşteriye cezbeden dış yüzey özelliklerini kazandırırken, dayanım, yorulma direnci ve rijitlik çökmeye ve çarpılmaya karşı direnç kazandıracak seviyelerdedir [4,6].

Otomotiv imalatçıların dış gövde panellerinde kullandığı yaklaşımlar üç grup içerisinde toplanabilir [4]. Bunlar:

1. Tasarım (biçim, rijitlik, çarpılma ve çökme direnci)
2. İmal edilebilirlik (biçimlendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve boyanabilirlik)
3. Maliyet ve ağırlıktır (çeliğin işlenmesindeki güçlük, geçirdiği işlem sayısı ve sac kalınlığı)

Çelik üreticileri tarafında ise konu, bu tür talepleri karşılayacak sacları üretmek için mevcut donanımdan nasıl yararlanılacağı, üretilen çeliğin biçimlendirme işlemi öncesinde kararlılığının nasıl sağlanacağı ve sorunsuz bir biçimlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik için hangi yöntemle ve nasıl kaplanacağı üzerine odaklanmıştır [1,4].

## II. OTOMOTİV DIŞ GÖVDE SACLARINDAN BEKLENEN ÖZELLİKLER

Otomotiv dış gövde saclarında birbiriyle çatışan bazı özellikler aynı anda arzu edilmektedir. Biçimlendirilebilirlik açısından biçimlendirme öncesinde düşük bir akma dayanımı, biçimlendirme sırasında ise yüksek bir deformasyon sertleşmesi arzu edilir. Çökme direnci, biçimlenebilirlik için arzu edilen daha yüksek bir akma dayanımına gereksinim duyar. Bu gereksinim ise yüksek bir orantısal sınır (gerilme-deformasyon diyagramında eğrinin doğrusallıktan uzaklaştığı nokta) gerektirir. Biçimlendirmeden sonra kusursuz bir yüzey elde etmek için malzeme “0” süreksiz akma uzamasına sahip olmalıdır.

Birbiriyle uyuşmayan yukarıdaki özellikler, dislokasyonları harekete geçiren ve taneden taneye artık gerilimler yaratan temper haddelenmesiyle bir araya getirilmektedir. Soğuk haddelenmiş çelik sac üretiminin son aşaması olan ve çelik sacın %1 civarında yüzeyel olarak haddelendiği temper haddelenme işlemiyle gerilme-deformasyon eğrisi düşük bir orantısal sınırla yuvarlatılmaktadır (süreksiz akma uzaması ortadan kalkmaktadır) [4].

Çelik içerisinde çözülmüş karbonun zamana ve sıcaklığa bağlı olarak dislokasyonlara ve tane sınırlarına yayılması sonucunda ortaya çıkan deformasyon yaşlanması orantısal sınırdan artışa yol açarak süreksiz akma uzamasını geri getirir. Boyanmış dış gövde saclarının fırınlanması sonrasında da gözlenen bu olgu

biçimlendirilme sonrasında malzemenin akma dayanımında arzu edilen artışı ortaya çıkarmaktadır. Burada vurgulanması gereken önemli bir nokta, sorunsuz bir biçimlendirme için preste biçimlendirme öncesinde ortaya çıkan yaşlanma olgusu yeterince bastırılmalıdır [4, 7].

### III. FIRINLAMA SIRASINDA SERTLEŞEN ÇELİKLER

Yakıt tüketimini düşürmek ve bu şekilde egzoz gazlarının çevreye verdiği zararı en aza indirmek amacıyla otomotiv gövde ağırlığının azaltılması son yıllarda otomotiv sanayindeki en önemli beklentilerden birisidir. Bunun bir kısmı otomotiv dış gövde panellerinde daha ince sac kullanımıyla karşılanmıştır. Daha ince sac uygulamasıyla dış gövde panellerinde aranan temel özelliklerden birisi olan çökme direnci ise çeliğin akma dayanımı yükseltilecek artırılabilir.

Başlangıçta, yüksek bir r değeri (derin çekme işlemleri sırasında kalınlık yönünde incelmeye karşı direnç) ve nispeten yüksek bir akma dayanıma sahip olan ve düşük bir maliyetle üretilebilen 400 MPa çekme dayanımındaki fosfor katımlı Al ile durgunlaştırılmış çeliğin yukarıdaki beklentileri karşılayacağı düşünülmüştür. Ancak, bu çelik preste biçimlendirme işlemleri sırasında kötü bir şekil kalıcılığı (geri yaylanma sorunu) yaratmıştır. Bu çelik sacın sonraki adımlarda kalıba tam oturmayacağı anlamına gelmekte ve yüksek akma dayanımından dolayı preste biçimlendirme sonrasında çelik panelde yüzey bozukluklarına neden olmaktadır [5]. Bu nedenle, preste biçimlendirme öncesinde çeliğin düşük, biçimlenmiş parçada ise yüksek akma dayanımına sahip olması arzu edilmektedir.

Arzu edilen özellikler fırınlama sırasında sertleşen (FSSen) çelik ile elde edilmiştir. FSSen bir çelik sac, preste biçimlendirme işlemi takip eden 170°C'deki 20 dak.'lık bir fırınlama işlemiyle akma dayanımında yaklaşık 40 MPa'lık bir artış kazanmaktadır. Bu yegane özellik otomotiv üreticilerine daha ince çelik sac kullanımı ve bunun sonucunda daha hafif bir araç üretimi olanağı sağlamaktadır. Örneğin, bu özellikten yararlanılarak, başlangıç akma dayanımının yeniden ayarlanması sonucunda dış gövde panellerinin kalınlığı 0,8mm'den 0,7mm'ye indirilmiştir [8].

Biçimlendirilen gerçek boyuttaki parçalarda deformasyon miktarı parçanın şekline bağlı olarak farklı olabilmekte ve bölgesel deformasyon miktarına göre fırınlama sırasında sertleşme (FSSme) miktarında farklılıklar görülebilmektedir[9]. Bu nedenle fırınlama öncesi uygulanan farklı ön deformasyonların FSSme değerine etkisi bu çalışmada araştırılan konulardan birisidir.

Ayrıca enerji tasarrufu açısından fırınlama sıcaklıklarını düşüren yeni tip organik kompozit boyalar otomotiv sanayinde kullanılmaya başlanmıştır [10]. Bu amaçla FSSen çeliğin standart fırınlama sıcaklığı olan 170°C dışındaki sıcaklıklardaki davranışını belirlemek amacıyla 100-250°C aralığındaki FSSme miktarları araştırılmıştır.

### IV. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylerde kullanılan numuneler sıcak daldırma yöntemiyle çinko kaplanmış, alüminyum ile durgunlaştırılmış, Ti ve Nb ile stabilize edilmiş, çok düşük karbonlu bir çelik sacdan çıkarılmıştır. Otomotiv uygulamaları için üretilen çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 1 ve mekanik özellikleri Tablo2'deki gibidir.

**Tablo 1.**Deneylerde kullanılan çeliğin kimyasal bileşimi (%ağ)

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	N
0,003	0,011	0,126	0,007	0,008	0,040	0,012	0,008	0,0048

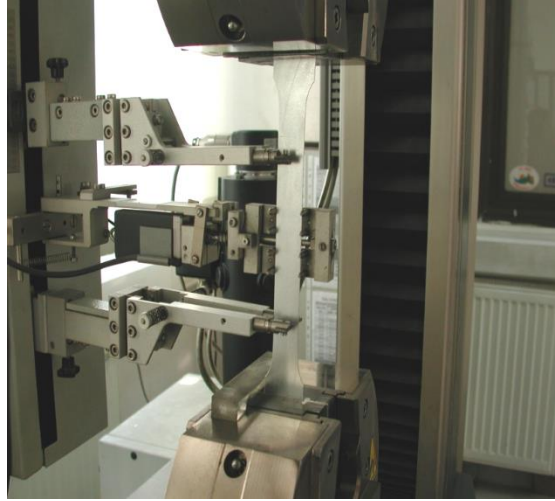
**Tablo2.**Deneylerde kullanılan çeliğin mekanik özellikleri (haddeleme doğrultusuna dik yönde)

Alt akma muk. (kg/mm <sup>2</sup> )	Çekme muk. (kg/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)	r	n
22,24	32,46	33,02	1,91	0,18

FSSme değerinin tespit edilmesinde, standart ön deformasyonlu çekme testi esas alınmıştır. Ön deformasyonun FSSme değerine etkisinin incelendiği deneylerde, hazırlanan çekme test numunelerine % 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 deformasyon uygulanmış; hemen ardından numuneler 170°C sıcaklıktaki etüvde tavllanmış ve 20 dakikalık süre sonunda dışarı çıkarılıp oda sıcaklığına soğutulmuştur. Soğuyan numunelere standart çekme testi uygulanmıştır.

Farklı fırınlama sıcaklıklarının FSSme değerine etkisinin incelendiği deneylerde ise standart %2 ön deformasyon uygulanan numuneler hemen ardından daha önceden 100, 120, 150, 170, 200, 220 ve 250°C sıcaklıklara set edilen bir etüve tek tek yerleştirilerek tavllanmış ve 20 dakikalık süre sonunda dışarı çıkarılıp oda sıcaklığına soğutulmuştur. Soğuyan numunelere standart çekme testi uygulanmıştır. Deneylerde tespit edilen deformasyon sertleşmesi değeri, numunenin istenilen ön deformasyon seviyesine çıkarılırken gözlenen orjinal alt akma gerilmesi ile istenilen ön deformasyon seviyesine çıkıldığında ortaya çıkan dayanım farkıdır. FSSme değeri, fırınlama sonrasında uygulanan standart çekme testinde elde edilen en düşük akma dayanımıyla fırınlama öncesinde ön deformasyon uygulandığında ulaşılan dayanım farkıdır. Elde edilen toplam dayanım değeri ise uygulanan ön deformasyon sonrasında ulaşılan deformasyon sertleşmesi ile ulaşılan FSSme değerinin toplamıdır. Ön deformasyonun uygulandığı ve çekme testinin yapıldığı cihaz bilgisayar kontrollü Zwick Üniversal Test Cihazıdır. İstenilen ön deformasyon oranlarına cihaza bağlı olan bir ekstansiyometreyle (Şekil 1) hassas bir şekilde ulaşılmıştır.

Fırınlama işlemi için içerisinde hava sirkülasyonu olan bir etüv kullanılmıştır. Aynı sıcaklıkta fırınlanacak ön deformasyon uygulanmış numuneler delikli bir tepsiye yerleştirildikten sonra aynı anda hava sirkülasyonlu fırına yerleştirilmiş (Şekil 2) ve fırınlamanın ardından yine aynı tepsi ile fırından çıkarılarak havada soğutulmuştur.



*Şekil 1. Çekme cihazına bağlanmış numune ve çekme sırasında numune üzerindeki uzamaları hassas olarak ölçen ekstansiyometre*



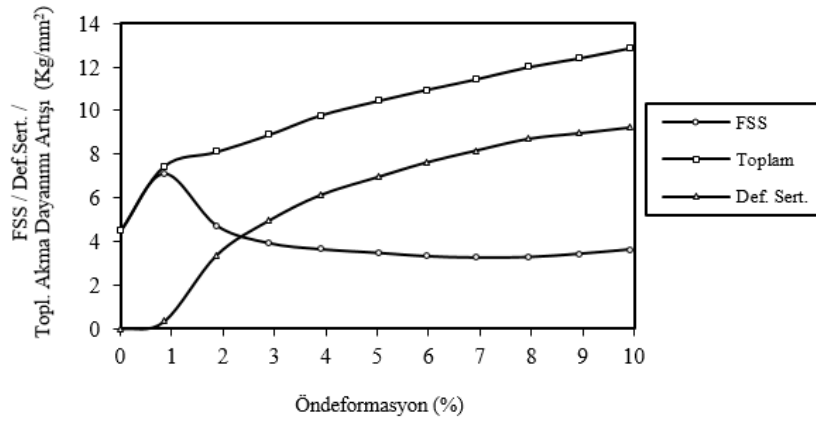
*Şekil 2. Fırınlama işlemlerinde kullanılan etüv ve tepsi içerisine yerleştirilmiş numuneler*

Fırınlama işlemleri sonrasındaki iç yapısal değişiklikleri gözlemek için çekme testi numunesinin ölçü boyu içerisinde kalan, ancak kopma bölgesine uzak kısımlardan numune çıkarılmıştır. Bu numuneler epoksi reçine içerisinde soğuk olarak gömülmüş ve zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiştir. Deneyler sonrasında olası karbür çökelmelerini görmek amacıyla parlatılan numuneler Picral çözeltisi ile dağlanmış ve 1000 büyütmede ışık mikroskopunda ve 7000 büyütmede taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.

Yine deneyler sonrasında tane şekil ve boyut dağılımındaki olası değişiklikleri görmek amacıyla tekrar parlatılan numuneler bu kez Nital 3 ile dağlanmış ve 1000 büyütmede ışık mikroskopunda incelenmiştir.

## V. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

Ön deformasyonun FSSmeye etkisini belirlemeye yönelik çalışmalar sonrasında elde edilen veriler Şekil 3’de gösterildiği gibi grafik haline getirilmiştir. Burada, uygulanan ön deformasyon miktarındaki artışla birlikte malzemede de artan bir deformasyon sertleşmesi gözlenmektedir. Bu durum artan deformasyonla birlikte malzeme iç yapısında da artan dislokasyon yoğunluğunun bir sonucudur[11].



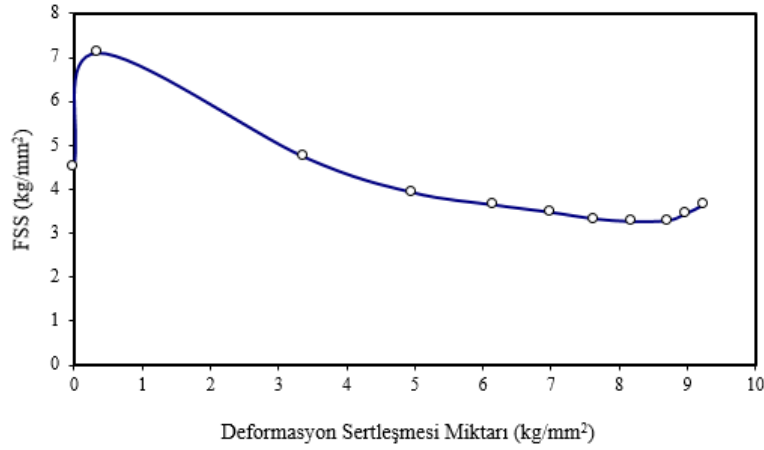
**Şekil 3.** Uygulanan ön deformasyon miktarına bağlı olarak deformasyon sertleşmesi, FSSme miktarı ve toplam akma dayanımı artışı

Elde edilen sonuçlar, 170°C'deki FSSme olgusuna yönelik daha önce yapılan çalışmalarla [9,12,13] uyumlu bir karakteristik göstermektedir; yani, önce düşük ön deformasyon seviyelerinde bir artış, sonra artan ön deformasyon miktarıyla birlikte artık ön deformasyonun etkili olmadığı bir değere düşüş.

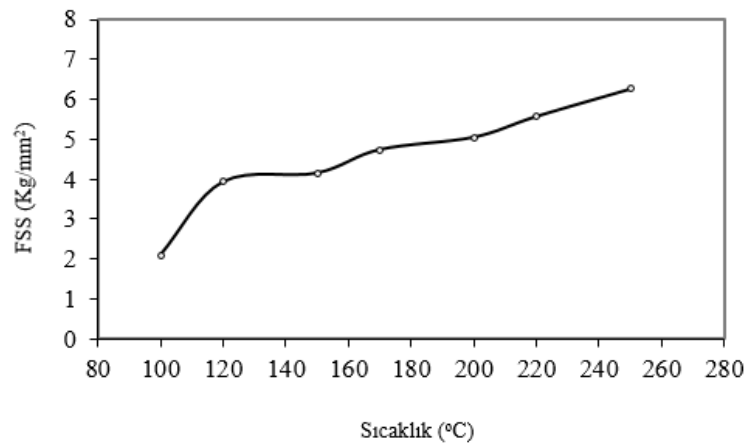
Şekil 3'te görüldüğü gibi ön deformasyonun uygulanmadığı durumda bile standart %2 ön deformasyon sonrasındaki FSSme değerine yaklaşılmaktadır. Bu durum sıfır'a yakın ön deformasyon seviyelerindeki Cottrell atmosferinin en yüksek FSSme değerini verdiğini açıklayan Elsen'in [14] verileriyle uyumluysen, Snick ve arkadaşlarının [15] bulgularından farklılık göstermektedir. Snick ve arkadaşlarına göre, ön deformasyon uygulanmamış numunelerde dislokasyonlar arası mesafeler büyüktür ve bunun sonucu olarak, standart fırınlama sırasında (170°C'de 20 dakika) iç yapıdaki serbest karbon atomları tüm dislokasyonları kilitleme özelliğine sahip değildir; bu yüzden elde edilen FSSme değeri de düşüktür. Bu çalışmada deformasyonsuz durumda gözlenen yüksek FSSme değeri başlangıçta yapıda mevcut serbest dislokasyonlardan kaynaklanabilir. Bobin şeklinde sarılmış çelik sacdan numune çıkarımı ve düzleştirme işlemi sırasında numune üzerinde bu tür küçük deformasyonlar oluşturulabilecektir. Bu tür deformasyonların mevcudiyeti nedeniyle ilk anlarda bastırılmayan hızlı Cottrell atmosferi oluşumunun ön deformasyon uygulanmayan numunede gözlemlenen yüksek FSSme değerini yarattığı düşünülmektedir.

Ön deformasyon miktarı arttırıldığında dislokasyon yoğunluğu da artacağından dislokasyonların arasındaki mesafe küçülecek ve içyapıdaki serbest karbon atomları sonuçta daha yüksek FSSme değeri verecek şekilde daha yüksek oranda dislokasyonu kilitleyebilecektir [14]. Elde edilen deneysel bulgulara göre, bu çelikte FSSme miktarındaki en büyük artış %1 ön deformasyona karşılık gelecek şekilde 7.11 kg/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. %1'den daha yüksek ön deformasyon uygulamalarında FSSme değeri düşmekte ve yaklaşık olarak %3 deformasyondan sonra hemen hemen aynı kalmaktadır. Düşük deformasyon miktarlarında ana etkenler dislokasyonlar arasındaki mesafe ve karbon atomlarının yayınma hızıyken; en yüksek FSSme değerine ulaşıldıktan sonra mesafeler ve yayınma artık o kadar sorun olmayacağından, dislokasyon yoğunluğu serbest karbon/ dislokasyon oranını düşürecek kadar çok artmaktadır. Bu durumda, sonuç olarak daha az etkili bir dislokasyon kilitlemesi seviyesine ulaşılmaktadır [12,15]. Snick ve arkadaşları [14] artan ön deformasyonla birlikte FSSme değerinde görülen düşüşün sürekli devam etmediğini %10 gibi yüksek deformasyon oranlarında yeniden yüksek FSSme değerlerine ulaşıldığını belirtmektedir. Şekil 3'te bu eğilim belirgin bir şekilde gözlenmemesine

rağmen FSSme ile deformasyon sertleşmesi arasındaki ilişkide (Şekil 4) bu yaklaşım hissedilmektedir. Standart ön deformasyon (% 2) uygulanmış çelikte farklı fırınlama sıcaklıklarının FSSme miktarına etkisi Şekil 5'teki gibidir. Şekil 5'ten görülebileceği gibi artan sıcaklıkla birlikte yapıda çözülmüş karbonun yayınabilirliği de artacağından FSSme değerinde de artış görülmektedir. Standart olarak alınan 170°C'de 20 dakika tavlama sonrasında ulaşılan FSSme değerine 120°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hızlı bir şekilde ulaşılmaktadır. 120°C'nin altındaki sıcaklıklarda ise karbonun yayınma hızı düştüğünden istenilen FSSme değerlerine ulaşmak için daha uzun fırınlama sürelerinin gerekeceği dikkate alınmalıdır. Yüksek FSSme sergileyen düşük ön deformasyonlu (%1) numunelerin 170°C'deki fırınlanmaları sonrasında gözlenen davranışlarının daha düşük sıcaklıklarda nasıl olacağı bu çalışmada incelenmemiştir. Mitsumasa ve arkadaşları [16] yaptığı çalışmalarda %1 ön deformasyon uygulanan numunelerde 70°C'de 20 dakika fırınlama sonrasında yaşlanma tespit etmiştir. Buradan, presle biçimlendirme sırasında düşük oranda deformasyona maruz kalan sığ derin çekilmiş parçalarda düşük fırınlama sıcaklıklarının istenilen FSSme değerlerini karşılayabileceği düşünülmektedir.



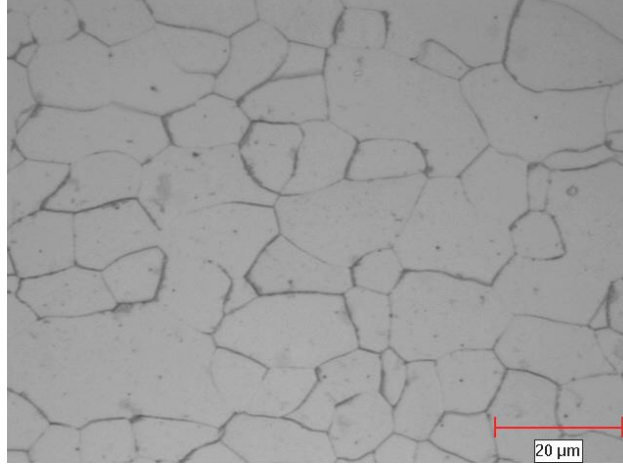
**Şekil 4.** Numuneler üzerinde yaratılan deformasyon sertleşmesi ile FSSme miktarı arasındaki ilişki.



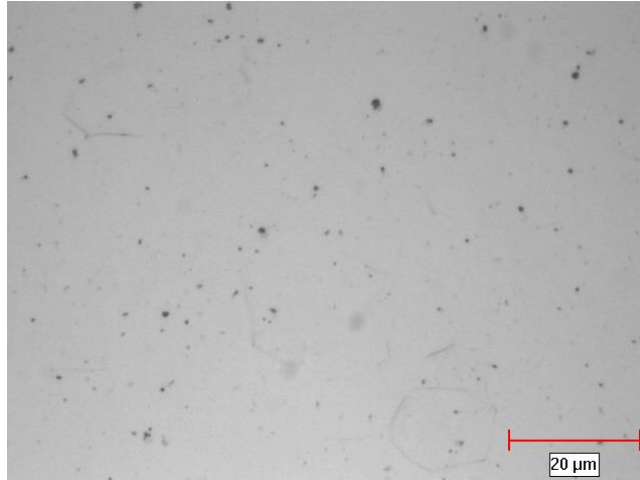
**Şekil 5.** Standart ön deformasyon (%2) uygulanmış çelikte farklı fırınlama sıcaklıklarının FSSme değerine etkisi

FSSme olgusunda etkili olan karbür çökelmelerini gözlemlemek amacıyla, gerek farklı ön deformasyon uygulanmış ve 170°C'de 20 dakika fırınlanmış gerekse %2 ön deformasyon uygulanıp farklı

sıcaklıklarda 20 dakika fırınlanmış numunelerde ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri yapılmıştır (Şekil 6, 7 ve 8). İncelemelerde ferrit tane şekli ve boyut dağılımı ve çökelti içeriği açısından bir farklılık gözlenmemiştir. Bu durum, deneylerde kullanılan parametrelerin (ön deformasyon oranları ve sıcaklıkların) özellikle tane boyutunda bir değişikliğe yol açacak kritik değerlerin çok altında kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, fırınlama işlemleri sırasında oluşan çok ince karbür çökeltilerinin mevcut cihazlarla tespit edilemediği düşünülmektedir. Uygulanan deformasyon miktarına ve sıcaklığa bağlı olarak çökelti yoğunluğu ve boyutlarındaki farklılıkların tespit edilebilmesi için bu numunelerden çıkarılacak karbon replikaların geçirgen elektron mikroskobunda incelenmesi gereklidir. Bu tür bir çalışmada izlenecek yöntem Starling ve arkadaşları [17] tarafından açıklanmıştır.

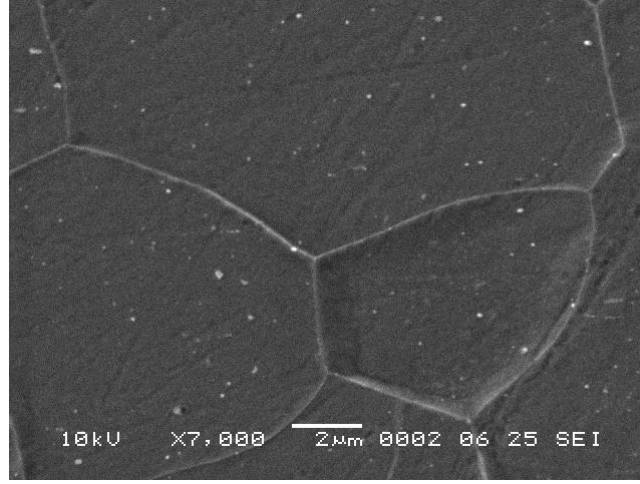


**Şekil 6.** Genel tane şekli ve dağılımı, Nital 3 ile dağlanmış, 1000X



**Şekil 7.** Genel çökelti içeriği, Picral ile dağlanmış, 1000X





**Şekil 8.** Genel tane boyut ve dağılımı ve çökelti içeriği, Nital 3 ile dağlanmış, 7000X

## VI. SONUÇ

Deneylerde kullanılan çeliğin FSSme davranışı genel olarak diğer araştırmacıların bulgularını destekler niteliktedir.

Ön deformasyon miktarı arttıkça elde edilen FSSme değeri düşmektedir. Standart deney koşulları (%2 ön deformasyon, 170°C’de 20 dakika fırınlama) ile bu çelikte elde edilebilecek en yüksek FSSme değeri 4,74 kg/mm<sup>2</sup> iken %1 ön deformasyon uygulandığında 7,11 kg/mm<sup>2</sup>’dir. Bu nedenle FSSme olgusundan en yüksek oranda yararlanmak için, bu çeliğin büyük ölçüde otomobil kapısı, kaput ve bagaj kapağı gibi sığ derin çekme işleminden geçen parçalarda kullanılması önerilmektedir.

Çökme direnci açısından fırınlanan parçadaki dayanım artışı FSSme ile deformasyon sertleşmesinin toplamından oluşmaktadır. Karmaşık şekilli parçalarda deformasyon sertleşmesinin yüksek olduğu bölgelerde akma dayanımındaki artışta FSSme değerinin yerini deformasyon sertleşmesi, deformasyonun sıfır olduğu bölgelerde ise FSSme değeri almaktadır.

Fırınlama sıcaklığının artışıyla FSSme değeri de artmaktadır. Bu durum yapıdaki serbest karbonun yayınma hızının sıcaklıkla artmasından kaynaklanmaktadır.

Enerji tasarrufu açısından fırınlama sıcaklığının düşürülmesi durumunda yapıdaki karbonun yayınma hızı da düşeceğinden istenilen FSSme değerlerine ulaşılabilmesi için fırınlama süresinin de artması gerekecektir.

## VII. KAYNAKLAR

- [1] E. Pereloma, I. Timokhina, “Bake hardening of automotive steels. Automotive steels: design, metallurgy,” *processing and applications*, pp. 259-288, 2016.
- [2] M. Takahashi, “Sheet steel technology for the last 100 years: progress in sheet steels in hand with the automotive industry,” *ISIJ International*, vol. 55, no. 1, pp. 79-88, 2015.

- [3] T. Senuma, "Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets," *ISIJ International*, vol. 41, no. 6, pp. 520-532, 2001.
- [4] R. P. Foley, M. E. Fine and S. K. Bhat, "Bake Hardening Steels: Toward Improved Formability and Strength," *39th MWSP Conf. Proc.*, vol. 35, 1998, pp.653-666.
- [5] T. Matsuoka, A. Okamoto, S. Sugisawa, and S. Nakai, "High Strength Cold Rolled Sheet Steels for Automobiles," *Metallurgy of Continuous Annealed Sheet Steel*, AIME, 1982, pp. 969-976.
- [6] M. R. Bache, V.J. Evans, and I. Uygur, "Fatigue life predictions for notch geometries in particle reinforced metal matrix composites," *Materials science and technology*, vol. 14, no. 9-10, pp. 1065-1069, 1998.
- [7] J. R. Fekete, D. C. Strgala and Z. Yao, "Advanced sheet steels for automotive applications," *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, vol. 44, no. 1, pp. 17-21, 1992.
- [8] N. Mizui, A. Okamoto and T. Taniooku, "Recent development in bake-hardenable sheet steel for automobile body panels," In *Steel in Motor Vehicle Manufacture*, Int. Conf., vol. 26, pp. 85-94, 1990.
- [9] W. C. Jeong, "Effect of Prestrain on Aging and Bake Hardening of Cold Rolled," *Continuously Annealed Steel Sheets, Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 29, pp. 463-466, 1998.
- [10] S. Susumu, O. Susumu, K. Toshiyuki, H. Osaka, H. Toshitake and T. Hiroshi, "Development of Bake-Hardening High-Strength Cold rolled Sheet Steels for Automobile Exposed Panels," *Kawasaki Steel Technical Report*, no. 27, 1992. pp. 31-38.
- [11] D. William, Jr. Callister, G. R. David, *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*, 4th ed. Hoboken, N.J. Wiley, 2012, p. 278.
- [12] A. K. De, S. Vandeputte and B. C. Cooman, "Static Strain Aging Behavior of Ultra Low Carbon Bake Hardening Steel," *Scripta Materialia*, vol. 41, nNo. 8, pp. 831-837, 1999.
- [13] R. Pradhan, "Dent-Resistant Bake Hardening Steels for Automative Outer-Body Applications," *SAE Technical Paper Series*, no. 910290, 1991.
- [14] P. Elsen, Bake –Hardening Effekt bei Feinblechen, *Fortschritt-Berichte VDI*.
- [15] A. V. Snick, D. Vanderschueren, S. Vandeputte and J. Dilewijns "Influence of Carbon Content and Coiling Temperature on Hot and Cold Rolled Properties of Bake Hardenable Nb-ULC Steels," *39th MWSP Conf. Proc.*, 1998, pp.225-232.
- [16] K. Mitsumasa, S. Susumu, O. Takashid and T. Kozo, "Age-Hardening Behavior and Dent Resistance of bake-Hardenable and Extra Deep-Drawable High Strength Steel," *Kawasaki Steel Technical Report*, no. 18, pp. 61-65, 1998.
- [17] J. Starling, S. Saimoto, and J. D. Boyd, J, "Strengthening of Low-Interstitial Steels by Strain-Ageing Treatments," *Scripta Materialia*, vol. 39, no. 4/5, pp. 487-492, 1998.