

Ti-Nb İle Stabilize Edilmiş Çok Düşük Karbonlu Bir Çelik Sacın Fırınlamayla Sertleşme Özelliği Üzerine Bir Çalışma

A Study on the Bake Hardenability of a Ti-Nb Stabilized Extra Low Carbon Steel

*¹Candan Şen Elkoca

*¹Alaplı Meslek Yüksekokulu, Bülent Ecevit Üniversitesi, 67850, Alaplı, Zonguldak, Türkiye

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. Bu çalışmada Ti-Nb ile stabilize edilmiş çok düşük karbonlu bir çelik sacın fırınlamayla sertleşme özelliği ön deformasyon miktarı ve fırınlama sıcaklığına bağlı olarak incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Fırınlama sırasında sertleşme, Çok düşük karbonlu çelik, Çökme direnci, Yaşlanma, Otomotiv

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 pre-deformation and baking temperatures. In this study, the bake hardening property of a Ti-Nb stabilized extra low carbon steel sheet was investigated depending on the amount of pre-deformation and baking temperature.

Keywords: Bake hardening, Extra low carbon Steel, Dent resistance, Aging, Automotive

1. Giriş

Otomotiv sanayi çelik saclar üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarının çoğunda önemli bir motivasyon kaynağı olmuştur [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 müşteriyi cezbeden dış yüzey özelliklerini kazandırırken, dayanım, yorulma direnci ve rijitlik çökmeye ve çarpılmaya karşı direnç kazandıracak seviyelerdedir [4,6]. Otomotiv imalatçılarının 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 yöntemlerin uygulanacağı üzerine odaklanmıştır [1,4].

2. Otomotiv Dış Gövde Sacları

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 edilenden 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 haddemesiyle bir araya getirilmektedir. Soğuk haddelenmiş çelik sac üretiminin son aşaması olan ve çelik sacın %1 civarında yüzeysel olarak haddelendiği temper haddeme 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 sınırla 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].

3. Fırınlama Sırasında Sertleşen Çelikler

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 yükselttilerek arttırılabilir.

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 işlemini 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 0,8 mm'den 0,7 mm'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.

4. Deneysel Çalışmalar

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 Tablo 2'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

Tablo 2. Deneylerde kullanılan çeliğin mekanik özellikleri (haddeleme doğrultusuna dik yönde)

Alt akma muk. (kg/mm ²)	Çekme muk. (kg/mm ²)	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 çıktığında 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 Üiversal Test Cihazıdır. İstenilen ön deformasyon oranlarına cihaza bağlı olan bir ekstansiyometreyle 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 ve fırınlamanın ardından yine aynı tepsi ile fırından çıkarılarak havada soğutulmuştur

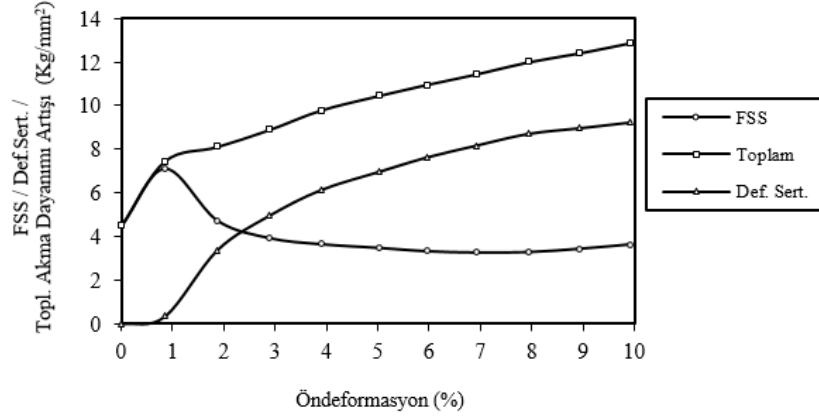
Fırınlama işlemleri sonrasındaki iç yapısal değişiklikleri gözlemek için çekme testi numunesinin ölçü boyu içerisinde kalan, ancak kopma bölgesine uzak kısımlardan numune çıkarılmıştır. Bu numuneler epoksi reçine içerisine soğuk olarak gömülmüş ve zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiştir.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

5. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Ön deformasyonun FSSmeye etkisini belirlemeye yönelik çalışmalar sonrasında elde edilen veriler Şekil 1’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].



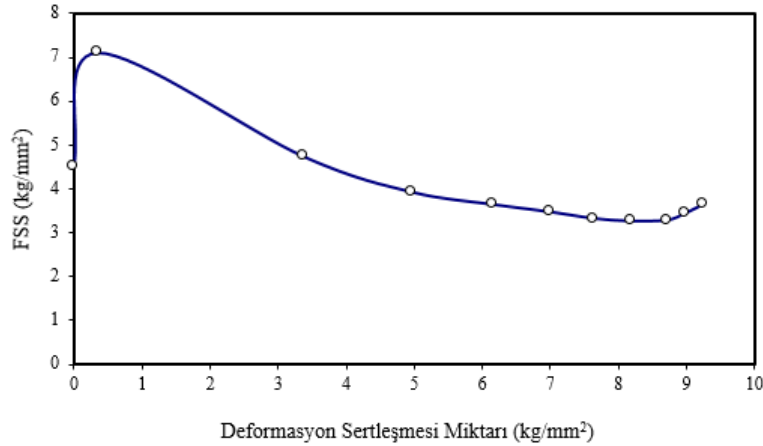
Şekil 1. Uygulanan ön deformasyon miktarına bağlı olarak deformasyon sertleşmesi, FSSme miktarı ve toplam akma dayanımı artışı.

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.

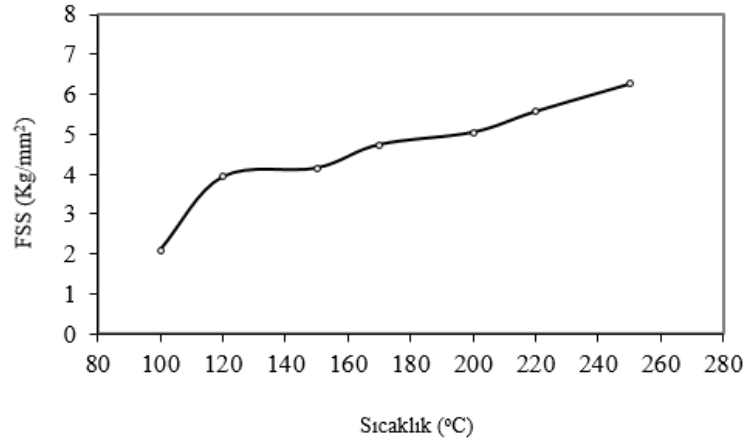
Şekil 1'de görüldüğü gibi ön deformasyonun uygulanmadığı durumda bile standart % 2 ön deformasyon sonrasındaki FSSme değerine yaklaşılmaktadır. Bu durum sıfır'a yakın ön deformasyon seviyelerindeki Cottrell atmosferinin en yüksek FSSme değerini verdiğini açıklayan Elsen'in [14] verileriyle uyumluysen, 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/mm² 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 kilitlenmesi 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 1’de bu eğilim belirgin bir şekilde gözlenmemesine rağmen FSSme ile deformasyon sertleşmesi arasındaki ilişkide (Şekil 2) bu yaklaşım hissedilmektedir. Standart ön deformasyon (% 2) uygulanmış çelikte farklı fırınlama sıcaklıklarının FSSme miktarına etkisi Şekil 3’teki gibidir. Şekil 3’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.

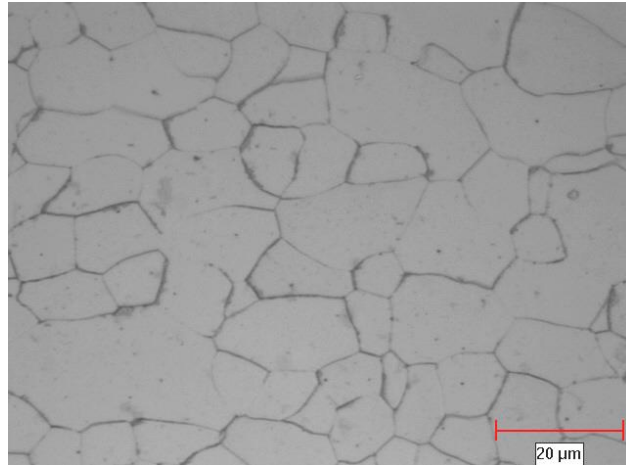


Şekil 2. Numuneler üzerinde yaratılan deformasyon sertleşmesi ile FSSme miktarı arasındaki ilişki.

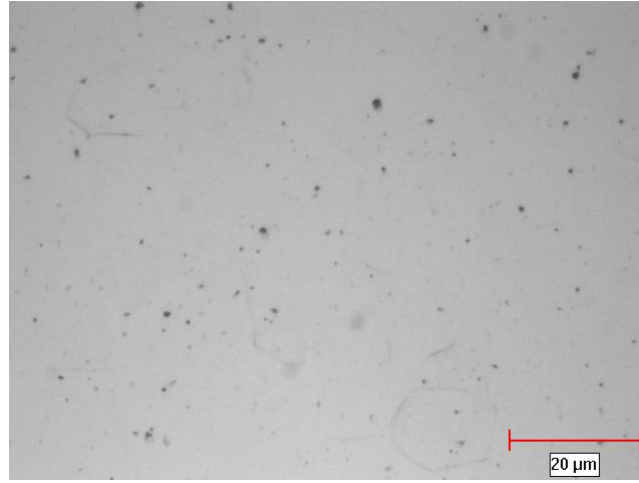


Şekil 3. Standart ön deformasyon (%2) uygulanmış çelikte farklı fırınlama sıcaklıklarının FSSme değerine etkisi.

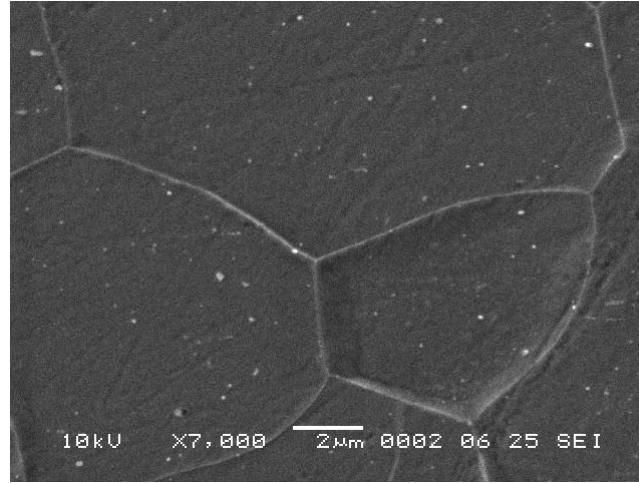
FSSme olgusunda etkili olan karbür çökelmelerini gözlemlemek amacıyla, gerek farklı ön deformasyon uygulanmış ve 170 °C’de 20 dakika fırınlanmış gerekse % 2 ön deformasyon uygulanıp farklı sıcaklıklarda 20 dakika fırınlanmış numunelerde ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri yapılmıştır (Şekil 4-6). 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 4. Genel tane şekli ve dağılımı, Nital 3 ile dağlanmış, 1000X.



Şekil 5. Genel çökelti içeriği, Picral ile dağlanmış, 1000X.



Şekil 6. Genel tane boyut ve dağılımı ve çökelti içeriği, Nital 3 ile dağlanmış, 7000X.

6. Sonuç

Bu çalışma sonrasında elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Deneilerde kullanılan çeliğin FSSme davranışı genel olarak diğer araştırmacıların bulgularını destekler niteliktedir.
2. 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/mm² iken %1 ön deformasyon uygulandığında 7,11 kg/mm²'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.

3. 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.

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

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

Kaynaklar

[1] Pereloma E, Timokhina I. Bake hardening of automotive steels. In Rana R, Singh SB (Eds.), Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications, Duxford:Woodhead Publishing, 2017;259-288.

[2] Takahashi M. Sheet Steel Technology for the Last 100 Years: Progress in Sheet Steels in Hand with the Automotive Industry. ISIJ International 2015;55:1:79-88.

[3] Senuma T. Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets. ISIJInternational 200;41:6:520-532.

[4] Foley RP, Fine ME, Bhat SK. 39th MWSP Conf Proc Iron and Steel Society of AIME.1997;35:653-666.

[5] Matsuoka T, Okamoto A, Sugisawa S, Nakai S. High Strength Cold Rolled Sheet Steels for Automobiles. Metallurgy of Continuous Annealed Sheet Steel, AIME, 1982;969-976.

[6] Bache MR, Evans VJ, Uygur I. Materials Science and Technology 1998;14:1065-1069.

[7] Fekete JR, Strgala DC, Yao Z. Advanced Sheet Steels for Automotive Applications. JOM 1992;17-21.

[8] Mizui N, Okamoto A. Recent Development in Bake Hardenable Sheet Steels for Automotive Body Panels. Steel in Motor Vehicle Manufacture, Int Conf Sept. 24 - 26 1990; 85-94.

[9] Jeong WC. Effect of Prestrain on Aging and Bake Hardening of Cold Rolled, Continuously Annealed Steel Sheets. Metallurgical and MaterialsTransactions A 1998;29A:463-466.

[10] Susumu S, Susumu O, Toshiyuki K, Osaka H, Toshihiko H, Hiroshi T. Development of Bake-Hardening High-Strength Cold rolled Sheet Steels for Automobile Exposed Panels. Kawasaki Steel Technical Report 1992;31-38.

[11] William D, Callister , Jr David GR. Fundamentals of Materials Science and Engineering: an Integrated Approach. 4th ed. 2012; 278.

- [12] De A.K, Vandeputte S and B.C. De Cooman DBC. Static Strain Aging Behavior of Ultra Low Carbon Bake Hardening Steel. *Scripta Materialia* 1999;41:8:831-837.
- [13] Pradhan R. Dent-Resistant Bake Hardening Steels for Automotive Outer-Body Applications. SAE Technical Paper Series 910290 1991.
- [14] P. Elsen, „Bake-Hardening bei Feinblechen“ *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, VDI-Verlag, Düsseldorf*, 1993; Nr. 314.
- [15] Snick AV, Vanderschueren D, Vandeputte S, Dilewinjns J. Influence of Carbon Content and Coiling Temperature on Hot and Cold Rolled Properties of Bake Hardenable Nb-ULC Steels, 39th MWSP Conf Proc, ISS 1998; 35:225-232.
- [16] Mitsumasa K, Susumu S, Takashi O, Kozo T. Age-Hardening Behavior and Dent Resistance of Bake-Hardenable and Extra Deep-Drawable High Strength Steel. *Kawasaki Steel Technical Report* 1998;18:61-65.
- [17] Staarling J, Saimoto S, Boyd JD. Strengthening of Low-Interstitial Steels by Strain-Ageing Treatments. *Scripta Materialia* 1998;39:4/5:487-492.