


Investigation of the Effects of Static Deformation Aging Treatment on the Tensile Strength of a Plain Carbon Powder Metal Steel

 Onur Altuntaş^{1,*}  Emine Kübra Özer²  Ahmet Güral² 
¹Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Machine and Metal Technologies Department, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University Faculty of Technology, Department of Material and Metallurgy Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effect of annealing temperatures on the deformation aging of 0.4% C steels produced by conventional Powder Metallurgy (PM) method was investigated. After aging deformation, powder metal steels; microstructure, hardness, broken surface and tensile properties were investigated.

Article Info:

Research article
 Received: 25/04/2020
 Revision: 07/07/2020
 Accepted: 11/08/2020

Highlights

- Tensile Strength

Keywords

Deformation aging
 Powder metallurgy steel
 Fracture surface

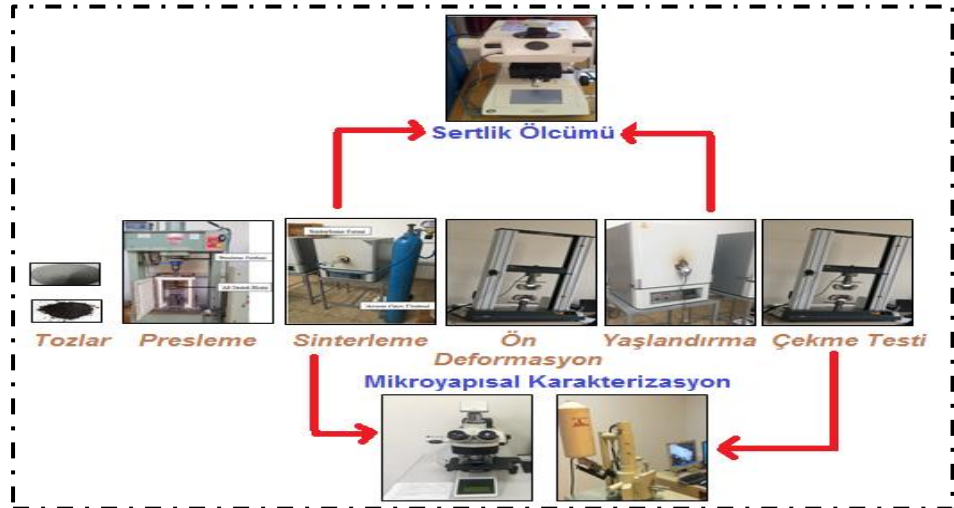


Figure A. Schematic representation of the production and characterization processes

Purpose: The purpose of this study is to investigate the static deformation aging behaviors at different temperatures of powder metal steels

Theory and Methods: Micro tensile test samples were produced by shaping the obtained powder mixtures at room temperature and at a pressure of 700 MPa in a single-axis mold. Then it was left to sintering for 30 minutes under an atmosphere of pure argon gas at 1180 °C. 4% pre-deformation was applied to the medium carbon powder metal steels produced after sintering. Then, aging treatment of 30 minutes was carried out at 200, 300 and 400°C temperatures, respectively. After aging deformation, powder metal steels; microstructure, hardness, broken surface and tensile properties were investigated.

Results: It was determined that the yield strength decreased as the annealing temperature applied after 4% pre-deformation increased. As the static deformation temperature increases, the elongation amount and the hardness values were decreased all of specimens

Conclusion: Studies have shown that the results of static deformation aging behavior at 0.4% C steels produced by powder metallurgy method are compatible the mechanical tests



Sade Karbonlu Toz Metal Bir Çeliğin Çekme Dayanımına Statik Deformasyon Yaşlanma İşleminin Etkilerinin Araştırılması

Onur Altuntaş^{1,*} Emine Kübra Özer² Ahmet Güral²

¹Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O. Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü., 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Bu çalışmada Toz Metalurjisi (TM) yöntemi ile üretilmiş % 0,4 C'lu çeliklerin deformasyon yaşlanması üzerine tavlama sıcaklıklarının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla saf demir tozuna, ağırlıkça % 0,4 oranında doğal grafit tozu ve yağlayıcı olarak ise ağırlıkça % 0,3 çinko stearat ilave edilmiştir. Elde edilen toz karışımları, oda sıcaklığında ve tek etkili kalıpta 700 MPa presleme basıncında şekillendirilerek mikro çekme test numuneleri üretilmiştir. Ardından 1180 °C sıcaklıkta saf argon gazı atmosferi altında 30 dk boyunca sinterlenme işlemine bırakılmıştır. Sinterlenme işlemi sonrasında üretilen orta karbonlu toz metal çeliklere %4 oranında ön deformasyon uygulanmıştır. Ardından sırasıyla 200, 300 ve 400 °C sıcaklıklarda 30 dakika süre yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deformasyon yaşlanması sonrası, toz metal çeliklerin; mikroyapı, sertlik, kırık yüzey ve çekme özellikleri araştırılmıştır. Statik deformasyon sonucunda en yüksek akma dayanımı ve sertlik değeri 200 °C'de statik deformasyon yaşlanması uygulanan numunelerde görülmüştür.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/04/2020
Düzeltilme: 07/07/2020
Kabul: 11/08/2020

Anahtar Kelimeler

Deformasyon yaşlanması
Toz metalurjisi çelik
Kırık yüzey

Keywords

Deformation aging
Powder metallurgy steel
Fracture surface

Investigation of the Effects of Static Deformation Aging Treatment on the Tensile Strength of a Plain Carbon Powder Metal Steel

Abstract

In this study, the effect of annealing temperatures on the deformation aging of 0.4% C steels produced by Powder Metallurgy (PM) method was investigated. For this purpose, 0.4% by weight natural graphite powder and 0.3% by weight zinc stearate are added to pure iron powder. Micro tensile test samples were produced by shaping the obtained powder mixtures at room temperature and at a pressure of 700 MPa in a single-axis mold. Then it was left to sintering for 30 minutes under an atmosphere of pure argon gas at 1180 °C. 4% pre-deformation was applied to the medium carbon powder metal steels produced after sintering. Then, aging treatment of 30 minutes was carried out at 200, 300 and 400°C temperatures, respectively. After aging deformation, powder metal steels; microstructure, hardness, broken surface and tensile properties were investigated. As a result of static deformation, the highest yield strength and hardness value were seen in the samples where static deformation aging at 200 °C was applied.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

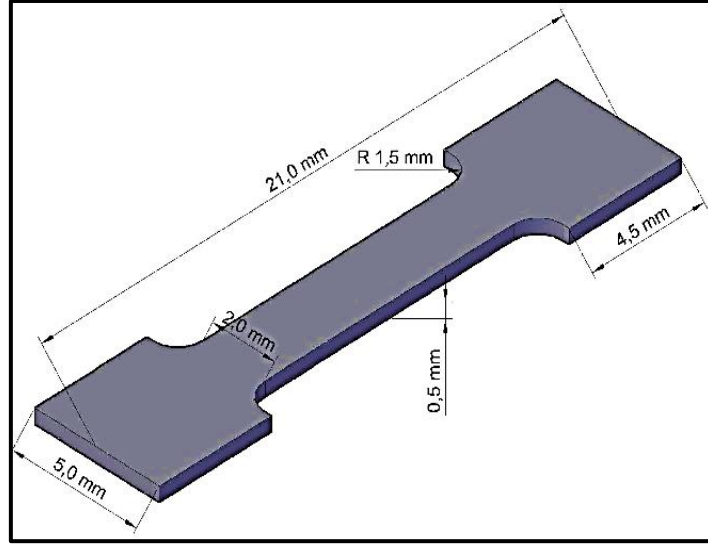
Deformasyon yaşlanması, özellikle düşük karbonlu çeliklerde (ferritik çelikler) gözlemlenen akma noktası olayı ile yakından ilişkili olan bir tür mekanik davranıştır [1]. Yaşlanma sertleşmesi, karbon (C) ve azot (N) gibi arayer atomlarının dislokasyonların hareketini engellemesiyle metal ve alaşımların mekanik özelliklerinin değişmesidir [2-4]. Mekanik özelliklerdeki değişim plastik deformasyondan sonra meydana geliyorsa bu durum statik yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırılır. Eğer yaşlanma sertleşmesi olayı plastik deformasyon sırasında meydana geliyorsa bu dinamik yaşlanma sertleşmesi olarak tanımlanır [5,6]. Statik yaşlanma sertleşmesi, plastik deformasyondan sonra meydana gelen yaşlanma olarak tanımlanabilir. Statik yaşlanma sertleşmesinin etkisi, akma gerilmesinde bir artış ve % uzamada bir düşüş olarak görülmektedir. Bu etkilere hareket eden dislokasyonlar ve onları kilitleyen karbon ve azot arayer atomlarının neden olduğu kabul edilmektedir [7]. Akma noktasındaki bu artış, statik yaşlanma sertleşmesinin en önemli göstergesi

olarak kabul edilir [8-9]. Yaşlanma sertleşmesi olayı çeliklerin sünek/gevrek geçiş sıcaklığını, yüksek sıcaklık dayanımını, elektriksel ve manyetik özelliklerini de etkileyebilir [10]. Yapılan çalışmalarda, [11,12] yaşlanma sertleşmesinin etkisini azaltmak için, katı çözeltilerde arayer atomlarının oranını % 0,0001'den aşağıya düşürülmesi gerektiğini ve arayer atomlarının % 0,002 oranında olduğunda yaşlanma olayının maksimuma ulaştığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Gündüz ve Kaçar C-Mn-Al-V-N mikroalaşım çeliğinde yaşlanma sertleşmesinin oluştuğunu ve özellikle havada soğutulan numunelerin herhangi bir ısıl işlem görmemiş numunelere göre daha fazla statik yaşlanmaya maruz kaldığını göstermişlerdir [13]. İş makinelerinin jant üretiminde kullanılan S275JRC çelikleri temin edilerek yapılan bir çalışmada fabrikasyon şekliyle ve homojenleştirme + normalizasyon ısıl işlemi uygulanıp % 5 ön deforme edildikten sonra farklı sıcaklık ve zaman dilimlerinde yaşlandırılmaları sonucu optimum yaşlanma zamanı ve sıcaklığı belirlenerek yaşlanmaya bağlı olarak meydana gelen dayanım artışının yorulma dayanımını olumlu etkilediği tespit edilmiştir [14]. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan HSLA 7136 kalite çeliğin % 3 ön deforme edilerek farklı sıcaklıklardaki deformasyon yaşlanması özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada en yüksek mekanik değerler, 20 dakika sürede 150 °C'de yapılan yaşlandırma işlemlerinde elde edilmiştir. Çalışma solüsyona alma ve ardından suda soğutmanın, ön deformasyonun ve yaşlandırma sıcaklığının yüksek mukavemetli düşük alaşımlı 7136 kalite çeliğin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir [15].

Bu çalışmanın amacı toz metalurjisi yöntemi ile üretilen sade orta karbonlu bir çeliğin % 4 ön deformasyon sonrası farklı sıcaklıklarda yaşlandırılması sonucu sertlik ve çekme özelliklerinin mikroyapısal dönüşüm ile beraber karakterize edilmesidir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneysel çalışma için Höganäs AB firması tarafından ticari olarak satın alınan elektroliz yöntemi ile üretilmiş NC 100.24 saf demir tozlarına karbon kaynağı olarak ağırlıkça % 0,4 grafit ve yağlayıcı olarak ise % 0,3 Zn stearat ilave edilmiştir. Hazırlanan bu karışım tozları 700 MPa basınçta oda sıcaklığında tek eksenli presleme ile ASTM E-08 standardına göre mikro çekme test numunesi (Şekil 1) olacak şekilde şekillendirilerek $7,1 \text{ g.cm}^{-3}$ ortalama ham yoğunluğa sahip numuneler üretilmiş ve bu numuneler 1180 °C de Argon gaz atmosfer kontrollü fırında 30 dakika süre ile sinterlenerek $7,08 \text{ g.cm}^{-3}$ yoğunluğunda toz metal numuneler üretilmiştir. Sinterleme işlemi sonrası % 90 teorik yoğunluğa ulaşılmıştır. Sinterleme işlemi sonrası numunelerin % 4 ön deformasyon işlemleri ile statik deformasyon yaşlandırma sonrası çekme testleri her bir parametre için üretilen 3 numunenin Instron 3369 Bilgisayar kontrollü ve 50 kN (5 ton) çekme-basma kapasitesine sahip üniversal test cihazında 1mm/dk çekme hızında koparılmaları ile gerçekleştirilmiştir. Metalografi işlem basamaklarının uygulanması amacıyla bakalite alınan numuneler sırasıyla 120-1200'lik zımparalarda zımparalayıp pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Zımparalama işlemi bittikten sonra sırasıyla 3-1 mikronluk solüsyonlar kullanarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikro yapıların açığa çıkarılması amacıyla yağlayıcı olarak % 3'lük Nital çözeltisi (3ml HNO₃-100ml ethanol) kullanılmıştır. Mikroyapı ve kırık yüzeylerin incelenmesinde Leica optik ve JEOL JSM-6060LV marka SEM mikroskopları kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerde Vickers (HV 0,1) sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin sertliğinin belirlenmesinde yüzey ve merkez bölgelerindeki 3 farklı noktadan sertlik değerleri alınarak aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.

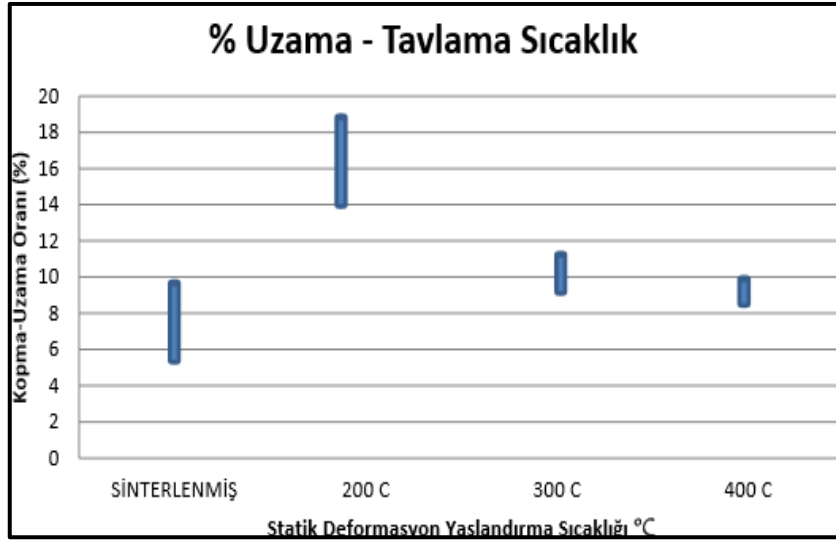


Şekil 1. Mikro çekme test numunesinin üç boyutlu çizimi ve SI sistemindeki ölçüleri

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

3.1. Statik Deformasyon Yaşlanması Sonuçları (Static Deformation Aging Results)

Geleneksel toz metalurjisi prosesleri uygulanarak üretilen ve ardından % 4 ön gerinim uygulanarak 200, 300 ve 400 °C sıcaklıklarda yaşlandırılmış numuneler, çekme test cihazında 1 mm/dk sabit çekme hızında çekilmesi ile aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



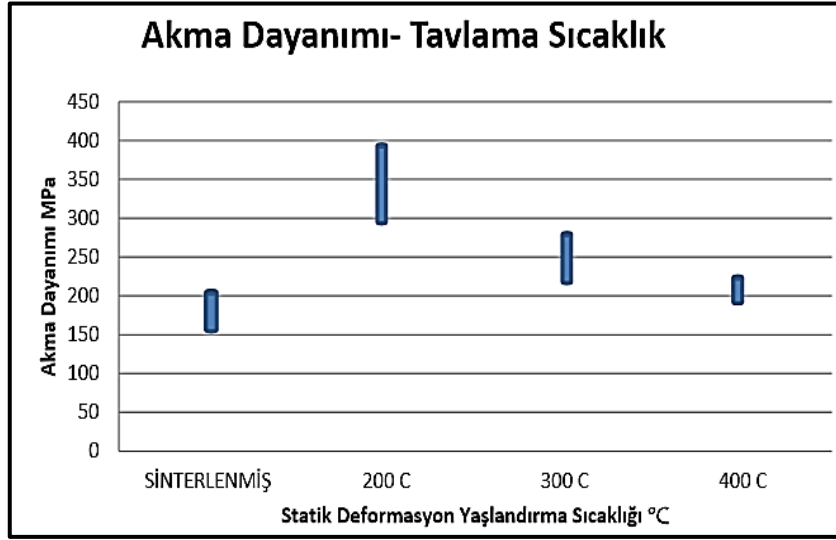
Şekil 2. Statik deformasyon yaşlandırma sıcaklığına bağlı % kopma-uzama değişimleri

Şekil 2'deki grafikten de görüleceği üzere sinterlenmiş numuneye uygulanan statik deformasyon yaşlanma işleminin % uzama oranında belirgin bir artışa neden olduğu görülmüştür. Bu durum öncelikle beklenmeyen bir özellik olarak görülmektedir. Çünkü bu işlem esnasında arayer atomlarının dislokasyonlar etrafında Cottrell atmosferi oluşturmasından kaynaklanan bir dayanım artışı ve % uzamada azalma beklenir. Ancak düşük statik deformasyon yaşlanma sıcaklığı olan 200 °C'de, en yüksek % uzama miktarı elde edilmiştir. Bu durum, bu sıcaklıkta Cottrell etkisi henüz devreye girmeden önce ön gerinim uygulanan malzemenin yeniden kristalleşme sürecine girmiş olabileceğini göstermektedir.

Bilindiği gibi ön gerinim uygulanan, yani soğuk plastik deformasyon uygulanmış malzeme yeniden kristalleştirildiğinde % uzama değerleri artabilir. Ancak bu çalışmada kullanılan Fe esaslı bu alaşım için 200 °C yeniden kristalleşme sıcaklığı için etkisiz bir sıcaklıktır.

Şekil 2'deki sonuçlar incelendiğinde tavlama sıcaklığı ile % uzama miktarı arasında ters orantı gözlenmiştir. Tavlama sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, % uzama miktarı o derece düşük olmuştur. Bu nedenle en düşük % uzama miktarı, sinterlenmiş numuneden sonra, 400 °C sıcaklıkta statik deformasyon ile yaşlandırılan numunelerde görülmüştür.

Bu sonuçlar, zaten statik deformasyon yaşlanma sıcaklığı ile Cottrell etkisini sağlayacak arayer C atomunun yayılımının hızlanmasını sağladığından, dislokasyon hareketleri çok erken zamanda ve etkili bir şekilde engellenmesiyle % uzama değerleri azalmıştır. Bu durum aynı zamanda dinamik gerinim yaşlanması işleminde de karşılaşılan bir durumdur. Bir çalışmada DP600 çelikleri 400 °C civarlarında çekme testi uygulandığında, çekme değerleri artarken % uzama değerlerinin düştüğü bildirilmiştir [16].

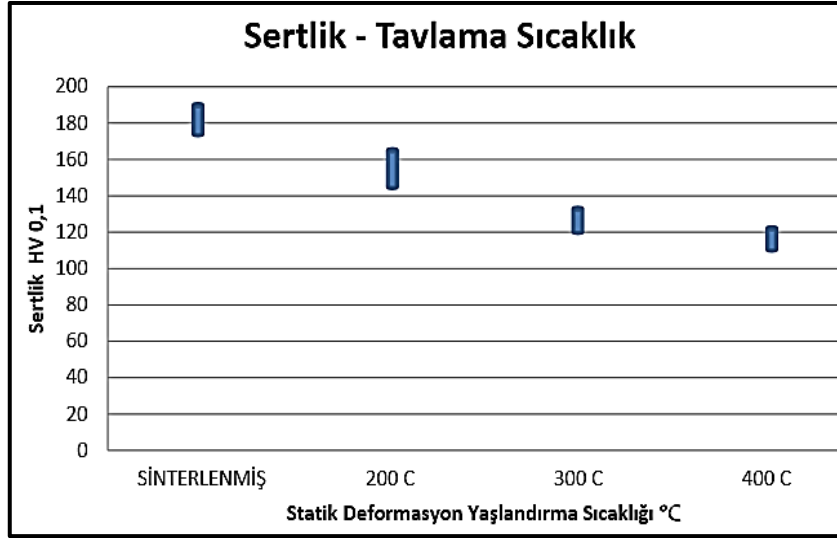


Şekil 3. Statik deformasyon yaşlandırma sıcaklığına bağlı akma dayanımı değişimleri

Yapılan statik deformasyon yaşlandırma işlemleri sonrasında Şekil 3'deki grafikten de görüleceği üzere, sinterlenmiş numuneye göre genel olarak akma dayanımlarında bir artış görülmüştür. Akma dayanımları incelendiğinde en yüksek akma değeri en düşük statik deformasyon sıcaklığı olan 200°C'de görülmüştür. Statik deformasyon sıcaklığı arttıkça akma dayanımı azalmıştır. En düşük akma dayanımı 400°C'de elde edilmiştir. Literatüre bakıldığında statik deformasyon uygulanan farklı malzemelerde artan statik deformasyon sıcaklığı ile akma dayanımlarında azalma görülürken % uzama miktarlarında artış görülmüştür. Ancak bu çalışmada akma dayanımı azalırken % uzama miktarlarında da azalma görülmüştür. Şekil 3'de verilen akma dayanımı değişimleri statik deformasyon yaşlanması işlemlerinden beklenen sonucu 200 °C'de karşılamıştır. Ancak akma dayanımı değerlerinin artışı beklenirken, bu değerlerin muhtemel düşüş nedeni sıcaklığın yeniden kristalleşme sıcaklığına yakın olmasından dolayı düşünülebilir. Yine de akma dayanım değerleri % uzama değerleri ile uyumlu değildir. Bu durum ön deformasyon uygulandığında kısmen dislokasyon yoğunluğunun artışına bağlı soğuk plastik deformasyon sertleşmesinin 200 °C'de henüz toparlanmaya bağlı yumuşama etkisi (akma dayanımı) henüz gerçekleşmediğine bağlanabilir. Çünkü statik deformasyon yaşlanma sıcaklığının artışı ile akma ve sertliğin azalması, statik deformasyon yaşlanması mekanizmasından ziyade toparlanma mekanizmasının baskın olduğunu göstermiştir.

3.2. Sertlik Sonuçları (Hardness Results)

Statik deformasyon sıcaklıklarına bağlı olarak numunelerin sertlik sonuçları Şekil 4'de verilmiştir.

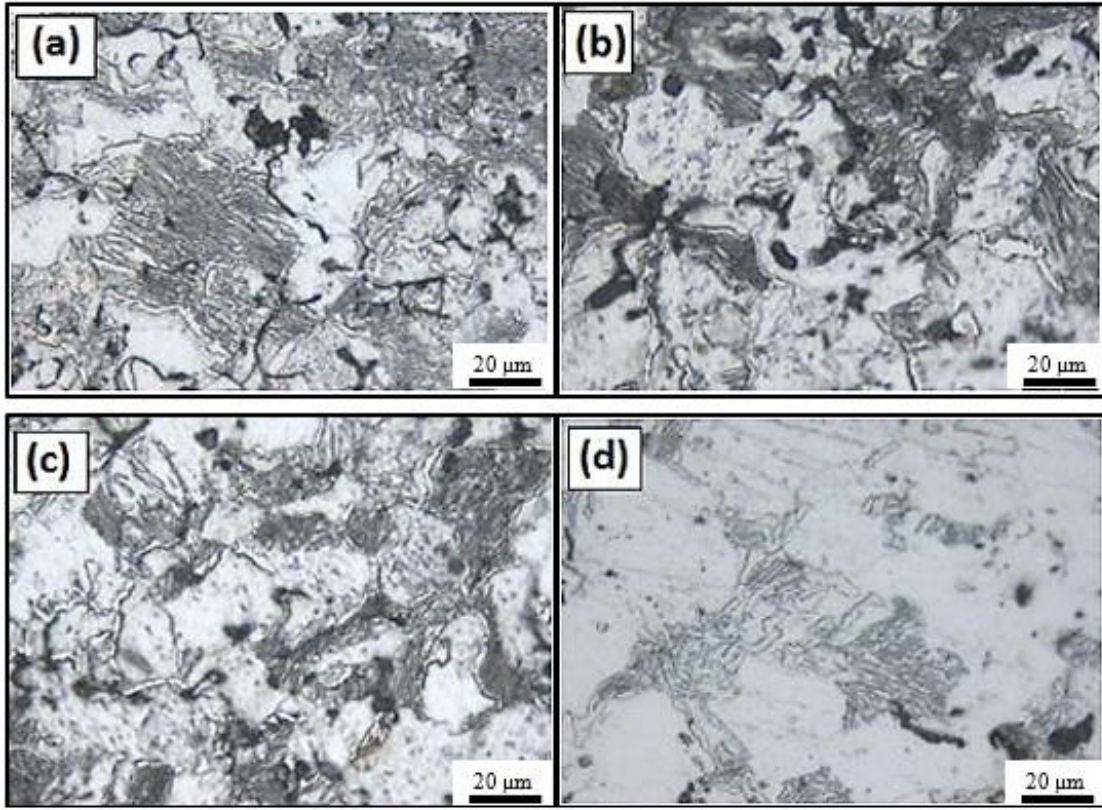


Şekil 4. Statik deformasyon yaşlandırma sıcaklığına bağlı sertlik değişimleri

Sinterlenmiş şartlarda sertlik değerleri ortalama 195 HV_{0,1} iken Şekil 3'de görüldüğü üzere statik deformasyon sıcaklığı arttıkça numunelerin sertlikleri azalmıştır ve bu sertlik sonuçları akma dayanımı değerleri ile uyumludur. Ancak sinterlenmiş şartlarda sertlik ve akma değerleri uyumsuzdur. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Toz metalurjisi ile üretilen malzemeler gözenek barındırdığından, yarı dinamik sayılan çekme testi sırasında yükü sinterlenmiş tozlar arasındaki boyunlaşmış bölgeler taşımaktadır. Bu sinterlenmiş malzeme henüz gerilim altında değil iken sinterlenmiş boyunlar genellikle düşük akma/çekme dayanımı göstermektedir. Sertlik değerlerinin akmaya göre yüksek çıkmasının nedeni ise bu çalışmada uygulanan sertlik yükü değerlerinin düşük olması (mikro sertlik) mikro yapıda gözeneklerden uzak ve genellikle perlitik alanlardan sertlik ölçümü yapıldığından, sinterlenmiş sertlik değerleri akma dayanımına göre fazla ve uyumsuzdur. En düşük sertlik sonucu en yüksek statik deformasyon sıcaklığı olan 400 °C elde edilmiştir. 200 °C statik deformasyon sıcaklığında numune sertliği 161 HV_{0,1} ölçülmüşken, statik deformasyon sıcaklığı 300 °C uygulandığı zaman sertlik değeri 130 HV_{0,1} ve 400 °C ise 121 HV_{0,1} olarak ölçülmüştür. Yapılan tüm sertlik testi sonucunda, sertlik değerlerinde normalden düşük sonuçlar görülmüştür. Bunun nedeni de toz metalurjisi ile üretilen malzemelerdeki gözeneklerdir. Numunelerimizin yoğunluğunun 7,08 – 7,1 g.cm⁻³ olarak ölçülmüş olması da içerdiği gözeneklerden kaynaklanır.

3.3. Mikroyapı Sonuçları (Microstructure Results)

Aşağıdaki Resim 1'de deneysel çalışmalar bölümünde anlatıldığı gibi metalografik olarak hazırlanmış sinterlenme sonrası ile 200 °C, 300 °C ve 400 °C sıcaklıkta statik deformasyon işlemi sonrası optik mikro yapı görüntüleri verilmiştir.



Resim 1. Optik mikroyapı görüntüleri; (a) Sinterlenmiş (b) 200°C'de (c) 300°C'de (d) 400°C'de statik deformasyon ile yaşlandırılmış numuneler

Mikroyapı karakterizasyonları sonucunda Resim 1(a-d)'de ferrit + perlitik yapıların görüldüğü ayrıca toz metalürjisi yöntemi ile üretimin doğal bir sonucu olarak gözeneklerin de varlığı gözlemlenmiştir [17]. Mikroyapılar incelenerek sinterlenmiş numuneye ait % perlit hacim oranları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda artan sıcaklık ile perlit miktarında azalma görülmüştür. Çıkan sonuçlara göre aşağıdaki Eş. 1'de verildiği gibi, ters kaldıraç kuralına göre bileşik C oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Ortalama \% perlit oranı} = \frac{\% C - 0,025}{0,8 - 0,025}$$

$$0,47 = \frac{\% C - 0,025}{0,77}$$

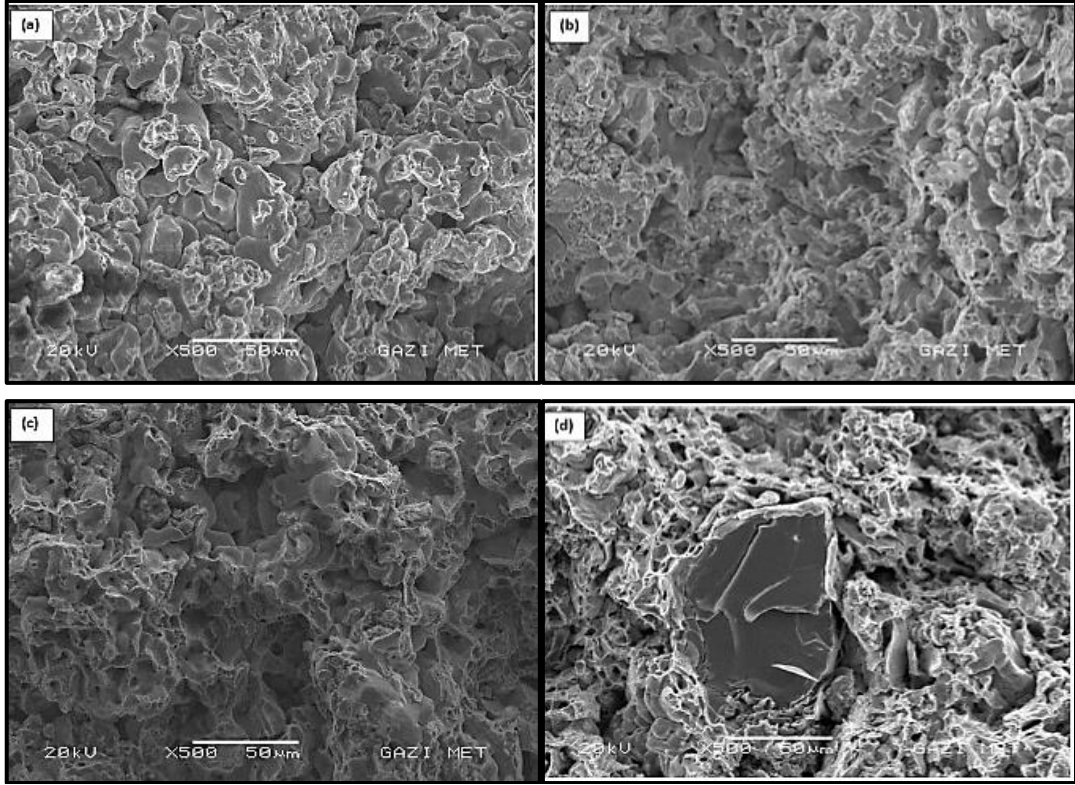
$$\% C = 0,39$$

1

Çalışma sonucu grafit miktarında önemli bir azalma görülmemiştir. Bu çalışmada üretilen sade karbonlu toz metalürjisi çeliğin orta karbonlu olduğu anlaşılmıştır.

3.4. Kırık Yüzey İncelemeleri (Fractured Surface Investigations)

Çekme testi uygulaması sonrası kopan numunelerin, kopma yüzeylerinden kırılma tiplerini belirlemek için SEM cihazı kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler Resim 2'de verilmiştir.



Resim 2. SEM kırık yüzey görüntüleri; (a) Sinterlenmiş (b) 200 °C, (c) 300 °C (d) 400 °C'de statik deformasyon ile yaşlandırılmış numuneler

Resim 2’de görüldüğü üzere sinterlenmiş, 200 ve 300°C’de yaşlandırılmış numunelerde özellikle sinterlenme bağı yapmış çekme yükünü taşıyan sinter bağlarında mikro çukurcuk kopma tipleri görülmüştür ancak 400 °C’de statik deformasyon yaşlandırılan numunede klivaj kırılma gerçekleşmiştir. Diğer sıcaklıklarda tavlama sıcaklığına göre % uzama miktarı 400 °C’de en düşük olarak görülmüştür. 200 °C’de statik deformasyon uygulanmış numunede ise en yüksek % uzama miktarı görülmüştür. SEM görüntüsündeki gözeneklerde sünek yapının işareti. Özellikle toz metalurjisi malzemelerinde olduğu gibi çekme yükünü taşıyan sinter boyunları kopmaya kadar yük taşıyabiliyorsa genellikle kopma yüzeyleri mikro çukurcukları açığa çıkartabilir. Bu mevcut gözenekler çentik etkisi yaptığından kopma için gerekli mikro çatlaklar tane içlerinden ilerleyebilir. Bu çalışmada olduğu gibi cottrell etkisi daha etkili olan 400 °C’de yaşlandırılmış numunede dislokasyon hareketlerinin engellenmesine bağlı bu hat üzerindeki düzlemsel yarılmaya neden olabilir. Bu da klivaj gibi kırılma tipi ile sonuçlanmıştır. Bu aynı zamanda kopma yüzeylerine yakın gözenek miktarları ile de orantılı olduğu düşünülebilir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi bulunmuştur;

- Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen % 0,4 C’lu toz metalin presleme sonrası yoğunluğu 7.1 g.cm^{-3} , sinterleme sonrası ise ortalama $7,08 \text{ g.cm}^{-3}$ olarak ölçülmüştür. 7.1
- % 4 ön deformasyon sonrasında uygulanan tavlama sıcaklığı arttıkça akma dayanımının azaldığı tespit edilmiştir.
- % Uzama miktarı, tavlama sıcaklığı arttıkça azalan akma dayanımı ile ters orantılı artması gerekirken, akma dayanımı ile doğru orantılı azaldığı görülmüştür. Statik deformasyon sıcaklığı arttıkça % uzama miktarı da azalmaktadır.
- Uygulanan statik deformasyon sıcaklığı arttıkça sertlik değerlerinin ters orantılı olarak azaldığı ölçülmüştür.

- Yapılan çalışmalar, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen % 0,4 C'lu çeliklere statik deformasyon yaşanması uygulanabildiğini göstermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

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

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G.E. Dieter, Mechanical Metallurgy, Mc Graw-Hill BookCompany, New York, 1961.
- [2] Chiew, S.P., Zhao, M.S. and Lee, C.K., “Mechanical properties of heat-treated high strength steel under fire/post-fire conditions”, Journal of Constructional Steel Research, 98: 12–19 (2014).
- [3] Cottrell, A. H. and Bilby, B.A., “Dislocation theory of yielding and strainageing of iron”, Proc. Phys. Soc., 62: 49-62 (1949).
- [4] Karahan, T., Ertek, E. H., Tümer, M. and Kaçar, R., “Strengthening of AISI 2205 duplex stainless steel by strain ageing”, Materials and Design, 55: 250–256 (2014).
- [5] Josefson, B., Nilsson, J.O. and Wilson, A., “Phase transformation in duplex steels and the relation between continuous cooling and isothermal heat treatment”, Proc. Conf. Dup. Stainless Steel, 91:67-69 (1991).
- [6] Pettersson, C. O., Fager, S. Å., & Steel, A. S. (1995). Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507. *AB Sandvik Steel, Sweden*.
- [7] Gündüz, S. (2008). Static strain ageing behaviour of dual phase steels. *Materials Science and Engineering: A*, 486 (1-2), 63-71.
- [8] Lee, S. H., Choi, J. Y., & Nam, W. J. Hardening behavior of a 304 stainless steel containing deformation-induced martensite during static strain aging. *Materials transactions*, (2009).
- [9] Glen, J., “Effect of alloying elements on the high temperature tensile strength of normalised low carbon steel”, Journal of the Iron and Steel Institute, 186: 21-32 (1957).
- [10] Strutt, A.J. and Larimer, J.W., “Structure property relationships of Zeron 100”, Proc. Conf. Phase Transformation, Cambridge, 178 (1987).
- [11] Graff, S., Forest, S., Strudel, J. L., Prioul, C., Pilvin, P. And Béchade, J. L., “Strain localization phenomenon associated with static and dynamic strain ageing in notched specimens: experiments and finite element simulations”, *Materials Science and Engineering A*, 387–389: 181–185 (2004).
- [12] Wilson, D.V. and Russel, B., “The contribution of precipitation to strain ageing in low carbon steels”, *Acta Metall.*, 8: 468-479 (1960).
- [13] Gündüz, S. & Kaçar, R. (2000). Static Strain Ageing In Microalloyed Steels *Teknoloji*, 3(4).
- [14] Ahmet Bülbül, “İş Makinelerinin Jantlarında Statik Yaşlanmanın Etkisinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014).

- [15] Şadettin Okumuş, “Düşük Karbonlu Mikroalaşımli Çeliklerde Soğuma Ve Deformasyon Yaşlanması Mekanik Özelliklere Etkisi” Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [16] Ghosh, A., Chatterjee, A., (2008). Ironmaking & Steelmaking. London: Prentice Hall of India Book Company.
- [17] Altuntaş, O., & Güral, A. (2019). Designing spherical cementite in bainitic matrix (SCBM) microstructures in high carbon powder metal steels to improve dry sliding wear resistance. *Materials Letters*, 249, 185-188.