

Aynı Sıcaklıkta Uygulanan Isıl İşlem ve Farklı Oranda Uygulanan Redüksiyon İşleminin Fren Borularının Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Ozan KOYUNCU¹ , Burak ÇELİK¹ , Yasin AKGÜL^{2,3} , Alper İNCESU^{2,3} 

¹Bant Boru San. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Departmanı, 41480 Gebze/Kocaeli, Türkiye

²K-O Faktör Teknoloji ve Mühendislik, 78050, Karabük, Türkiye

³Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü, 78050, Karabük, Türkiye

Başvuru: 11/03/2024

Kabul: 10/05/2024

Çevrimiçi Basım: 01/07/2024

Öz

Bu çalışmada, 3,40 mm ve 4,75 mm dış çapa sahip fren borularına 3,20 mm ve 4,65 mm dış çapa sahip olacak şekilde redüksiyon işlemi uygulanmıştır. Ardından fren borularına 450 °C sıcaklık ve 30 dk. süre ile tavlama ısıl işlem uygulanmış ve numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Başlangıçtaki 2 adet referans boru ile redüksiyon ve ısıl işlemlerle elde edilen 6 farklı parametredeki numuneler karşılaştırmalı olarak mekanik özellikler ve mikroyapı bakımından incelenmiştir. Uygulanan redüksiyon işlemi ile 4,75 mm dış çap borudan 4,60 mm dış çap boruya düşüşte akma mukavemetinde %20,6 oranında artış, çekme mukavemetinde %11,4 artış, kopma uzamasında %34,3 oranında düşüş tespit edilmiştir. Ayrıca sertlik değerlerinde de %27,1 oranında artış tespit edilmiştir. 3,40 mm dış çap borudan 3,20 mm dış çap boruya düşüşte akma mukavemetinde %4,1 oranında artış, çekme mukavemetinde %0,7 artış tespit edilmiş; malzemeler çok kırılğan olduklarında dolayı kopma uzama değerleri çekme testinde belirlenememiştir. Ayrıca sertlik değerlerinde de %1,5 oranında artış tespit edilmiştir. Uygulanan tavlama ısıl işlem parametrelerinin sıcaklık ve süre olarak yeterli olduğu mekanik özelliklerdeki değişimlerden anlaşılmaktadır. Eğme deneyi sonucunda elde edilen verilerden 4,75 mm dış çap borudan 4,65 mm dış çapa düşüşte diğer mekanik özellikler ile paralel bir davranış sergilediği ancak 3,65 mm dış çap borudan 3,40 mm dış çapa düşüşte bunun tam tersi bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

Fren borusu, boru redüksiyonu, tavlama, mekanik özellikler.

Investigation of the Effect of Heat Treatment Applied at the Same Temperature and Reduction Process Applied at Different Rates on the Mechanical Properties of Brake Pipes

Abstract

In this study, brake pipes with 3.40 mm and 4.75 mm outer diameters were reduced to 3.20 mm and 4.65 mm outer diameters. Then, the brake pipes were subjected to a temperature of 450 °C and 30 minutes. Annealing heat treatment was applied for a period of time and the samples were allowed to cool at room temperature. Samples with 6 different parameters obtained by reduction and heat treatments, along with the initial 2 reference pipes, were comparatively examined in terms of mechanical properties and microstructure. With the reduction process applied, a 20.6% increase in yield strength, a 11.4% increase in tensile strength, and a 34.3% decrease in elongation at break were detected when decreasing from 4.75 mm outer diameter pipe to 4.60 mm outer diameter pipe. Additionally, a 27.1% increase in hardness values was detected. When decreasing from 3.40 mm outer diameter pipe to 3.20 mm outer diameter pipe, a 4.1% increase in yield strength and a 0.7% increase in tensile strength were detected; Since the materials are very brittle, elongation values at break could not be determined in the tensile test. Additionally, a 1.5% increase in hardness values was detected. It is understood from the changes in mechanical properties that the applied annealing heat treatment parameters are sufficient in terms of temperature and time. From the data obtained as a result of the bending test, it was observed that the decrease from 4.75 mm outer diameter pipe to 4.65 mm outer diameter exhibited a parallel behavior with other mechanical properties, but that it exhibited the opposite behavior when falling from 3.65 mm outer diameter pipe to 3.40 mm outer diameter.

Key Words

Brake pipes, tube reduction, annealing, mechanical properties.



*Sorumlu Yazar: alperincesu@karabuk.edu.tr

Bu makaleyi alıntalamak için; Ozan KOYUNCU ve ark., Aynı Sıcaklıkta Uygulanan Isıl İşlem ve Farklı Oranda Uygulanan Redüksiyon İşleminin Fren Borularına Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, *Journal of Steel Research and Development*, 5(1), 1-8.

1. Giriş

Soğuk boru çekme (redüksiyon), hassas boyutlara, iyi yüzey kalitesine ve yüksek mekanik özelliklere sahip yüksek kaliteli borular üretmek için kullanılan bir metal işleme yöntemidir. Bu yöntem ile üretilen borular, mukavemet homojenliğinin, mikro yapının ve uzun ürün ömrünün önemli tasarım parametreleri olduğu uygulamalar için kullanılmaktadırlar (Bella et al. 2021). Çelik boruların soğuk çekilmesi için kullanılan iki farklı tip işlem vardır: sabit tapayla çekme işlemi ve içi boş batırma işlemi. Sabit tapa ile çekme işleminde, dış çap ve boru duvar et kalınlığı azaltılmaktadır. Giriş besleme stoğunun kalınlığına bağlı olarak sabit silindirik veya sabit konik tapa kullanılmaktadır. Konik tapa, daha iyi malzeme akışı sağlayan geometrisi sayesinde daha yüksek çekme hızının kullanılmasına olanak sağlamaktadır. İçi boş batırma işleminde ise, boru duvar et kalınlığı aynı kalmakta ve dış boru çapı azalmaktadır (Neves and Button 2005; Mojžiš et al. 2016). Deformasyon sırasında duvar kalınlığındaki değişiklik, borunun giriş boyutlarına ve kalıp geometrisine bağlıdır (Pernis 2006).

Soğuk çekme işlemi sırasındaki düşük sıcaklık, dinamik yeniden kristalleşmeye izin vermez ve dolayısıyla dislokasyonların birikmesi nedeniyle malzeme sertleşmesi meydana gelir (Das and Pradhan 2017). Şekillendirme işlemi sırasında taneler ana deformasyon yönünde uzamaktadırlar. Çok yüksek düzeyde deformasyon ve sertleşme, malzeme plastisitesinin tükenmesi ve kusur riskiyle ilişkilidir ve bu nedenle yeniden kristalleştirme tavlama gerekmektedir. Tavlama sırasında deformasyonsuz yeni eş eksenli taneler oluşmaktadır (Belyakov et al. 2004; Raji and Oluwole 2011). Tavlama iki ana aşamadan oluşmaktadır: geri kazanım ve yeniden kristalleşme. Geri kazanım, yüksek açılı tane sınırlarının hareketini gerektirmeyen depolanmış enerjiyi serbest bırakan tüm süreçleri içermektedir ve düşük açılı hücre sınırlarının oluşturulması yoluyla depolanan enerjiyi azaltmak için dislokasyonların yok edilmesini ve yeniden düzenlenmesini kapsamaktadır. Öte yandan yeniden kristalleşme, depolanan enerjinin etkisiyle yüksek açılı tane sınırlarının yer değiştirmesidir (Almojlil 2010).

Bakır kaplı fren boruları ile ilgili daha önce gerçekleştirilen bir çalışmada fren borularına 3 farklı hızda (27 m/dk, 36 m/dk ve 45 m/dk) redüksiyon işlemi uygulanarak 4,75 mm dış çap ölçüsüne sahip fren borularının dış çapları 4,60 mm ölçüsüne getirilmiştir (Koyuncu et al.). Kritik redüksiyon hızının 36 m/dk ile 45 m/dk arasında bir hız olduğu değerlendirilmiştir. Diğer bir çalışmada ise ısıtma işlemi bakır kaplı çelik boruların mekanik özelliklerine etkisi araştırılmış ve optimum ısıtma işlem parametresi olarak 450 °C sıcaklık ve 30 dk. süre belirlenmiştir (Koyuncu et al.).

Bu çalışmada ise redüksiyon hızı ve redüksiyonun ardından uygulanan tavlama ısıtma işlem parametreleri sabit tutulmuş, farklı oranlarda uygulanan redüksiyon ve redüksiyonun ardından uygulanan tavlamanın mekanik özellikler üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

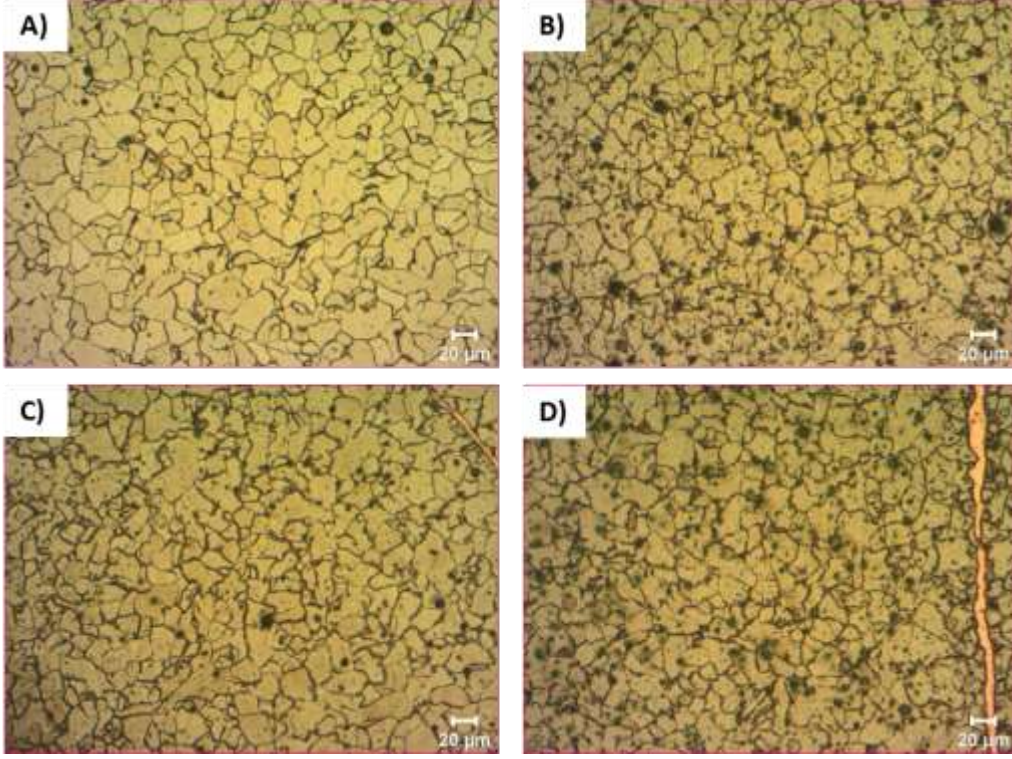
Bu çalışmada kullanılan fren boruları Bant Boru AŞ'den temin edilmiştir. Temin edilen referans numune konumunda olan 3,40 mm ve 4,75 mm dış çapa sahip fren boruları 0,35 mm kalınlığındaki DC03 kalite çelik saçlara 3-5 µm bakır kaplamanın ardından 720° kıvrırma yöntemi ile elde edilmiş ve herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmamıştır. Standart olarak üretilmiş olan 3,40 mm ve 4,75 mm dış çapa sahip fren boruları 3,20 mm ve 4,65 mm dış çapa sahip olacak şekilde içi boş batırma işlemi yöntemi ile 36 m/dk hızda redüksiyon işlemi uygulanmıştır. Bu şekilde 4 farklı dış çapa sahip fren borusu elde edilmiştir. Ardından mamul haldeki tüm fren borularına 450 °C sıcaklık ve 30 dk. süre ile tavlama ısıtma işlemi uygulanmış ve numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Başlangıçtaki 2 adet referans boru ile redüksiyon ve ısıtma işlemlerle elde edilen 6 farklı parametredeki numuneler karşılaştırmalı olarak mekanik özellikler ve mikroyapı bakımından incelenmiştir. Makale akışı boyunca numune kodlarının takibi açısından ısıtma işlem görmemiş numuneler numune çap ölçüleri ile kodlanmış (3,20; 3,40; 4,65; 4,75), ısıtma işlem görmüş olan numuneler ise çap ölçülerinin yanına "HT" yazılarak kodlanmıştır (3,20HT; 3,40HT; 4,65HT; 4,75HT).

Numunelerdeki mikroyapı değişimleri Nikon Eclipse MA200 ters metalürjik optik mikroskop ile incelenmiştir. Mikroyapı incelemelerinden önce SiC kağıtlarla (200, 400, 600, 800, 1200, 2000, 2500 grit) zımparalama, parlatma (1 ve 3 µm elmas süspansiyonlar) ve dağlama (%5 Nital çözeltisi) metalografik işlemleri uygulanmıştır (Albahlol et al. 2023). Çekme testleri Zwick/Roell Z600 Ünlversal Test Makinesinde 2 mm/dk test hızında EN ISO 6892-1 (ISO 2016) metalik malzemelerde çekme deney standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Buğan et al. 2022). Boruların kesit alanına uygun olarak uzamanın ölçüldüğü test boyu 20 mm olarak alınmıştır. Vickers mikrosertlik testi, Q10 A+ QNESS mikrosertlik test cihazı ile 1000g yük ve 15 sn bekleme süresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ortalama sertlik değerleri 5 farklı noktadan alınan ölçümlerden hesaplanmıştır. Eğme deneyi, Zwick/Roell Z600 Ünlversal Test Makinesinde 2 mm/dk test hızında EN ISO 7438 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm numunelere 90°'lik eğilme açısına ulaşana kadar deformasyon uygulanmıştır.

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

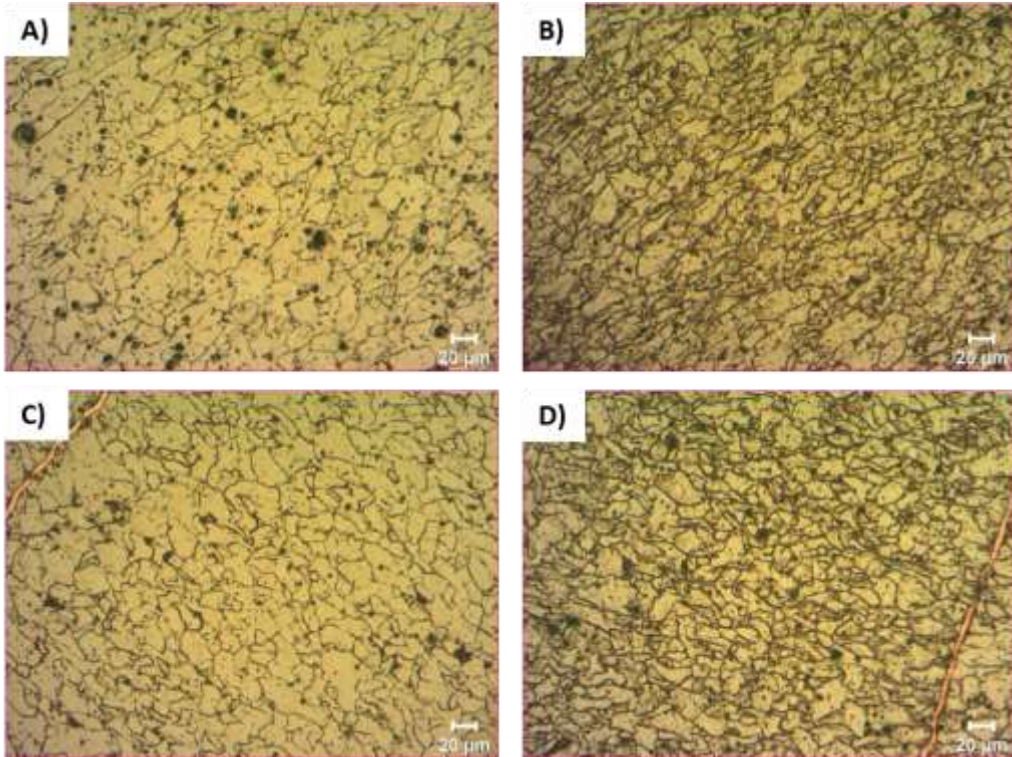
Fren borularının yan kesitinden alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 1a ve Şekil 1c karşılaştırıldığında yani boru et kalınlığı sabit kalmak şartı ile uygulanmış olan %2,1 oranındaki redüksiyon işlemiyle beraber mikroyapısal olarak belirgin bir farklılık meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise redüksiyon ile boru iç alanının daralmasına rağmen boru et kalınlığı sabit kalmasıdır. Şekil 1a ile Şekil 1b veya Şekil 1c ile Şekil 1d kıyaslandığında ise uygulanan

ıslıl işlem ile de mikroyapısal olarak belirgin bir farklılık meydana gelmediği tespit edilmektedir. unkü uygulanan ıslıl işlem sıcaklığı (450 °C), eliđin rekristalizasyon sıcaklığının altındadır (Choi et al. 2002).



şekil 1. Fren borularına ait optik mikroskop görüntüleri a) 4,75 b) 4,75HT c) 4,65 d) 4,65HT

Boru iç çapının 3,40'tan 3,20'ye düşmesiyle beraber, boru et kalınlığı sabit kalmak şartı ile %5,9 oranında redüksiyon uygulanmıştır (şekil 2). Mikroyapı zellikleri, %2,1 oranında uygulanan redüksiyon oranına (şekil 1'de gösterilen numunelere) benzer davranış sergilemiştir.



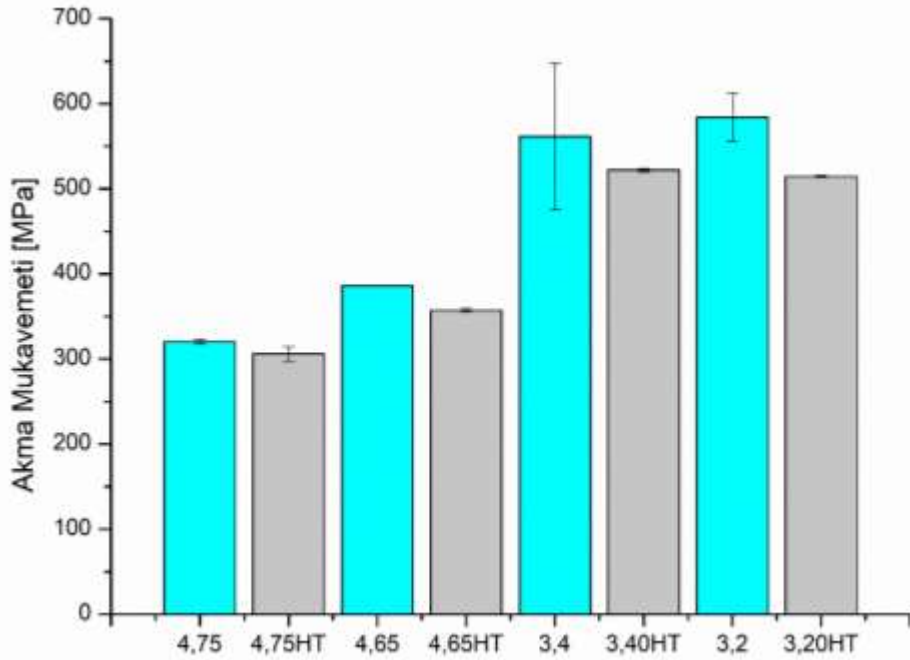
şekil 2. Fren borularına ait optik mikroskop görüntüleri a) 3,40 b) 3,40HT c) 3,20 d) 3,20HT

Fren borularına uygulanan çekme testi neticesinde elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve kopma uzaması verilerinin karşılaştırmalı sonuçları Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te sütun grafikleri şeklinde karşılaştırmalı olarak ayrı ayrı verilmiştir. Ayrıca Tablo 1'de tüm mekanik test sonuçları toplu halde verilmiştir.

Tablo 1. Mekanik Test Sonuçları

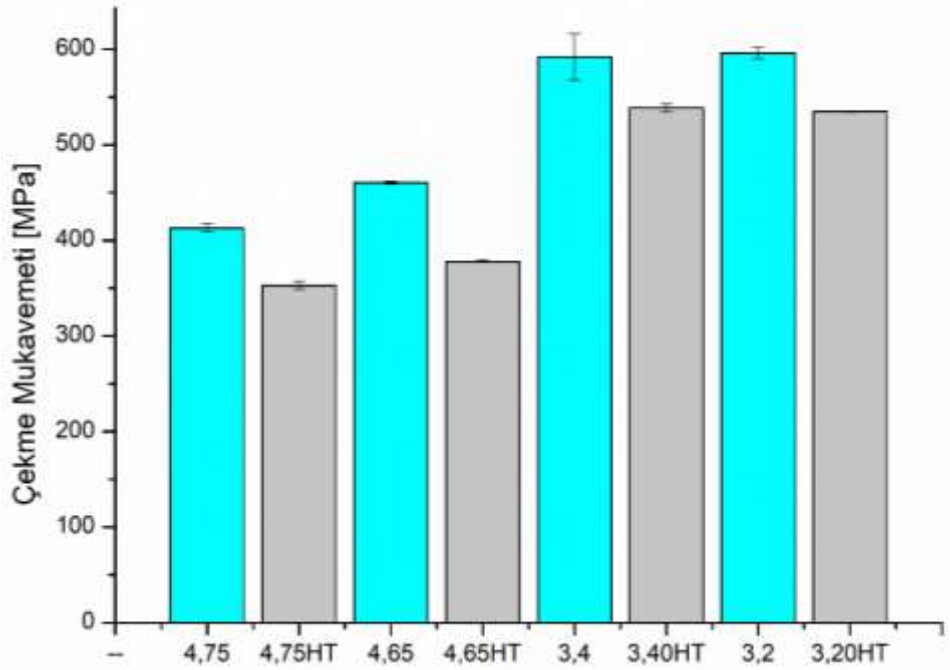
	Akma Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Kopma Uzaması [%]	Mikro Sertlik [HV]
4,75	320,0±2,8	413,0±4,2	32,1±2,0	142,0±10,6
4,75HT	306,0±8,5	353,0±4,2	37,8±2,2	115,5±4,2
4,65	386,0±0,0	460,7±1,4	21,1±1,3	160,5±2,8
4,65HT	357,0±2,1	378,0±1,4	32,4±1,4	155,5±7,8
3,40	561,3±85,6	592,0±24,0	-	220,5±2,1
3,40HT	522,0±2,1	538,7±4,2	14,6±0,0	202,5±1,4
3,20	584,0±28,3	596,0±5,7	-	223,8±5,7
3,20HT	514,7±0,7	534,7±0,7	18,3±3,9	204,3±0,7

Akma mukavemeti değerleri kıyaslandığında (Şekil 3) uygulanan redüksiyon işlemi ile hem 4,75 mm çaptan 4,65 mm çapa düşüşte, hem de 3,40 mm çaptan 3,20 mm çapa düşüşte belirgin şekilde mukavemet artışı gözlemlenmektedir (turkuaz sütunlar). Bunun sebebi uygulanan redüksiyon işlemi ile birlikte malzeme iç yapısında deformasyon sertleşmesi mekanizmalarının aktive olmasıdır (Almojil 2010). 4,75 mm çaptan 4,65 mm çapa düşüşte %20,6'lık bir artış gözlemlenirken 3,40 mm çaptan 3,20 mm çapa düşüşte ise %4,0'lık bir artış gözlemlenmiştir. Bilindiği üzere uygulanan deformasyonla birlikte malzeme iç yapısındaki dislokasyon yoğunluğu artmakta bu da dislokasyonların birbirlerini kilitlemesini kolaylaştırarak mekanik dayanım artışına yol açmaktadır (Li et al. 2022). Uygulanan tavlama ısıl işlemi ile birlikte beklenildiği üzere mukavemet değerlerinde belirgin şekilde düşüşler gözlemlenmiştir (gri sütunlar). Tavlama işlemi deformasyon ile iç yapıda artan dislokasyon yoğunluğu azalarak mekanik dayanımlarda düşüşlere yol açmıştır (Ridzoň et al. 2015).



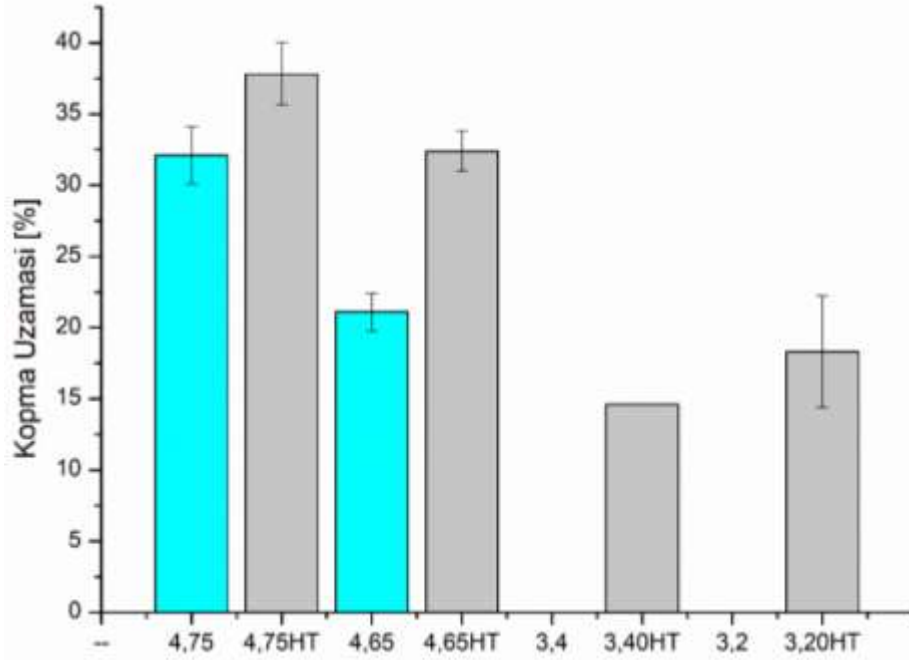
Şekil 3. Çekme testi sonrası elde edilen akma mukavemeti değerlerinin karşılaştırması

Çekme mukavemeti değerleri kıyaslandığında (Şekil 4) akma mukavemeti değerlerindeki değişime paralel şekilde uygulanan redüksiyon işlemi ile hem 4,75 mm çaptan 4,65 mm çapa düşüşte, hem de 3,40 mm çaptan 3,20 mm çapa düşüşte belirgin şekilde mukavemet artışı gözlemlenmektedir (turkuaz sütunlar). 4,75 mm çaptan 4,65 mm çapa düşüşte %11,6'lık bir artış gözlemlenirken 3,40 mm çaptan 3,20 mm çapa düşüşte ise %0,7'lık bir artış gözlemlenmiştir. Uygulanan tavlama ısıl işlemi ile birlikte beklenildiği üzere mukavemet değerlerinde belirgin şekilde düşüşler gözlemlenmiştir (gri sütunlar).



Şekil 4. Çekme testi sonrası elde edilen çekme mukavemeti değerlerinin karşılaştırması

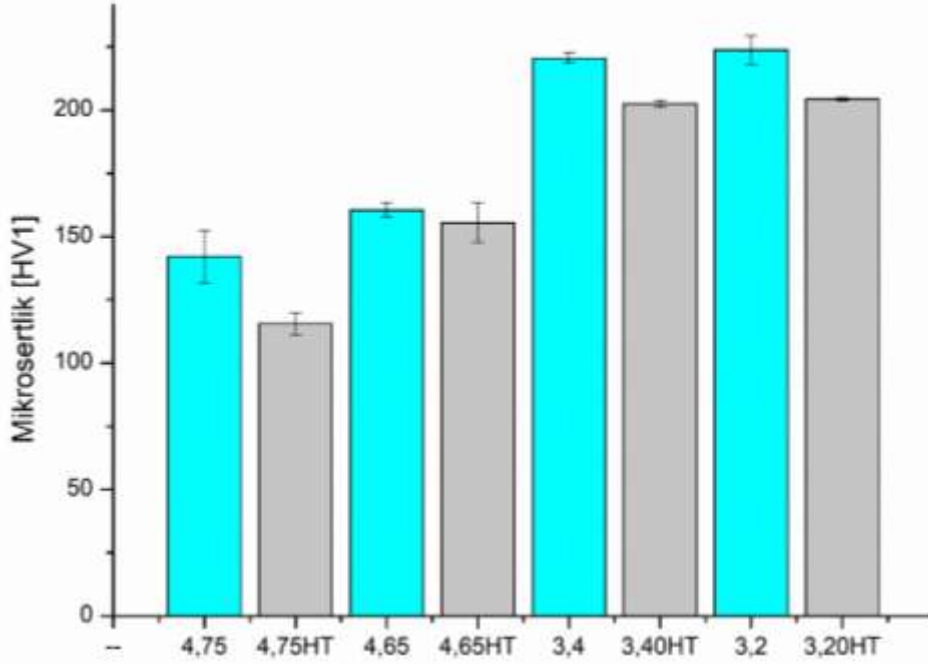
Kopma uzaması değerleri kıyaslandığında (Şekil 5) akma ve çekme mukavemetinde değişimle ters orantılı olarak uygulanan redüksiyon işlemi ile 4,75 mm çaptan 4,65 mm çapa düşüşte kopma uzaması değerlerinde azalma gözlemlenmiştir (turkuaz sütunlar). 3,40 mm çap ve 3,20 mm çap ısılsız numunelerden uzama ölçülememiştir çünkü redüksiyon işlemi birlikte numune gevrekleşmiştir, Tablo 1'deki sertlik sonuçları bunu desteklemektedir. Uygulanan tavlama ısılsız işlemi ile beklenildiği üzere mukavemet değerlerinde belirgin şekilde düşüşler gözlemlenmiştir (gri sütunlar). Deformasyon sertleşme mekanizmasının bir sonucu olarak dislokasyonların birbirlerini kilitlemesiyle mikroyapıdaki atomsal hareketliliğin kısıtlanmasının bir sonucu olarak kopma uzaması değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir (Almojl 2010).



Şekil 5. Çekme testi sonrası elde edilen uzama değerlerinin karşılaştırması

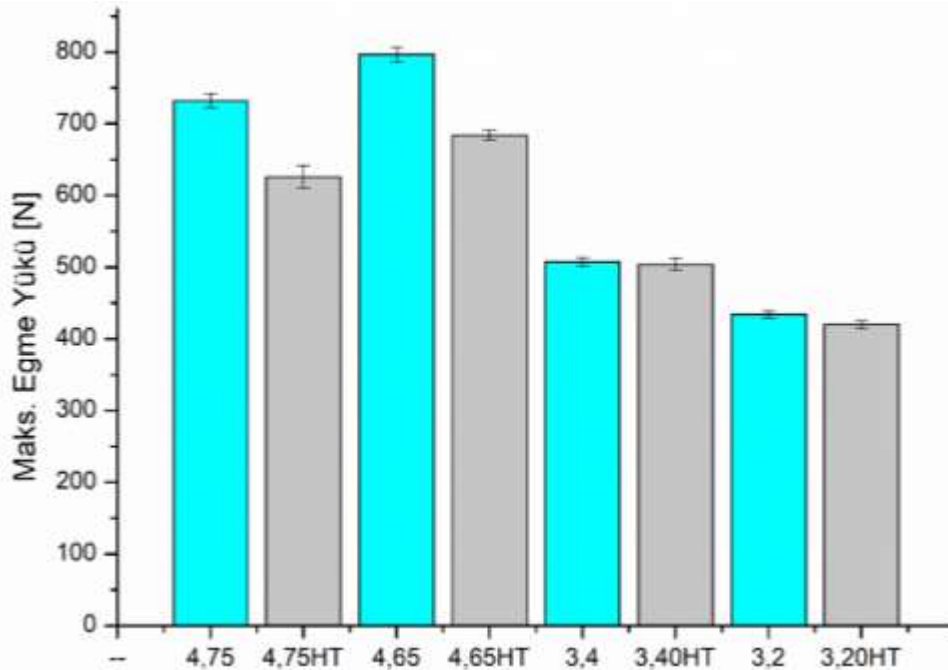
Şekil 6'da numunelere ait Vickers sertlik ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Redüksiyon işlemi uygulanmamış iki numune kıyaslandığında (4,75 ve 3,40) ilk boru üretimi neticesinde 3,40 mm çapa sahip borularda %55 oranında daha yüksek sertliğin elde edildiği anlaşılmaktadır (Tablo 1). Uygulanan redüksiyon işlemleri ile birlikte yani 4,75 mm çaptan 4,65 mm çapa düşüşle birlikte sertlikte %13 oranında bir artış; 3,40 mm çaptan 3,20 mm çapa düşüşle birlikte sertlikte %1,5 oranında bir artış elde edilmiştir. İlk

üretimde 3,40 mm çapa sahip malzemenin daha yüksek sertliğe sahip olması yani iç yapıdaki dislokasyon yoğunluğunun daha fazla olması uygulanan redüksiyon işlemi ile beklenen sertlik artışının belirli seviyede kalmasının önündeki en sınırlayıcı etken olarak değerlendirilebilmektedir.

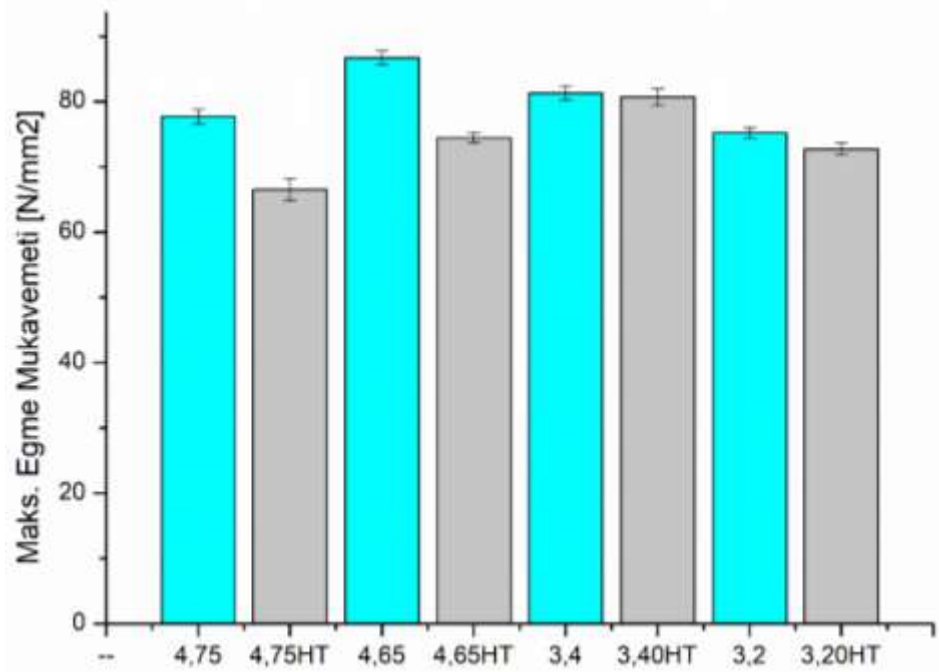


Şekil 6. Numunelerden elde edilen Vickers sertlik değerlerinin karşılaştırması

Numunelerden 90° eğme açısında elde edilen maksimum eğme yükleri Şekil 7’de, bu yüklerin boru kesit alanlarına bölünmesi birlikte elde edilen maksimum eğme mukavemetleri ise Şekil 8’de verilmiştir. 4,75 mm’den 4,60 mm’ye redüksiyon işlemi ile dış çap ölçüsü düşürülen numunelerde akma ve çekme mukavemetleri ve sertlik değerlerine paralel olarak maksimum eğme yükü ve maksimum eğme mukavemeti değerlerinde belirgin bir artışın meydana geldiği gözlemlenmektedir. Tavlama ısıl işlemi ile birlikte bu değerlerde düşüşler gözlemlenmiştir. Ancak 3,40 mm’den 3,20 mm’ye redüksiyon işlemi ise dış çap ölçüleri düşürülen numunelerde ise maksimum eğme yükü ve maksimum eğme mukavemeti değerlerinde artış yerine düşüş gözlemlenmiştir. Aynı uygulanan ısıl işlemle birlikte de bu değerlerde belirgin bir farklılaşma gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi olarak deformasyona bağlı numune iç yapılarında meydana gelen aşırı dislokasyon yoğunluğu olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 7. 90°’lik eğme açısı ile birlikte elde edilen maksimum eğme yükleri [N]



Şekil 8. 90°'lik eğme açısı ile birlikte elde edilen maksimum eğme mukavemetleri [MPa-N/mm²]

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, 3,40 mm ve 4,75 mm dış çapa sahip fren boruları 3,20 mm ve 4,65 mm dış çapa sahip olacak şekilde redüksiyon işlemi uygulanmıştır. Ardından fren borularına 450 °C sıcaklık ve 30 dk. süre ile tavlama ısıl işlem uygulanmış ve numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Başlangıçtaki 2 adet referans boru ile redüksiyon ve ısıl işlemlerle elde edilen 6 farklı parametredeki numuneler karşılaştırmalı olarak mekanik özellikler ve mikroyapı bakımından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Uygulanan redüksiyon işlemi ile 3,40 mm dış çap borudan 3,20 mm dış çapa düşüşte hem de 4,75 mm dış çap borudan 4,65 mm dış çapa düşüşte akma mukavemeti ve çekme mukavemeti ve Vickers sertlik değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Kopma uzaması değerlerinde ise mukavemet değerleri ile ters orantılı şekilde azalmalar meydana gelmiştir (3,40 mm dış çaptan 3,20 dış çapa düşüş hariç).
- Uygulanan tavlama ısıl işlem parametrelerinin sıcaklık ve süre olarak yeterli olduğu mekanik özelliklerde meydana gelen farklılaşmalardan anlaşılmaktadır yani hiçbir parametre için ısıl işlem öncesi ve sonrası değerlerin aynı kalmadığı görülmüştür.
- Eğme deneyi sonucunda elde edilen verilerden 4,75 mm dış çap borudan 4,65 mm dış çapa düşüşte diğer mekanik özellikler ile paralel bir davranış sergilediği ancak 3,65 mm dış çap borudan 3,40 mm dış çapa düşüşte bunun tam tersi bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir.

Teşekkür / Bilgilendirme

Çalışmanın gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Bant Boru A.Ş.'ye teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

Albahlol OA, Harun C, Akgul Y, et al (2023) Effect of laser hardening on the mechanical, tribological and corrosion properties of low alloy steels. J Min Metall Sect B Metall 59:255–267

Almojil M (2010) Deformation and recrystallisation in low carbon steels. The University of Manchester (United Kingdom)

Bella P, Burik P, Bucek P, Ridzon M (2021) Influence of Deformation on Texture Development During Cold Drawing of Tubes. In: Forming the Future: Proceedings of the 13th International Conference on the Technology of Plasticity. Springer, pp 729–737

- Belyakov A, Kimura Y, Adachi Y, Tsuzaki K (2004) Microstructure evolution in ferritic stainless steels during large strain deformation. *Mater Trans* 45:2812–2821
- Buğan FE, Altıparmak T, Akgül Y, Karaca MM (2022) 5xxx Serisi Alüminyum Alaşımları için TIG Kaynak İşleminin Mekanik Davranışlarına Olan Etkisinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Derg* 101–105
- Choi J-Y, Seong B-S, Baik SC, Lee H-C (2002) Precipitation and recrystallization behavior in extra low carbon steels. *Isij Int* 42:889–893
- Das R, Pradhan M (2017) *Handbook of research on manufacturing process modeling and optimization strategies*. IGI Global
- ISO E (2016) 6892-1: 2016. *Met Mater Testing—part 1*:
- Koyuncu O, Çelik B, Akgül Y, İncesu A Farklı Hız ve Sabit Oranda Uygulanan Redüksiyonun Fren Boruların Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Çelik Araştırma Ve Geliştirme Derg* 4:17–23
- Koyuncu O, Çelik B, Akgül Y, İncesu A Isıl İşlemin Bakır Kaplı Çelik Boruların Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *J Mater Mechatron A* 4:177–192
- Li YZ, Zhao SL, He SH, et al (2022) Enhancing yield stress and uniform elongation in an ultrathin packaging steel via controlling dislocation density. *Int J Plast* 155:103334
- Mojžiš M, Ridzon M, Bella P, et al (2016) Production Technology for Precision Seamless Steel Tubes from the Perspective of Microhardness Changes. *Key Eng Mater* 716:988–993
- Neves FO, Button ST (2005) Residual stress on stainless steel a304 tube drawn with fixed plug. In: 18-th International Congress of Mechanical Engineering
- Pernis R (2006) Calculation of wall thickness at tube sinking. *Acta Metall Slovaca* 12:191–201
- Raji NA, Oluwole OO (2011) Influence of degree of cold-drawing on the mechanical properties of low carbon steel. *Mater Sci Appl* 2:1556
- Ridzoň M, Mojžiš M, Domovcová L, et al (2015) Microstructural Aspects of Cold Forming Processes In Precision Tube Drawing