

## itüdergisi/d

### mühendislik

Cilt:2, Sayı:2, 60-70

Nisan 2003

# Kuvvet dönüştürücülerde ısı ve mekanik işlemlerin histerisiz hatasına etkisi

**Sinan FANK\***, **Mehmet DEMİRKOL**

*İTÜ Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34437, Taksim, İstanbul*

## Özet

*Yay elemanının yapısal özellikleri kuvvet dönüştürücülerinin performans özelliklerini etkilemektedir. Bu çalışma, çok kullanılan bir yay elemanı malzemesi olan AISI 4340 çeliğine uygulanan farklı ısı ve mekanik işlemler sonrası elde edilen iç yapısal özelliklerin kuvvet dönüştürücünün histerisiz performansına etkisini araştırmaya yöneliktir. Deney sonuçlarına göre, histerisiz hatasının malzemenin sertliğine paralel olarak iyileştiği, aynı sertlikteki beyritik yapının temperlenmiş martenzitik yapıya göre daha iyi performans gösterdiği, çevrimsel zorlama ile sert yapıda kötüleştiği, yumuşak yapılarda ise iyileştiği görülmüştür. Ön plastik şekil değişimi ile histerisiz hatasında iyileşme, ön sürünme uygulanması ile kötüleşme görüldüğü belirlenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** AISI 4340 çeliği, kuvvet dönüştürücü, histerisiz hatası, termo-mekanik işlemler.

## Effect of heat and thermo-mechanical pre-treatments on hysteresis performance of force transducers

### Abstract

*Different mechanical and heat treatment processes can be applied on the spring element of a force transducer, in order to obtain good and satisfactory performance. The manufacturers are generally focused on the improvement of performance by applying different heat and mechanical treatments on spring material, and no information is in free circulation regarding the process-performance relationships of transducers due to tight competition in the market. Mechanical behavior of spring element of force transducers is playing a crucial role to obtain good performance in measurements. The application of different heat treatments changes the microstructure of spring material, which is very effective in the improvement of performance properties of force transducers such as hysteresis error and creep response. Present study covers the attempts of changing microstructure of AISI 4340 steel by using different heat and thermo mechanical treatments and measuring the performance of force transducers related with the structural properties of spring element. The measurement results have shown that; hysteresis characteristics were improved with increasing hardness of specimens, which were quenched and tempered only. Bainite has an advantage over tempered martensite at the same hardness level from hysteresis performance point of view. Prestraining has beneficial effects on the improvement of hysteresis characteristics, while pre-creep deformation has adverse effect. Cyclic stressing improved hysteresis properties only in soft structures.*

**Keywords:** AISI 4340 steel, force transducer, hysteresis error, thermo-mechanical treatments.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Sinan FANK. [Sinan.fank@ume.tubitak.gov.tr](mailto:Sinan.fank@ume.tubitak.gov.tr); Tel: (262) 646 63 55 dahili:530.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Makine Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Kuvvet dönüştürücülerinde yay elemanı malzemesi özelliklerinin performans üzerindeki etkisi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 30.09.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 25.12.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Dirençli uzama ölçerlerin kullanıldığı kuvvet dönüştürücüler, kuvvet ve yük ölçme uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Bray v. diğ., 1990). Özellikle araştırma ağırlıklı ve yüksek doğruluk istenen ölçümler için gerekli performansın sağlanmasında en önemli rolü kuvvet dönüştürücü tasarımı, yay malzemesi özellikleri ve kullanılan hazırlama yöntemleri oynamaktadır. Yüksek doğruluklu kuvvet dönüştürücü imal etmenin temel yolu, doğruluğu etkileyen parametrelerin ele alınarak incelenmesi ve bu konuda iyileştirmelere gidilmesinden geçmektedir. Kuvvet dönüştürücülerin kalibrasyonu sırasında elde edilen ölçüm verilerinin belirli bir hesaplama tekniği ile değerlendirilmesi sonucu elde edilen dönüştürücüye ait hatalar, genel olarak kuvvet dönüştürücülerin performans özellikleri olarak tanımlanmaktadır. Bunlar içinde en önemlileri tekrarlanabilirlik, doğrusallık, histerisiz ve sürünme hatalarıdır (Bray v. diğ., 1990).

Bu çalışmada kuvvet dönüştürücülerde doğruluğu etkileyen ve performans özellikleri olarak adlandırılan hatalar arasında en büyük öneme sahip histerisiz hatası ve bu hataya sebep olan malzeme kaynaklı faktörler ve uygulanan ısıl ve mekanik işlemlerin bu hata üzerindeki etkileri üzerinde durulmuştur. Histerisiz hatası aynı

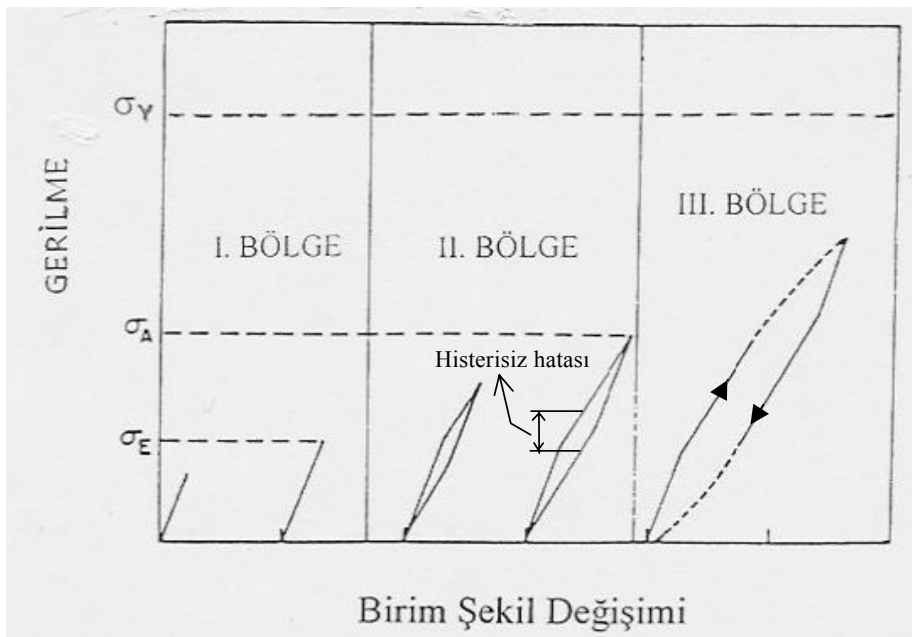
zamanda bir kuvvet dönüştürücünün doğruluğunu etkileyen en önemli parametre olarak kabul edilmektedir (Allgeier, 1994, Bray v. diğ., 1990, Kawai, 1984). Tersinebilirlik hatası olarak da adlandırılan bağıl histerisiz hatası, kuvvet dönüştürücüde aynı yük değeri için artan ve azalan yükleme yönünde elde edilen sinyaller arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 1’de grafik olarak gösterimi verilmiş olan histerisiz hatası, doğruluk kontrolünün artan ve azalan kuvvetlerle yapıldığı her bir kalibrasyon işlemi sırasında belirlenmektedir. Artan ve azalan kuvvetlere karşılık elde edilen değerler arasındaki fark histerisiz hatasını vermekte ve bu aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$u_{1-2} = \frac{X'_{1-2} - X_{1-2}}{X_{\max 1-2}} \times 100 \quad (1)$$

$$u_{ort} = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (2)$$

$u$  : Bağıl histerisiz hatası,  $u_1$  ve  $u_2$  1. ve 2. serideki histerisiz hatası,  $X'_{1-2}$  : 1. ve 2. serilerde azalan yönde uygulanan kuvvete karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışları,  $X_{1-2}$  : 1. ve 2.



Şekil 1. Histerisiz hatasının ve oluşum bölgelerinin gösterilişi

serilerde artan yönde uygulanan kuvvete karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışları,  $X_{\max 1-2}$  : 1. ve 2. serilerde maksimum kuvvete karşılık gelen kuvvet dönüştürücü çıkışlarıdır.

Histerisiz hatası üzerindeki en etken faktörün kuvvet dönüştürücünün yay elemanı malzemesine ait özellikler olduğu öne sürülmektedir (Allgeier, 1994, Bray v. diğ., 1990, Kawai, 1984, Özbay v. diğ., 1997). Bir kuvvet dönüştürücünün doğruluğunu etkileyen diğer faktörler olarak; malzemenin elastik şekil değişimini elektriksel çıktıya çeviren dirençli uzama ölçerler, bunların yapıştırma uygulamasında kullanılan yapıştırıcı, oluşturulan elektriksel devre ile uygulanan gerilimin kararlılığı ve gösterge elemanının kalitesi sayılabilir.

Çalışmada AISI 4340 çeliğine uygulanan farklı ısıl ve ön termo-mekanik işlemler sonrasında elde edilen iç yapıların histerisiz hatasını nasıl etkilediği incelenmiştir.

## Deneysel çalışma

### Yay elemanı malzemesi

Yay elemanı malzemesi olarak kimyasal bileşimi ve standart değerleri Tablo 1’de verilen, sıcak hadde mamulü standart AISI 4340 çeliği seçilmiştir (Source Book, 1983).

### Uygulanan ısıl işlemler

Deney malzemesine uygulanan ısıl işlemlere ait detay Tablo 2’de verilmektedir. Deney numunelerine ait tablo ve grafiklerde verilen kod harflerinin anlamları aşağıdaki verilmiş olup belirtilen sertlik değerleri  $\pm 1$  RSD-C toleransıya elde edilmiştir.

MART: Martenzit, BEYN: Beynit, KBMART: Kaba martenzit, ÇZMART: Çevrimsel zorlama uygulanmış martenzit, ÇZBEYN: Çevrimsel zorlama uygulanmış beynit, SÜMART: Ön sürünme zorlanması uygulanmış martenzit, FYMART: Ön gerilme uygulanmış martenzit, % 0.4 YMART: % 0.4 kalıcı ön birim şekil değişimi uygulanmış martenzit, % 4 YMART: % 4 kalıcı ön birim şekil değişimi uygulanmış martenzit.

### Uygulanan termo-mekanik ön işlemler

45 RDS-C sertliğindeki bazı numunelere daha da farklı iç yapısal özellikler elde edebilmek için uygulanan mekanik ve termo-mekanik ön işlemlere ait detay Tablo 3’de verilmektedir.

Bu işlemler malzemenin mekanik zorlanma altında gösterdiği davranışı değiştirebilme amacıyla uygulanmıştır. Bu ön işlemlerden çevrimsel zorlama sonrasında, ön-sürünme zorlanması sonrasında ve ön-plastik şekil değişimi sonrasında kuvvet dönüştürücünün çalışması sırasında oluşabilecek dislokasyon hareketlerinde farklılıklar yaratılması ve bundan doğabilecek değişik mekanik davranışların histerisiz performansı üzerindeki etkisinin araştırılması hedeflenmiştir.

Bu amaçla farklı ısıl ve mekanik işlem uygulanan elastik elemandan ikişer adet numune hazırlanarak bunların bir tanesine iki tam köprü diğerine ise bir tam köprü devresi oluşturacak şekilde dirençli uzama ölçerler yapıştırılmıştır. Bir numuneye iki tam köprü devresinin kurulmasının nedeni, bir elastik elemanın iki ayrı kuvvet dönüştürücü gibi çıkış vermesini

Tablo 1. AISI 4340 çeliğinin standart bileşimi ve deney malzemesinin kimyasal bileşimi

	Alaşım Elementleri ( % )							
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
AISI 4340 (Standart Bileşim) (Source Book, 1983)	0.38- 0.43	0.60- 0.80	En çok 0.04	En çok 0.04	0.20- 0.35	1.65- 2.00	0.70- 0.90	0.20- 0.30
Deney Malzemesi AISI 4340 Çeliği	0.40	0.69	0.014	0.012	0.20	1.76	0.77	0.20

Tablo 2. Deney numunelerine uygulanan ısıl işlemler

Numune Kodları	Ostenitleme Sıcaklığı ve Süresi	Su verme Ortamı	Uygulanan Isıl İşlem Sıcaklık ve Zamanı
MART 35 R <sub>C</sub>	845 °C'de 30 dakika	20°C'de yağ	600 °C'de 1.5 saat temperleme
MART 45 R <sub>C</sub>	845 °C'de 30 dakika	20°C'de yağ	440 °C'de 1.5 saat temperleme
MART 55 R <sub>C</sub>	845 °C'de 30 dakika	20°C'de yağ	205 °C'de 1.5 saat temperleme
BEYN 45 R <sub>C</sub>	845 °C'de 30 dakika	320°C'de tuz banyosu	320°C'de tuz banyosunda 40 dk ostemperleme ve havada soğutma
KBMART 45 R <sub>C</sub>	1000 °C'de 4.5 saat	20°C'de yağ	440 °C'de 1.5 saat temperleme

sağlayarak, yapıştırma işleminden kaynaklanabilecek hataların kuvvet dönüştürücü performans özellikleri, diğer bir deyişle hataları üzerinde etkili olup olmayacağını belirlemektir.

#### Kuvvet dönüştürücü tasarımı ve imalatı

Kolon tipindeki kuvvet dönüştürücü sadece çekme yönünde kuvvet ölçecek ve 100 kN kapasitesinde olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada, kuvvet dönüştürücü hatalarını yaratan kaynaklar arasında sadece yay malzemesinden kaynaklananlar incelendiği için dirençli uzama ölçer, yapıştırıcı, yapıştırma işlemleri, yapıştırma basıncı ve yapıştırma sıcaklığı gibi parametreler tüm dönüştürücüler için sabit tutulmuştur. Diğer bir deyişle, dirençli uzama ölçerler ve bunların

yapıştırılmasından kaynaklanan etkenleri en aza indirebilmek için tüm kuvvet dönüştürücülerin hazırlanmasında geçerli olan şartlar aynı tutulmuştur.

Hooke bağıntısı yardımıyla kuvvet dönüştürücü yay elemanının kesit alanı, 100 kN'luk kuvvet uygulandığında yaratılması hedeflenen  $\epsilon = 1500 \mu\text{m/m}$ 'lik birim şekil değişimine karşılık gelmesi gereken kesit alanı olarak hesaplanmış ve parça çapı 20 mm olarak belirlenmiştir. Buna göre olası uç etkilerinden kaçınmak amacıyla boy 100 mm olarak seçilmiştir (Firma Yayını, 1988). Tüm numunelerin çapı ısıl işlem sonrası, tornada bor yağı ile soğutulmak ve 0.1 mm'lik pasolar kullanılmak suretiyle

Tablo 3. Deney numunelerine uygulanan termo-mekanik işlemler

Numune Kodları	Uygulanan mekanik ve termo-mekanik işlemler
ÇZMART 35 R <sub>C</sub>	100.000 kez 10-100 kN aralığında çevrimsel zorlama
ÇZMART 45 R <sub>C</sub>	100.000 kez 10-100 kN aralığında çevrimsel zorlama
ÇZMART 55 R <sub>C</sub>	100.000 kez 10-100 kN aralığında çevrimsel zorlama
ÇZBEYN 45 R <sub>C</sub>	100.000 kez 10-100 kN aralığında çevrimsel zorlama
ÇZKBMART 45R <sub>C</sub>	100.000 kez 10-100 kN aralığında çevrimsel zorlama
SÜMART 45 R <sub>C</sub>	380°C'de 95 MPa Gerilmede 4 saat ön sürünme
FYMART 45 R <sub>C</sub>	300 kN yüke kadar aşırı yükleme
% 0.4 YMART 45 R <sub>C</sub>	Akma bölgesinde % 0.4 kalıcı uzama elde etme
% 4 YMART 45 R <sub>C</sub>	% 4 kalıcı uzama elde etme

20 mm'ye düşürüldükten sonra, hepsinde aynı değeri elde edebilmek için dirençli uzama ölçerlerin yapıştırılacağı 110 mm'lik gövde uzunluğu boyunca ( $\pm 0.002$  mm tolerans ile) silindirik olarak taşlanmıştır. Bu şekilde oluşabilecek artık gerilmelerin en alt düzeye indirilmesine gayret edilmiştir. Taşlama sonrası tüm parçalarda çap 19.80 mm olarak elde edilmiştir. Mekanik imalat sonrasında elektrik rezistanslı uzama ölçerlerden yararlanarak, Şekil 2'de bir örneği gösterilmiş bulunan kuvvet dönüştürücü numuneler hazırlanmıştır.



*Şekil 2. Ölçüme hazır deney numunesi*

Burada kullanılan Measurement Group firmasının ürettiği N2A-06-S053P-350 tipi dönüştürücü sınıfı uzama ölçerlerin yapıştırma işleminin özel itina ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle dirençli uzama ölçerlerin yay elemanına yapıştırılması özel bir prosedür çerçevesinde, özel alet ve aparatlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Katalog; Technical Note, 1978).

Deneylerin gerçekleştirildiği UME Kuvvet Laboratuvarında sıcaklık kontrolünün çok hassas olarak  $\pm 0.2$  °C aralığında sağlanmasından dolayı numunelerde herhangi bir sıcaklık kompanzasyonuna gerek duyulmamıştır. Bu mertebedeki sıcaklık değişiminin ölçüm sonuçlarına etkisi, uzama ölçerlerin kendiliğinden sıcaklık kompanzasyonu sağlamaları da dikkate alınacak olursa çok düşük mertebelerde kalmaktadır (Katalog; Technical Note, 1992).

### **Kalibrasyon yöntemi**

Kuvvet dönüştürücülerden ölçüm verileri ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasında çeşitli kuvvet adımları ile yüklenerek alınmıştır. Tekrarlanabilirlik, doğrusallık ve histerisiz hataları hesaplanarak kuvvet dönüştürücüler için EN 10002-3 standardında verilen tabloya göre sınıflandırma yapılmakta ve doğruluk sınıfı belirlenmiştir (EN-10002-3, 1994). Bu standarda göre kuvvet dönüştürücü eksenini etrafında çeşitli açılarda döndürülerek ölçüm verileri alındığı halde, bu çalışma kapsamında malzemeden kaynaklanan etkiler incelendiği için asimetriden kaynaklanabilecek hataların belirlenmesine yönelik dönmümlü ölçümlerden yararlanılmamış olup her bir dönüştürücüye iki seri artan ve azalan yönlerde, 60 sn bekleme sürelerinde kuvvet uygulanmıştır. Yüklemeler arasında, yüksüz duruma karşılık gelen gösterge değerleri, sıfır yüke dönülmesinin ardından yine 60 sn bekledikten sonra kaydedilmiştir. Elektriksel kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonuna başlanmadan önce sıfır sinyali de kaydedilmiştir.

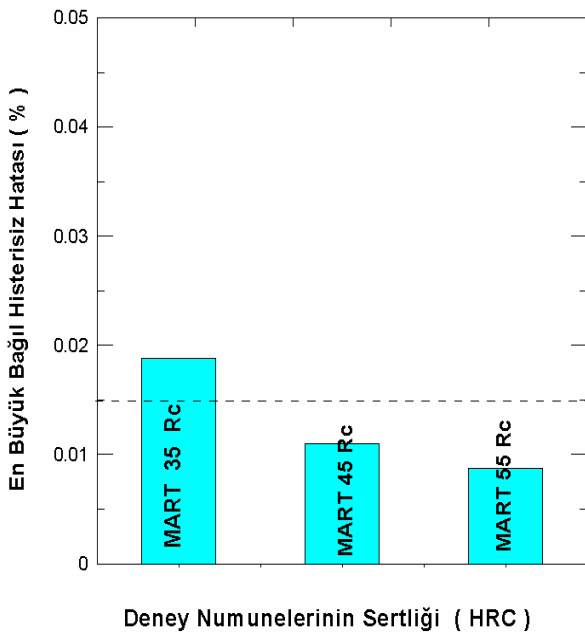
### **Deney sonuçları ve irdeleme**

Deney numuneleri oluşturulurken her numune grubundan üçer adet dirençli uzama ölçer devre sinyali alınacak şekilde planlama yapılmış ve numuneler üretilmiştir. Deneysel sonuçlara ait grafiklerde, ilgili numune gruplarına ait bu üç sinyal değerinin ortalaması alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca, kuvvet dönüştürücüler için en iyi doğruluk sınıfı olan 00'a ait üst sınır değerler, grafiklerde "kesikli çizgi" ile gösterilmiştir. Uygulanan çeşitli ısı ve mekanik işlemler sonucunda sertlik ve mikro yapıları değiştirilen deney numunelerine tüm işlemleri bittikten sonra dirençli uzama ölçerler yapıştırıldığı için, uygulanan mekanik işlemlerin dirençli uzama ölçerleri veya yapıştırma şartlarını etkilemesi beklenmemektedir.

Uygulanan çeşitli ısı işlemler karşısında sertliği, tane boyutu ve iç yapısı değiştirilen deney malzemesinin histerisiz hatasında belirgin farklılıklar olduğu gözlenmiş olup, bunlar aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

### Sertliğin histerisiz hatasına etkisi

Şekil 3'te verildiği gibi temperlenmiş martenzit yapıdaki MART 35 R<sub>C</sub>, MART 45 R<sub>C</sub> ve MART 55 R<sub>C</sub> kodlu numuneler histerisiz performanslarına göre karşılaştırıldıklarında en sert numune olan MART 55 R<sub>C</sub> kodlu numunenin beklediği gibi en düşük histerisiz hatasına sahip olduğu belirlenmiştir. Uygulanan ısıl işlemlerin histerisiz hatasında etkin rol oynadığına önceki çalışmalarda değinilmektedir (Kawai, 1984, Allgeier, 1994). Bu durumun uygulanan ısıl işleme bağlı olarak sertlik ve akma dayanımı değişen malzemedeki dislokasyon yoğunluğu farkından kaynaklandığı üzerinde durulmaktadır (Wood, 1971). Martenzitik dönüşüm sırasında meydana gelen dislokasyon yoğunluğu 10<sup>12</sup> adet/cm<sup>2</sup> mertebelerine kadar ulaşmaktadır (Demirkol, 1991). Belirli sıcaklıklarda uygulanan temperleme yapıda sıkışmış olan karbonun yayınmasına neden olduğu için kafes yapısındaki çarpılma miktarı azalmakta ayrıca dislokasyon yoğunluğundaki azalmayı da beraberinde getirmektedir. Aynı su verme şartları uygulanmış numunelere farklı temperleme uygulanarak çeşitli sertlik değerleri ve akma dayanımları elde edilebilmesi ve akma dayanımını değiştiren her ısıl işlemin malzemenin anelastik sınırını da etkilemesi nedeniyle, kuvvet dönüştürücülerdeki histerisiz hatasında değişme



Şekil 3. Farklı sertliklerdeki temperlenmiş martenzit numunelerde bağlı histerisiz hatası

görülmesinin mümkün olabileceği sonucu çıkarılmaktadır. Şekil 1'den de görülebileceği gibi histerisiz çevrimleri gerilme seviyesinin ( $\sigma_A$ )-anelastik sınır olarak adlandırılan ve akma gerilmesinin oldukça altında bulunan ve akma sınırının artması ile büyüyen bir gerilme seviyesine kadar kapalı kalmaktadır (Alexopoulos, 1981).

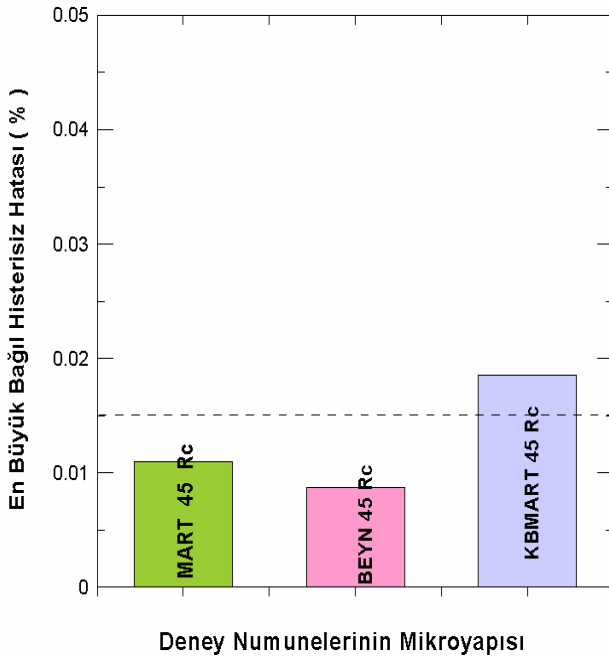
Çalışmadaki MART 55 Rc kodlu en sert numunenin sahip olduğu yüksek akma dayanımı ve dolayısıyla artan  $\sigma_A$  anelastik sınırı değerinden dolayı en küçük histerisiz hatası bu numunede elde edilmektedir. Ayrıca buna bağlı olarak aynı çalışma gerilmesi altında oluşabilecek histerisiz çevriminin küçülmesi de bir diğer neden olarak söylenebilir. Histerisiz çevriminin oluşumunda elastik alanda olsa bile dislokasyonların yaptığı hareketler çok etkin olmaktadır (Alexopoulos, 1981, Allgeier, 1994). Bu durumda dislokasyon hareketini zorlaştıracak her mekanizma histerisiz hatasını düşürücü etki yapmaktadır. Malzemenin dislokasyon dağılımı ve yoğunluğunun uygulanan ısıl ve soğuk şekil verme işleme bağlı olduğu bilinmektedir (Hull, 1975). Yüksek sıcaklıkta temperlenen numunelerde dislokasyonların sıcaklık etkisiyle birbirlerini yok etmeleri ve/veya dislokasyon yapısındaki olası gevşeme nedeniyle dislokasyon yoğunluğunda azalma beklenmektedir (Allgeier, 1994). Diğer taraftan yüksek sertlikte veya uygulanan soğuk şekil verme sonucunda dislokasyon yoğunluğu artmakta ve artan dislokasyon yoğunluğu ile bunların birbirlerini engellemeleri sonucunda histerisiz hatası küçülmektedir. Bu durumun dislokasyon yığılmaları sebebiyle dislokasyonların hareketlerini engelleyici bir etkiye sebep olan kilitleme veya dislokasyon hareketini kolaylaştırıcı etkisi olan gevşeme mekanizmaları ile açıklanması da mümkündür (Allgeier, 1994). Artan sertlik miktarına bağlı olarak yoğunluğu artan dislokasyonların hareketlerinin olası kilitlemeler nedeniyle zorlaşacağı için histerisiz hatasında da azalma beklenmektedir.

### Aynı sertlikteki farklı mikro yapıların histerisiz hatası üzerindeki etkisi

Aynı sertlikteki bu numuneler arasında bir karşılaştırma yapıldığında Şekil 4'teki gibi en küçük histerisiz hatasını beynitik yapılı



numunelerin, en büyük histerisiz hatasını ise kaba martenzitik yapıya sahip numunelerin verdiği görülmektedir. Her üç yapı aynı sertlik değerine sahip olmasına rağmen sertlikten farklı olarak mikro yapıdan da kaynaklanabilecek bazı farklılıkların histerisiz hatası üzerinde etkili olduğunu söylemek mümkündür. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmada, martenzitik paslanmaz çelikte, martenzitik yapı içindeki artık ostenit miktarı ve uygulanan farklı yaşlandırma işlemlerine bağlı olarak elde edilen karbürler ve çökeltilerin histerisiz hatasını değiştirdiği belirlenmiştir (Allgeier, 1994). Buna göre ince veya kaba martenzitik yapı ile beynitik yapıdaki dislokasyon yoğunluğu ve dislokasyon hareketlerinin engellenmesi ile söz konusu değişimi açıklamak mümkündür. Beynitik yapıda dayanımın artması ise yapı içindeki karbürlerin tabaka yerine çok ince dağılmış bir şekilde yapıda bulunmaları nedeniyle dislokasyon hareketlerinin daha etkin şekilde engellenmesi ile meydana gelmektedir (Bakkal, 1999; Krauss, 1980).



Şekil 4. 45 RSD-C sertliğine sahip farklı içyapılardaki bağlı histerisiz hatası

Aynı sertliğe sahip martenzitik ve beynitik yapılardaki dislokasyon yoğunluklarının, martenzit için  $1.5 \times 10^{12}$  adet/cm<sup>2</sup>, beynit için ise  $6.3 \times 10^{11}$  adet/cm<sup>2</sup> mertebesinde olduğunu ifade eden bazı

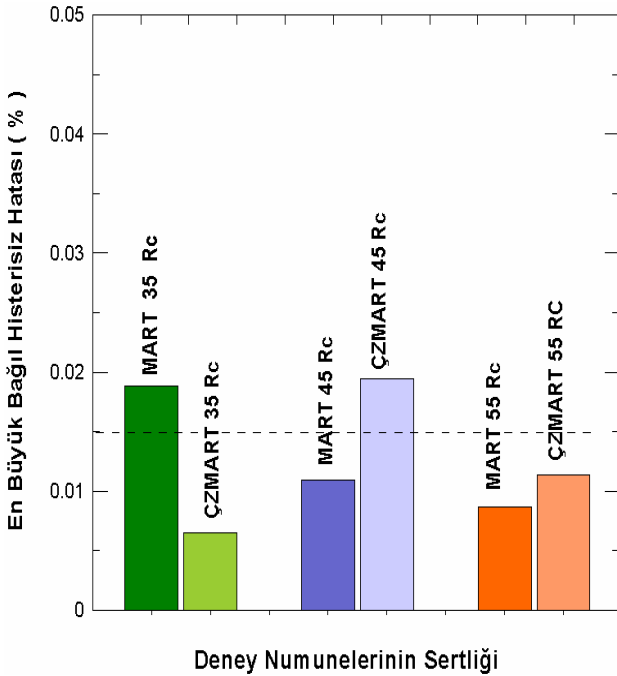
bulgular vardır (Bhadeshia, 2001). Sertlik değerleri aynı olan martenzitik ve beynitik yapılarda görülen histerisiz hatası farkı, martenzitik yapıda dislokasyon yoğunluğunun daha fazla olmasına rağmen beynitik yapıdaki karbür parçacıklarının martenzite oranla dislokasyon hareketlerini daha fazla engelleyici etki yapmasından kaynaklanabilir. Özellikle beynitik yapılarda, sert Fe<sub>3</sub>C ikinci faz parçacıklarının ferritik matris içinde ince bir dağılım göstermesi nedeniyle, dislokasyonlar zorlanma sırasında esneyerek kavislenmekte ve hareketleri için yeterli mesafe bulamamaktadırlar. Bunun sonucunda sert parçacıklar dislokasyonların hareketlerini kısıtlayarak histerisiz hatasını azaltacak şekilde etkin rol oynayabilmektedirler (Bakkal, 1999; Bhadeshia, 2001).

Martenzitin kabalığı ostenit tane boyutuna göre değişmektedir. KBMART 45 Rc kodlu numuneler 1000°C de 4.5 saat bekletildiği için martenzit boyutu da büyümüş olup tane boyutu inceye oranla yaklaşık % 50 daha büyüktür. Martenzitik yapıda dayanımın artmasın-daki en büyük etkenin dislokasyon hareketlerine engel olan veya zorlaştıran, martenzit kristal yüzeyleri ve blok sınırlarının olduğu bilinmektedir (Lakhtin, 1994). Bu durumda dislokasyon hareketini engelleyen sınırların martenzit boyutu büyük numunelerde daha azalması nedeniyle dislokasyon hareketlerinin daha kolay gerçekleşmesi beklenmektedir. Buna bağlı olarak da histerisiz hatası ince martenzit numunelere oranla artmaktadır. Sertlik mertebesi aynı olmakla birlikte kaba martenzit yapıda dayanımın bir miktar daha düşük olması nedeniyle akma gerilmesi ve buna bağlı olarak anelastik sınır da azalmaktadır. Çalışma gerilmesi aynı kaldığı halde anelastik sınırın azalması, histerisiz hatasının büyümesine sebep olabilmektedir. İnce ve kaba martenzitik yapılardaki histerisiz hata farkını bu şekilde de yorumlamak mümkündür.

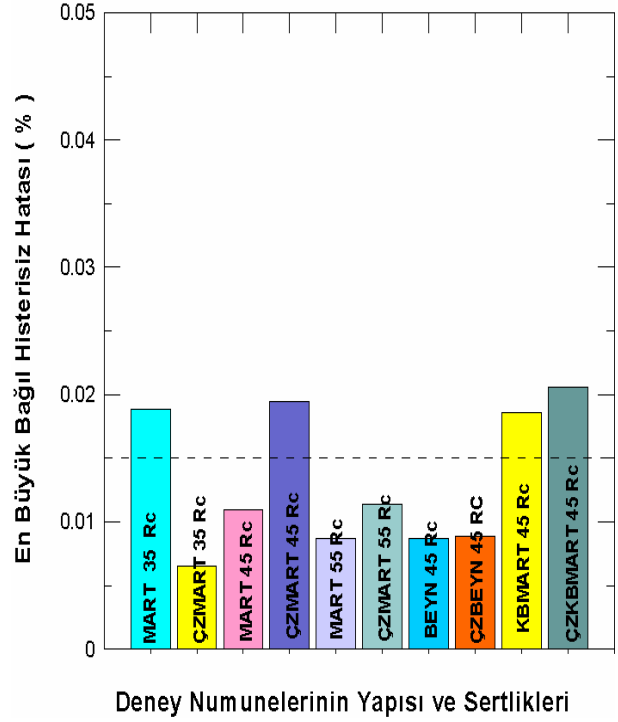
#### Çevrimsel zorlamanın histerisiz hatası üzerindeki etkisi

Sertliğe bağlı olarak çevrimsel zorlama uygulanan ince martenzitik yapıya sahip numunelerin histerisiz hatalarındaki değişim Şekil 5'te, tüm numunelerin histerisiz hatalarının karşılaştırılması ise Şekil 6'da verilmeye çalışılmıştır. Bilindiği

gibi sertleştirilmiş malzemelerde plastik alana giren çevrimsel zorlama ile yumuşama, tavlanmış malzemelerde ise çevrimsel zorlama ile sertleşme görülebilmektedir (Klesnil, 1980). Çevrimsel sertleşmenin dislokasyon hareketlerini sınırlayan çeşitli engeller tarafından meydana geldiği dikkate alınacak olursa, çevrimsel yumuşamanın da bu engellerin kaldırılmasıyla meydana geldiğini söylemek mümkündür. Çevrimsel zorlamayla yumuşamanın meydana gelmesi, sertleştirilmiş malzemelerin yapılarındaki yüksek dislokasyonların geri dönüşsüz ileri-geri hareketler neticesinde ortaya çıkan yeni bazı yapısal oluşumlara bağlanmaktadır. Bu oluşumlar başlangıçta yoğun dislokasyon içermekteyse yumuşama, az yoğun dislokasyon içermekteyse sertleşme şeklinde kendini göstermektedir. Bahsedilenler her ne kadar plastik şekil değişiminin söz konusu olduğu çevrimsel zorlamalar için geçerli olsa da, akma sınırı altında kalan zorlamalarda da bir miktar mikro seviyede mikro plastik şekil değişimi (mikro akmalarla oluşabilen yerel plastik deformasyonlar kastedilmektedir) etkisinin olmasını beklemek mümkündür.



Şekil 5. Temperlenmiş martenzit yapısındaki numunelerde çevrimsel zorlamanın bağıl histerisiz hatasına etkisi



Şekil 6. Çeşitli yapı ve sertlikteki numunelerde çevrimsel zorlamanın bağıl histerisiz hatası üzerindeki etkisi

Düşük birim şekil değişimi genliklerinin uygulandığı yüksek çevrimli yorulmada hücre yapısı oluşması beklenmemekle birlikte dislokasyon yığınlarının meydana gelme olasılığı vardır (Klesnil, 1980). Bu çalışmada düşük gerilmeli çevrimsel zorlama söz konusu olup uygulanan gerilme elastik bölgede kalmaktadır. Dolayısı ile hücre yapısının oluşumu ve çevrimsel bir sertleşmenin beklenmesi söz konusu değildir. Sadece dislokasyonların dağılımının değişmesi ve buna bağlı olarak hareketlerinin engellenmesi veya kolaylaşmasının söz konusu olabileceğini söylemek mümkündür.

Burada 35 RSD-C sertliğine sahip numunelerdeki histerisiz hatasındaki iyileşmeyi dislokasyonların oluşturduğu yeni düzenlere bağlamak mümkündür. 35 RSD-C sertliğine sahip numunelerdeki çevrimsel zorlamayla histerisiz hatalarında görülen iyileşme, dislokasyon hareketlerini engelleyen bazı olayların gerçekleştiğine işaret etmektedir. Histerisiz hatasının azalmasında en etkili mekanizmanın dislokasyonların yığılması hareketlerinin engellenmesi ve kilitletmesinin olabileceği düşünülmektedir.



Daha sert olan 45 ve 55 RSD-C sertliğine sahip numunelerde histerisiz hatasının kötüleşmesi ise çevrimsel zorlama ile dislokasyonların birbirini yok etme eğilimi içinde olduğu veya daha büyük bir olasılıkla dislokasyon hareketlerinin kolaylaştığı şeklinde açıklanabilir.

Şekil 6'da görüldüğü üzere aynı sertliğe sahip olmalarına rağmen çevrimsel zorlama uygulanan martenzitik yapıya sahip numunelerin histerisiz hatası, beynitik yapıya oranla, daha fazla artmaktadır. Çevrimsel zorlama ile dislokasyon hareketini sınırlayan engellerin martenzitik yapı içinde beynitik yapıya oranla daha kolay aşılması beklenmektedir. Bunun nedeni beynitik yapıdaki karbür parçacıklarının dislokasyon hareketlerini zorlaştırıcı etki yapmasıdır (Bakkal, 1999). Bu nedenle, çevrimsel zorlama ile beynitik yapı numunenin histerisiz hatasındaki değişim, martenzitik yapıya oranla daha düşük oranda gerçekleşebilmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi çevrimsel zorlama uygulanan beynitik yapı numunelerin histerisiz hatası ihmal edilebilecek mertebede etkilenmektedir.

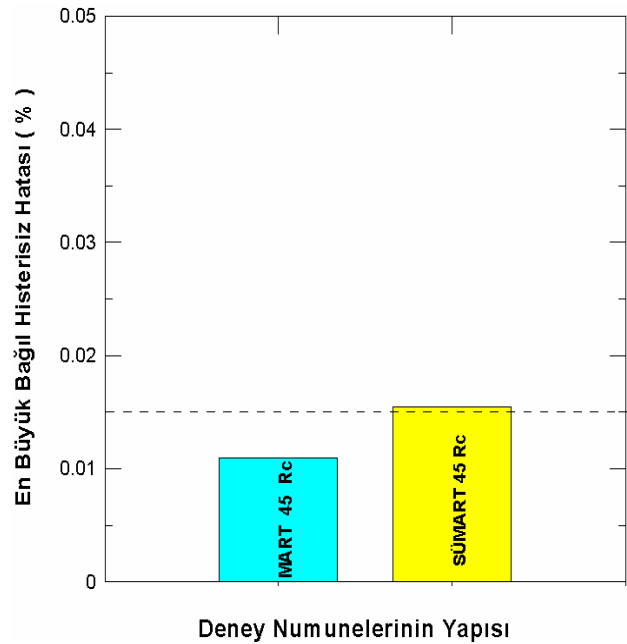
Bunun yanında, MART 45 Rc ve MART 55 Rc sertliğine sahip numunelerdeki dislokasyon yoğunluğu MART 35 Rc sertliğine sahip olan numunelere oranla daha fazla olduğu için, çevrimsel zorlama ile daha önce anlatılmış olan dislokasyon kilitlenmelerinin muhtemelen çözülerek dislokasyon hareketinin kolaylaşması söz konusudur. Bu nedenle histerisiz hatası da olumsuz etkilenmekte ve Şekil 6'da görüldüğü üzere histerisiz hatası az miktarda da olsa büyümektedir. 45 RSD-C sertliğindeki kaba martenzit yapı numunelerde de, çevrimsel zorlama ile birlikte histerisiz hatası artmaktadır. Bu durumda dislokasyon hareketlerinin kolaylaşması veya gevşemesi olayının kaba martenzit yapı için de geçerli olduğu sonucuna varmak mümkündür.

### Ön sürünme şekil değişimi uygulamasının histerisiz hatasına etkisi

Ön sürünme şekil değişimi, birincil sürünme safhasının tamamlanıp ikincil sürünmenin başladığı yere kadar uygulanarak, malzemenin dislokasyon alt yapısında beklenen olası değişiklikleri önceden yaratıp bunların histerisiz

ve sürünme hatalarına olan etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7 incelendiğinde ön sürünme şekil değişimi uygulanan numunenin uygulanmaya oranla daha yüksek histerisiz hatası verdiği saptanmıştır. Numunelere 380°C de uygulanan ön sürünme deneyi sonucunda, birincil sürünmeden ikincil sürünmeye geçiş gerçekleştiği için meydana gelen sürünmenin bir sonucu olarak bazı dislokasyon hareketlerinin gerçekleşmiş olması gerekmektedir. Ancak oda sıcaklığındaki zorlanmada bu gerçekleşen hareketlerin hiçbir kalıcı etkisinin kalmadığını, hatta dislokasyon hareketlerini daha da kolaylaştırıcı bazı etkileri olduğunu söylemek mümkündür. Bunun sonucu olarak histerisiz oluşumuna sebep olan dislokasyon hareketlerinin aynı düzen içinde daha kolay gerçekleşmesi olasılığı arttırıldığı için histerisiz hatasında büyüme görülmektedir.

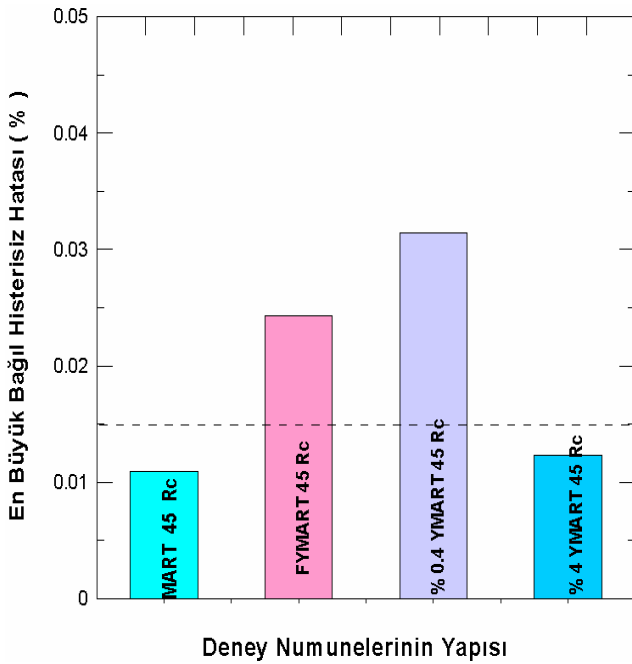


Şekil 7. 45 RSD-C sertliğine sahip martenzitik numunelerde ön sürünme şekil değişiminin bağli histerisiz hatasına etkisi

### Ön gerilme ve kalıcı şekil değişimi uygulamasının histerisiz hatasına etkisi

Herhangi bir ön gerilme uygulanmamış ve ön şekil değişimine uğratılmamış olan MART 45 Rc kodlu numunenin histerisiz hatası, kuvvet

dönüştürücünün kapasitesinin % 300 fazlası ön gerilme uygulanmış olan FYMART 45 R<sub>C</sub> kodlu numuneden daha düşük, o da akma sınırına kadar yüklenen % 0.4 YMART 45 R<sub>C</sub> kodlu numuneden daha düşük çıkmış olup bu durum Şekil 8'de görülmektedir. Bu durumda akma sınırına kadar arttırılarak uygulanan gerilmenin histerisiz hatasının da artmasına neden olduğu anlaşılmaktadır. Akma sınırına kadar uygulanan gerilmelerin malzemenin dayanımını ve buna bağlı olarak anelastik sınırını değiştirmesi beklenmemektedir. Çalışma gerilmesinin oldukça üzerinde gerçekleştirilen ön gerilme ile dislokasyon hareketinin daha kolay gerçekleşeceği bir düzenin mikro ölçekte ve kalıcı olarak yaratılmış olabileceği ve dolayısıyla FYMART 45 R<sub>C</sub> kodlu numunelerin histerisiz hatasının büyüyeceği öngörülebilir.



Şekil 8. 45 RSD-C sertliğine sahip numunelerde ön gerilme ve kalıcı ön şekil değişiminin bağıl histerisiz hatasına etkisi

Akma sınırındaki ön zorlamalar sonrasında görülen histerisiz hatasındaki artışın akma sınırında meydana gelen Lüders bantları oluşumu ile ilişkisi olduğu düşünülmektedir. Söz konusu bölgede dislokasyonların özellikle Cottrell atmosferi etkisinden kurtulmaları kademesinde bir kararsızlık yaşanmaktadır. Bu kararsızlık

dislokasyon hareketlerinin belirli bir gerilme altında olsa bile daha kolay gerçekleşmesine, bu da % 0.4 FYMART kodlu numunelerin histerisiz hatasının beklenenden daha fazla olmasına yol açmaktadır. Akma sınırı çok fazla geçilip numunenin % 4 plastik birim şekil değişimine uğratılması söz konusu olduğunda histerisiz hatasında belirgin şekilde iyileşme görülmektedir. Fakat bu iyileşme ancak MART 45 R<sub>C</sub> kodlu numunenin histerisiz hatası mertebelerinde olabilmektedir. Normalde plastik şekil değişimi ile dislokasyon yoğunluğu ve dayanımdaki artışa paralel olarak % 4 FYMART 45 R<sub>C</sub> kodlu numunenin histerisiz hatasının MART 45 R<sub>C</sub> kodlu numuneden daha iyi olması beklenmesine rağmen bunlar yaklaşık olarak birbirine yakın elde edilmiştir.

## Genel sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Uygulanan ısıl ve mekanik işlem ne olursa olsun dislokasyon yoğunluğunu arttırıcı ve dislokasyon hareketlerini kısıtlayıcı her olay, histerisiz performansının iyileşmesine diğer bir deyişle bu hatanın azalmasına neden olmaktadır.
2. Histerisiz hatası 45 RSD-C sertliğindeki yapılar karşılaştırılacak olursa en küçük histerisiz hatası beynitik yapıya sahip numunelerde elde edilmiştir.
3. Ön çevrimsel gerilme uygulaması ancak yumuşak numunelerde histerisiz hatası açısından bir iyileşme sağlamaktadır. Sert numuneler çevrimsel gerilme uygulamasından olumsuz yönde etkilenmiştir.
4. Histerisiz hatası ön sürünme zorlanmasından olumsuz yönde etkilenmiştir.
5. Uygulanan ön plastik şekil değişimi histerisiz hatasının iyileşmesine neden olmuştur.
6. İnce tane yapıları numunelerde histerisiz hatası daha düşük elde edilmiştir.

## Kaynaklar

Alexopoulos, P. S., Cho, C. W., Hu, C. P., Li, Che-Yu, (1981). Determination of the Anelastic Modulus for Several Metals, *Acta Metallurgica*, 29, 4, 549-577.

*Isıl ve mekanik işlemlerin histerisiz hatasına etkisi*

- Allgeier, T., (1994). Factors Influencing the Mechanical Hysteresis in Stainless Steel Load Cells, A *Thesis for the Doctor of Philosophy*, Glamorgan University, England.
- Bakkal, M., (1999). İyon Nitrürlemenin Ostemperlenmiş AISI 8660 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bhadeshia, H. K. D. H., (2001). *Bainite in Steel*, The Institute of Materials, U.K.
- Bray, A., Barbato, G., Levi, R., (1990). *Theory And Practice Of Force Measurement*, Academic Press, London.
- Demirkol, M., (1991). *Mekanik Metalurji Ders Notları*, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
- EN-10002-3, (1994). Metallic Materials - Tensile Testing - Part 3 - Calibration of Force Proving Instruments Used for the Verification System of the Uniaxial Testing Machine, *European Standard*.
- Firma Yayını, (1988). *Strain Gage Based Transducers*, Their Design And Construction, Measurement Group Inc., USA.
- Hull, D., (1975). *Introduction to Dislocation*, Pergamon Press, Oxford.
- Kawai, M., (1984). Problems Raised By Improvements in Load Cell Accuracy, *Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference of IMEKO*, Kobe, Japan, September 11-14, 59-62.
- Katalog, *Transducer Class Strain Gages*, Measurement Group Inc., USA.
- Klesnil, M., Lukas, P., (1980). *Fatigue of Metallic Materials*, Elsevier Science, New York.
- Krauss, G., (1980). *Principles of Heat Treatment of Steel*, ASM, Metal Park, Ohio.
- Lakhtin, Y., (Çevirenler:Şerif, O., Altaç, Z), (1994). *Fiziksel Metalurji ve Isıl İşlemler*, Osman Gazi Üniv., Eskişehir.
- Özbay, H. Ö., Ural., K., (1997). Gerinim Ölçerli Kuvvet Dönüşt. Aranan malzeme Özellikleri, *II. Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, Eskişehir, 137-144.
- Source Book On Industrial Alloy And Engineering Data*, (1983). ASM, Metal Park, Ohio.
- Technical Note, (1978). *Strain Gage Installation Proced. for Transducers*, Measur. Group Inc., USA.
- Technical Note, (1992). *Strain Gage Thermal Output And Gage Factor Variation With Temperature*, Measurement Group Inc., USA.
- Wood, W. A., (1971). *The Study Of Metal Structure And Their Mechanical Properties*, Pergamon Press, New York.