

Malzeme özelliklerinin anelastik davranışa etkileri

Levent YAĞMUR*, **Turgut GÜLMEZ**

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Metallerin anelastik davranışı, metroloji biliminin özellikle kütle, basınç ve boyutsal alanlarında, yerçekimiyle ilgili deneylerde, yüksek hassasiyet gerektiren cihaz ve sensör elemanlarının tasarımıyla ilgili bir malzeme özelliğidir. Sensöre uygulanan yükün genliği ve onun uygulanma sıklığı cihazın ölçüm belirsizliğini etkiler. Metallerin anelastiklik özelliği, malzemenin iç sürtünmesinin kaynağı olarak değerlendirilmiş ve sönümlemenin, uygulanan yükün hızıyla orantılı olarak değiştiği modellenmiştir. Bazı mekanik modeller, metallerde uygulanan yükün izi olarak sönümlemeyi tanımlamak amacıyla kullanılmıştır. Gecikmiş cevabın ve sönümlemenin tanımlanmasında elastiklik modülü, frekans alanında karmaşık bir sayı olarak ele alınabilmektedir. Bu sayının gerçel ve sanal kısımları kuvvet ile ortaya çıkan şekil değişimleri arasındaki fazı ve faz kaymasını göstermektedir. Bu değerlerin oranı malzemenin modül kaybını vermektedir. Bu çalışmada anelastiklik ölçümü için, esnek elemanı bakır berilyum (Cu-Be) malzemedan imal edilmiş yeni bir ters sarkaç tasarlanmış ve performansının temel sınırları belirlenmiştir. Yeni sarkacın esnek elemanı dikey pozisyonda basma değil çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bir çok esnek eleman çekme gerilmesi altında çalışmakta olup, basma gerilmesi uygulamalarında performansları kötüdür. Esnek elemanın çekme gerilmesine maruz kalabilmesi için, bağlandığı sarkaç koluyla yeni bir şekilde monte edilmiştir. Sarkacın kalite faktörü, üstel bir fonksiyon olarak azalan salınımların CCD (Charge-Coupled Device: Işığa duyarlı hassas bir cihaz) kamera ile, 2 s ile 30 s arasındaki periyotlarda tespit edilmesiyle elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı içyapı özellikleri için modül kayıpları tespit edilip gerilmeye göre bu kayıpların miktarı araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Anelastiklik, iç sürtünme, ters sarkaç, esnek eleman, bakır berilyum alaşımı.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Levent YAĞMUR. leventy@ume.tubitak.gov.tr; Tel: (262) 679 5000 dahili: 5502.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Makina Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Ters sarkaçla esnek elemanların anelastik davranışının incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 24.04.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 20.06.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.10.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Effects of material properties on anelastic behavior

Extended abstract

A new inverted pendulum with a copper-beryllium (Cu-Be) flexure element is designed and its performance is determined by detecting the respective angular changes of the pendulum using a ccd camera within an oscillation period range of 2 s and 30 s. A new arrangement was made by clamping of the flexure element and pendulum rod to avoid subjecting them to compression stress due to the weight of the overall pendulum mass on the flexure. This new form of inverted pendulum employs a flexure specially clamped to the pendulum rod to provide tension deformation under the weight of mass and could be used for dynamic testing of highly sensitive flexure elements. The quality factors of the pendulum were determined with respect to flexure elements by measuring free oscillations decaying exponentially. The results showed that the new inverted pendulum with a different connection between the flexure element and pendulum rod can be used to measure the anelasticity of materials and to test elements under bending deformation in a dynamic way.

Many experimental apparatuses have been designed and used to investigate the anelastic behavior of materials. These are divided into three main types, in terms of the frequency of use: subresonance, resonance and suprarsonance methods. The resonance method is particularly useful for the dynamic testing of the flexure in a pendulum. There are many types of pendulum apparatus and various clamping orientations are used for the measurement of anelasticity. The most frequently used type of pendulum to determine anelastic phenomena in materials is the torsion pendulum consisting basically of a mass as an inertia member suspended from a wire specimen that is subjected to a twisting deformation. The standard pendulum is used with various modifications. The simple pendulum is known as the basic arrangement of the standard pendulum, the specimen is under tension stress and subjected to bending stress but low frequencies cannot be easily generated because frequencies depend on the length of pendulum rod. The frequency changes in inverse proportion to the square root of the rod length so that periods of more than a few seconds require a very long pendulum

rod, which is not useful for experimental purposes. An inverted pendulum is another version of the standard pendulum known as the “swinging type”. It consists of a rod on the top of which a suspension mass placed. The rod is supported by a spring attached to its bottom in order to hold the pendulum rod vertically. The spring comes under compression stress and is subjected to a twisting deformation due to the suspended mass. The oscillation of the pendulum rod depends mainly on torque acting on the spring element and can easily vary over a wide band.

Some researchers have used various types of combined and torsional pendulum apparatuses to determine the anelasticity of copper-beryllium flexures, for the purpose of designing a highly sensitive mass comparator. Different types of flexures were used as pivot elements. Some measurements were carried out by using an inverted pendulum with an instant steel flexure element which was under compression and subjected to bending deformation, and it has been shown that the inverted pendulum was a valuable tool for the study of internal friction, that it could be used to probe anelasticity within a wide band of frequencies, and that it allowed direct tests of the features of anelastic behavior that were hard to perform in other ways.

An inverted pendulum is a valuable instrument for precision measurement, gravitational physics, and also for measuring the anelasticity of materials, which is one of the mechanical properties connected to designing highly accurate measurement devices and sensors used in the mass, force, pressure and dimensional fields of metrology. The frequency of an inverted pendulum can easily be changed over a wide band by either adding mass on top of the pendulum or by changing the centre of gravity of the suspended mass. This enables dynamic testing of metals, especially anelasticity in the flexure elements of the pendulum.

This study covers the attempts of searching the relationships between microstructural material properties of flexure elements and their respective anelastic behavior by using an inverted pendulum.

Keywords: *Anelasticity, internal friction, inverted pendulum, flexure element, copper beryllium alloy.*

Giriş

Malzemelerin elastik deformasyon özelliği, hassas makina ve ölçüm cihazlarında 100 yıldan fazladır kullanılmaktadır. Bakır-berilyum alaşımının (Cu-Be) elastik davranışı ve iyi mekanik, elektriksel özellikleri nedeniyle uzun yıllardır çok farklı alanlarda özellikle de metroloji alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Çökeltme sertleştirilmesi uygulanabilen demir dışı bu metal alaşımı, gösterdiği üstün elastik davranışı nedeniyle özellikle sensör imalatında duyar eleman olarak kullanılmaktadır. Hassas ölçme cihazlarının, kuvvet ileten elastik elemanı olarak veya farklı alanlarda iletkenliği ve manyetik olmayışı nedeniyle de yerçekimi uygulamalarında algılayıcı eleman olarak kullanılmaktadır.

Elastik şekil değişim özelliğinin metroloji alanında kullanımında, malzemenin elastik ve anelastik davranışı çok önemlidir. Metalik malzemeler elastik bölgede belirli bir gerilme değerinin üzerinde anelastik davranış gösterir. Anelastik davranış zamana bağlı doğrusal bir davranıştır ve bu tür malzemelerin özellikle hassas ölçüm cihazlarında kullanımında önemli bir belirsizlik bileşenidir. Anelastik davranışın görüldüğü bölgede, malzemenin elastik modülü yani gerilme-şekil değişimi doğrusunun eğimi sabit değil değişkendir. Gerilme yüklemesi ve boşaltması sırasında ise gerilme-şekil değişimi döngüleri (histerisiz) oluşur. Bu döngüler anelastik sınırdan kapalıdır (yükün malzemedan kaldırılması sırasında ortaya çıkan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin son noktası yüklemenin ilk başladığı nokta ile birleşiktir), yani geri dönebilir şekil değişimleri meydana gelir (Zener, 1960; Nowick ve Berry 1972; Alexopoulos vd., 1980).

Malzemelerde iç sürtünmeden kaynaklanan zamana bağlı elastik davranış “anelastiklik” ile açıklanmış ve malzemeye etkileyen gerilmeden termodinamik işlemlere kadar malzemeyi karakterize eden değişik özelliklerinin bir sonucu olduğu ortaya konulmuştur. Genel olarak bu tür etkiler, malzemedeki ideal elastik davranışa göre gecikmiş bir cevaba neden olmaktadır.

Cu-Be malzemesinin ısı işlemleri sonrasında oluşan çökeltilerin, malzeme içerisinde belirli bü-

yüklük, geometri ve miktarda dağılması gibi parametreler malzemenin yük altında gösterdiği davranışı etkilemektedir. Bu etki, özellikle hassas ölçümlerin yapıldığı sistemlerde hatalara neden olabilmektedir.

Daha önce yapılan çalışmalarda Cu-Be malzemesi incelenmiş, ortaya çıkan anelastik davranış bu malzeme ve aynı alana uygulama imkanı olan diğer malzemeler için farklı ölçüm teknikleri ve cihazları kullanılarak ortaya konulmaya çalışılmıştır (Quinn vd., 1986; Quinn, 1992; Bertolini, 2001).

Konuyla ilgili önceki çalışmalarda, Cu-Be malzemesinin özellikle çökeltme sertleştirilmesi ile ortaya çıkan farklı iç yapı özelliklerinin anelastik davranışına etkisi incelenmemiştir. Yine bu çalışmada, anelastiklik ölçümleri, daha önce önerilen sistemlerin çalışma prensibinden farklı, tamamen yeni bir cihaz olarak tasarlanan mekanik ve optik elemanlara sahip bir ölçme sistemiyle yapılmıştır (Saulson, 1990; Yağmur vd., 2005).

Deney düzeneği

Ters sarkaçta, frekansının asıldığı ağırlığa göre değişmesi, bu tür sarkaçların anelastik ölçümlerde kullanımında büyük yarar sağlamaktadır. Malzemelerdeki anelastik etkilerin ortaya konulmasında önemli bir düzenek olan ters sarkaç sistemi, geniş bir frekans aralığında çalışma imkanı sunar. Basit sarkaç sisteminde, periyodun 30 saniye mertebelerine çıkartılabilmesi için 20 metreye yakın bir kol uzunluğunu gerektirmektedir ki bu da ölçüm yapmayı neredeyse imkansız kılmaktadır. Ayrıca küçük açılarda, basit sarkaçta periyot kütleden bağımsızdır (Denklem 1).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1)$$

Burada L, sarkaç kolunun boyunu (uzunluğunu), g ise yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Tasarlanan düzenekte (Şekil 1) istenen frekansın ayarlanabilir olması ve sistemin imal edilip ölçmeyi mümkün kılması gerekmektedir. Bu

amaçla tasarlanıp imal edilen yeni ters sarkaç, istenilen periyotlardaki (2 s-30 s) ölçüm için uygun bir düzendir.

Düzeneğin mekanik kısmı "ProEngineer" CAD/CAM (Computer Aided Design and Manufacturing : Bilgisayar Destekli Tasarım ve İmalat) yazılımı kullanılarak tamamen özgün bir şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan parçalar daha sonra monte edilmiştir. Parçaların imalatında klasik imalat yöntemleri kullanılmıştır. Düzenekte kullanılan tüm parçalar manyetik olmayan malzemeden imal edilmiştir. Sarkacın önden kesit görünüşü Şekil 2'de verilmiştir.

Düzeneğin sarkaç kısmında esnek eleman deney numunelerine istenilen gerilme büyüklüğünün verilebilmesi için ProMechanica yazılımında sonlu elemanlar modülünde analizi ve simülasyonlar yapılmıştır.

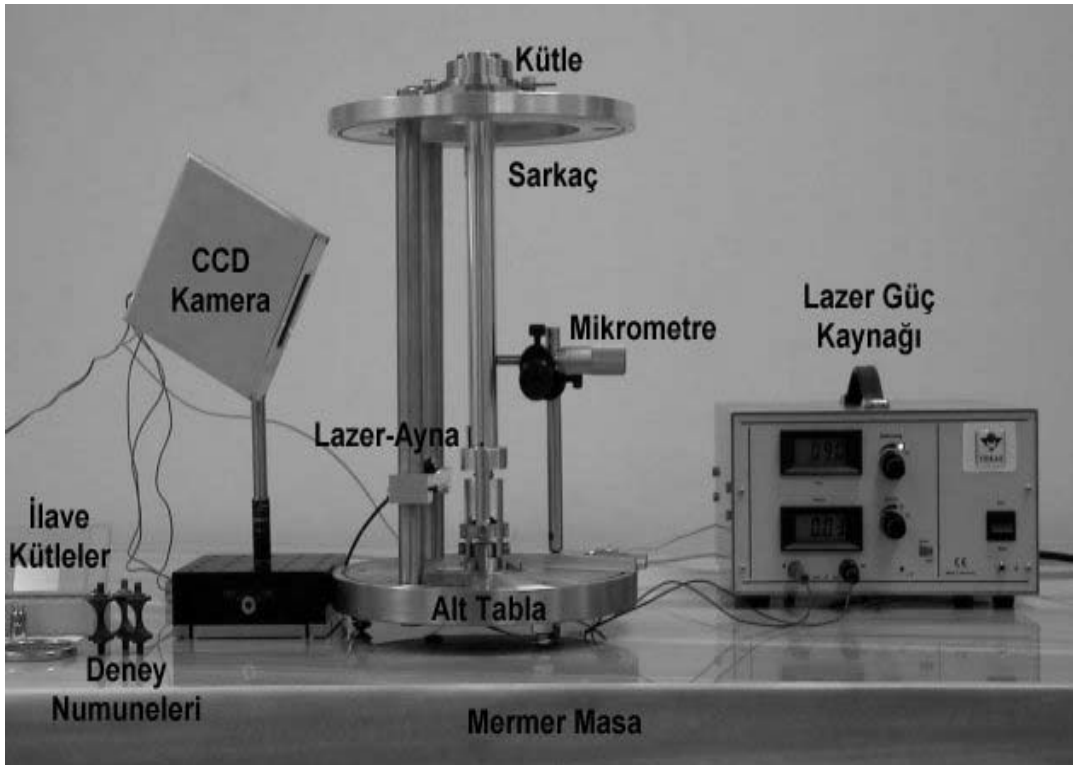
Ölçüm düzeneğinde, esnek elemanın bağlı olduğu sarkaç kol hareketinin tespit edilebilmesi için lazer-ayna-CCD kamera üçlüsü kullanılmıştır. Bu amaçla ayna, sarkaç koluna yapıştırılarak tutturulmuştur. Lazer ile ayna arasındaki açı 90°

olacak şekilde, üst ve alt tablaların birbirine tutturulduğu 3 adet çubuğun ikisine monte edilmiştir. CCD kamera da aynadan gelen lazer ışını algılayacak şekilde yerleştirilmiştir.

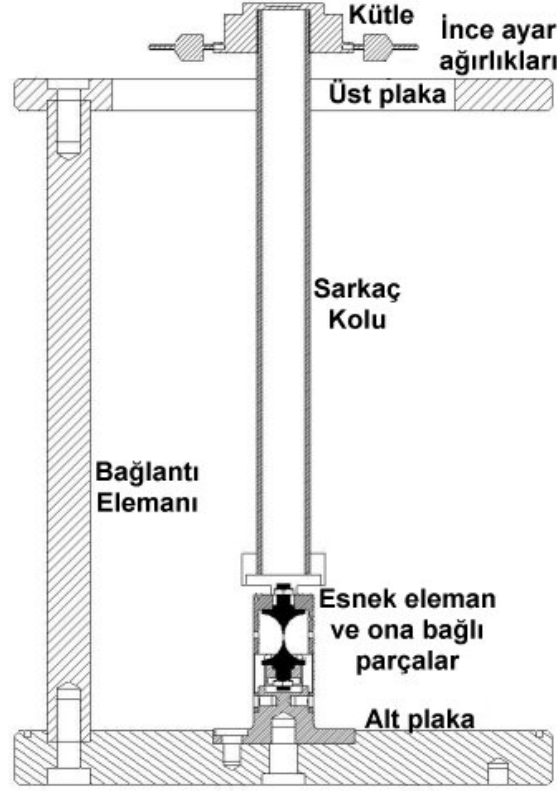
Kullanılan CCD kamera TÜBİTAK-UEKAE Optoelektronik Birimi'nce geliştirilmiş ve imal edilmiş olup, genel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. CCD kameranın çıkışı, RS-232 iletişim protokolü ile bilgisayar tarafından kaydedilmiştir.

Numune malzemesi, tasarımı ve özellikleri

Esnek elemanların tasarım kriterleri dikkate alınarak, deney düzeneğinde monte edileceği yere uygun ve simetrik olarak, UNS C17200 kodlu Cu-Be malzemeden (Tablo 2) tasarlanmıştır. Tasarlanan deney numunesinin rijit bir şekilde diğer parçalara monte edilebilmesi için kare şeklinde, ucunda ve sonunda oturma yüzeyleri tasarlanarak esnek elemanın montajı sırasında inceltilmiş kesite gelebilecek momentler bu yüzeylerde karşılanmıştır. Numuneler her iki tarafından M6 somunlarla düzeneğe bağlanacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin fotoğrafı



Şekil 2. Ölçüm düzeneğinin kesit resmi ve parçalar

Tablo 1. CCD kameranın özellikleri

Piksel sayısı	5150
Kamera tipi	Tek renkli (Monochrome)
Aktif piksel	5150 × 1
Piksel boyutu	7 × 7 µm
Maksimum tarama	16 MHz
Video çıkışı	8 bit ve 10 bit Dijital Analog Yapı
Diğer özellikleri	Toplama zamanı, sinyal kayması, ışığa maruz kalma kontrolü ve senkronizasyon parametreleri cihaza özel yazılan kodla programlanabilir.

Tablo 2. UNS C17200 kodlu Cu-Be malzemesinin kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimi	Üretici Firma
% Be 1.92 ± 0.07, % Co 0.17 ± 0.01, % Ni 0.005, % Fe 0.33 ± 0.01, % Pb 0.37 ± 0.01, % Cu 97.2 kalan	Brush Wellman

Numunelerin inceltilmiş kısmının kalınlığı (t) nominal 320 µm, boyu (b) 2 mm olacak şekilde belirlenmiştir. İmalat sonrası parçalar CMM (Coordinate Measuring Machine: Koordinat Ölçme Makinası) cihazıyla ölçülüp bu büyüklükler teyit edilmiş ve hesaplamalara katılmıştır.

Ölçüm düzeneğinde yapılan deneyler ve numune iç yapıları

Deneyler, TÜBİTAK-Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Kütle Standartları Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında Laboratuvar'daki ortalama çevresel şartlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Deneyler sırasındaki ortam şartları

Laboratuvar Sıcaklığı	20.0 ± 0.5 °C
Atmosfer Basıncı	995.0 ± 5.0 mbar
Bağıl Nem	% 45.0 ± 5.0

Yaşlandırma ısıl işlemiyle, farklı iç yapı ve çökelti formlarında elde edilen numuneler, tamamen özgün tasarlanan ve optik ölçme sistemiyle donatılan düzenekte çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Farklı iç yapıya sahip Cu-Be malzemesinden numunelerin elastik-anelastik davranışları, gerilme uygulama sonrası anelastik davranışı (gevşeme) ve dinamik gerilme altında malzemenin elastiklik modülünde meydana gelen modül hataları (kayıp) elde edilmiş ayrıca, malzemeler için anelastik limitin tespitinde yeni bir yaklaşım sunulmuştur.

Numune iç yapı farklılıklarının, bahsedilen davranışlara etkileri deneysel olarak tespit edilmiştir. Her malzeme grubu için 3 adet numune kullanılmıştır. Numunelerin geometrik ölçümleri CMM cihazında gerçekleştirilmiş ve uygulanan yer değişimine göre, kritik kesitte etkiyen maksimum gerilmeler sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilmiştir. Deney düzeneğinde CCD kamera konumu tüm deneylerde aynı pozisyonda tutularak, numuneler arasındaki içyapı farklılıkların malzeme davranışına etkileri gözlemlenmiştir.

Deney numuneleri (Tablo 4) farklı ısıl işlemlere tabi tutulmuştur. Isıl işlemlerle malzemeye Tablo 4'teki hedef içi yapı ve özellikler kazandırılmaya çalışılmıştır. Özetle; malzemenin anelastik davranışına dislokasyon yoğunluğunun, tane sınırlarının, çökelti büyüklük, miktar ve dağılımlarının, sertliğin, farklı faz yapılarının etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Malzemede çözeltiliye alınma sonrası plastik soğuk şekil değiştirilerek dislokasyon yoğunluğu artırılmış iç yapı, AR kodu ile gösterilmiştir.

AR kodlu iç yapı özelliklerine sahip malzeme, 315 °C'de 2 saat tutularak yaşlandırma işlemi uygulanmış, böylece malzemede çökelti meydana getirilmiştir. Bu numuneler Y kodu ile gösterilmiştir.

Yaşlandırma işleminin aynı sıcaklıkta 6 saat devam ettirilmesiyle, G.P (Guinier-Preston) bölgelerinin γ' ve γ fazlarına dönüşmesi sağlanarak daha dengeli bir içyapı hedeflenmiştir. Uzun süreli yaşlandırma olarak adlandırılan bu işlemde sıcaklık yaşlandırma sıcaklığı ile aynı seçilmiştir. Böylece malzeme sertliğinde fazlaca bir düşmeye neden olmadan faz yapılarının ve çökeltilerin etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu grup numuneler USY kodu ile gösterilmiştir.

Numunelerin AR iç yapı özelliğinden yani şekil değiştirilerek dislokasyon yoğunluğu artırılmış malzemedeki, katı çözeltiliye alınmak suretiyle normal iç yapı özellikleri elde edilmiştir. Böylece dislokasyon yoğunluğunun en az olduğu katı çözeltili elde edilmiştir. Bu iç yapıdaki numunelere yaşlandırma işlemi uygulanarak (315 °C'de 3 saat) Y kodlu numunelerde olduğu gibi çökelti bir yapı elde edilmiştir. Bu numuneler Y2 kodu ile gösterilmiştir.

Y2 kodlu numunelere benzer şekilde, aynı sıcaklıkta 6 saat tutulmak suretiyle katı çözeltili halinde uzun süreli yaşlandırılmış numuneler elde edilmiştir. Bu grup numuneler de USY2 olarak gösterilmiştir.

AR kodlu numuneler yeniden kristalleşme sıcaklığı olan 400 °C'nin üstünde bir sıcaklıkta (550 °C) 30 dk. tutularak, malzemede iri taneli yapı meydana getirilmiştir. Böylece tane sınırları göreceli olarak azaltılmıştır. Bu şekilde tane sınırlarının, incelenmek istenen malzeme özelliğine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu grup numuneler TB1 kodu ile gösterilmiştir. Farklı sıcaklıklar için ise TB2 ve TB3 kodları kullanılmıştır. Bu grup numunelere yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde tavlama işlemi uygulanması nedeniyle bir miktar çökelti katı çözeltili haline gelmiş olabileceğinden yeniden yaşlandırma ile bu yapının tekrar çökelti sertleştirmesine tabi tutulması amaçlanmıştır. Tablo 4'te verilen ve numunelere uygulanan ısıl ve mekanik işlemlere ait kodların açıklamaları şöyledir; KÇ: Katı çözeltiliye alınmış, ŞD: Şekil değiştirmiş (pekleşme yapılmış), Y: Yaşlandırma yapılmış (315 °C'de 2-3 saat), USY: Uzun süreli yaşlandırma yapılmış (315 °C'de 6 saat),

T1:Tavlama (550 °C’de 30 dk), T2: Tavlama (500 °C’de 10 dk), T3: Tavlama (500 °C’de 5 dk).

Genel sonuçlar

Tasarlanan ters sarkaç düzeneğinde, esnek eleman üzerindeki sarkaç kolunun açısız salınımları CCD kamera ile tespit edilip, zamana bağlı değişimleri bilgisayar yardımıyla kaydedilmiştir. Farklı salınım periyotlarında elde edilen bu salınımların zaman bağlı genlik azalmalarından 4 adet örnek Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3c ve d’de salınımların kesildiği noktalar, sarkacın düzensiz hareketlere başladığı noktalar ve grafikte gösterilmemiştir. Ters sarkaç düzeneğinden elde edilen salınımlar, sarkaç kolunun bağlı olduğu esnek elemanın davranışının bir fonksiyonudur. Bu salınımların tepe noktalarının zaman göre belirlenmesiyle, malzemenin elastik ve anelastik davranışı hakkında bilgi edinilebilir.

Yaşlandırılmış (Y), uzun süreli yaşlandırılmış (USY) ve kaba taneli yapıda (TB1), 3 farklı iç yapıya sahip numunenin kalite faktörlerinin değişimi Şekil 4’te gösterilmiştir. Q değeri salınım frekansının (ω) karesiyle doğru orantılı şekilde artmaktadır. Bu sonuçlar, Denklem 2 ile ifade edilen bağıntının bir göstergesidir. Yine, mal-

zeme iç yapısının o malzemeden imal edilmiş yay elemanı kullanılmış bir sarkacın kalite faktörünü doğrudan etkilediği Şekil 4’e bakılarak ifade edilebilir.

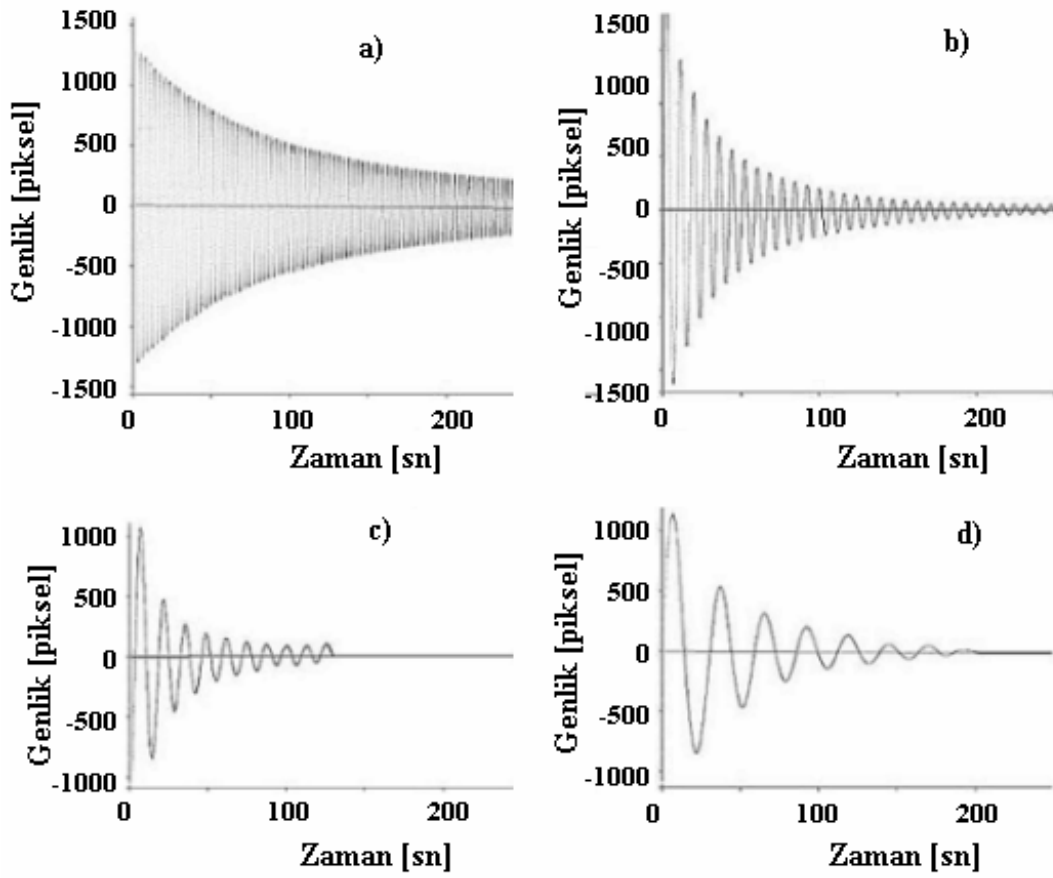
$$Q = \frac{\omega_r^2}{(\kappa/I)\phi(\omega_r)} \quad (2)$$

Şekil 4’te Y, USY ve TB1 numunelerine ait sonuçlar verilmiştir. Tablo 4’de ifade edilen, kalan diğer grup numune sonuçları ise bu grafikte gösterilmemiştir. Bahsedilen bu numunelerin Q değerleri, üzerinde ölçümlerin yapıldığı diğer 3 grup esas alınarak Tablo 5’te verilmiştir (Q değerine göre sıralanarak).

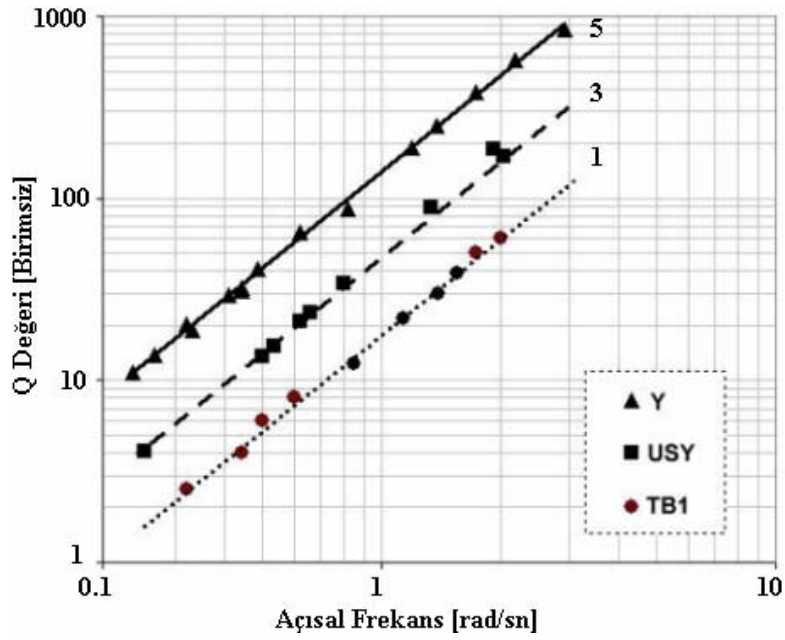
Tablo 5’e bakıldığında, sertlikleri hemen hemen aynı olan Y, USY ve TB3 kodlu numunelerin farklı Q değerlerine sahip olduğu görülebilir. Yine, aynı sertlikteki AR ve TB1 iç yapıları numunelerin çok farklı Q değerlerini verdikleri tespit edilmiştir. Buradan, malzeme iç yapısal özelliklerinin sarkacın kalite faktörünü doğrudan etkilediğini ve bu değerlerin sertliğin bir fonksiyonu olmadığı söylenebilir (Sgobba vd., 1995). Ama, sert malzemelerin de iyi anelastik özellik gösterdikleri bilinen bir gerçektir (Allgeier, 1994; Fank, 2002).

Tablo 4. Numune kodları, uygulanan ısıl işlemler ve malzeme özellikleri

Grup	Kod	Uygulanan Isıl ve Mekanik İşlem	Malzeme İç Yapı özelliği	Sertlik [HRB-C] / (HV)
1	Y	KÇ+ŞD+Y	Tane sınırları ve içlerinde düzgün dağılmış çökelti-ler, G.P bölgeleri	41 HRC (400 HV)
2	USY	KÇ+ŞD+USY	Bir araya gelerek miktarı göreceli azalmış çökelti formları	40 HRC (388 HV)
3	TB3	KÇ+Y+T3+Y	Düşük dislokasyon yoğunluğu, çökelti bir araya gelerek miktarı azalmış	40 HRC (388 HV)
4	Y2	KÇ+Y	Düşük dislokasyon yoğunluğu, düzgün dağılmış çökelti formları	38 HRC (369 HV)
5	USY ₂	KÇ+USY	Bir araya gelerek miktarı göreceli azalmış çökelti formları	35 HRC (340 HV)
6	TB2	KÇ+ŞD+Y+T2+Y	Bir miktar tane irileşmesi	31 HRC (306 HV)
7	AR	KÇ+ŞD	Yüksek dislokasyon yoğunluğu	95 HRB (214 HV)
8	TB1	KÇ+ŞD+Y+T1+Y	Yeniden kristalleşme, kaba taneli yapı, göreceli düşük tane sınır alanı, tav ikizleri	94 HRB (209 HV)



Şekil 3. Tipik bir numune için sarkacın farklı periyotlarda salınım davranışı; salınım periyotları: a) 3.1 sn, b) 7.8 sn, c) 13.1 sn, d) 27.8 sn



Şekil 4. Sarkaç kalite faktörünün (Q) salınımın açısal frekansı ile değişimi

Tablo 5. İç Yapının Q değerine etkisi

Kod	Sertlik Değeri [HRB-C] ve [HV]	Q değeri bakımından göreceli yeri
Y	41 HRC (400 HV)	5
TB3	40 HRC (388 HV)	4
AR	95 HRB (214 HV)	4
USY	40 HRC (388 HV)	3
Y2	38 HRC (369 HV)	2
USY2	35 HRC (340 HV)	2
TB2	31 HRC (306 HV)	2
TB1	94 HRB (209 HV)	1

Tablo 5'te Q değeri için 5 en yüksek, 1 en düşük değer olarak ifade edilmiştir (Şekil 4'e göre).

İçerisinde çökelti formları oluşturulmamış AR kodlu numunelerin, katı çözelti sonrası yaşlandırma ve uzun süreli yaşlandırma ile sertliği artırılmış, içerisinde uygun şekilde dağılmış çökeltilerin bulunduğu Y2 ve USY2 grubu malzemelere göre daha yüksek Q değerini sağlamıştır. Bu durum dislokasyon yoğunluğunun malzeme, anelastik özellik bakımından en etkin parametrelerden birisi olduğunun bir göstergesidir.

Yaşlandırma ile tane sınırlarında ve içlerinde uygun büyüklük, form ve dağılımda elde edilmiş çökelti formları ve G.P bölgelerinin, malzemenin Q değerini yükselttiği Y kodlu numunelerin sonucundan açıkça anlaşılabilmektedir. Uzun süreli yaşlandırma ile çökeltilerin biraraya gelerek miktarlarında göreceli azalmaları kötü etki yapmaktadır. Bu durum Y ve USY grubu numunelerin karşılaştırılmasıyla anlaşılabilir.

Tane sınırları, dislokasyonların kavislenmesi, yumaklaşması ve yığılması gibi mekanizmaları gerçekleştirebilmesinde engel oluşturduğundan anelastik özellik bakımından etkili yapılardır. TB1 kodlu numunelerde kaba taneli yapı elde edilerek, Y ve USY numunelerine göre daha kötü sonuçlar verdiği görülmektedir. Dislokasyonların bahsedilen mekanizmalarını gerçekleştirebilmesi için, gerekli boş alanların malzeme içlerinde olması, anelastik özellik bakımından kötü etki etmektedir. Çökeltilerin uygun büyüklük, form ve dağılımda olmalarının yanında tane sınırları da bu noktada etkilidir. Kaba taneli yapıda tane sınır alanları göreceli daha düşük ol-

duğundan, malzeme iç yapısında dislokasyon mekanizmaları için boşluklar oluşur. Zaten kaba taneli yapının sertliği de diğerlerine göre daha düşük seviyelerdedir.

TB1, TB2 ve TB3 gruplarına bakılarak; yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde, sıcaklık ve tutma sürelerinin artmasıyla malzemelerin Q değerlerinin düştüğü görülebilir. Bunun nedeni olarak; yeniden kristalleşmenin ve tutma süresinin artırılmasıyla kaba taneli bir malzeme iç yapısının etkin olması değerlendirilebilir.

Dinamik gerilme altında modül hatasının belirlenmesi

Modül kaybı, malzemenin gerilme altındaki elastik modülü ile normal haldeki değeri arasındaki fark (ΔE) olarak ifade edilir. Bağlı modül kaybı ise ($\Delta E/E$) ters sarkaçla ölçümlerde iç sürünmelere eşit alınabilir.

Malzemelere uygulanan gerilmeye bağlı olarak, modül hatası yani modül kayıpları artmaktadır (Quinn vd., 1995; Quinn vd., 1997). Esnek elemanların kullanıldığı alanlar düşünüldüğünde, bu kayıpların seviyesi önemli bir parametre olmaktadır. Özellikle metroloji gibi ölçüm doğruluğunun çok önemli olduğu alanlarda, gerilme altında malzemenin mümkün olduğu kadar az modül kaybı olması istenir. Metroloji'de artan ile azalan yüklem arasında meydana gelen fark nedeniyle ortaya çıkan histeresiz hatası, bu modül kaybıyla alakalıdır.

Malzemelerde, elastiklik modülünün artan gerilme ile bir miktar azalmasının bir nedeni olarak, artan kuvvet ile malzeme atomları arasındaki mesafesinin değişimi dolayısıyla bu mesafe ile elastiklik modülü arasındaki ilişki gösterilmektedir (Allgeier, 1994; Fank, 2002). Şekil değişimlerinin elastik bir karakterde olmasına karşın, malzemede gevşemeye yol açan mikropplastik şekil değişimi mekanizmalarının katkısı da etkin bir parametre olarak değerlendirilmiştir (Quinn, 1992; Fank, 2002).

Malzemenin normal haldeki elastiklik modülü ile gerilme altındaki değeri arasındaki fark modül kaybını (veya hatasını) verir. Modül kaybı, gerilme altında malzemenin iç sürtünmelerinin bir göstergesidir ve Denklem 2 ile ifade edilir. Bu bağıntıya göre bağıl modül kaybı ($\Delta E/E$), sarkaç sisteminde ölçülmeye çalışıldığında; sarkacın salınım frekansına, yay elemanının rijitlik değerine ve sarkacın kütleli atalet momentine bağlıdır.

Tablo 6'da, 3 malzeme grubu için farklı frekanslarda gerçekleştirilen, 3 adet numunenin modül hatalarının ortalamaları alınarak elde edilen değerler verilmiştir.

Tablo 6. Farklı iç yapıların modül hataları

	Yaşlandırılmış (Y)	Uzun süreli Yaşlandırılmış (USY)	Kaba Taneli Yapı (TB1)
$\Delta E/E$	4.9×10^{-5}	2.7×10^{-4}	6.5×10^{-4}
ΔE [MPa]	6	36	85

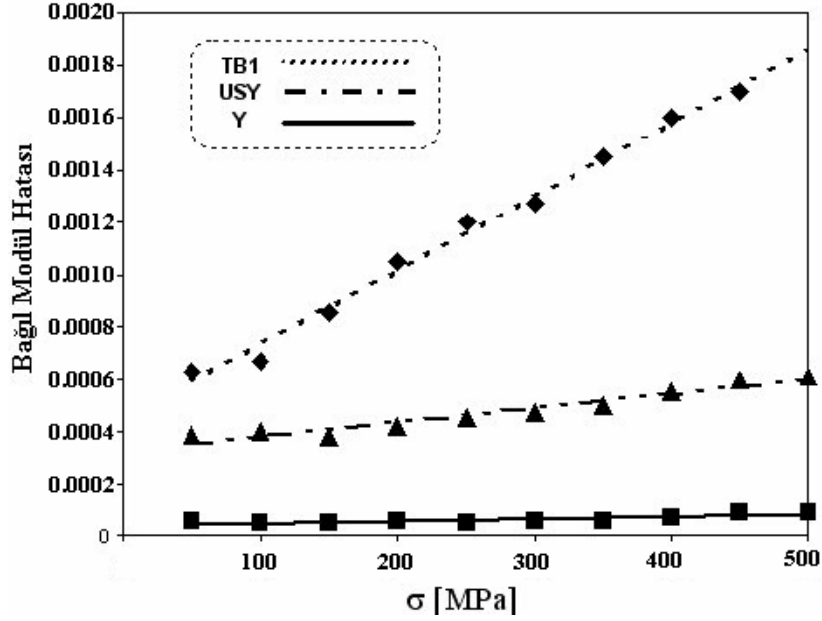
Yaşlandırılmış numunelerin en düşük modül hatasına sahip oldukları açıkça görülebilir. Elde edilen bu değer, aynı malzeme için (Cu-Be) daha önce elde edilen sonuçlarla yaklaşıktır (Quinn vd., 1995; Yuki vd., 1996; Quinn vd., 1997). Numunelerde tane büyümesinin ise modül hatasını arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu modül hataları başlangıç gerilmesi için (100 MPa civarı bir gerilme değeri) tespit edilmiştir.

Şekil 5'te, gerilmenin artmasıyla modül hatalarının arttığı gösterilmiştir. Yaşlandırılmış nu-

munelerde bu değer diğer numunelere göre daha düşüktür. Bu da yaşlandırılmış numunelerin daha iyi anelastik davranış gösterdiğinin bir ifadesidir. Kaba taneli yapı, modül hatalarının gerilme bağımlılığını diğerlerine göre daha fazla arttırmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Malzemelerinin dinamik olarak test edilebileceği bir ters sarkaç düzeneği tasarlanıp imal edilmiştir.
2. Esnek eleman malzemelerinin anelastik davranışlarının ters sarkaç düzeneği ile tespit edilebileceği gösterilmiştir.
3. Ters sarkaç sisteminde salınım hareketlerinin tespiti için kullanılan CCD kameranın, benzer amaçlar için kullanılacak ölçüm sistemlerine göre daha ucuz ve taşınabilir olması avantaj olarak değerlendirilebilir. Uygun özelliklerdeki CCD kameraların metrolojik amaçlı ölçümlerde rahatlıkla kullanılabilmesini ifade etmek mümkündür.
4. Yaşlandırma ısıl işlemiyle Cu-Be malzemesinin düşük anelastik davranış gösterdiği, bu çalışma ile yeni olarak tasarlanan ters sarkaç ile de teyit edilmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış Cu-Be malzemesinin anelastik sınır gerilme değeri 400 MPa civarında tespit edilmiştir. Bu sınır gerilme değerinin altında bağıl modül kaybı sabit ve değeri 4.9×10^{-5} 'dir. Sınır gerilme değerinin üzerinde ise, artan gerilme ile bağıl modül kaybı artmaktadır.
5. İncelenen iç yapılar arasında, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış Cu-Be'un esnek eleman imalatı için en uygun malzeme olduğu görülmüştür.
6. Dislokasyonlar ve onların çökeltiyle olan etkileşiminin, malzemenin anelastik davranışında etkin bir parametre olduğu ifade edilebilir.
7. Sertlik ile anelastik davranışın iyileşmesi arasında doğru bir orantı olmadığı ama sert malzemelerin de düşük anelastik etki gösterdiği ifade edilebilir.
8. Malzemede çökelti sayısı ve tane sınır alanlarının artmasıyla anelastik özellik iyileşmektedir.



Şekil 5. Gerilmeye bağlı olarak modül hatasının değişimi

Teşekkür

Bu çalışmada yardımlarından dolayı, TÜBİTAK-UME KSL sorumlusu Sevda KAÇMAZ teşekkürle anılır.

Kaynaklar

- Alexopoulos P. S., Cho C.W., Hu C.P. ve LI C.Y., (1980). Determination of the anelastic modulus for several metals, *Acta Metallurgical*, **29**, 569-537.
- Allgeier T., (1994). Factors influence the mechanical hysteresis in stainless steel load cells, *Doktora Tezi*, Glamorgan University, England.
- Bertolini A., (2001). High sensitivity accelerometers for gravity experiments, *Doktora Tezi*, Università Delgi Studi di Pisa, İtalya.
- Fank S., (2002). Kuvvet Dönüştürücülerinde yay elemanı malzemesi özelliklerinin performans üzerindeki etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Nowick A.S. ve Berry B.S., (1972). *Anelastic relaxation in crystalline solids*, Academic Press, New York.
- Quinn T.J., Speake C.C. ve Davis R.S., (1986). A 1 kg Mass Comparator Using Flexure-Strip Suspensions: Preliminary Results, *Metrologia*, **23**, 87-100.
- Quinn T.J., Speake C.C. ve Brown L.M., (1992). Materials problems in the construction of long-period pendulums, *Philosophical Magazine*, **65**, 261-276.

- Quinn T.J., (1992). The beam balance as an instrument for very precise weighing, *Measurement Science and Technology*, **3**, 141-159.
- Quinn T.J., Speake C.C., Davis R.S. ve Tew W., (1995). Stress-dependent damping in Cu-Be torsion and flexure suspensions at stresses up to 1.1 GPa, *Physics Letters A*, **197**, 202-208.
- Quinn T.J., Davis R.S., Speake C.C. ve Brown L.M., (1997). The restoring torque and damping in wide Cu-Be torsion strips, *Physics Letters A* **228**, 36-42.
- Saulson P.R., (1990). The inverted pendulum as a probe of anelasticity, *Physical Review D* **42**, 182-191.
- Sgobba S., Künzi H. ve Ilschner B., (1995). The influence of thermal and surface treatments on the anelastic creep of Al-Zn and Al-Cu alloys, *Acta Metall Mater*, **43-3**, 1171-1181.
- Yağmur L., Gülmez T., Hacıyev F. ve Kaçmaz S., (2005). A new inverted pendulum to determine anelastic behavior of metals : Design and characterization, *Review of Scientific Instruments* **76**, 093903;1-7.
- Yuki K., Marton M.A, Kanda N. ve Kuroda K., (1996). Measuring the anelasticity of Cu-Be film under tensile stress using the x-pendulum, *Physics Letters A* **223**, 149-154.
- Zener C., (1960). *Elasticity and anelasticity of metals*, The University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.