

Amorf ferromanyetik tellerde mıknatıslanma süreçleri

Muzaffer ERDOĞAN*, Orhan KAMER

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

Özet

Çifttekararlılık için sınır uzunluğun üzerindeki bir amorf ferromanyetik telin üzerinde yaratılan ezilgin ve küçük bobinler ile tele uygulanan yerel manyetik alanların telin DC manyetik histeresisine etkisi, deneysel olarak incelenmiş, sonuçlar bir model ile yorumlanmıştır. Bir grup amorf tel, ölçümden önce 0.75mm çaplı sert çelik iğneyle tele dik olarak ortadan değişik miktarlarda ezilmiştir. Diğer bir grup ölçüm de ortasından kesilip çeşitli aralıklar bırakılmış örneklerle yapılmıştır. Üçüncü bir grup deney de, tele 1.5mm uzunluğunda bobin(ler) sarılarak uygulanan manyetik alan(lar)ın telin manyetik histeresis üzerindeki etkilerini incelemek üzere yapılmıştır. Birinci grup ölçümlerde kullanılan teller çifttekararlılık için sınır uzunluktan kısa olduğu halde ezik 20 μ m'yi aştıktan sonra histeresis döngülerinde iki aşamalı büyük Barkhausen sıçraması ile kademeli düşüş görülmüştür. İkinci grup deneylerden elde edilen histeresis döngüleri fark olarak birinci gruptakilerden sadece basamaklı gevşeyen kısımlarında daha büyük bir eğim göstermiştir. Aynı yerde tele sarılı küçük bir bobin ile tele artı yönlü manyetik alan uygulandığında ise, mıknatıslanma histeresis döngüsünde uzun, basamaklı bir gevşmeden sonra büyük bir Barkhausen sıçraması ile ters yönde doyuma gitmiştir. Döngünün çıkıcı kısmında ise ters mıknatıslanmanın, eksi bir dış alan değerinde büyük bir Barkhausen sıçraması ile başlayıp küçük basamaklarla doyuma gittiği görülmüştür. Bu çalışmada sunulan model, telin iç çekirdeğindeki manyetik bölge duvarı hareketi ve kapanma bölgelerindeki parçalanma sonucunda ortaya çıkan manyetik moment dağılımının bilgisayar yazılımları ile hesaplanması temeline dayanmaktadır. Hesap sonucu elde edilen histeresis döngüleri deneysel sonuçlarla uyum içindedir.

Anahtar Kelimeler: Amorf tel, ezik, histeresis, ferromanyetik.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Muzafer Erdoğan. muzoerdo@gmail.com; Tel: (212) 285 69 93.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Amorf ferromanyetik tellerde mıknatıslanma mekanizmaları" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 05.05.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 30.07.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.04.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Magnetization mechanism in amorphous ferromagnetic wires

Extended abstract

Hysteresis loops in a ferromagnetic amorphous wire longer than the critical length are studied. Wires with a deformation in the middle are considered. Both theoretical and experimental studies using DC vibrating sample magnetometer were performed.

Amorphous wires with compositions Fe-Si-B and with diameter 125 μ m of positive magnetostriction coefficient are used in the experiments. Samples have been deformed at the middle by pressing with a hard steel needle of 0.75mm diameter, perpendicular to the axis of the wire. Another group of measurements was carried out of the samples cut at the middle. A third group of experiments was intended to be a bridge to the hysteresis model proposed. 1.5mm coils were wound up at the middle of the wire under investigation to apply a local magnetic bias. An oppositely directed pair of local fields is applied with a pair of identical coils reversely connected is employed to investigate its effect on the hysteresis loop.

The DC hysteresis loops were measured with a home made vibrating sample magnetometer. The sample vibrates sinusoidally along the axis of a long solenoid at the frequency of 23 Hz. The pick-up coils have been particularly designed to measure long samples. Magnetic field has been changed with a step of 0.3 A/m, and measured with a sensitivity of 0.01 A/m.

In the first group of experiments, although the length of the wire is greater than the critical length for bistable behavior, after a threshold value of increasing, the hysteresis loop starts to narrow keeping its rectangular shape. Furthermore deformations more than 20 μ m lead to two large Barkhausen jumps separated by a staircase relaxation. The only difference of the hysteresis loops yielded by the second group of experiments from the first is that the slope of the inclined parts is bigger than those in the first group.

The unidirectional magnetic bias gave rise to a staircase relaxation, followed by a long Barkhausen jump in the descending branch of the loop. In the

ascending branch, the domain wall completes its almost entire motion in a negative external field and the magnetization approaches saturation with staircase movements. As the current through the reversely connected pair of coils is increased, the hysteresis loop starts developing nearly horizontal tails first at the up right, and then at the bottom left corners.

The model proposed in this work is based on the calculation of the magnetic moment distribution in the core of the wire by means of computer simulations. To simulate the magnetization process of the deformed wire, the total energy is taken as a function of five variables. Three of these correspond to the nucleation at two ends and at the middle of the wire while the remaining two represent the domain wall locations in the two regions. The simulation traces the gradient in the six dimensional energy landscape to find the set of coordinates, which, for a given value of external field, minimizes the total energy. Magnetization makes a jump to another stable position when the total energy loses its local minimum in the landscape. Since in general there are more than one energy minima along the entire process, a magnetic hysteresis occurs. The total energy of the system is taken as the summation of mutual magnetostatic interactions along all the domains, Zeeman energy, and the anisotropy energies. Exchange interactions are taken into account by assuming the domain wall motions along the wire.

When the deformation created in the middle of the wire is represented by just an anisotropy field, but no nucleation allowed, the upper and lower halves of the calculated loop is shifted symmetrically to the right and to the left respectively, with horizontal stretch lines in the two directions. The horizontal lines result from the energy barrier created by the local anisotropy field in the middle. Although the great simplicity of this structure, it reveals the response mechanism of the wire beyond a certain threshold of deformation; no change in the hysteresis occurs before the threshold is reached. When the wall motion starts at a point around the deformation, and nucleation mechanism occurring at the deformed part and at the ends is taken into account, the same staircase character in the hysteresis loops is obtained as the experimental ones. The ends and the deformed part of the wire act as pinning sites.

Keywords: Amorphous wire, deformation, hysteresis, ferromagnetic.

Giriş

Amorf Ferromanyetik Teller (AFT), bir kaç on yıldır zengin manyetik özelliklerinden dolayı yoğun bir ilgi alanıdır (Humphrey, 2002; Squire vd., 1994). İki yönlü kararlılık sayesinde elektronik aletler, konum seçici dedektörler, algılayıcılar ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır (Humphrey, 1994; Humphrey, 2002).

Büyük manyetik büzülme katsayılı ve işlem görmemiş ferromanyetik amorf tellerin ana karakteristik özelliği olan bir sınır alanda gerçekleşen geniş Barkhausen sıçrama özelliği tel belli bir sınır uzunluğun üzerindeyse dikdörtgen histeresis döngüsüne neden olur (Vázquez vd., 1992; Vázquez ve Chen, 1995; Zhukova vd., 2003; Vázquez vd., 1999). Demir temelli amorf tellerin uç bölgelerindeki kapanma bölgelerinin varlığı mıknatıslanma mekanizmalarında belirleyici rol oynar (Vázquez ve Chen, 1995). Ters mıknatıslanma manyetik bölge duvarının tel boyunca yayılmak üzere koptuğu uca yakın bir noktadan başlar ve her tersinmede başlangıç ucu değişir, ya da uygulanan dış manyetik alana bağlı olarak aynı kalır.

Amorf telin belirli bir sınır uzunluğun altında olması halinde manyetik çift yönlülük kaybolur ve manyetik histeresi her iki yönde de uzun ve kademeli, sanki tersinir bir gevşeme ile birbirinden ayrılan iki Barkhausen sıçramasına dönüşür (Vázquez ve Chen, 1995; Vázquez vd., 1992; Vázquez vd., 1999). Farklı uzunluklardaki teller için histeresis döngüleri arasındaki farkın ortaya çıkmasında ters mıknatıslanma faktörü önemli bir rol oynar (Vázquez vd., 1999).

Manyetik bölge duvarının hareketini tetikleyen alan tel boyunca değişmemektedir. Kalıntı alanı telin ortalarında bir plato göstermekte, telin uçlarına 3cm gibi bir sınır değerden daha fazla yaklaşıldıkça düşmektedir (Vázquez vd., 1992; Chen vd., 1992). Bu mesafe çiftyönlülük için sınır tel uzunluğunun yaklaşık yarısıdır. Bu olay manyetik enerjiyi en aza indirmek için ortaya çıkan uçlardaki kapanma bölgelerinin büyüklüğü ile çiftyönlülük arasındaki sıkı ilişkiyi ortaya koymaktadır. Kapanma bölgelerinin varlığı uç bölgelerde duvar hareketinin enerji maliyetinin yüksek olmasına neden olmaktadır (Zhukova

vd., 2003). Benzer bir etkinin denetimli olarak telin ortalarında gerçekleştirilebilmesi halinde histeresis döngülerinin kontrollü olarak değiştirilebileceği fikrini oluşturmuştur.

Bu çalışmada çift yönlülük için sınır uzunluğun üzerindeki amorf ferromanyetik tellerin manyetik histeresisinin tele uygulanan ezikler ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Deneysel veriler kullanılarak bir model geliştirilmiştir.

Deneysel ölçümler

Deneysel ölçümlerde UNITIKA Inc. tarafından sağlanan AF-10 tipinde, Fe-Si-B bileşiminde, 125µm çapında 10 cm uzunlukta amorf manyetik büzülme katsayılı amorf teller kullanılmıştır.

Amorf tellere uygulanan mekanik ezik, yerel manyetik alan(lar) ve kesme gibi işlemlerin tellerin manyetik histeresis üzerindeki etkilerini incelemek üzere üç grupta toplayabileceğimiz deneyler yapılmıştır. Bu bölümde ölçülen histeresis eğrileri verilecektir.

Birinci grup ölçümler için kullanılan örnekler ölçümden önce 0.75mm çaplı sert çelik silindir ile tele dik olarak mikrometre yardımı ile ortadan değişik miktarlarda ezilmiştir. Ezikler ezme anında mikrometre ile ölçülmüştür. İkinci grup ölçüm ortasından kesilerek değişik miktarlarda aralıklar bırakılmış örneklerle yapılmıştır. Üçüncü grup ölçümler, tele 1.5 mm uzunluğundaki bir bobin sarılarak uygulanan manyetik alanın ve bu bobinlerden iki tanesinin ters-seri bağlanması ile tele uygulanan manyetik alan çiftinin telin manyetik histeresis üzerindeki etkilerini incelemek üzere yapılmıştır.

Birinci grup ölçümler için kullanılan 50µm kadar ezilmiş bir telin fotoğrafı Şekil 1'de görülmektedir.

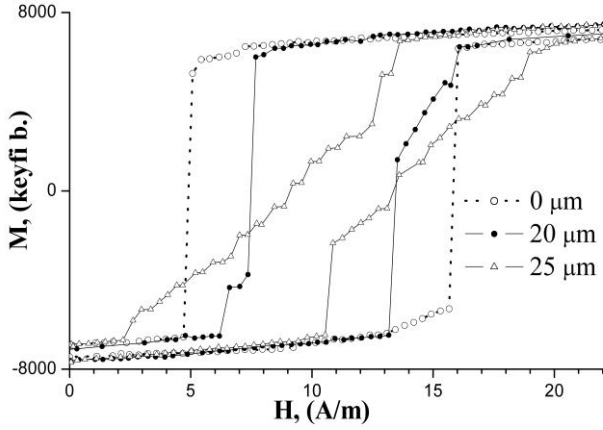
Şekil 2, 10cm uzunluğundaki bir telin manyetik histeresis döngüsünün telin ortasında bir iğne ile yaratılan eziğin artışına karşı nasıl evrildiğini göstermektedir.

Bu telin uzunluğu sınır uzunluktan fazla olduğundan, ezikten önce döngüde görülen dikdörtgen-

sel karakter (kesikli çizgiler) beklenen bir durumdur. Ezikten sonra ortaya çıkan histeresis döngüleri bu uzunluktaki bir tel için literatürde daha önce görülmemiştir.



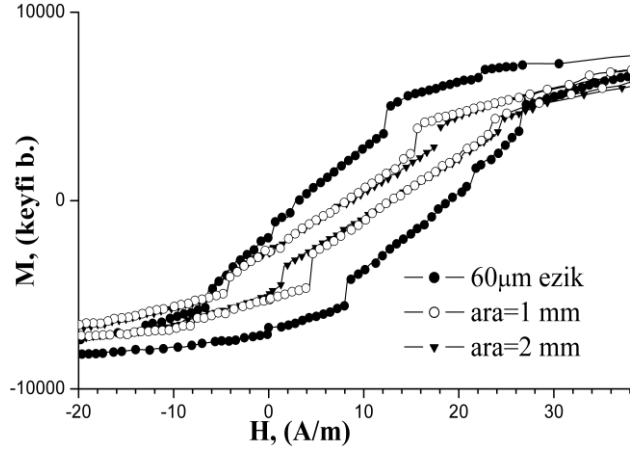
Şekil 1. 50 μm kadar ezilmiş bir telin fotoğrafı



Şekil 2. 10cm uzunluğunda bir telin ezilmeden önce, ortadan 20 μm ezildikten sonra ve 25 μm ezildikten sonra ölçülen manyetik histeresis döngüleri

Eziğin artarak 20 μm den daha az bir eşik değerini aşmasından sonra döngü dikdörtgen karakterini koruyarak daralırken belli bir değerden sonra da sağ üst ve sol alt köşelerinden kırılarak basamaklanmaya başlar. 25 μm 'lik bir ezikten sonra telin histeresis döngüsü her iki yönde de basamaklı bir eğimle birbirinden ayrılan iki Barkhausen sıçramasından oluşmaktadır. Bu olaya, ezme sonucunda tel ortasında bozulan silindirik simetrisinin, manyetoelastik etkileşimlerden dolayı teli birbiri ile etkileşen eş eksenli ve sınır uzunluktan kısa iki parçaya ayırmasının neden olduğu belirlenmiştir. Bu savın Doğruluğunu denemek amacı ile tel ortasından kesilmiş ve eş eksenli olarak aralarındaki uzaklığın değişik değerleri için manyetik histeresis döngü-

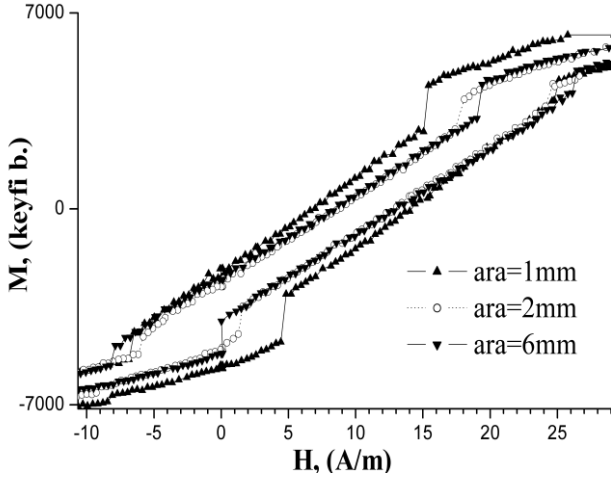
leri ölçülmüştür. Şekil 3'te aralığın 1 mm ve 2 mm olduğu histeresis döngülerinin 60 μm ezik bir telin döngüsü ile bir karşılaştırması görülmektedir.



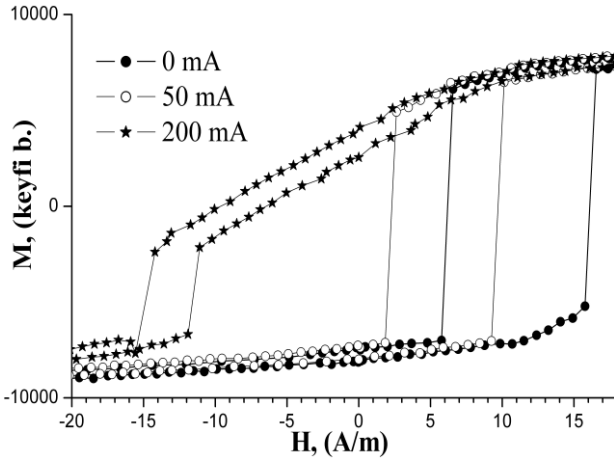
Şekil 3. 10 cm uzunluktaki telin 60 μm ezilmesi ve kesilerek 1mm ve 2mm boşluk bırakılması durumunda manyetik histeresis döngüleri

Ezik ve kesik tellerin döngüleri arasındaki fark, eğik kısımlar arasındaki küçük bir eğim farkı ve histeresis enerjisindeki azalma olarak bulunmuştur. Bu farkın sadece nicel olması ve döngülerin aynı özellikleri taşıyor olması dikkat çekicidir. Şekil 4'te ise aralığın 1 mm, 2 mm ve 6 mm'lik değerleri için histeresis döngüleri görülmektedir. Burada görüldüğü üzere ilk Barkhausen sıçramasının gerçekleştiği manyetik alan ve histeresis enerjisi aralık arttıkça azalmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi bu azalmanın 1 mm ve 2 mm'lik aralıklar için değeri 2 mm ve 6 mm'lik aralıklar için değerinden daha büyüktür. Toplam manyetik enerjideki azalma miktarı artan uzunlukla doyuma gitmektedir.

Şekil 5'te içi boş ve yıldız noktalarla belirtilen iki histeresis döngüsü, telin ortasına sarılan 1.5 mm uzunluğunda 8 sarımlı bir bobinle tele uygulanan iki farklı manyetik alana karşılık gelmektedir. Bobinden geçirilen 50 mA ve 200 mA'lik akımlar, döngülerin iniş kısmında birer Barkhausen sıçraması ile sonlanan basamaklı birer düşüşe neden olmuştur. Döngülerin iniş kısımlarında, manyetik bölge duvarı ters yönde ki bir dış manyetik alana rağmen uygulanan yerel alanla yöndeş olmasından dolayı hareketini neredeyse tamamlar.



Şekil 4. Kesik tel parçalarının aralığı artırıldığında histeresis döngüleri

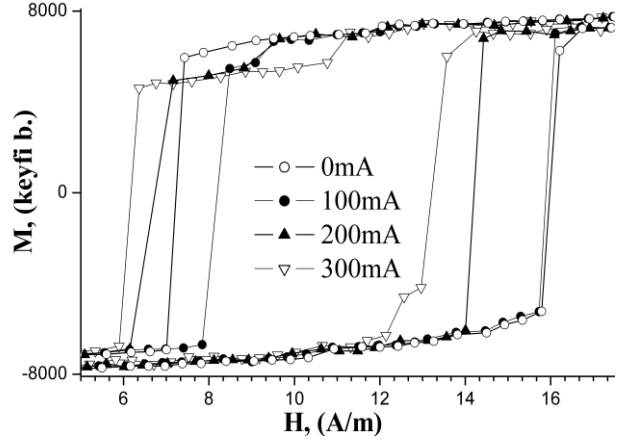


Şekil 5. Tele sarılı 1.5 mm uzunluğundaki bir bobin ile tele uygulanan yerel manyetik alanın ezilmemiş bir telin histeresis döngüsü üzerinde yarattığı etki (bobinden geçen akımlar belirtilmiştir)

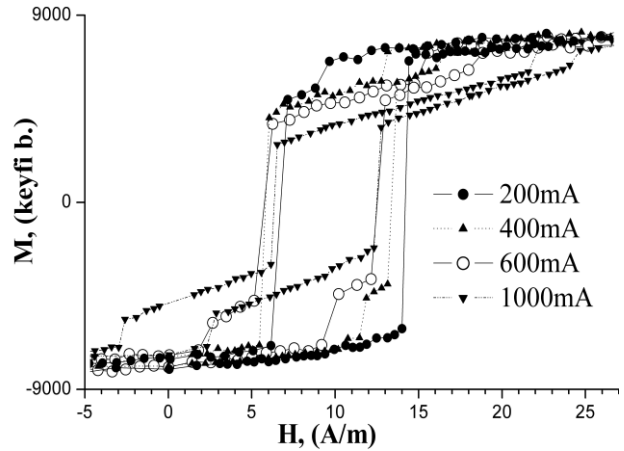
Şekil 6'da, 1 mm aralıklı ters-seri bağlı bir bobin çifti kullanılarak tele ortasından bir çift yerel manyetik alan uygulanarak yapılan histeresis ölçümleri görülmektedir. Bu şekilde görülen dört döngü, bobinden geçen 0 mA, 100 mA, 200 mA ve 300 mA'lık akımlara karşılık gelmektedir. Akım sıfırdan itibaren artırıldıkça daralarak sola kaymıştır.

Şekil 7'de aynı bobinlerden geçirilen daha yüksek akımlar ile ölçülen histeresis döngüleri görülmektedir. 100 mA civarında döngüde önce sağ üst ve sonra sol alt köşesinde ortaya çıkan

uzantılar, artırılan akıma karşı neredeyse yatay olarak gelişmiştir. Akımın artırılmaya devam etmesi halinde dar ve tamamen eğimli bir döngünün ortaya çıkması öngörülmektedir.



Şekil 6. Ters-seri bağlı bir çift bobin ile zıt olarak uygulanmış bir yerel manyetik alan çiftinin etkisi ile telin histeresis döngüsünde dikdörtgen karakterden ilk sapmalar (bobinlerden geçen akımlar belirtilmiştir)



Şekil 7. Ters-seri bağlı bir çift bobin ile zıt olarak uygulanmış bir yerel manyetik alan çiftinin etkisi ile telin histeresis döngüsünün evrilmesi (bobinlerden geçen akımlar belirtilmiştir)

Model

Telin toplam enerjisi

Çelik bir silindir ile ezilen bir amorf tel, ezme noktasının manyetoelastik etkileşimlerden dolayı ayırdığı ve yakın olduğu için birbiri ile etkileşen iki ayrı tel gibi davranmaktadır. Bu yapı

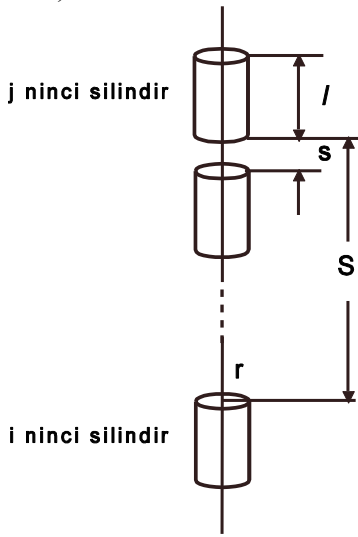
tek parça bir tele göre komşu iki tane fazla tel ucu, ve bu yüzden birden fazla pinning merkezi içerir.

Önerilen model, bir ferromanyetik telin değişen dış manyetik alana karşı manyetik moment dağılımlarının hesaplanması temeline dayanır.

Telin ezilen kısımları, uçlarına ek olarak pinning merkezi olarak davranır. Bu pinning merkezlerine ters mıknatıslanmaya engel olacak yönde yönseçicilik alanları eşlik eder.

Mıknatıslanma, 180-derece (zıt yönlerde manyetik bölgeleri birbirinden ayıran) duvarların hareketi ile, ve telin uçları ile ezilmiş kısımlarının duvar hareketine katılmadan manyetik olarak parçalanması ile gerçekleşir.

Nitel bir inceleme açısından karmaşık yapısına rağmen, söz konusu telin, eksen boyunca sıralanmış, eşit yarıçapta, tabanlarındaki yarıçaptan bağımsız manyetik yüklerle aksel olarak mıknatıslanmış silindirlere olduğu varsayılmıştır (Şekil 8).



Şeki 8. Manyetik bölgeleri temsil eden eş eksenli silindirlerin şematik görünümü (boyutlar ölçeksizdir)

Silindirlerin her biri, diğerleri ile ve dış manyetik alanla etkileşir. Tel ayrıca pinning merkezlerine eşlik eden yönseçicilik alanları ile etkileşir.

Böyle bir silindir diziliminin kendi aralarındaki toplam etkileşme enerjisi,

$$E_{int} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n U_{ij} \quad (1)$$

olarak alınmıştır. Burada n silindir sayısı, U_{ij} ise i ve j sayılı silindirler arası etkileşme enerjisidir. Manyetik yük yoğunluğu m , yarıçapı r olan bir diskin silindirik koordinatlarda (R, z) noktasında yaratacağı manyetik potansiyel

$$\varphi = \frac{mr}{2} \int_0^\infty J_1(xr)J_0(xR)e^{-xz}x^{-1}dx \quad (2)$$

bağıntısı ile verilir (Craik, 1995). Burada $J_n(x)$, n inci dereceden birinci tür Bessel fonksiyonudur. Aralarında z uzaklığı bulunan eş eksenli iki disk arasındaki etkileşme enerjisi;

$$W(z) = \pi m^2 r^2 \int_0^\infty J_1^2(xr)e^{-xz}x^{-2}dx. \quad (3)$$

Denklem 3'ü kullanarak U_{ij} yi yeniden yazabiliriz:

$$U_{ij} = 2W(l+S) - W(2l+S) - W(S), \quad (4)$$

Burada l silindirin boyu ve S ise i ve j ($j > i$) indisli iki silindirin birbirine yakın yüzeyleri arasındaki uzaklıktır.

$$S = (j-i)s + (j-i-1)l. \quad (5)$$

Toplam enerji;

$$E(z) = E_{int}(z) - HM(z) + E_{pin}(z) \quad (6)$$

olarak yazılabilir. Burada H dış manyetik alan, $M(z)$ telin mıknatıslanması, $E_{pin}(z)$ pinning merkezlerinden kaynaklanan enerjidir, ve

$$E_{pin}(z) = -\sum m_i H_i \quad (7)$$

olarak alınmıştır. Burada m_i ve H_i pinning merkezlerindeki dipol momenti, ve onlara eşlik eden yönseçicilik alanıdır. z ise manyetik bölge duvarı ile telin seçilen bir ucu arasındaki uzaklıktır. Telin toplam mıknatıslanması $M(z)$,

$$M(z) = \sum_{i=1}^n m_i(z) \quad (8)$$

olarak alınmıştır. Tüm dipol momentlerinin yönü duvarın konumuna bağlı olduğundan z değişken olarak dahil edilmiştir. İndirgenmiş enerji

$$e(z) = rE(z)/M_s^2, \quad (9)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada M_s doyum mıknatıslanmasıdır. İndirgenmiş manyetik alan ve indirgenmiş mıknatıslanma sırasıyla

$$\begin{aligned} h &= rH/M_s \\ \mu(z) &= M(z)/M_s \end{aligned} \quad (10)$$

olarak tanımlanmıştır. Böylece,

$$e(z) = e_{int}(z) - h\mu(z) + e_{pin}(z) \quad (11)$$

ya da daha açık olarak,

$$e(z) = r \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{U_{ij}}{M_s^2} - \frac{rHM(z)}{M_s^2} - r \sum_i \frac{m_i H_i}{M_s^2} \quad (12)$$

yazılabilir. Özet olarak, 12 eşitliğinin ilk terimi, tel çekirdeğini oluşturan silindirler arası toplam etkileşme enerjisinden, ikinci terim telin dış manyetik alan ile etkileşme enerjisinden, ve son terim teldeki pinning merkezlerinden gelir ve bu terim tel uçlarındaki keskin enerji minimumlarının nedenidir. Tüm hesaplamalar sayısal olarak yapılmış, ve hiç bir istatistik yaklaşım kullanılmamıştır.

Ezik telin mıknatıslanma simülasyonunda toplam enerji, eşitlik 12'de kapalı olarak içerilen beş bağımsız değişkenin fonksiyonu olarak alınmıştır. Bunlardan üçü telin uçlarında ve ortasında ezikten dolayı oluşan pinning merkezlerine karşılık gelmekte, diğer ikisi de telin ayrılmış iki bölgesinde manyetik bölge duvarlarının konumlarını temsil etmektedir. Simülasyon, bu altı boyutlu enerji uzayında, dış manyetik alanın verilen her değeri için bulunduğu konuma en yakın yerel enerji minimumunu arayarak bul-

muştur. Dış manyetik alan bir basamak artırılarak aynı süreç tekrarlanmış ve bulunan minimumlara karşılık gelen beş koordinatın belirlendiği mıknatıslanmalar, histeresis döngüsünün çizimi için kullanılmıştır. Dış manyetik alanın artmasına karşılık toplam enerji uzayında sistemin, bulunduğu yerel minimum noktası bu kararlılık özelliğini kaybederse civarındaki en yakın yerel minimum noktasına yerleşir. Genel olarak süreç boyunca birden fazla enerji minimumu bulunduğundan manyetik histeresis gerçekleşmektedir.

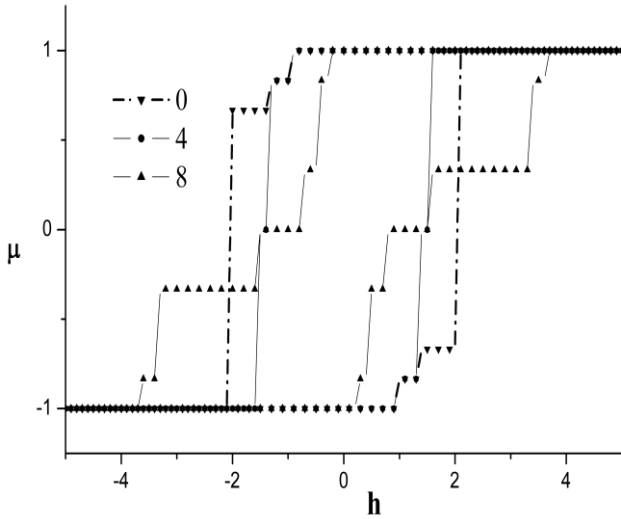
Söz konusu tellerin nitel olarak incelenmesi için model tel için 12 silindiri yeterli gördük. Elde edilmiş her histeresis döngüsü için tel uçlarında iki çift silindire bağımsız dönebilme serbestisi getirildi. Tel ortasında gerçekleştirilen eziği modellemek amacı ile tellerin orta kısmında eziğin derecesine bağlı olarak dört silindire kadar serbest dönebilme serbestisi getirildi. Söz konusu pinning merkezlerine her zaman ters mıknatıslanmaya karşı direnç gösteren yerel yönseçicilik alanları eşlik etmektedir.

Hesaplanan histeresis döngüleri

Şekil 9'da histeresis döngüsünün sıfırdan başlayarak artan ezikle nasıl evrildiğini gösteren hesaplanmış histeresis döngüleri görülmektedir. Bu döngüler, Şekil 2'de görülen deneysel eğrilerle makul bir uyum içindedir. Eziğin oluşturulduğu yerde manyeto elastik etkileşmelerden dolayı bir pinning merkezi oluşur. Bu merkez, teli birbiri ile etkileşen eş eksenli bağımsız iki bölgeye ayırır. Ortadan ezilen 10 cm uzunluğundaki örnek için bu bölmelerin uzunluğu 5 cm olup çift kararlı yapının görülmesi için sınır uzunluğun (7 cm) altındadır. Bu nedenle iki bölgenin toplam histeresis döngüsü de sınır uzunluğun altında görülen döngülerle aynı karakterde elde edilmiştir. Eğik karakterin başlıca nedeni, ezik bölgede gerçekleşen manyetik bölge parçalanmasıdır.

Mıknatıslanmanın başlangıçta yukarı doyurulduğunu varsayalım. Belli bir eziğin altındaki ezik dikdörtgen karakteri etkilememektedir. Bunun nedeni, dış manyetik alan üst uçtaki kapama bölgelerini yenip ayrıca manyetik bölge

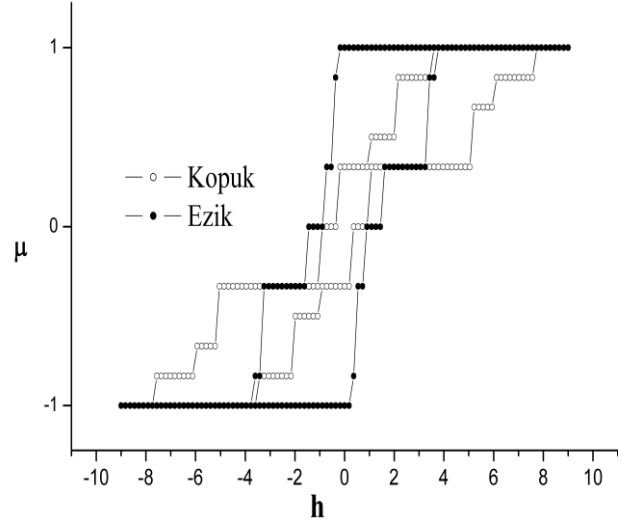
duvarının bu uçtan kopmasını sağlayacak kadar artırıldığında, ezik bölgenin etrafındaki enerji engeli dış manyetik alandan sağlanan enerji tarafından ortadan kaldırılmış olur. Doyum durumundan itibaren dış manyetik alanın sıfıra indirilmesi ile elde edilen kalıntı durumunda, telin enerji dağılımı eziğe bağlı olmasına rağmen mıknatıslanma doyum durumunu devam ettirmektedir. Bu eşik Şekil 2'den de anlaşılacağı gibi $20 \mu\text{m}$ 'lik ezilmeden daha azdır. Eşiğin ötesine geçildiğinde döngü dikdörtgen karakterini koruyarak daralır, koersivitesi azalır. Bu olay bu aşamada tel daha fazla ezildikçe telin üst ucunda kapanma manyetik bölgenin yenilmesinin kolaylaştığını göstermektedir. Bu aşamada mıknatıslanma süreci hem kapanma bölgelerinin etkinliğini hem de duvar hareketini içerir. Daha ileri düzeydeki bir eziğin telin ortasından kesilme durumu ile bir karşılaştırılması amacıyla hesaplanan eğriler Şekil 10'da görülmektedir. Burada ezik telin histeresis döngüsü içi dolu dairelerle gösterilmiştir. Bu iki döngünün karşılaştırılması bize, ezilmenin eğride görülen basamaklı gevşemeyi artırıcı bir etkisinin olduğunu ve bunun sonucu olarak da kalıntı durum mıknatıslanmasının sıfıra yaklaştığını gösterir.



Şekil 9. Küçük miktarda ezilmeler için dikdörtgen karakterden ilk sapmalar

Şekil 10'da görülen iki eğri, Şekil 3'te aynı amaçla gösterilen deneysel olarak elde edilmiş eğrilerle anlaşılır bir uyum içerisindedir. Şekil 3'te görülen eğrilerde ortada bulunan basamaklı

yapının eğiminde görülen fark, eğrilerin aynı nitelikte oluşu ve telin ezilme sonucu eş eksenli iki tel gibi davrandığı fikrini desteklemektedir. Eğrilerin eğimlerinde görülen farkın nedeni, telin kesilerek parçaların arasına bir uzaklık girdikten sonra manyetik bölgeler arası etkileşme enerjisinin azalmasıdır.



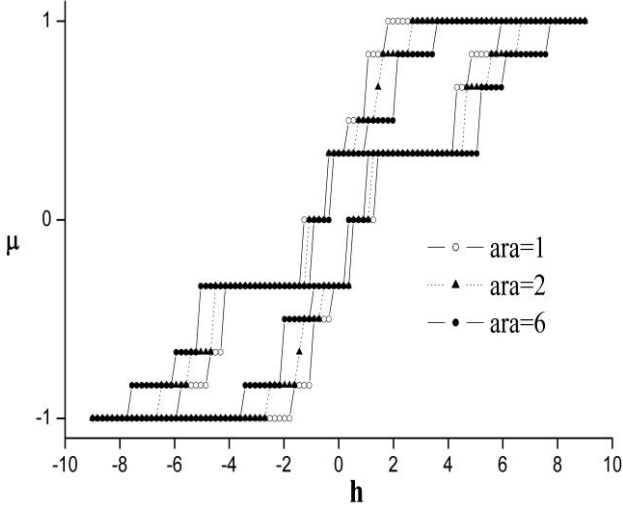
Şekil 10. Eziğin ve telin ortadan kesilmesinin histeresis döngülerindeki etkilerinin karşılaştırılması amacıyla hesaplanmış histeresis döngüleri

Bu azalma, pinnig merkezlerinde meydana gelen parçalanmanın toplam mıknatıslanma sürecindeki etkinliğinin artmasına yol açar.

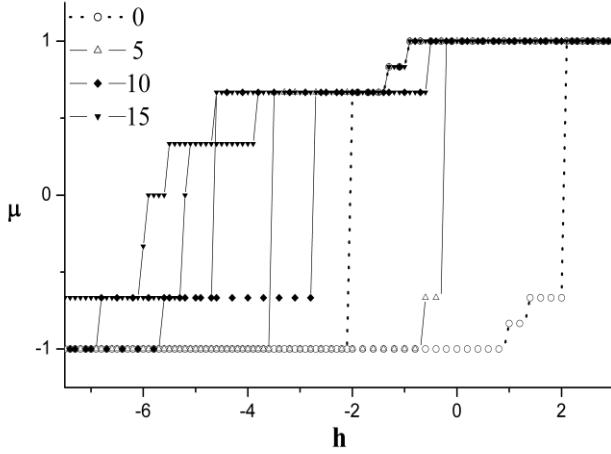
Kesik teller arasındaki uzaklığın artırılmaya devam etmesi halinde döngünün ortasında görülen basamaklı gevşemenin eğimindeki ve manyetik histeresis kaybındaki azalma doyuma gider. Aralık belli bir değer üzerinde iken aralığın artırılması eğimde ve histeresis kaybında anlamlı bir fark yaratmaz. Bunun nedeni, uzaklığın artması ile azalmış olan manyetik enerjinin değişimlerinin de azalmasıdır. Bu olgu Şekil 10'da görülen döngülerde ve Şekil 11'de aralarındaki uzaklık 1, 2 ve 6 birim alınarak hesaplanmış üç histeresis döngüsünde görülmektedir.

Ortasından yerel olarak tek yönlü manyetik alana maruz bırakılmış bir telin hesaplanmış histeresis eğrisinin yerel alanın artan şiddeti ile evrilmesi Şekil 12'de görülmektedir. Döngünün

azalan kısmında, uçtan kopan manyetik bölge duvarı birden diğer uca gitmeyip, ters yöndeki yerel manyetik alanın etkisi ile azalan dış manyetik alana karşı kademeli bir yerdeğiştirme gerçekleştirmiştir. Ters alanın aşılması ile duvar uzun ve tersinmez bir sıçrama gerçekleştirir.



Şekil 11. Kesilen tel parçaları arası uzaklık 1, 2 ve 6 birim alınarak hesaplanmış histeresis döngüleri

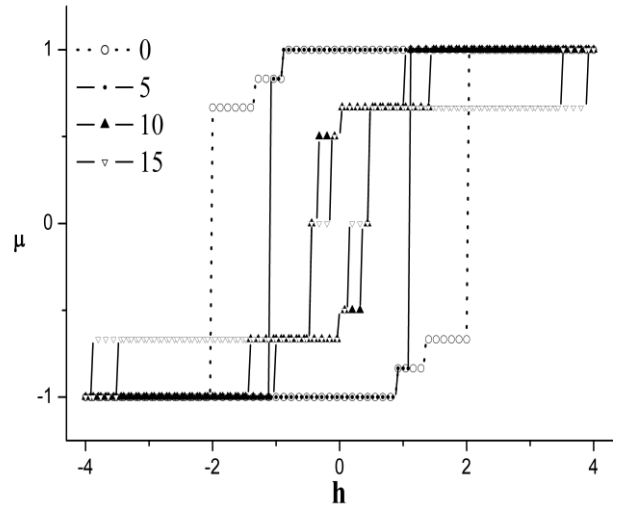


Şekil 12. Ortasından yerel bir manyetik alana maruz bırakılmış bir telin hesaplanmış histeresis eğrisinin, manyetik alanın artan şiddeti ile çifte kararlı durumdan başlayarak evrilmesi

Döngünün artan kısmında ters mıknatıslanma, azalan kısmın sonundakine denk uzun bir Barkhausen sıçraması ile başlar ve sıfır alana ulaşmadan sabit yerel alanın etkisi ile büyük bir bölü

ümü tamamlanır. Yerel sabit manyetik alanın kendisi ile yöndeş mıknatıslanması kolaylaştırıcı ve zıt mıknatıslanmayı zorlaştırıcı etkisi görülmüştür.

Şekil 13'te, ters bağlı iki bobin ile zıt yönlü bir yerel manyetik alan çiftinin bir telin manyetik histeresis üzerindeki etkisini incelemek üzere yerel alanların farklı değerleri için hesaplanan histeresis döngüleri görülmektedir. Her iki yöndeki mıknatıslanmanın aşamaları, küçük bir sıçramayı izleyen düz yatay bir çizgi, keskin bir düşüş, ve son olarak yatay bir düz çizgiyi takip eden küçük bir sıçramadan oluşur.



Şekil 13. Ortasından yerel ve ters yönlü bir manyetik alan çiftine maruz bırakılmış bir telin hesaplanmış histeresis eğrisinin, manyetik alanın artan şiddeti ile çifte kararlı durumdan başlayarak evrilmesi

İlk yatay çizgi manyetik bölge duvarının ilk olarak ters yöndeki yerel manyetik alanla karşılaşmasından ve keskin düşüş de yöndeş yerel alana maruz kalmasından kaynaklanır. Alan çiftinin genliği artırılırsa döngünün sağ üst ve sol alt uzantıları genişlemeye devam eder.

Sonuç

Çifte kararlılık için sınır uzunluğu aşan (10 cm) ve ortasında silindirik ezik biçiminde bir ezik oluşturulmuş bir ferromanyetik amorf telin ölçülen DC manyetik histeresis döngüsünün, sınır uzunluğun altındaki tellerde olduğu gibi, her iki

yönde de orta kısımda görülen basamaklı bir gevşemenin ayırdığı iki Barkhausen sıçramasından oluştuğu görülmüştür.

Bu davranışın kökeninde telin ezilen kısımlarında manyeto elastik etkiden dolayı telin uçlarındakilere ek olarak bir pinning merkezi oluştuğu düşünülmüştür. Böylece ezilen tel, birbirine bitişik, eş eksenli, sınır uzunluğun altında ve bir-biri ile etkileşen iki telden oluşmuş gibi davranmaktadır. Telin bir bütün olarak ters mıknatıslanmasında tel uçlarında ve pinning merkezlerinde manyetik bölgelerin toplam enerjisi en aza indirmek için parçalanması mekanizması başat bir rol oynamıştır. Bu modele dayanarak hesaplanan histeresis döngüleri deneysel döngülerle uyum göstermiştir.

10 cm uzunluğunda, ortasına tek yönlü yerel bir manyetik alan uygulanmış bir telin yerel alana ters yönlü mıknatıslanma eğrisinde dış alan sıfıra düşürüldüğünde kalıntı mıknatıslanması doyum değeyine eşit olarak elde edilmiştir. Dış alan, yerel Alana ters olarak artırılmaya başlandıktan sonra ters mıknatıslanma, büyük bir Barkhausen sıçraması ile son bulan basamaklı bir düşüşle tamamlanır. Döngünün çıkıcı kısmında ise yerel manyetik alanın desteğinden dolayı dış manyetik alanın eksi bir değerinde mıknatıslanma artı yönde büyük ölçüde tamamlanmış olur. Sonuç olarak döngü, mıknatıslanma eksenine göre asimetric olur.

Birbirine ters seri bağlanmış bir çift bobin ile zıt yönlü yerel manyetik alan çifti uygulandığında, telin manyetik histeresisinde, uzun bir Barkhausen sıçraması ile birbirinden ayrılan iki basamaklı gevşeme evresinden oluşur. Yerel

alanların artırılması ile Barkhausen sıçraması kısalmış ve basamaklı gevşemeler her iki yönde uzar.

Kaynaklar

- Chen, D.X., Vázquez, M., Julian, C. ve Gómez, P.C., (1992). AC loss analysis and domain structure in magnetostrictive amorphous wires, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **115**, 295-306.
- Craik, D., (1995) *Magnetism, principles and applications*, 344, University of Nottingham, Nottingham, UK.
- Humphrey, F.B., (1994). Applications of amorphous wires, *Material Science and Engineering A*, **66**, 179-180.
- Humphrey, F.B., (2002). Applications of amorphous wires, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **1-2**, 249-251.
- Squire, P.T., Atkinson, D., Gibbs, M.R.J. ve Atalay, S., (1994). Amorphous wires and their applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **132**, 10-21.
- Vázquez, M., Gómez, P.C. ve Chen, D.X., (1992). Switching mechanism and domain structure of bistable amorphous wire, *IEEE Transactions on Magnetism*, **28**, 5, 3147.
- Vázquez, M. ve Chen, D.X., (1995). The magnetization reversal process in amorphous wires, *IEEE Transactions on Magnetism*, **31**, 1229.
- Vázquez, M., Theuss, H. ve Kronmüller, H., (1999). Susceptibility profile in soft magnetic wires, *IEEE Transactions on Magnetism*, **35**, 1, 573.
- Zhukova, V., Zhukov, A., Blanco, J.M., Gonzales, J., Gómez, P.C. ve Vázquez, M., (2003). Effect of stress applied on the magnetization profile of Fe-Si-B amorphous wire, *Journal of Applied Physics*, **13**, 7208.