

Encircling Probe Design for Eddy Current Inspection System Used in The Aluminum Clad Steel Wire Inspection

Halim Burak TAŞKIN^{1,*}  Nurettin ÜSTKOYUNCU² 

¹ Hascelik Kablo Ind. & Trade. Corp., R&D Center, Kayseri/Turkey

² Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri/Turkey

Graphical/Tabular Abstract

In this study, an encircling probe design used in the inspection of conductive wires, which are qualified as aluminum clad steel (ACS) wire is made as shown in Figure A.

Article Info:

Research article

Received: 04/05/2021

Revision: 27/06/2021

Accepted: 07/07/2021

Highlights

- Encircling Probe
- Eddy Current Inspection
- ACS Wire

Keywords

Wire Inspection
Eddy Current
Non-Destructive Testing
Probe
Coil

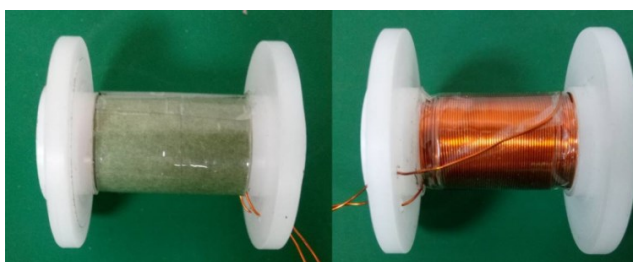


Figure A. Realized probes for the inspection system

Purpose: The eddy current systems are widely used for the quality control of conductive materials as one of non-destructive testing methods. In these systems, it is possible to design and to use different types of probes according to the material type. Internal, encircling and surface probe types are used for the inspection of pipes, wires and plate conductive materials, respectively. In this study, a sensitive encircling probe design is realized to detect various defect on wire surfaces.

Theory and Methods: The inductance value of the designed probe is calculated by using two and three dimensional finite element analysis (FEA) as shown in Figure B and the obtained results are compared.

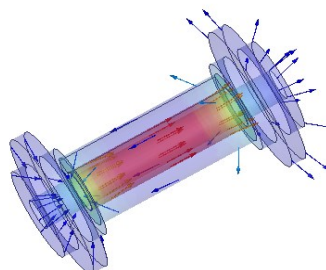


Figure B. Magnetic flux distribution of the realized probe

Results: The inductance change of the probe was measured by an LCR meter while the probe contained sample ACS wires with different types of defects, these values are given in the table and the change graph is plotted. In addition, an impedance bridge circuit was set up with the probe and the results of the change in voltage induction on the coil are given as an oscilloscope image.

Conclusion: Obtained results show that the realized probes can be used in the inspection of ACS wires.

GU J Sci, Part C, 9(3): 402-412 (2021)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

Encircling Probe Design for Eddy Current Inspection System Used in The Aluminum Clad Steel Wire Inspection

Halim Burak TAŞKIN^{1,*} Nurettin ÜSTKOYUNCU² ¹ Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Kayseri/Türkiye² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri/Türkiye

Abstract

In this paper, an encircling probe design used in the inspection of conductive wires, which are qualified as aluminum clad steel (ACS) wire is made. The eddy current systems are widely used for the quality control of conductive materials as one of non-destructive testing methods. In these systems, it is possible to design and to use different types of probes according to the material type. Internal, encircling and surface probe types are used for the inspection of pipes, wires and plate conductive materials, respectively. The discontinuities on the conductor surfaces are detected and the changes in the inductance values of the coils of probes are analyzed with the electronic hardware and the quality control of the material is ensured. In this study, a sensitive probe design is realized to detect various defect on wire surfaces. The inductance value of the designed probe is calculated by using two and three dimensional finite element analysis (FEA) and the obtained results are compared. The inductance change of the probe was measured by an LCR meter while the probe contained sample ACS wires with different types of defects, these values are given in the table and the change graph is plotted. In addition, an impedance bridge circuit was set up with the probe and the results of the change in voltage induction on the coil are given as an oscilloscope image.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/05/2021
Düzeltilme: 27/06/2021
Kabul: 07/07/2021

Keywords

Wire Inspection
Eddy Current
Non-Destructive Testing
Probe
Coil

Anahtar Kelimeler

Tel Muayenesi
Girdap Akımı
Tahribatsız Muayene
Prob
Bobin

Alüminyum Kaplanmış Çelik Tel Muayenesinde Kullanılan Girdap Akımları Muayene Sistemi için Çevreleyici Prob Tasarımı

Öz

Bu çalışmada, alüminyum kaplanmış çelik (AKÇ, ACS: Aluminum Clad Steel) tel olarak nitelendirilen iletken tellerin tahribatsız muayene sürecinde kullanılmakta olan çevreleyici bir prob tasarımı yapılmıştır. İletken materyallerin üretim ve kalite kontrol süreçlerinde tahribatsız muayene yöntemlerinden olan girdap akımları sistemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, materyal türüne bağlı olarak farklı tipte problemlerin tasarlanması ve kullanılması mümkündür. Boruların, tellerin ve plaka şeklindeki iletken materyallerin muayenesi için sırasıyla dahili, çevreleyici ve yüzey prob türleri kullanılmaktadır. Bu problemler ile iletken yüzeylerindeki süreksizlikler tespit edilip, proba ait bobinlerin indüktans değerlerinde meydana gelen değişiklikler elektronik donanımlar ile analiz edilerek materyalin kalite kontrolü sağlanmaktadır. Bu çalışmada, tel yüzeylerindeki çeşitli kusurların algılanabilmesi için hassas bir prob tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan proba ait indüktans değerleri, iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen bu değerler karşılaştırılmıştır. Proba ait indüktans değişimi, içerisinde farklı türden kusurlar içeren numune AKÇ teller varken bir LCR metre vasıtasıyla ölçülmüş, bu değerler tabloda verilmiş ve değişim grafiği çizdirilmiştir. Aynı zamanda, prob ile bir empedans köprü devresi kurularak bobin üzerinde meydana gelen voltaj indüklenmesindeki değişim sonuçları osiloskop çıktısı olarak verilmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde metal endüstrisi alanında üretilen veya endüstriyel uygulamalarda kullanılan manyetik ve manyetik olmayan materyallerin yapılarında oluşabilen çizik, çatlak, korozyon ve ezilme gibi kusurlar malzemenin kullanım alanına göre maddi kayıplar veya riskler oluşturabilmektedir. Bu kayıp ve riskleri önlemek için üretim aşamasında veya sonrasında tahribatsız ya da tahribatlı test yöntemleri kullanılarak kusurlu materyal bölgeleri tespit edilebilmektedir. Özellikle iletkenlerin muayenesinde, test numunesine zarar vermemek ve üretim esnasında kalite kontrolünü sağlayabilmek için tahribatsız test yöntemleri günümüzde yaygınlık kazanmıştır. Bu test yöntemlerinden biri de girdap akımları tekniğidir. Bu teknik, oldukça hassas bir şekilde gözle görülemeyen kusurların tespitini gerçekleştirebilmesi nedeniyle endüstriyel alanda kendine yaygın olarak yer bulmaktadır. Girdap akımları tekniği ile kusur tespitinin yanı sıra iletken materyalin kalınlığı, öz direnci ve iletkenliği gibi değerlerinin ölçülmesi de mümkündür [1].

Tahribatsız test yöntemleri arasında, yüksek hızda test gerçekleştirebilecek en uygun teknik yöntemlerin başında girdap akımları tekniği gelmektedir. Zorlu çalışma koşullarında ve 150 m/sn hız değerlerine kadar yüksek hızda test yapılmasına izin veren girdap akımı sistemleri bulunmaktadır [2]. Bu sistemlerde yüksek hızlarda ölçüm yapılması, prob tasarımından ziyade elektronik donanımda iyileştirmeler ile sağlanmaktadır. Girdap akımı testi ile özellikle teller, çubuklar ve borular gibi yarı mamul ürünlerin üretimi esnasında hızlı bir muayene gerçekleştirilebilmektedir [3-5]. Anlık olarak sonuçlar alınabilen bu yöntemde, ferromanyetik özelliğe sahip olan ya da olmayan çok çeşitli iletken malzemelerde çatlak tespiti yapılabilmektedir [6].

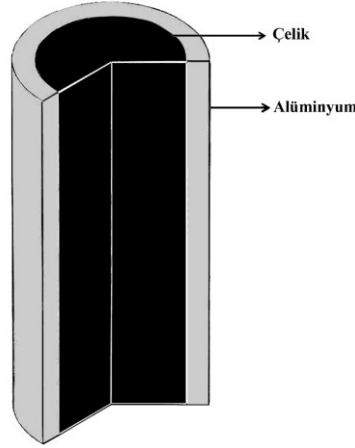
Literatürde girdap akımları tekniği ile ilgili yapılan çalışmalarda teorik ve pratik yaklaşımların ele alınabildiği görülmektedir [7-11]. Desjardins ve arkadaşları, problemlere ait bobinler ile indüktif olarak eşleştirilmiş devrelerde tüm elektromanyetik etkileşimleri tanımlayarak, kesin çözümlerin elde edilmesi için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, öz ve karşılıklı indüktans katsayılarına karşılık gelen zamandan bağımsız ifadeler üretmişlerdir [7]. Desjardins ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada uzun bir ferromanyetik iletken çubuğun çevreleyici koaksiyel prob ile gerilim kontrolü altında girdap akımı indüksiyon problemi çözümlerine analitik olarak yaklaşımı ele almışlardır [8]. Machado ve arkadaşları, boruların iç yüzeylerinde meydana gelen farklı yönelimlere sahip olası milimetre altı hataları tespit etmek için girdap akım problemleri geliştirmişlerdir. Problemlerin herhangi bir tarama pozisyonunda 0.5 mm derinliğindeki tüm kusurları tespit edebildiğini deneysel çalışmalar sonucunda göstermişlerdir [9]. Xin ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada mekanik olarak dönebilen ve 360° boruların iç duvar taramasını gerçekleştirebilen bir prob tasarımı yaparak, bu problemler ile alınan ölçümleri analiz etmişlerdir. Prob özelliklerini üç boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) kullanarak araştırmışlardır ve deneysel sonuçlar ile ölçümleri doğrulamışlardır [10]. Xie ve arkadaşları, boru hattı yapısındaki kusurları tespit etmek için yeni bir bölünmüş tip prob önermiş ve geliştirmişlerdir. Yapılan benzetim çalışmaları ve deneyler ile çatlakların derinliği, eksenel ve çevresel pozisyonu bu çalışmada önerilen yeni prob ile doğrulanmıştır [11].

Bu çalışmanın amacı, Optik topraklama teli (OTT, OPGW: Optical Ground Wire) iletkenlerinde topraklama işlevlerini yerine getiren, alüminyum kaplanmış çelik (AKÇ) tellerin üretim esnasında yüzeylerinde meydana gelen kusurları tespit etmek için girdap akımları sistemlerinde kullanılacak olan prob tasarımının gerçekleştirilmesidir. Üretim esnasında AKÇ teller üzerinde meydana gelen kusurlar, bu tellerin işlevlerini yerine getirmesine engel olabilmekte ve yeterli topraklamanın sağlanamamasına neden olmaktadır. Gözle muayene gerçekleştirildiğinde çok belirgin kusurlar dışında birçok kusur algılanmadığından bu çalışmada, iletken çubukları hassas ve güvenilir bir şekilde muayene edebilen girdap akımları sistemi için çevreleyici tip bir prob tasarımı gerçekleştirilmiştir.

2. MALZEME ÖZELLİKLERİNE GÖRE İNDÜKTANS DEĞİŞİMİ (INDUCTANCE CHANGE ACCORDING TO MATERIAL PROPERTIES)

Bu çalışmada incelemesi yapılan AKÇ tel yapısı Şekil 1’de görülmektedir. Hatalı üretim durumlarında tel yüzeyindeki alüminyum kaplama incelenerek veya yok olarak çelik öze doğru bir açıklık veya incelme

oluşmaktadır. Bu durumda malzemenin manyetik geçirgenlik katsayısında bir değişiklik meydana gelmekte ve manyetik akı yoğunluğu değeri de buna bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 1. AKÇ tel kesitli görünüm

Eşitlik 1’de verilen temel indüktans ifadesinde, bobine ait indüktans değerinin malzemenin manyetik geçirgenlik katsayısı ile değiştiği görülmektedir [12].

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (1)$$

Burada N, bobinin sarım sayısını; l, manyetik akının aktığı uzunluğu; A, akının aktığı etkin kesit alanı ve μ ise ortamın manyetik geçirgenlik katsayısını ifade etmektedir. Ayrıca Eşitlik 2’den de görülebileceği üzere ortamın manyetik geçirgenlik katsayısı, ortamın bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı olan μ_r ile boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı olan μ_0 ’a bağlı olarak değişmektedir.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve 2’ye bağlı olarak malzemenin manyetik özelliğine göre içerisinde bulunduğu bobinin indüktansını etkilediği görülmektedir. Dolayısıyla AKÇ telde yer alan alüminyum ve çelik malzemeye ait bağıl manyetik geçirgenlik değerleri dikkate alınarak ve Eşitlik 1’den yararlanılarak hata tespitinin yapılması mümkün olabilmektedir.

3. PROB TASARIMI VE İNDÜKTANS HESAPLAMALARI (PROBE DESIGN AND INDUCTANCE CALCULATIONS)

Tel muayenesi için girdap akımları test sistemlerinde kullanılan bobinler, dayanıklılığı çok yüksek ve üretilen manyetik alanı etkilemeyen malzemelere sarılmakta ve prob haline getirilmektedir. Kullanım alanlarına göre bu malzeme yapıları değişiklik gösterebilmektedir. PVC, kestamit ve delrin gibi farklı mukavemet değerlerine sahip malzemeler, bobinlerin sarılacağı sensör iskeletinin oluşturulmasında kullanılan yaygın malzeme türleridir. Bu çalışmada, seri üretim hattında kullanılacak, mukavemeti yüksek ve tel muayenesinin gerçekleştirilebilmesi için uygun merkez çapa ve karkas uzunluğuna sahip bobin iskeletinin oluşturulmasında kestamit malzeme seçilmiştir. Bobin iskeletleri, kullanılan girdap akımları sisteminin çalışma mantığına uygun olarak mutlak veya diferansiyel şekilde tasarlanabilmektedir. Mutlak tip problemler ise kendi içerisinde harici ve dahili kıyaslamalı olarak iki kısma ayrılmaktadır. Harici kıyaslamalı mutlak tip problemlerin bünyesinde, test bobini ve referans bobin olmak

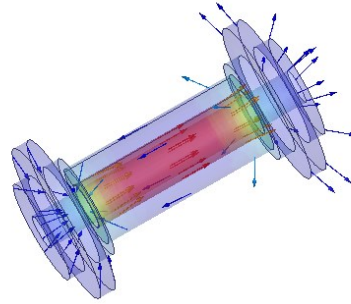
üzere iki ayrı prob bulunmaktadır. Test bobininde muayene edilecek kusurlu tel numunesi yer alırken referans bobinde ise kıyaslanmanın yapılacağı kusursuz tel numunesi yer almaktadır.

3.1. Bobin İndüktans Hesaplamaları (Coil Inductance Calculations)

Bu çalışmada, bobin indüktansının belirlenebilmesi için çok katmanlı hava çekirdekli bobin indüktans hesabı dikkate alınmıştır [13]. Çok katmanlı hava çekirdekli bobinler, daha büyük indüktans değeri ile yüksek frekanslı devrelerde kullanılmak için tasarlanmaktadır [14,15]. Girdap akımları test sisteminde kullanılan bobinler, 100 kHz ila 100 MHz arasında olmak üzere yüksek frekanslarda çalıştırılarak hassas ölçüm gerçekleştirmektedirler. Eşitlik 3'te kullanılan çok katmanlı bobinle ilgili indüktans ifadesi verilmiştir. Eşitlik 3'te b, bobin karkasının uzunluğunu; N, bobin sarım sayısını; c, katman boyunu ve a ise bobinin ortalama çapını ifade etmektedir. Eşitlik 3'te yer alan tüm parametrelerin birimleri inç cinsindedir ve indüktans değeri μH olarak hesaplanmaktadır [13].

$$L_0 = 0.8 \times \frac{n^2 a^2}{6a+9b+10c} \mu H \quad (3)$$

Eşitlik 3 ile verilen analitik hesaplama beraberinde nümerik hesaplama yöntemlerinden iki ve üç boyutlu SEA kullanılarak da ilgili indüktans değeri hesaplanmıştır. Şekil 2'de gerçekleştirilen üç boyutlu nümerik analizde elde edilen akı dağılımı vektörel olarak gösterilmiştir.

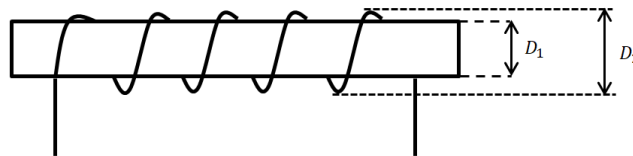


Şekil 2. Tasarlanan proba ait vektörel olarak manyetik akı dağılımı

3.2. Prob Tasarımı (Probe Design)

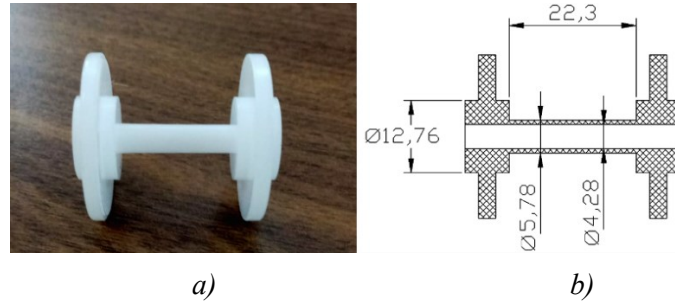
İndüktans hesaplaması yapılırken kullanılan probun merkez çapı, manyetik alanın malzeme yüzeyine bağlanmasında etkili doldurma faktörü, η ile sembolize edilmekte ve Eşitlik 4'te verilen ifade kullanılarak belirlenmektedir [16]. Şekil 3'ten de görülebileceği üzere Eşitlik 4'te yer alan D_1 , tel sarım çapını ve D_2 ise bobin çapını göstermektedir. Genellikle güvenilir muayene için % 70 ile % 90 arasında bir doluluk faktörüne sahip olunması beklenmektedir [17]. Sunulan çalışmada muayene edilmesi istenen AKÇ teller 4 mm çap değerine sahip olup bu değer ve doldurma faktörü dikkate alınarak probun iç çapı belirlenmiştir.

$$\eta = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (4)$$



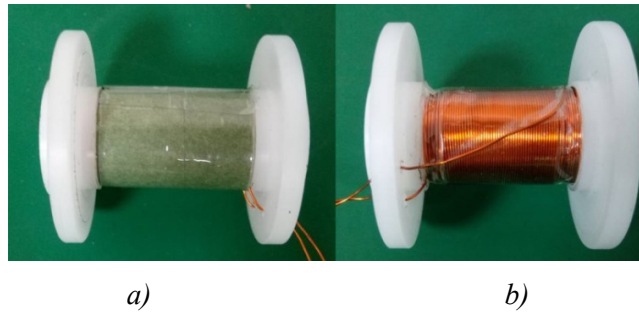
Şekil 3. Doldurma faktörü parametreleri

Şekil 4'te tasarlanan mutlak tip proba ait kestamit malzemedен üretilen karkas ve ilgili karkasa ait boyutlar mm olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. Mutlak tip bobin karkası a) Bobin karkası b) Karkasa ait boyutlar

Çalışmada kullanılmak üzere tasarlanmış mutlak tip referans ve test problemlerine ait görüntüler ise Şekil 5'te gösterilmiştir.

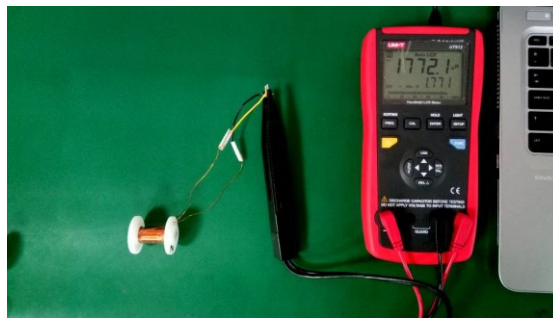


Şekil 5. Gerçekleştirilen mutlak tip problemler a) Referans probu b) Test probu

Tasarımı gerçekleştirilen proba ait bobin indüktansının farklı yöntemlerle elde edilmiş değerleri Tablo 1'de karşılaştırılmış ve yapılan deneysel ölçüme ait bir görüntü Şekil 6'da gösterilmiştir.

Tablo 1. Bobin indüktans değeri

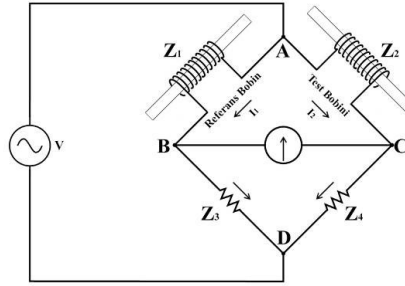
	Anolitik Sonuç (mH)	İki Boyutlu SEA Sonucu (mH)	Üç Boyutlu SEA Sonucu (mH)	Ölçüm Sonucu (mH)
Proba ait Bobin İndüktansı (mH)	1.66	1.53	1.53	1.77



Şekil 6. Mutlak tip referans bobine ait deneysel indüktans ölçümü (μH)

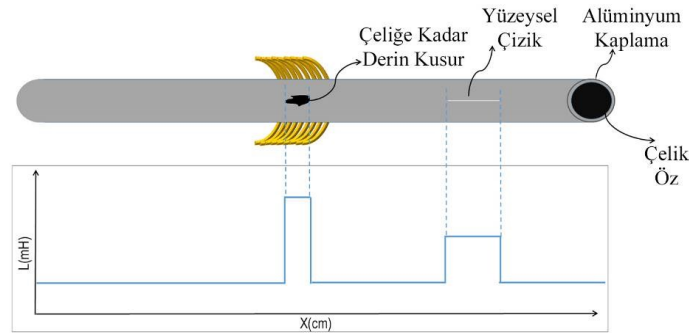
4. TEST YÖNTEMİ VE DENEYSEL ÖLÇÜMLER (TEST METHOD AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS)

Girdap akımları test sisteminde test edilen teldeki kusurlu kısımlar, prob içerisindeki ilgili telin yüzeyinde bulunan süreksizliklerden kaynaklı olarak indüktansta meydana gelen değişime göre belirlenmektedir. Bu değişimin ölçülebilmesi için test ve referans bobinlerin yer aldığı ve Şekil 7’de gösterilen empedans köprü devresi kullanılmaktadır.



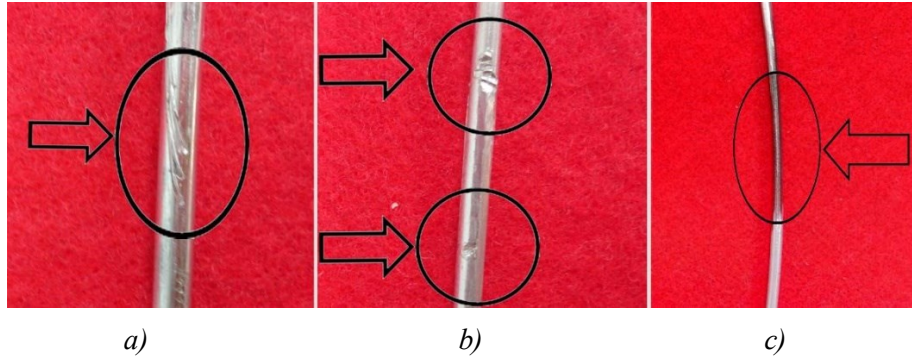
Şekil 7. Mutlak tip problar kullanılarak ölçüm yapılabilmesi için gerekli empedans köprü devresi

Şekil 7’de gösterilen köprü devresinde test edilen telin herhangi bir kusura sahip olması durumunda, Şekil 8’den de görülebileceği üzere test probunun indüktans değeri değişecek ve bunun neticesinde de B ile C noktaları arasında bir potansiyel fark oluşacaktır. Bu potansiyel farkların yorumlanması neticesinde ise tel üzerindeki kusurlar belirlenmiş olmaktadır.



Şekil 8. Kusurlara göre proba ait bobin indüktansının değişimi

Sunulan bu çalışmada tasarlanan sistem ile çeşitli türlerde kusurlara sahip AKÇ tel numuneleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. AKÇ tel üzerinde oluşan bu çeşitli kusurlar tel çekme üretim hattında meydana gelmektedir. Deneylerin gerçekleştirildiği numune teller, HASÇELİK Kablo San. Tic. A.Ş. firmasındaki tel çekme üretim hattından alınmıştır. Numune tellerin belirli kısımlarında oluşan kusurlar genellikle alüminyum kaplamanın çizilmesi, ezilerek çelik öze doğru açılmaların olması veya soyulması ile oluşmaktadır. Deneylerin gerçekleştirildiği bu üç tür kusura sahip numune teller Şekil 9’da gösterilmiştir.



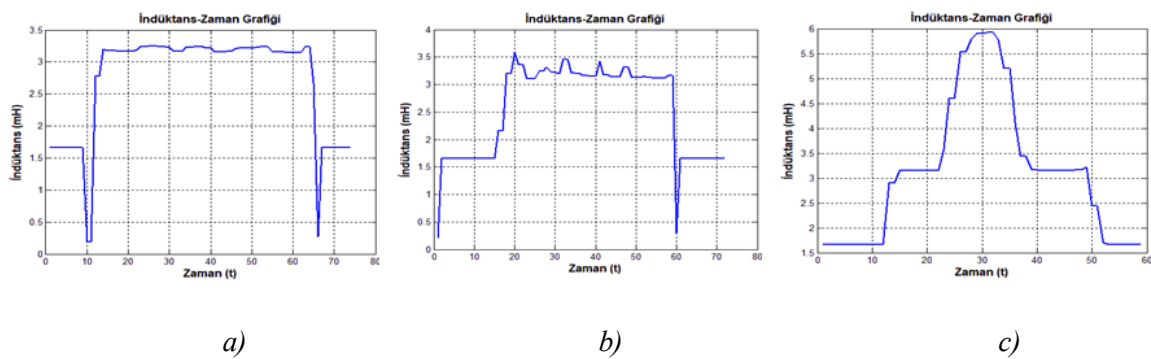
Şekil 9. Deneysel ölçümler için kullanılan kusurlu teller a) Al kaplama üzerinde yüzeysel çizik kusuru b) Al kaplama üzerinde yüzeysel ezik kusurları c) Al kaplama üzerinde derin kusur

Tasarlanan bobinler içerisinde kusurlu teller varken bobinlerin indüktans değerlerindeki değişim Tablo 2’de verilmiştir. Ölçümler UNI-T marka, UT612 model, 0.6 Vrms ölçüm voltajına, 100 kHz’e kadar ölçüm frekans değerine ve % 0.5 hata toleransına sahip LCR metre ile alınmıştır.

Tablo 2. Tasarlanan bobinin indüktans değişimleri

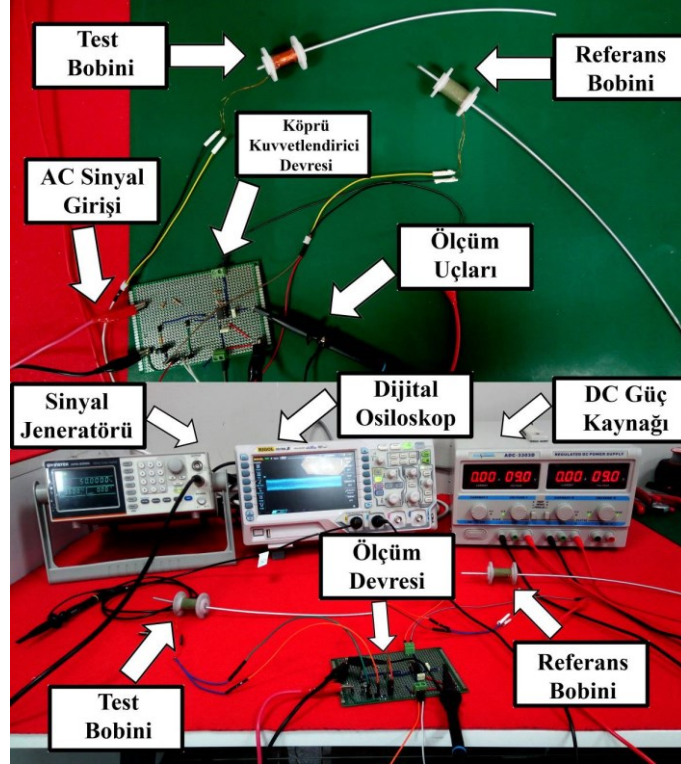
Kusur Türü	Alt Sınır Değeri (mH)	Üst Sınır Değeri (mH)
Yüzeysel Çizik Kusuru	3.085	3.309
Yüzeysel Ezik Kusuru	3.161	3.254
Çeliğe Kadar Ezik Kusuru	3.184	3.586
Derin Kusur	3.980	5.886

Tablo 2’de verilen değerler LCR metre ile ölçümler sonucunda kaydedilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği çizik, çeliğe kadar ezik ve derin kusura sahip AKÇ telin muayenesi esnasında bobin indüktansındaki değişim grafikleri Şekil 10’da gösterilmiştir.

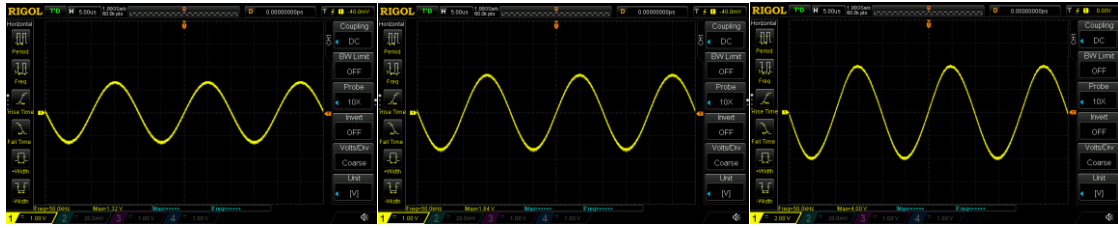


Şekil 10. Deneysel ölçümlerde elde edilen indüktans değişimleri a) Al kaplama üzerinde yüzeysel çizik kusur için b) Al kaplama üzerinde çeliğe kadar ezik kusurları için c) Al kaplama üzerinde derin kusur için

Tasarlanan problemlerden alınan elektriksel işaretlerin uygun şekilde değerlendirilebilmesi için enstrümantasyon kuvvetlendirici içeren bir devre kurulmuştur. Kuvvetlendirici olarak yüksek kazançlı sahip olan ve köprü kuvvetlendiricileri ölçüm uygulamaları için tasarlanan INA118 entegresi kullanılmıştır. Kuvvetlendiricinin kazancı 6 olarak belirlenmiştir. Devrenin giriş AC işaret değerleri 0.5 Vpp ve 50 kHz’dir. Şekil 11’de deneysel ölçüm düzeneği, Şekil 12’de ise farklı ölçümlerde kuvvetlendirici çıkışında görülen gerilim dalga işaretleri gösterilmiştir.



Şekil 11. Deneysel ölçüm düzeneği



a)

b)

c)

Şekil 12. Kuvvetlendirici çıkışındaki gerilim dalga şekilleri a) Köprü denge durumundayken b) Test bobini içerisinde çizik kusuruna sahip AKÇ tel varken c) Test bobini içerisinde derin kusura sahip AKÇ tel varken

Deneysel ölçümlerde kullanılan AKÇ tel numuneleri üzerindeki yüzeysel çizik hatası yaklaşık olarak 1.2 cm uzunluğa ve 0.25 mm derinliğe sahiptir. Yüzeysel ezik hatası yaklaşık olarak 0.6 cm uzunluğa ve 0.65 mm derinliğe sahiptir. AKÇ tel üzerindeki derin kusur ise 4 mm uzunluğa ve 1 mm derinliğe sahiptir. Üretim sistemlerinde muayenenin anlık olarak yapılması gerektiğinden tasarlanan sistemin ölçüm hız kabiliyeti de önem arz etmektedir. Hataların sistem tarafından maksimum 1 m/sn hızda algılanabildiği laboratuvar ortamında tespit edilmiştir.

Tablo 2’de verilen değerlerden de görülebileceği üzere AKÇ tellerde üretim esnasında meydana gelebilecek hatalar, niteliğine bağlı olarak test bobininin indüktansının değişmesine neden olmaktadır. Test bobinine ait indüktans değişimi ise beraberinde ilgili bobinin empedans değişimini getirmekte ve dolayısıyla Şekil 12’den de görülebileceği üzere enstrümantasyon kuvvetlendirici çıkışında farklı genlikte gerilim işaretleri oluşmaktadır. Sonuç olarak, bu gerilim işaretlerinin değerlendirilmesi suretiyle de ilgili tellerdeki hataların ve niteliğinin saptanabilmesi mümkün olabilmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, AKÇ tellerin üretim hattında tahribatsız muayene sistemlerinden girdap akımları tekniği ile test edilebilmesi için çevreyici tip prob tasarımı yapılmış ve prototip olarak gerçekleştirilmiştir. Mutlak

tipde tasarlanan proba ait indüktans değerinin hesaplanmasında gerek analitik gerekse de nümerik yöntemler kullanılmış ve sonrasında elde edilen değerler deneysel ölçümlerdeki değerler ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, gerçekleştirilen sistemin üretim hattındaki yeterliliklerinin görülebilmesi için hattın daha önceden hazırlanmış olan küçük bir basit modelinde, tasarlanan problemler test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ilgili problemlerin AKÇ tellerde meydana gelebilecek farklı nitelikteki hataların saptanabilmesi ve sınıflandırılabilmesi için kullanılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca AKÇ telin işlevini yerine getirebilmesi için kalite kontrol sürecinde kabul edilebilir olarak belirlenmiş derinlikteki yüzeysel çizik hatalar da tasarlanan problemler ile tespit edilebilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1501 programı kapsamında 3181430 proje numarası ile desteklenmiştir. Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan HASÇELİK Kablo San. Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederiz. Ayrıca, ilgili projede danışmanlık görevi yürüten Doç. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR'e ve donanım bileşenlerinin hazırlanmasında katkısı bulunan proje ekibinden Şeref TOKMAK ve Merve Karlıtepe ÇETİNKAYA'ya teşekkür etmeyi bir borç biliyoruz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Moulder, J. C., Uzal, E., & Rose, J. H. (1992). Thickness and conductivity of metallic layers from eddy current measurements. *Review of Scientific Instruments*, 63, 3455-3465.
- [2] Foerster I. D., Product Catalogue - Non-destructive eddy current testing of long products like tubes, bars, wire and profiles, DEFECTOMAT Sensor System Thermal Coil, 1-16, 2020.
- [3] Li, W., Wang, H., & Feng, Z. (2014). Ultrahigh-resolution and non-contact diameter measurement of metallic wire using eddy current sensor. *Review of Scientific Instruments*, 85, 085001-085001.
- [4] Alencar, D. A., Júnior, S. F. S., Vieira, A. L. P. S., & Soares, A. (2009). Eddy current NDT: a suitable tool to measure oxide layer thickness in PWR fuel rods. *International nuclear atlantic conference. Innovations in nuclear technology for a sustainable future, Brazil*.
- [5] Bennoud, S., & Zergoug, M. (2016). Simulation of Cracks Detection in Tubes by Eddy Current Testing. *The International Journal of Multiphysics*, 10, 417-426.
- [6] García-Martín, J., Gomez-Gil, J., & Vázquez-Sánchez, E. (2011). Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 11, 2525-65.
- [7] Desjardins, D. R., Krause, T. W., Tetervak, A., & Clapham, L. (2014). Concerning the derivation of exact solutions to inductive circuit problems for eddy current testing. *NDT & E International*, 68, 128-135.
- [8] Desjardins, D., Krause, T. W., & Clapham, L. (2015). Transient response of a driver-pickup coil probe in transient eddy current testing. *NDT & E International*, 75, 8-14.
- [9] Machado, M. A., Rosado, L., Pedrosa, N., Vostner, A., Miranda, R. M., Piedade, M., & Santos, T. G. (2017). Novel eddy current probes for pipes: Application in austenitic round-in-square profiles of ITER. *NDT & E International*, 87, 111-118.
- [10] Xin, J., Lei, N., Udpa, L., & Udpa, S. S. (2013). Rotating field eddy current probe with bobbin pickup coil for steam generator tubes inspection. *NDT & E International*, 54, 45-55.

- [11] Xie, S., Duan, Z., Li, J., Tong, Z., Tian, M., & Chen, Z. (2020). A novel magnetic force transmission eddy current array probe and its application for nondestructive testing of defects in pipeline structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 309, 112030.
- [12] Nave, R. Inductance of a Coil. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/indsol.html#c1>. Erişim tarihi: Temmuz 5, 2021.
- [13] Terman, F. E. (1943). *Radio Engineers' Handbook*. McGraw-Hill Book Company, Inc.: The United States of America, 74-78.
- [14] Peters, C., & Manoli, Y. (2008). Inductance Calculation of Planar Multi-Layer and Multi-Wire Coils: An Analytical Approach. *Sensors and Actuators A: Physical*. 145-146, 394-404.
- [15] University of Surrey. An Introduction to The Air Cored Coil. http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/air_coils.html#wht. Yayın tarihi: 2010. Erişim tarihi: Temmuz 5, 2021.
- [16] General Dynamics & George, C. (1967). *Marshall Space Flight, Nondestructive Testing Eddy Current Basic Principles RQA /M1- 5330.12 (V-I)*. San Diego, Hunstville NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 3-8.
- [17] Bhagi, P. C. (2011). Eddy Current Testing: Basics. *Journal of Non-Destructive Testing & Evaluation*, 10, 7-16.