

TAHRİBATSIZ YÖNTEMLERLE KALINTI GERİLİM ÖLÇÜMÜNDEKİ GELİŞMELER

H. İlker YELBAY

ODTÜ Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız Muayene Araş./Uyg. Merkezi, Ankara
ilkeryelbay@yahoo.com
<http://www.wtndt.metu.edu.tr>

ÖZET

Kalıntı gerilimler çeşitli üretim/imalat aşamalarından sonra parçada kalan elastik gerilimler olup parçanın performansını ve ömrünü önemli derecede etkilerler. Günümüzde tahribatsız yöntemlerle kalıntı gerilim ölçme konusunda araştırma ve geliştirme çalışmaları oldukça hız kazanmıştır. Bu bildiride, tahribatsız muayene yöntemleri ile kalıntı gerilim ölçümündeki gelişmeler aktarılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Kalıntı gerilim, Tahribatsız muayene

DEVELOPMENTS IN RESIDUAL STRESS MEASUREMENT BY NONDESTRUCTIVE METHODS

H. İlker YELBAY

Welding Technology & NDT Research/Application Center
Middle East Technical University Ankara-Turkey

ABSTRACT

Residual stresses are the elastic stresses remained in the engineering components after any production/manufacturing process. Since they remarkably affect the service performance and useful-life of the components, residual stress measurement by nondestructive testing methods is a challenging topic for reserchers. This paper presents the development in nondestructive testing methods for residual stress measurement.

Keywords: Residual stress, Nondestructive testing

1. KALINTI GERİLİMLER

Kalıntı gerilimler çeşitli üretim/imalat aşamalarından sonra parçada kalan elastik gerilimlerdir. Kaynaklı imalat, döküm, yüzey işlemleri ve ısı işlemler sonucunda malzeme içerisinde homojen olarak dağılmadan kalan plastik deformasyonlar veya ısıl değişimler, kalıntı gerilim oluşmasındaki ana nedenlerdendir.

3 çeşit kalıntı gerilim tipi vardır. 1. Tip kalıntı gerilimler aynı zamanda makroskopik kalıntı gerilimler olarak da adlandırılırlar ve malzeme içerisinde büyük bir alanı etkilerler. 2. Tip kalıntı gerilimler ise malzeme içerisinde birkaç tanecik üzerinde etkili olurlar. 3. Tip kalıntı gerilimler bir taneciğin içinde olan ve çok küçük bir alanı etkileyen gerilimlerdir.

Kalıntı gerilimler üretimden/imalattan sonra parçanın içerisinde kaldığından kullanım sırasında dışarıdan uygulanacak olan gerilimler kalıntı gerilimlerle birlikte parçaya etki eder. Bu nedenle kalıntı gerilim içeren bir parçada, parçaya etkiyen gerçek yükleme durumu analiz/hesaplama sonucunda tahmin edilenden çok farklı olabilir.

Kalıntı gerilimler üretilen malzemenin servis ömrünü doğrudan etkilerler. Çekme kalıntı gerilimler malzemenin yorulma ömrünü azaltıp erken bir hasara neden olabilirken basma kalıntı gerilimlerin malzemenin yorulma ömrünü arttırıcı etkisi vardır.

Kalıntı gerilimler üretilen malzeme içerisinde dengelenmiş bir halde bulunurlar. Parçanın bir bölgesinde varolan basma kalıntı gerilimler, diğer bölgelerdeki çekme kalıntı gerilimler tarafından dengelenirler ve malzeme içerisinde bir kalıntı gerilim dağılımı meydana gelir. Malzeme seçimi ve tasarımında, kullanılacak malzemenin içindeki kalıntı gerilim dağılımının önceden bilinmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle kalıntı gerilimlerin ölçülmesi günümüzde oldukça yaygınlaşmış bir mühendislik uygulamasıdır.

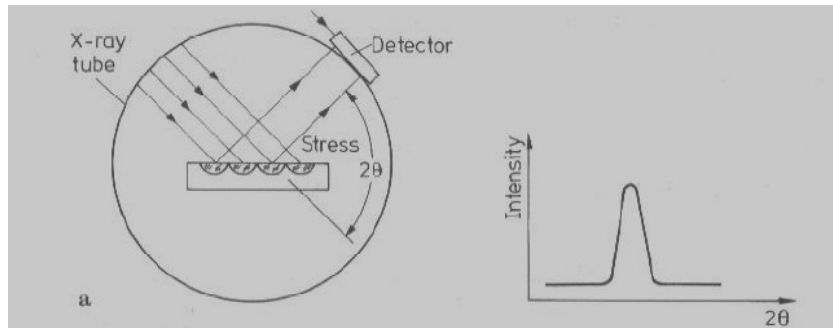
Kalıntı gerilim ölçümleri için tahribatlı testler uzun zamandır verimli olarak kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemlerin, ölçüm yapılacak malzemeye zarar vermesi ve çalışan parçalara uygulanmasındaki zorluklar nedeniyle günümüzde tahribatsız tekniklerle kalıntı gerilim ölçme uygulamaları yaygınlaşmaktadır.

2. KALINTI GERİLİM ÖLÇÜMÜNDE KULLANILAN TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

Kalıntı gerilim ölçümünde en çok kullanılan tahribatsız yöntem X-ışını kırınımıdır. Son yıllarda Manyetik Barkhausen yöntemi ile kalıntı gerilim ölçümlerinde de gelişme sağlanmıştır. Kalıntı gerilim ölçümünde kullanılan diğer tahribatsız muayene yöntemleri ise ultrasonik metot, nötron ışını kırınımı metodu ve Raman tayf ölçüm metodudur.

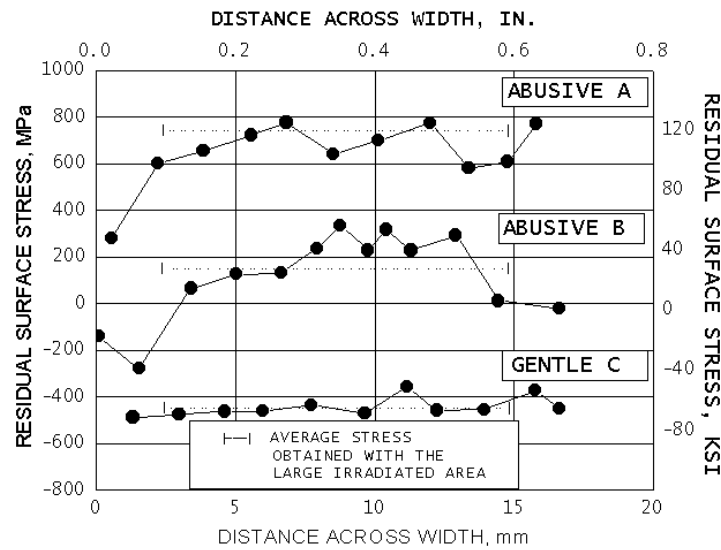
2.1 X-ışını Kırınımı Yöntemi

X-ışını kırınımı metodu kalıntı gerilimlerin bulunmasında oldukça doğru sonuçlar veren bir yöntemdir. Kristal yapı içerisinde bulunan atomik düzlemler arasındaki mesafe, uygulanan gerilimler veya malzeme içerisinde kalan kalıntı gerilimler sayesinde uzayıp kısalır. Bu mesafenin artması o bölgede oluşan bir çekme gerilimi ifade ederken mesafenin azalması ise basma gerilimlerin varlığını gösterir. X-ışını kırınımı yönteminde malzemeye gönderilen X-ışınları malzeme içerisindeki kristal düzlemlerden yansır. Bu sırada malzemeye gelen ışınların yönü değiştirilerek en çok yansımanın olduğu açı bulunur. Bulunan açı ve Bragg yasası kullanılarak iki atomik düzlem arasındaki mesafe hesaplanır. Malzeme içerisinde kalıntı gerilimler mevcutsa bu mesafe parçanın gerilim olmayan haline göre farklılık gösterir. Bu farklılık kullanılarak parçanın içerisinde kalan kalıntı gerilimler hesaplanabilir.



Şekil 1. X-ışını kırınımı yöntemi şematik gösterimi

Özellikle ince kaplamalarda 2-3 µm derinliğe kadar ölçümler yapılabilmektedir. Tahribatsız bir yöntem olması dolayısıyla birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu uygulamalara ve sonuçlara örnek olarak taşlama işlemi sonucunda ortaya çıkan kalıntı gerilimlerin ölçülmesi örneğini verebiliriz.

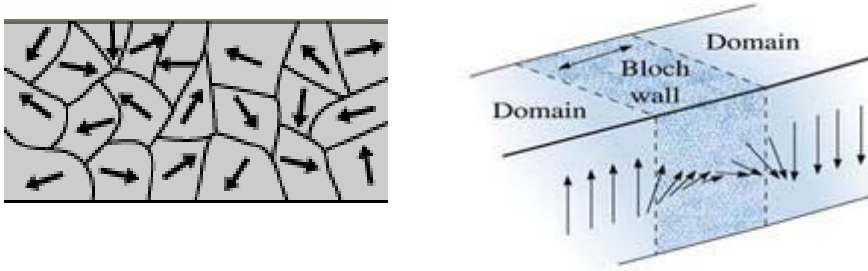


Şekil 2. SAE 4340 çeliğinde taşlama sonucu oluşan yüzey kalıntı gerilimlerinin X-ışını kırınımı yöntemi ile bulunması [1]

X-ışını kırınımı yöntemi, saha uygulamaları için çok uygun değildir. Bu yöntemle yapılan ölçümler uzun sürmekte ve cihazların fiyatları da diğer yöntemlere oranla daha fazladır. Günümüzde ise taşınabilir, hızlı ve daha ekonomik olan tahribatsız muayene yöntemlerine olan talep artmaya başlamıştır. Bu nedenle Manyetik Barkhausen Gürültüsü yöntemi bu alandaki araştırmaların başında gelmektedir.

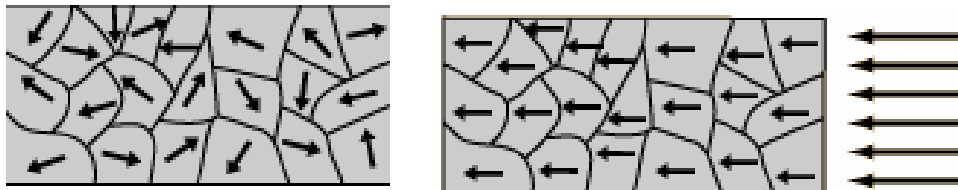
2.2 Manyetik Barkhausen Gürültüsü Yöntemi

Barkhausen gürültüsü, ferromanyetik malzemeler içinde yer alan manyetik dipollerin hareket etmesi veya yönlenecece sonucunda ortaya çıkan ses sinyalleridir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, ferromanyetik malzemeler içlerinde manyetik dipollerin oluştuğu küçük bölgelerden oluşurlar. Bu bölgelere domen adı verilir. Domenler birbirlerinden domen duvarları sayesinde ayrılırlar. Domenler ferromanyetik malzeme içinde mıknatıslanmanın homojen olarak dağıldığı bölgelerdir ve boyutları yaklaşık olarak 0,1 mm.den birkaç mm 'ye kadar değişebilir. Bu bölgeler içerisinde, yaklaşık 10^{12} - 10^{18} adet manyetik dipol aynı yönde yönlenecek şekilde domen sınırlarını belirlerler. İki ayrı domen birbirlerinden domen duvarları (Bloch duvarları) ile ayrılır. Domenler içindeki iki farklı yöne yönlenece olan manyetik dipoller bu duvarlar içerisinde birinden diğerine doğru yön değiştirirler.



Şekil 3. Ferromanyetik malzeme içindeki domenler ve manyetik dipoller

Ferromanyetik malzemeler mıknatıslanmadan önce manyetik dipoller, domenler içerisinde karışık ve dağınık bir şekilde yönlenece halde bulunurlar (Şekil 4a). Bu sırada net manyetik alan şiddeti sıfırdır. Dışarıdan bir kuvvet veya manyetik alan uygulanmaya başlandığında başlangıçta dağınık halde bulunan manyetik dipoller uygulanan kuvvet veya manyetik alan yönünde dönmeye başlarlar (Şekil 4b). Dönme hareketi domen duvarlarının hareket etmesiyle gerçekleşir.



Şekil 4. a) Domenler dağınık durumda yönlenece, b) Manyetik alan uygulandıktan sonra domenler uygulanan alan yönünde yönlenece

Bu metot magnetoelastik veya mikromagnetik metot olarak da adlandırılır. Ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanma sırasında oluşturduğu manyetik gürültüyü analiz ederek bir ölçüm yapar. Ölçüm derinliği 10 mm 'ye kadar ulaşabilir.

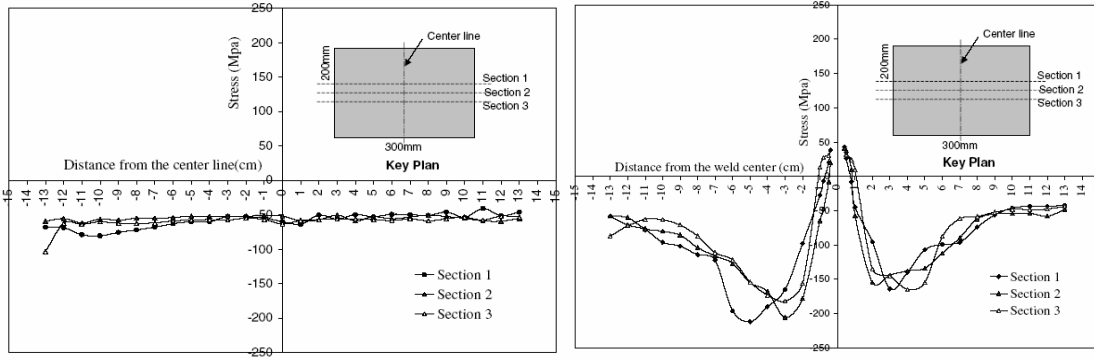
Malzeme geometrisine göre özel olarak hazırlanabilen problemler aracılığı ile malzeme mıknatıslanırken aynı anda malzeme üzerinden ölçüm alınır. Bu ölçümler manyetik parametre (MP) cinsindedir. Ölçülen bu değerlerin gerilim değerlerini bulabilmek için ise ölçümleme eğrileri kullanılır. Bu eğriler ölçüm yapılacak malzemeyle aynı malzemeden imal edilerek bilinen gerilimlere karşılık gelen manyetik parametre değerleri bulunarak oluşturulur. Daha sonra bu eğriler kullanılarak parça içerisindeki kalıntı gerilim değerleri hesaplanabilir.

Manyetik Barkhausen yöntemi ile kalıntı gerilimlerin yanı sıra ısıl işlemlerden sonra veya kaynaklı imalat sonucunda oluşan mikro yapı değişiklikleri de bulunabilir. Genel olarak, ölçülen MP değerleri sertlik arttıkça azalır. Bunun yanında malzeme içinde bulunan çekme kalıntı gerilimleri MP değerlerini yükseltirken basma kalıntı gerilimleri ise düşürür.

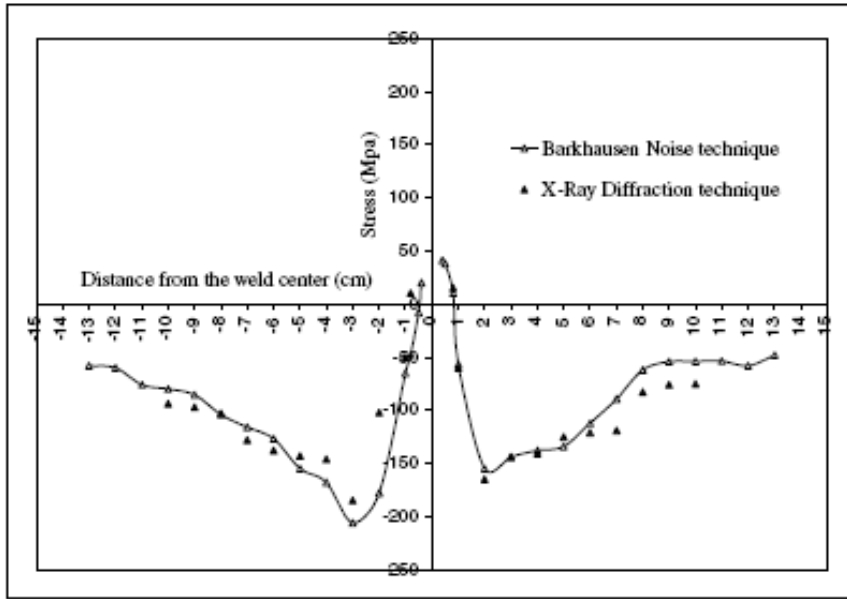


Şekil.5. Manyetik Barkhausen Gürültüsü Ölçüm Cihazı

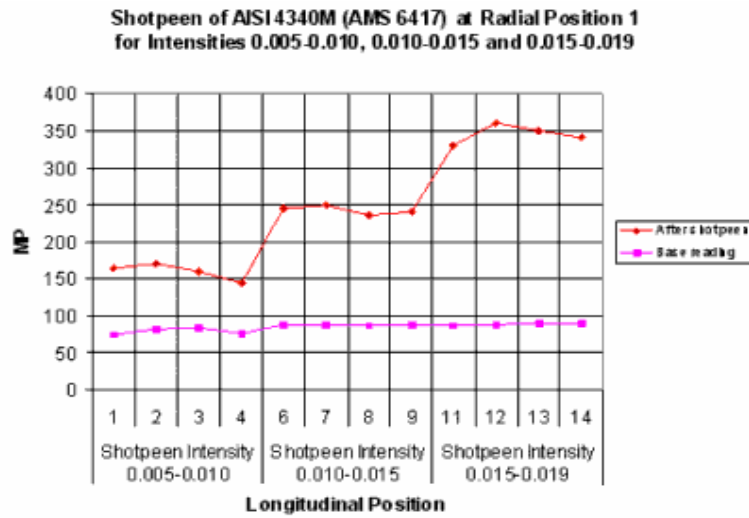
Manyetik Barkhausen Gürültüsü yöntemi tahribatsız bir muayene yöntemidir. Bu nedenle kullanımda olan parçalarda bile güvenli bir şekilde kullanılabilir. Kolay kullanımı, hızlı sonuç verebilmesi ve taşınabilir olması nedeni ile günümüzde önemi daha da artmıştır. Bilinen diğer tahribatsız kalıntı gerilim ölçüm yöntemleriyle kıyaslandığında doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Manyetik Barkhausen gürültüsü yöntemi ile kaynaklı imalat (Şekil 6 ve 7) ve parça yüzeyinde basma kalıntı gerilimleri oluşturarak yorulma ömrünü arttırmak için uygulanan bilyeli dövme işlemleri sonucunda ortaya çıkan kalıntı gerilimler verimli bir şekilde ölçülebilmektedir.



Şekil 6. Kaynaklı plakalarda kaynak işlemi sonrası kalıntı gerilim dağılımının Manyetik Barkhausen gürültüsü yöntemi ile bulunması [2]



Şekil 7. Kaynaklı plakalarda X-ışını kırınımı yöntemi ile Barkhausen gürültüsü yönteminin karşılaştırılması [2]



Şekil 8. SAE 4340 çeliğinde biyeli dövme işleminde oluşan kalıntı gerilimlerin Manyetik Barkhausen Gürültüsü yöntemi ile ölçülmesi [3]

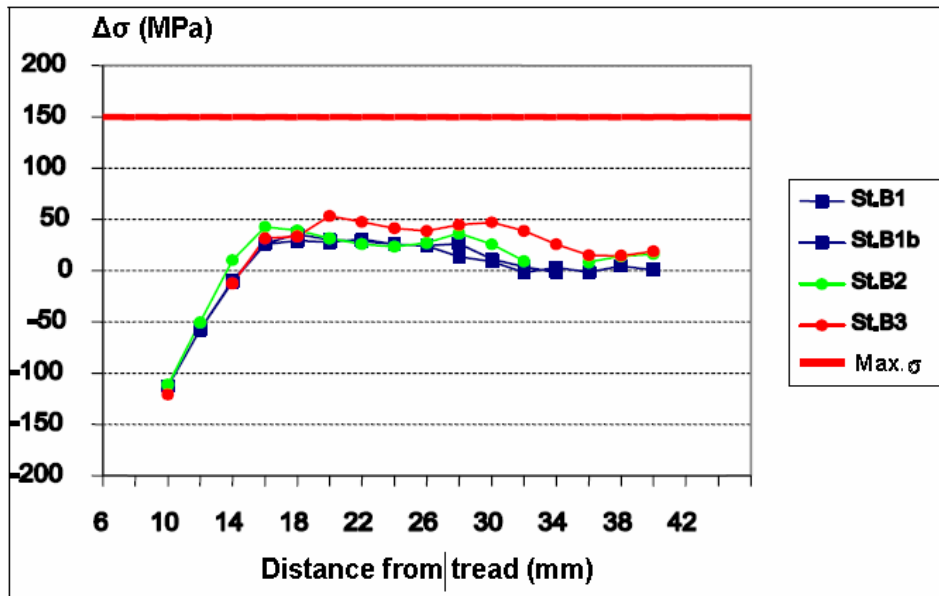
2.3 Ultrasonik Yöntem

Ultrasonik yöntem, malzemede ilerleyen dalgaların (boyuna veya enine) hızlarının varolan gerilimlerden etkilenerek değişmesi prensibini esas alır.

Malzeme içerisinde bulunan kalıntı gerilimler ses dalgalarının ilerlemesine engel oluşturdukları için ses dalgalarının hızlarını yavaşlatırlar. Bu sayede malzeme içerisinde ilerleyip arka yüzeyinden yansıyan ses dalgalarının gidiş geliş mesafesi gerilimsiz olan bir malzemeye oranla farklı olur. Bu farklılık toplam uçuş zamanı olarak ölçülebilir. Fakat bu fark nano saniye mertebesinde olduğu için ölçümü çok hassas cihazlar gerektirir.

Ultrasonik yöntem kullanılarak makro kalıntı gerilimler malzemenin derinliğinden bağımsız olarak bulunabilir. Bunun yanında izotropik olmayan malzemelerde, yöne bağlı olarak ses hızları değişebildiğinden bu bölgeden alınan uçuş mesafesi farklılıklarını ayırt etmek oldukça zordur. Ayrıca mikroyapı değişikliklerinin olduğu bölgelerde de ses hızları değiştiğinden bu bölgelerde de bu farklılıkların ölçülmesi oldukça zorlaşmaktadır. Bu zorlukların dışında ultrasonik yöntem oldukça hızlı, kolay ve ucuz bir tahribatsız kalıntı gerilim ölçme yöntemidir. Bu nedenle ultrasonik yöntemle kalıntı gerilim ölçme üzerine çalışmalar sürdürülmektedir.

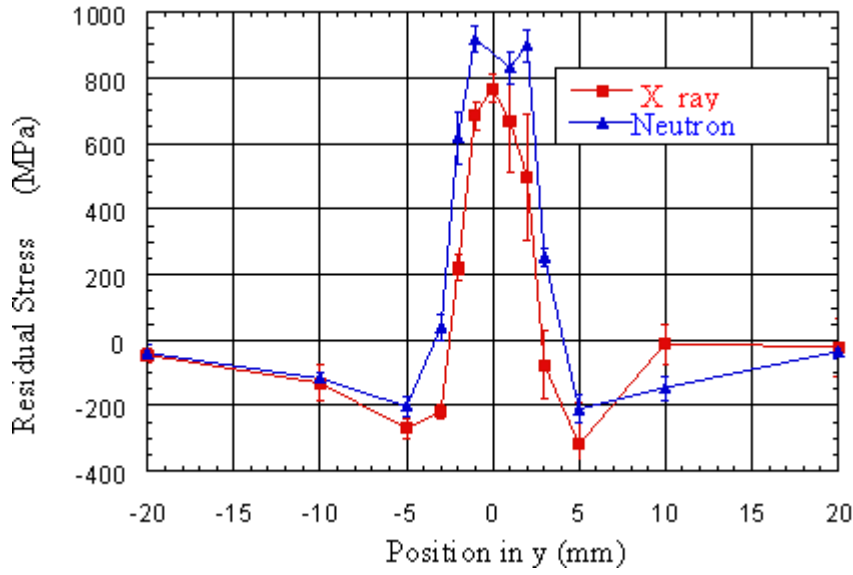
Ultrasonik yöntemle kalıntı gerilim ölçümünde en sık kullanılan prob EMAT (Electro Magnetic Acoustic Transducer) problelerdir. Yüzeye temas etmeden de malzeme içerisine ses dalgaları gönderebilen bu problelerle yüzey (Raigleigh) dalgalarını oluşturmak mümkündür. Ultrasonik yöntem ve EMAT probu kullanılarak tren tekerleklerinde üretim sırasında oluşan kalıntı gerilimler ölçülebilmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Ultrasonik yöntem kullanılarak tren tekerleklerindeki kalıntı gerilimlerin ölçülmesi [4]

2.4 Nötron Işını Kırınımı Yöntemi

Nötron ışını kırınımı yöntemi, X-ışını kırınımı gibi malzemenin kristal yapısındaki atomik düzlemler arasındaki mesafeyi ölçerek kalıntı gerilimlerin hesaplanmasını sağlar. Fakat, bu yöntemde malzemeye X-ışınları yerine daha yüksek enerjili nötronlar gönderilir. Bunun sonucunda malzemenin daha derin noktalarından ölçümler alınabilir. Ölçüm derinliği alüminyum için 250 mm 'ye çelik için ise 37 mm 'ye kadar ulaşabilir. Bu yöntem, sadece laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmektedir ve kullanılan cihazlar oldukça pahalıdır. Bu nedenle genellikle araştırma geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır.



Şekil 10. Kaynaklı plakalardaki kalıntı gerilimlerin Nötron ışını kırınımı ve X-ışını kırınımı sonuçlarının karşılaştırılması [5]

2.5 Raman Tayf Ölçüm Yöntemi

Raman tayf ölçüm yöntemi malzeme üzerine gönderilen lazer ışınlarının malzeme ile etkileşimini ölçerek kalıntı gerilimlerin bulunmasını sağlar. Malzemeye gönderilen lazer ışınları atomların titreşmesine neden olur. Saçılan ışınların incelenmesi sonucunda malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısı hakkında bilgi edinmek mümkün olur. Raman tayf ölçüm metodunda çözünürlük çok fazladır ve genellikle yüzey kalıntı gerilimlerin ölçümünde kullanılır. Günümüzde Raman tayf ölçümü üzerindeki çalışmalar daha çok kompozit malzemelere uygulanabilirliği üzerinde devam etmektedir.

KAYNAKÇA

- 1.** Prevéy, Paul S. "X-ray Diffraction Residual Stress Techniques," Metals Handbook. 10. Metals Park: American Society for Metals, 380-392. 1986.
- 2.** K. Kesavan, K. Ravisankar, S.Parivallal, P. Sreeshylam, Non Destructive Evaluation of Residual Stresses in Welded Plates Using the Barkhausen Noise Technique, Experimental Techniques, 17-21, September/October 2005
- 3.** Lim Mei Ting, Ng Heong Wah and B. Stephen Wong, Inspection of Aircraft Landing Gear Components by Barkhausen Noise Measurement, NDT.net, Vol 11 No.6, June 2006.
- 4.** M. Gori, M. Certo, G. Patelli, L. Aruta, Ultrasonic Assessment Of Residual Stresses In The Rim Of Railway Solid Wheels, NDT.net, Vol.3 No.7, June 1998
- 5.** A. Youtsos, C. Ohms, NDT Based on Neutron Techniques in Support of Structural Integrity Assessment, NDT.net, Vol.7 No.08, august 2002.
- 6.** J. Gauthier, T. W. Krause, D. L. Atherton, Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique, NDT&E International, Volume 31, 23-31, 1998.
- 7.** P. Palanichamy, A. Joseph, D. K. Bhattacharya and Baldev Raj, Residual Stresses and Their Evaluation in Welds, Welding Engineering Hand Book, Eds. S.Soundararajan, S.Vijaya Bhaskar and G.C.Amarnath Kumar, Radiant Publications Pvt. Ltd., Secundrabad, India, Vol. 1, pp. 269-296, 1992.
- 8.** J. Lu, Handbook of Measurement of Residual Stresses 1996.