

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİKLERDE X-IŞINLARI YÖNTEMİ İLE
ARTIK ÖSTENİT VE İNDENTASYON YÖNTEMİ
İLE ARTIK GERİLME TAYİNİ

Seher TAŞ

Haziran, 2010
İZMİR

**ÇELİKLERDE X-IŞINLARI YÖNTEMİ İLE
ARTIK ÖSTENİT VE İNDENTASYON YÖNTEMİ
İLE ARTIK GERİLME TAYİNİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Seher TAŞ

**Haziran, 2010
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SEHER TAŞ, tarafından DOÇ. DR. MUSTAFA TOPARLI yönetiminde hazırlanan “ÇELİKLERDE X-IŞINLARI YÖNTEMİ İLE ARTIK ÖSTENİT VE İNDENTASYON YÖNTEMİ İLE ARTIK GERİLME TAYİNİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mustafa TOPARLI

Danışman

Doç.Dr. Bülent ONAY

Jüri Üyesi

Doç.Dr. Cesim ATAŞ

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkarılması ve yürütülmesi esnasında destek ve yardımları için başta Sayın Doç. Dr. Mustafa TOPARLI, Doç. Dr. Erdal ÇELİK, Araştırma Görevlisi Osman ÇULHA, Araştırma Görevlisi Orkut SANCAKOĞLU, Araştırma Görevlisi Mustafa EROL, Araştırma Görevlisi Faruk EBEOĞLUGİL olmak üzere bölümümüz öğretim üyelerine ve bu çalışmada manevi desteği bulunan tüm akademisyen arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. İsmail ÖZDEMİR hocama destek ve yardımları için teşekkür ederim.

Ayrıca, Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Cahit HELVACI hocama destek ve yardımları için teşekkür ederim.

Manisa organize sanayi bölgesinde faaliyet gösteren Olgunçelik firması Genel Müdür Yardımcısı Mustafa KARAĞAÇ ve Üretim Mühendisi Kasım SEVİMLİ'ye çalışmalarında gösterdiği nezaket ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, bu çalışmanın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem Nigar TAŞ'a, Aynur-İrfan PEKSEL ve Gülnur-Bora KANAN ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmamı, 1989 yılında vefat eden babam Hikmet TAŞ'a atfediyorum...

SEHER TAŞ

İzmir, 2010

ÇELİKLERDE X-IŞINLARI YÖNTEMİ İLE ARTIK ÖSTENİT VE İNDENTASYON YÖNTEMİ İLE ARTIK GERİLME TAYİNİ

ÖZ

Kaynak, döküm, yüzey işlem ve ısıl işlem görmüş malzemelerde plastik deformasyon veya ısıl etkiler sonucunda malzeme içerisinde artık östenit ve artık gerilmeler oluşur. Çeliklerde artık östenit miktarının belirlenmesinde en doğru ölçümlerin, X-ışınları kırınımı yönteminden elde edildiği düşünülmektedir. Bir yarı tahribatlı yöntem olan indentasyon yöntemi son yıllarda artık gerilme miktarının doğrudan ölçülebilmesi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Bu tekniğin, artık gerilmelerin değerlendirilmesinde hızlı ve güvenilir olduğu için, gelecekte de yaygın bir uygulama haline gelmesi öngörülmektedir.

Bu çalışmada, ısıl işlem görmüş AISI 5115 (16MnCr5) sementasyon çeliği ve AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliği incelenmiştir. Isıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş her iki malzemenin tel erozyon cihazında (EDM) kesim işlemi yapılarak çalışmada kullanılacak numuneler elde edilmiştir. Numunelere zımparalama ve parlatma işlemleri yapılarak, düzgün yüzeyler elde edilmiştir. Herbir numunenin mikroyapıları Nikon Eclipse ME 600 metalografik optik mikroskopta elde edilmiştir. Artık östenit miktarı ölçümü için X ışınları difraksiyon cihazı (XRD) kullanılmıştır. Daha sonra numuneler üzerinde, Dynamic Ultra Micro Hardness (DUH) cihazında 200, 400, 600, 800 ve 1000 mN yükler altında sertlik ölçümleri yapılmıştır. Herbir ısıl işlem yapılmış ve yapılmamış numunenin, aynı maksimum yükler altında, yük-penetrasyon derinliği eğrileri, yükleme-boşaltma çevrimlerinden elde edilmiştir. Yükleme-boşaltma eğrilerinin sonuçları karşılaştırılarak artık gerilmenin tipi belirlenmiştir. Artık gerilme değerlerinin bulunması için çekme ve basma artık gerilmeleri için ayrı ayrı hesaplama yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Isıl işlem, Artık östenit, X-ışınları kırınımı, Artık gerilme, İndentasyon tekniği, Yükleme- yük boşaltma çevrimi

MEASUREMENT OF RETAINED AUSTENITE BY USING X-RAY DIFFRACTION METHOD AND RESIDUAL STRESS BY INDENTATION TECHNIQUE IN STEELS

ABSTRACT

Retained austenite and residual stress after various production stages such as welding, casting, surface processing and heat treatment processes remain in the parts. X-ray diffraction is considered to be the most accurate method of determining the amount of retained austenite in steels. By utilizing instrumented sharp indentation which is a semi-destructive technique, residual stresses produced by various different processes on material surfaces can be directly measured. It's evident through current studies that results obtained by using this technique are robust enough to compare its results with those of other methods. As a fast and reliable means of residual stress evaluation, it's believed that this technique will become a common practice in the foreseeable future.

In this research, heat treated AISI 5115 (16MnCr5) cementation and AISI 52100 roller bearing steels were investigated. Specimens with and without residual stresses that were sectioned by wire-erosion machine. Specimens were properly sanded and polished to get smooth surfaces. Optical micrographs of each specimen were taken by a Nikon Eclipse ME 600 metallographic microscope. Their retained austenite content was determined by the X-ray diffraction technique. These specimens were then examined by using a Dynamic Ultra Micro Hardness (DUH) tester under the maximum loads of 200, 400, 600, 800 and 1000 mN. Specimens with and without residual stresses that were subjected to loading-unloading cycles under the same amount of maximum load and their load vs. penetration depth curves were plotted. By comparing the resultant loading-unloading curves, the type of the residual stresses present in the specimens was determined. Seperate calculations were made for tensile and compressive residual stresses to obtain the residual stress values.

Keywords: Heat treatment, Retained Austenite, X-ray diffraction, Residual stress, Instrumented sharp indentation, Load-unload cycle

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Çelikler	1
1.2 Çeliklerde Isıl İşlem	2
1.3 Artık Östenit	5
1.4 Artık Gerilmeler	6
1.4.1 Artık Gerilme Miktarının Ölçümü.....	7

BÖLÜM İKİ - ARTIK GERİLME ÖLÇÜM METOTLARI 10

2.1 Tahribatlı Artık Gerilme Ölçüm Metotları.....	10
2.1.1 Tabaka Kaldırma Yöntemi (Curvature).....	11
2.1.2 Delik Delme Yöntemi (Hole Drilling Method)	11
2.1.3 Halka Çekirdek Yöntemi (Ring Core Method)	12
2.1.4 Kanal Açma Yöntemi (Compliance Methods)	12
2.2 Tahribatsız Artık Gerilme Metotları.....	13
2.2.1 Manyetik Barkhausen Yöntemi	13
2.2.2. Raman Tayf Ölçüm Yöntemi.....	15
2.2.3 Ultrasonik Yöntemler	15
2.2.4 Nötron Kırınımı Yöntemi	16
2.2.5. Termo-elastik Metot	17
2.2.6 Foto-elastik Metotlar	18
2.2.7 X-Işınları Kırınımı Yöntemi.....	18
2.3 Yarı Tahribatlı Artık Gerilme Ölçüm Metotları.....	21

BÖLÜM ÜÇ - İNDENTASYON TEKNİĞİ İLE ARTIK GERİLME HESABI 22

3.1 Dinamik Ultra-Mikro Sertlik Test Cihazı (DUH) Deneyi.....	22
3.2 İndentasyon Tekniği	24
3.2.1 İndentasyon Tekniği Verileri.....	25
3.3 Elastisite Modül ve Sertlik Değerlerinin Ölçümü	27
3.4 İndentasyon Yöntemi İle Artık Gerilme Ölçüm Tekniği	28
3.4.1 Çekme Artık Gerilmeleri	29
3.4.2 Basma Artık Gerilmeleri.....	31
3.4.3 Temas Alanı Oranının Bulunması	34
3.5 İndentasyon Yönteminde Elasto-Plastik Hesaplanmasında Karşılaşılan Problemler	35
3.5.1 Elastik Toparlanma.....	35
3.5.2 Yığılma (Pile-up) ve Göçme (Sink-in)	35
3.2.3 İndentasyon Metodu ile Elasto-Plastik Özelliklerinin Elde Edilmesi	36
3.6 Malzemenin Elasto-Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Davranışı.....	37
3.7 Temsili Deformasyon Değerinin (ϵ_r) Belirlenmesi	39
3.8 Geri Analiz Algoritmaları ve Birimsiz Fonksiyonlar.....	40

BÖLÜM DÖRT - X-IŞINLARI KIRINIMI YÖNTEMİ İLE ARTIK ÖSTENİT TAYİNİ 42

4.1 Giriş	42
4.2 X- Işınları Üretimi	42
4.2.1 X-Işın Tübü.....	43
4.2.2 X Işınlarnın Yapısı.....	44
4.3 Artık Östenit Miktarının Hesaplanması.....	45
4.3.1 Kantitatif Analiz	46

BÖLÜM BEŞ - DENEYSSEL ÇALIŞMALAR..... 48

5.1 Giriş	48
-----------------	----

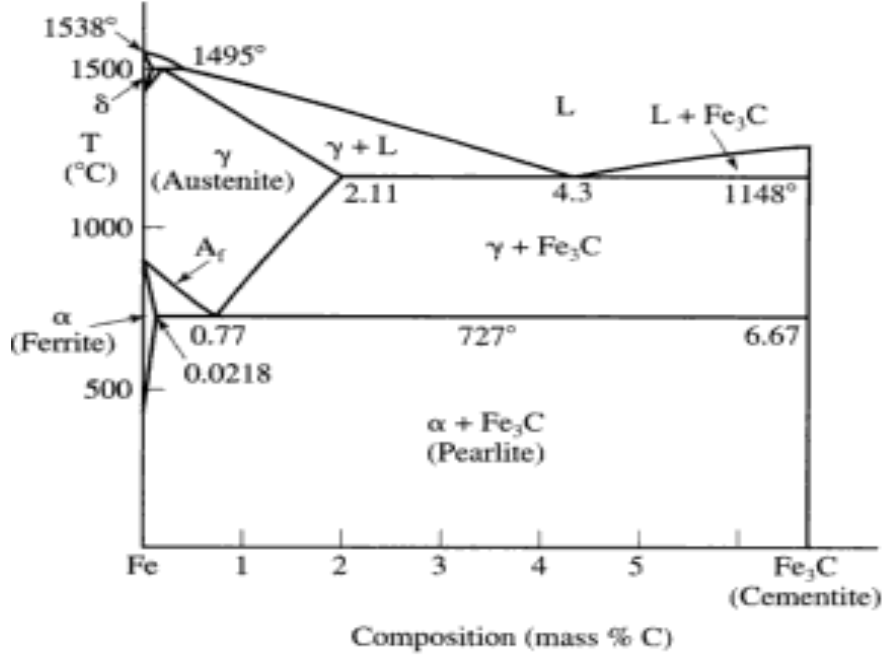
5.2 Araştırmada Kullanılacak Malzemeler.....	48
5.3 Numune Hazırlığı.....	49
5.3.1 Numunelerin Isıl İşlemi.....	49
5.3.2 Numunelerin Kesme İşlemi.....	49
5.3.3 Numunelerin Zımparalama ve Parlatma İşlemi.....	50
5.3.4 Numunelerin Hazırlığı Sonrasında Yapılan Karakterizasyon ve Mekanik Test Çalışmaları.....	50
5.4 Karakterizasyon Çalışmaları.....	51
5.4.1 Metalografik Çalışmalar.....	51
5.4.1.1 Optik Mikroskop.....	51
5.4.1.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	51
5.4.2 X-Işınları Cihazı (XRD).....	52
5.5 Mekanik Test Çalışmaları.....	52
5.5.1 Dinamik Ultra-Mikro Sertlik Test Cihazı (DUH).....	52
BÖLÜM ALTI - DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	53
6.1 Optik Mikroskop Analizi.....	53
6.2 SEM Analizi.....	55
6.3 X-Işınları Cihazı (XRD) Analizi.....	56
6.4 Dinamik Ultra-Mikro Sertlik Test Cihazı (DUH) Çalışması.....	61
6.4.1 Yükleme-Boşaltma Eğrileri (Load-Unload Curves) Analizi.....	61
6.4.1.1 AISI 5115 Çeliği Yükleme-Boşaltma Eğrileri.....	61
6.4.1.2 AISI/SAE 52100 Çeliği Yükleme-Boşaltma Eğrileri.....	63
6.4.2 Elastisite Modül (E) Analizi.....	64
6.4.3 Sertlik (H) Analizi.....	66
6.4.4 Akma Dayanımı ve Çekme Dayanımı.....	68
6.4.5 h_f/h_{max} ve Yükleme Eğriliği (C).....	70
6.5 Artık Gerilme Hesaplamaları.....	72

BÖLÜM YEDİ - SONUÇLAR.....	75
7.1 Genel Sonuçlar	75
7.2 Öneriler.....	79
KAYNAKLAR	80

BÖLÜM BİR GİRİŞ

1.1 Çelikler

Endüstrinin en önemli malzemesi olan çeliklerin birçok kullanım alanı vardır. Özellikle makina endüstrisinde çok geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Çelik, ağırlıkça %2'e kadar karbon içeren bir demir-karbon alaşımıdır (Şekil 1.1). İstenilen özelliklerde bir çelik elde etmek için karbon % miktarı ve işlem sıcaklığı önemli faktörlerdir.



Şekil 1.1 Demir-Karbon Denge Diyagramı (Hummel, 2004)

Katı halde sıcaklığa bağlı olarak üç farklı fazlarda olan (α , γ , δ) bir çeliğe her faz, farklı bir karakteristik (dayanım, sertlik, düktilite) özellik vermektedir.

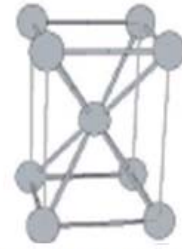
α (alfa) ve δ (gama) fazları, hacim merkezli kübik yapıya sahiptir (Şekil 1.2 a ve Şekil 1.2 b). Bu yapılar sert ve gevrek bir yapıdadır. Şekil değiştirmesi zordur. Östenit, γ katı erişine verilen isimdir. Yüzey merkezli kübik yapıdadır. Yumuşak ve sünektir. Alaşımsız çeliklerde oda sıcaklığında görülmez.



(a) Hacim Merkezli Kübik



(b) Yüzey Merkezli Kübik



(c) Hacim Merkezli Tetragonal

Şekil 1.2 Demir Kristal Yapıları

1.2 Çeliklerde Isıl İşlem

Karbon oranı % 0,2 den daha düşük çeliklere (yüzey sertleştirilebilir ‘*case-carburized*’ 16MnCr5 sementasyon çeliği) sementasyon işlemi (karbürleme işlemi de denir), yüksek karbonlu çeliklere (sertleşebilir ‘*hardenable*’ 100Cr6 rulman çeliği) karbürleme işleminin bir çeşidi uygulanarak (hardening), direkt sertleştirme yoluyla yüzey sertleştirme işlemi yapılır.

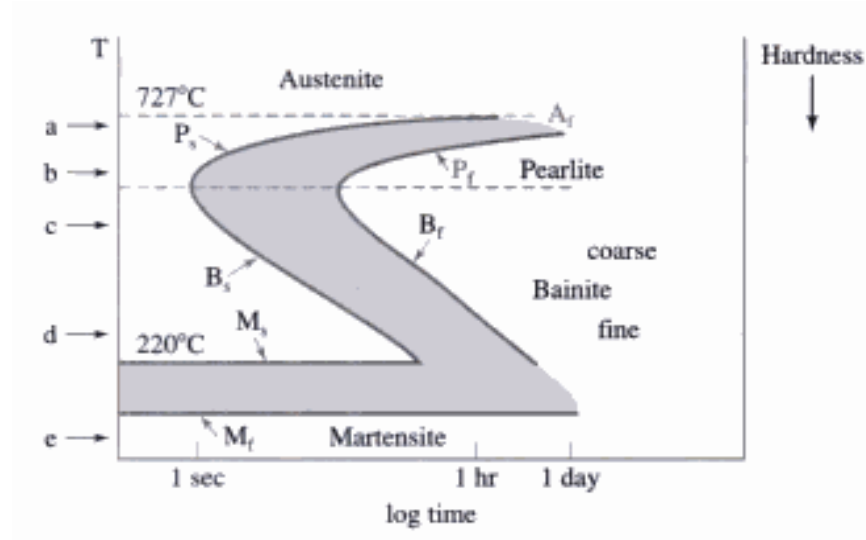
Sementasyon işlemi, içerisinde karbon verici gazların veya bileşiklerin olduğu fırında çelik yüzeyine (C) karbon emdirilmesi işlemidir. Karbürizasyon da denir. Yüzeysel sertlik kazandıran yöntemlerden biridir.

Sertleşebilirlik (Hardenability), bütün çelik cinsleri için fiziksel bir ölçüdür. Bir kesitteki sertlik derinliğini ve yüzey sertleşebilirliğini ifade eder.

Sertleştirme (Hardening), çeliğin cinsine bağlı olarak, belli bir sertleştirme sıcaklığında yapıyı östenite çevirip; su, yağ veya tuz banyosunda su vererek martensit yapı oluşturmak sertleştirmenin prensibidir. Yapısal değişim neticesinde karbon atomu hücre içerisinde hapsediği için sertlik artışı gerçekleşir.

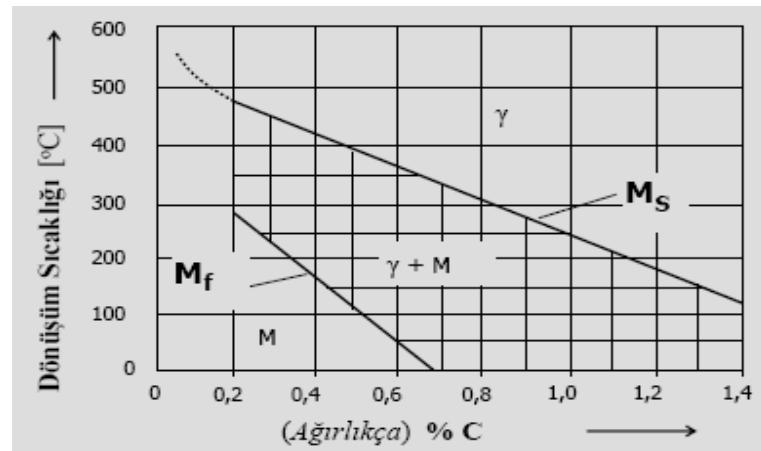
Çelikleri, östenitin kararlı olduğu sıcaklıklardan itibaren soğutmakla östenit, çeliğin kimyasal bileşimine ve soğutma hızına bağlı olarak kararsız ve yeni mikroyapılara dönüşür. Dönüşüm difüzyona müsaade edecek hızda olursa, östenitin içinde bulunan karbon kolayca dışarı çıkar ve ferrit, perlit ve beyrit gibi yapılar

meydana gelir (Şekil 1.3). Hızlı soğutmada ise difüzyon oluşmaz ve östenit yapı içerisinde ki karbon kristal kafesten dışarı çıkamaz. Bu yapı martenzit yapıdır.



Şekil 1.3 ZSD (Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm) Diyagramı

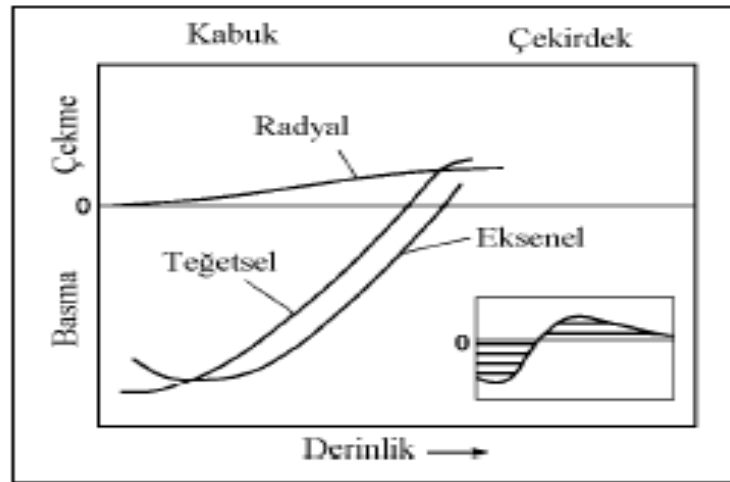
Martenzit, hacim merkezli tetragonal yapıya sahiptir. Bu yapıda birim kafesin iki boyutu eşit uzunlukta, üçüncü boyut ise karbonun hapsedilmesi sonucu biraz uzamıştır. Martenzit sertliğinin esası, boyutlarda olan değişimdir (Şekil 1.2c). Martenzitin yoğunluğu östenit yoğunluğundan az olduğu için dönüşüm sırasında hacim artışı meydana gelir. Bu artış iç gerilmelere neden olur. İç gerilmeleri fazla olan çeliğin şekil değiştirme yeteneği az, sertliği fazladır. Bu nedenle martenzit yapı sert ve kırılgandır.



Şekil 1.4 Martenzit dönüşümünün başladığı (Ms) ve tamamlandığı (Mf) sıcaklıklarının karbon oranına bağlı olarak değişimi

Martenzit dönüşüm sıcaklığı çeliğin karbon miktarına göre değişir. Düşük karbonlu az alaşımlı çeliklerin martenzit dönüşüm aralığı (M_s - M_f) 450 - 200 °C iken yüksek karbonlu çeliklerin, martenzit dönüşüm aralığı ise 200 °C - -100 °C arasındadır. M_s , martenzit dönüşüm başlangıç sıcaklığıdır. Martenzit bitiş sıcaklığı (M_f), su verme ortam sıcaklığının altına düşerse, östenitin martenzite dönüşümü tamamlanamaz ve yapıda bir miktar östenit kalır. Bu dönüşmemiş östenite artık östenit denilmektedir.

Sementasyon ve nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemi süresince, yüzeyler karbon veya azot atmosferinde ısıtılıp soğutulur. Bu işlem sonucunda, yüzeylerde hacimce genişleme ve basma karakterli gerilmeler oluşur. Sementasyon çeliğinde yüzey tabakasının sertliği arttıkça basma artık gerilmede de artış olur. Böylece ısıtılıp soğutulmuş parçanın yüzeyinde aşınma direnci ve yorulma dayanımı artar (Karataş ve diğer., 2001).

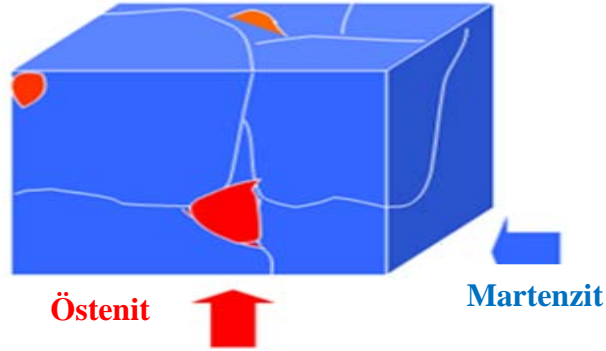


Şekil 1.5 Sementasyon yapılmış parçalarda meydana gelen artık gerilme eğrileri.

Bu işlemler, mil, dişli ve rulman gibi yüksek yüzey sertliği, yorulma dayanımı ve aşınma dayanımı gerektiren malzemelere uygulanır. Sementasyon çeliklerinin yüzeyi sert, çekirdeği tok istenir. Isıtılıp soğutulmuş parçalarda, yüzeyde iç kısma göre daha fazla karbon bulunur. Bu nedenle, parçanın yüzeyi sert, merkezi tok olur. Yüzeyde ve yüzeyin hemen altındaki bölgelerde basma gerilmeleri oluşurken, merkezde çekme gerilmeleri oluşur (Asi, O. ve Asi, D. 2003).

1.3 Artık Östenit

Artık östenit, su verme ve diğer ısıl işlemler sonrasında martenzite dönüşmeden oda sıcaklığına kadar kalabilen kısımdır.

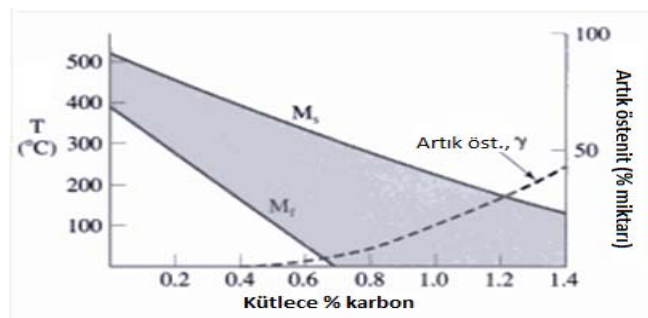


Şekil 1.5. Kübik bir yapıda östenit ve martenzitin şematik bir görünümü

Endüstriyel uygulamalarda, oda sıcaklığında östenitin martenzite deformasyon destekli dönüşümü, parçalarda iç gerilmelere ve çatlakların oluşumuna neden olur. Artık östenit miktarının artması, sertliğin ve dayanımın düşmesine neden olmaktadır.

Artık östenitin yapıda bulunması istenmez. Çünkü servis esnasında, çelik parçanın mekanik özellikleri, yüksek yüzdelerdeki artık östenit varlığından etkilenir.

Artık östenit miktarı, malzemenin kimyası ve ısıl işlem proseslerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu değişkenler, çeliğin kimyasını, karbon içeriğini, östenitleme sıcaklığını, su verme hızını ve tavlama sıcaklığını içerir.



Şekil 1.6 Çeliklerde M_s ve M_f sıcaklıkları üzerine ve artık östenit miktarı üzerine karbon (C) miktarının etkisinin temsili şematik görünümü (Hummel, R. E. 2004).

Ötekit altı ve üstü çeliklerin martenzitik dönüşümlerinin davranışı için M_s ve M_f sıcaklıkları ve artık östenit miktarı karbon içeriğine bağlı olarak yaklaşık şekil 1.6 'te görüldüğü gibidir. M_f sıcaklığı su verme hızına bağlı olarak değişebildiği için tam olarak belirlemek zordur.

Artık östenitin azaltılması veya istenilen değerlere çekilebilmesi sementasyon, takım, kalıp, rulman çelikleri vb değişik malzeme gruplarında çok önemli bir sorundur. Bu nedenle, artık östenit miktarının ölçülmesinde X-ışını kırınımı, kantitatif optik metalografi, elektriksel direnç, manyetik geçirgenlik, dilatometre ve termal analiz gibi birçok metot kullanılmaktadır. Ancak bunlardan X-ışını kırınımı ve metalografi tekniği dışındakiler daha çok dönüşüm esnasında var olan artık östenitin ölçümünde kullanılmaktadır (Yalçın, 1999).

Metalografi tekniği tahribatsız bir ölçme yöntemidir. Ancak, hacimce % 10' dan daha fazla miktardaki artık östenit ölçümlerini yapabilmektedir. X-ışınları yöntemi, optimum östenit miktarının belirlenmesi için, yapıda mevcut % 10 ve daha düşük yüzdelerdeki artık östenit miktarını hassas ve yüksek doğrulukla belirleyebilen, parçayı tahribatsız olarak ölçebilen güvenilir bir yöntemdir. Bu sebeple, bu yöntem artık östenit tayininde sıklıkla tercih edilmektedir.

1.4 Artık Gerilmeler

Artık gerilmeler, çeşitli imalat aşamalarından sonra; örneğin kaynaklı imalat, döküm, yüzey işlemleri ve ısıl işlem prosesleri veya malzemeye homojen olmayan deformasyon uygulanması neticesinde parça içerisinde kalan gerilmelerdir. Artık gerilmeler, üretim sonrasında parça içerisinde kaldığından dolayı kullanım sırasında dışarıdan uygulanacak olan gerilmeler bu gerilmelerle birlikte parçaya etki eder (Dilmeç ve diğer., 2008).

Çeliklerin ısıl işleminde dönüşüm sertleştirilmesi esnasında martenzite dönüşmeden, martenzit yapı içerisinde oda sıcaklığına kadar kalabilen artık östenitin kullanım sırasında deformasyon destekli martenzite dönüşümü boyutsal değişim

yarattığından dolayı, iç gerilmelere neden olabilmektedir. Artık östenitin ve termal genişleme farklılıklarının artık gerilmeye neden olabilmesinden dolayı, artık gerilme içeren bir parçada, parçaya etki eden gerçek yükleme/analiz durumu, hesaplama sonuçlarından çok daha farklı olabilmektedir.

Çeliğin ısıtılmasında, çeliğe su verme sonucunda, malzemenin merkezinde ve yüzeyinde farklı soğuma sonucunda oluşan termal gerilmeler çekme ve basma artık gerilme karakterlidir. Bu gerilmeler, malzemenin performansına yararlı olur veya zarar verir (Asi ve Asi, 2003).

Artık gerilmeler üretilen malzemenin servis ömrünü doğrudan etkiler. Çekme artık gerilmeleri, malzemenin yorulma ömrünü azaltıp malzemenin erken hasara uğramasına neden olabilirken, basma artık gerilmeleri ise malzemeye; yorulma ömrünü ve gerilmeli korozyona karşı direncini artırıcı yönde faydalı bir etkiye sahiptir. Üretim sırasında oluşan zararlı artık gerilmeleri (çekme) mümkün olduğu kadar kontrol altına almak için ısıtılma teknikleri uygulanır. Buna karşın parçanın yorulma performansını geliştirmek amacıyla, parçada faydalı artık gerilmeler (basma) özellikle oluşturulmaktadır (Shot Peening, Sementasyon işlemleri gibi).

1.4.1 Artık Gerilme Miktarının Ölçümü

Artık gerilmelerdeki küçük değişimler bir parçanın ömrü üzerinde kritik öneme sahip olabilir. Bu etkilerin parçanın (rulman ve dişli gibi) önemini anlamak ve servis sırasında malzemenin performansını değerlendirebilmek için, parça içerisindeki artık gerilme seviyesinin bilinmesine gerek duyulur. Günümüzde uzay, nükleer ve diğer mühendislik endüstrilerindeki tasarımlarda kolaylıkla yapılabilen, az zaman alan ve doğruluğu yüksek artık gerilmelerin ölçümüne büyük önem verilmektedir. Ancak ölçüm metotlarının doğruluğu, ölçümü yapılacak parçaların durumuna göre sınırlıdır. Genellikle bu ölçüm metotları üç kategoriye ayrılır. Bunlar:

- tahribatlı (destructive) metotlar
- tahribatsız (non-destructive) metotlar
- yarı tahribatlı (semidestructive) metotlar

Tahribatsız ölçüm teknikleri, artık gerilmeleri belirlemek için numunelerin farklı karakteristik yapılarını kullanır. Bunlar manyetik metot, ultrasonik metot, raman spektroskopisi, X-ışınları kırınımı ve nötron kırınımı gibi yöntemlerdir. Tahribatlı yöntemler ise, tekniğe bağlı olarak (delik delme metodu, tabaka kaldırma metodu gibi) numune üzerinden parça kaldırılması yoluyla ölçüm yapar. Bu metotların yanı sıra son yıllarda yarı tahribatlı bir metot olarak görülen indentasyon yöntemi de artık gerilmeleri belirlemede hızlı ve verimli kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağı konusunda, malzemenin ne olduğu, artık gerilmenin tipi, parça geometrisi, yöntemin güvenilirliği ve hassasiyeti, ekipman tedarik maliyeti ve ölçüm maliyeti gibi koşullar belirleyicidir.

Şahin ve arkadaşları (2003), tahribatlı bir metot olan delik delme metodu ile yüzeye yakın yerlerde artık gerilme tespitinde bulunmuşlardır. Bununla birlikte, Suresh ve Giannakopoulos, 1998) artık gerilmenin belirlenmesinde yarı tahribatlı bir yöntem olan indentasyon tekniğini ilk olarak gerçekleştirmişlerdir. İndentasyon tekniği, diğer tekniklerle karşılaştırıldığında, lokal olarak artık gerilme alanının ölçümünde çabuk ve etkili bir metottur (Chen ve diğer., 2006).

İndentasyon yöntemi, kaynak, döküm gibi yüzey işlemleri veya ısıl işleme tabi tutulmuş malzemelerde, termal etkiler veya plastik deformasyon sonucu oluşmuş olan artık gerilmelerin homojen olmayan dağılımlarını değerlendirebilmek için bulk malzemelere ve ince filmlere uygulanabilen, son on yıldır sıklıkla akademik çalışmalarda kullanıma sahip bir yöntemdir. Bu yöntemi kullanmanın amacı, çeşitli işlemler tarafından üretilmiş artık gerilmelerin doğrudan ölçülebilmesidir. Şimdiye kadar olan bu konudaki çalışmaların açıkça ortaya koyduğu sonuçlar, indentasyon tekniği kullanımının diğer tekniklerle karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir. Artık gerilmelerin değerlendirilmesinde hızlı ve güvenilir bir yöntem olması nedeniyle bu tekniğin yakın gelecekte pratikte yaygın bir kullanımı olacağına inanılmaktadır. Bu teknikte, sertlik, elastisite modülü, akma mukavemeti, sertleşme üsteli, kırılma tokluğu gibi elasto-plastik özelliklerinin bulunması ile birlikte, önceden var olan veya sonradan oluşmuş artık gerilmelerinin miktarı hesaplanmaktadır.

İndentasyon metodu ile mikrosertlik cihazı ile bağlantılı olan bir bilgisayardan eş zamanlı bir şekilde otomatik olarak çizilen yükleme-boşaltma (load-unload) eğrilerinden elde edilen yük-derinlik ($P-h$) verilerden artık gerilmenin tipi (çekme/basma) ve büyüklüğü belirlenmekte ve yük-derinlik verileri, Gauss-Jordan ve Newton-Rapshon sayısal çözümlene metotları uygulanarak geliştirilen bilgisayar programına girilerek, numunelerin elastisite modülü, akma mukavemeti ve sertleşme üsteli gibi elasto-plastik özelliklerinin değerleri belirlenmektedir.

Bu çalışmada, ısıtılmış AISI 5115 (16MnCr5) sementasyon ve AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliklerinin yüzeylerine yakın yerlerde, Shimadzu Dinamic Ultra-mikro Sertlik cihazında, elmas kare piramit Vickers ucu kullanılarak 200, 400, 600, 800 ve 1000 mN maksimum indetasyon yükleri altında indetasyon deneyleri yapılmıştır. Literatürde bu konuda ortaya atılan bir modelin incelenip ve bir akış diyagramı takip edilerek, Jordan ve Newton-Rapshon sayısal çözümlene metotları uygulanarak geliştirilen bilgisayar programına, indetasyon sonucu elde edilen yük-derinlik verileri ($P - h$) girilerek sertlik, elastisite modülü, akma mukavemeti ve sertleşme üsteli gibi elasto-plastik özelliklerinin değerleri belirlenmiş ve böylece artık gerilme ölçümleri sistematik olarak yapılmıştır.

BÖLÜM İKİ

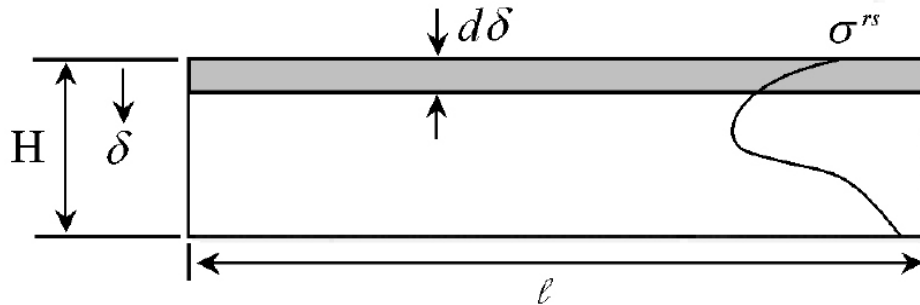
ARTIK GERİLME ÖLÇÜM METOTLARI

2.1 Tahribatlı Artık Gerilme Ölçüm Metotları

Artık gerilme ölçümleri, tahribatlı ve tahribatsız olarak yapılabilmektedir. Tahribatlı yöntemler, mekanik yöntemlerdir. Malzemedeki bir miktar parça kaldırılması yoluyla artık gerilme ölçümleri yapılmaktadır.

2.1.1 Tabaka Kaldırma Yöntemi (Curvature)

Bu metot genellikle filmler ve kaplamalar için kullanılır. Artık gerilme içeren bir düz bir levhadan ardı ardına tabaka kaldırıldığında (film), gerilmeler dengesizleşerek, levhanın eğilmesine neden olur. Levha eğriliği kaldırılan tabakadaki orijinal gerilme dağılımına ve levhanın elastik özelliklerine bağlıdır. Böylece, strain gage (gerilme ölçer), lazer tarama veya optik mikroskop kullanılarak numune eğriliğinin ölçümü ile levhadaki gerilme dağılımı belirlenebilir. Ölçümler çok eksenli eğriliğinden kaçınmak için genellikle dar şeritler üzerinde yapılır (Yiğit, Dilmeç ve Halkacı, 2008). Kimyasal ve fiziksel buhar depozitasyonu (CVD) ve (PVD) tekniği ile üretilmiş kaplamalar için ve metalik ve polimerik kompozit malzemeler için kullanılmaktadır (Anderoğlu, 2004). Bir tabakadaki artık gerilmelerin önemli olarak değişmediğinin varsayılması ile bu yöntem, silindirik numunelere ve düz levhalara uygulanabilmektedir. Bu yöntemle sadece numune eksenine paralel yöndeki artık gerilmeler hesaplanabilmekte ve levha düzlemine dik doğrultudaki gerilmeler hesaplanamamaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Numunedeki gerilme dağılımı

Yöntemde, hacimdeki makro gerilmeler ölçülmekte, yüzey ve yüzey kenarındaki gerilmeler ölçülememektedir.

Tabaka kaldırma mekanik veya elektrokimyasal olarak kaldırılabilir. Elektrokimyasal olarak tabaka kaldırma işleminde, ilave gerilme oluşturulmadığı için bu işlem için uygun bir yöntemdir. Bu yöntem, pek çok uygulamada yüzeyden 10-500 µm arasında değişen kalınlıklarda artık gerilme derinlik profili analizini içermektedir.

2.1.2 Delik Delme Yöntemi (*Hole Drilling Method*)

Bu metot, gerilmeli bir numuneden, genellikle 0,4-2 mm derinlikte sığ bir delik açılması şeklindedir. Öncelikle delik açılacak yerin hemen etrafına rozet tipi uzama teli yapıştırılır. Daha sonra delik delinir. Delik delme sonrası gerilmeli numunede gerilmeler tekrar dengelenir ve bu sırada uzama telinden gerilmeler ölçülmektedir. Elde edilen veriler sonucu gerekli hesaplamalar yapılmakta ve artık gerilme büyüklüğü belirlenmektedir. Ancak, derinliğin artması ile daha derinlerdeki gerilmeler hakkında sonuçlar alınabilirken, derinlik çap boyutunu aşarsa, güvenilir ölçümler elde etmek zorlaşmaktadır (Yiğit, Dilmeç ve Halkacı, 2008).



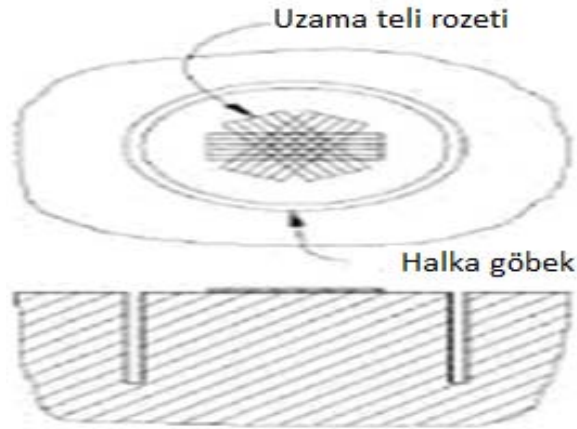
Şekil 2.2 Delik delme yöntemi şematik gösterimi

Bu metotun kullanımı kolaydır ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli malzemelere uygulanabilirliği, güvenilir sonuçlar vermesi, taşınabilir olması avantajlarındandır. Ancak, gerilme hassasiyetinin derinlikle değişiyor olması, sınırlı

çevresel çözünürlüğe sahip olması, delme işlemi sırasında numunede ek bir gerilme oluşturması dezavantajlarındandır. Artık gerilmeler akma dayanımının %50'ini aştığında ölçüm sonuçlarında hata verebilmektedir. Bu metot kaplamalarda kullanılmasına karşın, 100 µm değerinden deha düşük kalınlıkta filmler veya kırılğan filmler için kullanışlı değildir (Anderoglu, 2004).

2.1.3 Halka Çekirdek Yöntemi (*Ring Core Method*)

Bu yöntemde, delik delme tekniğine benzer teknik kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemde halka şeklinde ki delik derinliği daha fazladır. Böylece daha derinlerdeki gerilmeler (0.1-6 mm) ölçülebilmektedir (Yiğit, Dilmeç ve Halkacı, 2008). Polikristal ve/veya amorf malzemelerde, artık gerilmeler derinliğin bir fonksiyonu olarak, strain gage tekniği ile belirlenir. Delik açılmasıyla, malzemedeki gerilme gevşemeleri strain gage (uzama teli) rozeti ile ölçülmektedir. Rozet halka arasına yerleştirilmiştir (Dronavalli, 2001). Şekil 2.3'te bu yöntem şematığı görülmektedir.



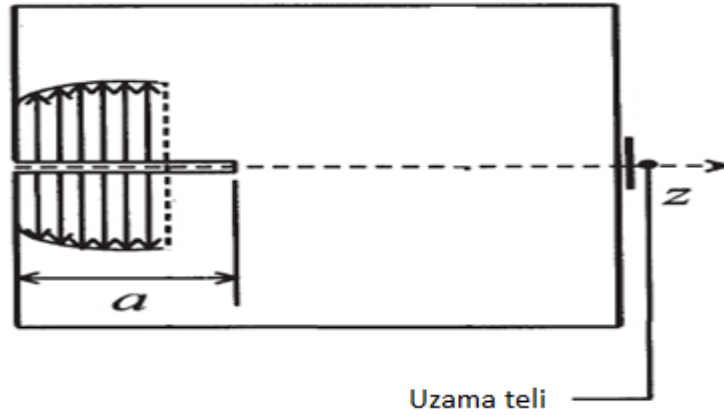
Şekil 2.3 Halka çekirdek yöntemi şematik gösterimi

Bu yöntemde daha hassas ölçümler yapılabilirken, delik delme yöntemine göre daha tahribatlı bir yöntemdir.

2.1.4 Kanal Açma Yöntemi (*Compliance Methods*)

Kanal açma yönteminde, küçük bir kanal açmak suretiyle kanal etrafında ki gerilme gevşemelerinin strain gage ile ölçülme işlemi yapılır. Kanal derinliği

artarken, derinliğin bir fonksiyonu olarak kanala dik yöndeki gerilme alanındaki gevşemelere (Şekil 2.4) müsaade edilmiş olunacaktır (Anderoglu, 2004)



Şekil 2.4 Kanal açma yöntemi şematik gösterimi

Yöntemin uygulanması basit ve çabuktur. Değişik geometrideki malzemelere 150 mm derinliğe kadar uygulanabilir bir yöntemdir. Kristal yapıya sahip olmayan malzemelere de uygulanabilmektedir. Belli derinlikteki artık gerilmeler bu yöntemle ölçülebilmektedir. Çözünürlüğü ve hassasiyeti yüksektir. Bu yöntemin dezavantajları, sadece kanal doğrultusuna dik yöndeki artık gerilmelerin ölçülebilmesi, kanal ve strain gage yerinin belirli olmamasıdır (Yiğit, Dilmeç ve Halkacı, 2008).

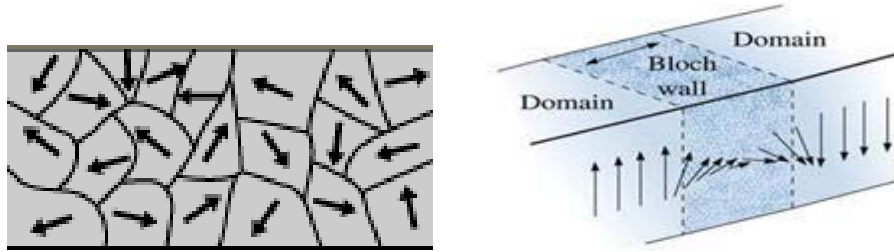
2.2 Tahribatsız Artık Gerilme Metotları

Tahribatsız yöntemler, yüzey artık gerilmeleri ölçümünde tahribatsızdır ancak malzemenin merkezine doğru olan derinlikteki ölçümler için parçanın kısmen veya tamamen tahrip edilmesi zorunludur. Bu yöntemlerde malzemenin fiziksel ve kristolografik parametreleri ile ilişki kurulur.

2.2.1 Manyetik Barkhausen Yöntemi

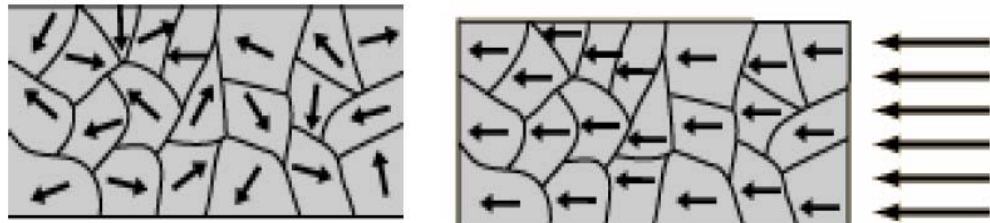
Çeliklerde veya diğer ferromanyetik malzemelerde, manyetik özellikler malzemenin gerilmelerine duyarlıdır. Bu yöntem gerilme mıknatıslanma ilişkisine dayanır (Anderoglu, 2004). İki manyetik yöntem vardır. Bunlar manyetik olarak

uzayıp kısılma ve Barkhausen gürültüsüdür. Bunlardan ilki manyetik indüksiyon ve geçirgenliğe dayalı ölçme, ikincisi manyetik domainlerin duvar hareketi analizi üzerinedir. Ferromanyetik malzemeler, içerisinde manyetik dipollerin bulunduğu küçük bölgelerden (domain) oluşurlar. Domainler domain duvarları ile birbirinden ayrılır. Eğer manyetik uzayıp kısılma alanı kullanılarak ölçüm yapılacak malzemeler de gerilme varsa, tercihi olarak domain yönleri değişir. Gerilmeler domainlerin büyümesine (pozitif) veya küçültmesine yol açar. Gerilmeler, manyetik alan yönünün, uygulanan doğrultudan sapmasına (dönmesine) yol açar. Bu döngüler, ölçümü yapılacak parçanın yüzey düzlemi üzerinden metal bir sensör tarafından algılanan veriler bir bilgisayara kaydedilir.



Şekil 2.5 Ferromanyetik malzeme içerisindeki domainler ve manyetik dipoller

Barkhausen gürültüsü ise, bulk malzemelerde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, Barkhausen gürültüsü denmesinin nedeni ferromanyetik malzemeler içinde yer alan manyetik dipollerin hareket etmesi sonucu ortaya çıkardığı ses sinyalleridir. Bu yöntemde, domain duvarlarının hareketi metal bir sensör aracılığı ile algılanarak, ölçüm gerçekleştirilir. Domainler ferromanyetik malzeme içinde miktatsızlanmanın homojen olarak dağıldığı bölgelerdir ve boyutları yaklaşık olarak 0,1 mm.den birkaç mm'ye kadar değişebilir. Ölçüm derinliği 10 mm 'ye kadar ulaşabilir (Yelbay, 2008).



Şekil 2.6 a) domainler dağınık durumda yönlenmiş b) manyetik alan uygulandıktan sonra domainler uygulanan alan yönünde yönlenmiş

Ölçülen değerlerden gerilme değerlerini hesaplayabilmek için ölçümleme eğrileri kullanılır. Bu eğriler ölçümü yapılan malzemeyle, aynı malzemeden elde edilmiş bilinen manyetik veriler karşılaştırılarak, buna karşılık gelen gerilme değerleri bulunur. Daha sonra bu değerler kullanılarak, parça içerisindeki artık gerilme değerleri hesaplanabilir. Manyetik Barkhausen yönteminde, ölçülen manyetik parametre değerleri sertlik arttıkça azalır. Manyetik parametre değerleri, malzeme içinde bulunan çekme artık gerilmeleri tarafından yükselirken basma artık gerilmeleri tarafından düşer. Manyetik Barkhausen Gürültüsü yöntemi tahribatsız bir ölçüm yöntemidir.

2.2.2 Raman Tayf Ölçüm Yöntemi

Raman tayf ölçüm yöntemi, malzeme ile lazer ışınlarının arasındaki etkileşim sonucunda artık gerilmelerin belirlenebildiği bir yöntemdir. Bu yöntemde, malzemeye lazer ışınları gönderilir. Lazer ışınları, atomların titreşmesine neden olur ve buna bağlı olarak malzeme üzerinden ışın saçılır. Saçılan ışınların incelenmesi sonucunda malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısı hakkında bilgi edinilebilmektedir. Raman tayf ölçüm metodunda çözünürlük çok fazladır. Genellikle yüzeydeki artık gerilmelerin ölçümü için kullanılır. Günümüzde Raman tayf ölçümü üzerindeki çalışmalar daha çok kompozit malzemelere uygulanabilirliği üzerinde devam etmektedir (Yelbay, 2008).

2.2.3 Ultrasonik Yöntemler

Ultrasonik gerilme ölçümleri tekniği, ses-dalgaları ve elastik etki arasındaki ilişkiye dayanır. Bulk bir malzeme içerisinde mekanik gerilmelere bağlı olarak elastik dalga ilerleme hızının ölçümüne dayanır. Malzeme içerisinde bulunan gerilmeler, ses dalgalarının yavaşlamasına neden olurlar. Gönderilen ve geri alınan ses dalgaları arasında ki fark artık gerilme ölçümünde hesaba katılarak, ölçüm gerçekleşir. Gerilme altındaki malzemelerde elde edilen ses dalgaları hızındaki değişim çok düşük yüzdelerde olduğu için ultrasonik tekniği kullanarak artık gerilme ölçümü yapılan pratik uygulamalarda çözünürlüğü çok yüksek bir ekipman gereklidir. Şekil 2.7’de veri tabanına sahip böyle bir ekipman görülmektedir.



Şekil 2.7 Artık gerilmelerin ultrasonik ölçümleri için geliştirilmiş, sensörlerle donatılmış bir cihaz.

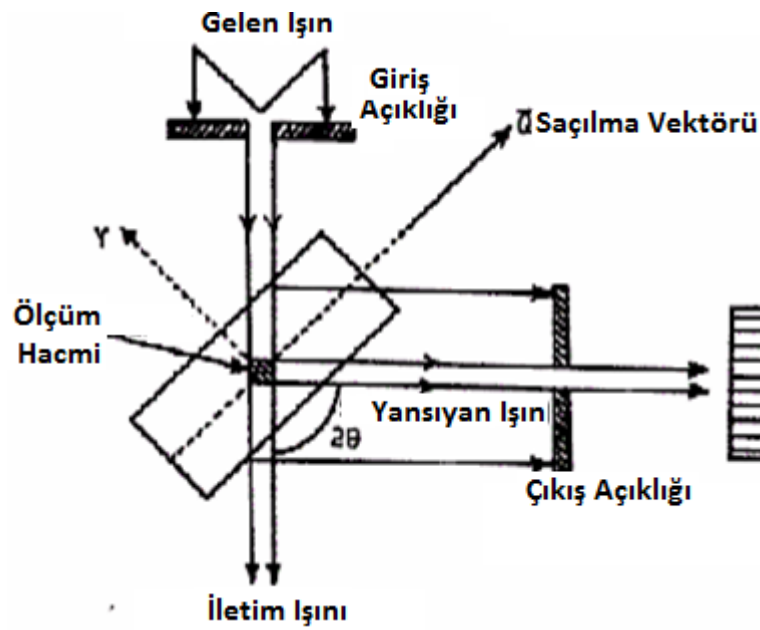
Ultrasonik yöntem kullanılarak makro kalıntı gerilmeler malzemenin derinliğinden bağımsız olarak bulunabilir. Ancak izotropik olmayan malzemelerde, ses dalga hızlarının yöne bağlı olarak değişebileceği gerçeği, bu yöntemin hatalı sonuçlar vermesine neden olabilecektir. Bu yöntemel verimli bir şekilde laboratuvar koşulları altında ve gerçek kullanım alanlarında, geniş bir malzeme aralığında artık gerilme ölçümü yapılabilmektedir. Bu yöntem, ortalama 2-150 mm kalınlıklarında plakalarda artık gerilme ölçümüne izin vermektedir. Hızlı, kolay ve ucuz bir tahribatsız yöntem olduğu için, ultrasonik yöntemle artık gerilme ölçümü üzerine çalışmalar sürdürülmektedir.

2.2.4 Nötron Kırınımı Yöntemi

Nötron kırınımı metodu, kristal malzemelerde tahribatsız olarak artık gerilme ölçümü yapan bir metottur. Nötron ışını kırınımı yöntemi, elastik gerilme değerleri sağlayarak, malzemenin kristal yapısındaki atomik düzlemler arasındaki mesafenin ölçülmesiyle, artık gerilmelerin hesaplanmasını sağlar. Malzemenin kristal latis boşluğundaki değişimler, gerilme olarak ölçülür. bu yöntemde malzemeye yüksek enerjili nötronlar gönderilir. Bir malzeme radyasyona maruz kaldığında düzlemler arası boşlukta ($0,5-3 \text{ \AA}$) elastik ve uyumlu bir şekilde Bragg açısına göre gelen ışınları kırar. Bu ışınlar pozisyon hassasiyetli bir dedektör tarafından kaydedilir. Kırılma açısı Bragg eşitliğinden (2.1) hesaplanabilir (Anderoglu, 2004) .

$$2d_{hkl} \sin\theta_{hkl} = \lambda \quad (2.1)$$

Burada λ , gelen ışının dalga boyudur. Bragg piki için d_{hkl} ise kristolografik düzlem ailelerinin(hkl) latis düzlem boşluğudur. θ_{hkl} , kırılma açısıdır. Bir malzeme elastik gerilme varsa, latis boşluğu değişir. Bu sebeple, belli dalga boyu sahip bir ışın gerilmeli bir malzemeye gönderildiğinde, belirli düzlemlerden θ_{hkl} açısında yansır. Bragg eşitliğine bağlı olarak d_{hkl} mesafesi belirlenir. İlgili hesap yöntemi yapılarak, artık gerilme değerleri hesaplanır.



Şekil 2.7 Nötron kırınımı metodu şematik görünümü (Dronavalli, 2001)

Bu yöntemde, ölçüm derinliği alüminyum için 250 mm 'ye çelik için ise 37 mm'e kadar ulaşabilir. Cihaz maliyeti yüksek olmasından dolayı, bu yöntem genellikle laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmekte ve araştırma geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır (Yelbay, 2008).

2.2.5 Termo-elastik Metot

Malzemedeki elastik deformasyonlar, sıcaklıkta (1 MPa çelikte için 1 mK) küçük değişimlere yol açar. İnfrared bir kamera kullanarak termal değişimlerin ortaya çıkarılması mümkündür. Bu değişimler, gerilmeye ki değişimleri göstergeleridir.

Termoelastik sabiti (β) gerilme de sıcaklığa bağımlılığı anlatır. Termoelastik sabiti kullanarak, parçalarda ki hidrostatik gerilmeler bu ilişki eşitlik (2.2) kullanılarak tanımlanabilir.

$$Heat \approx -\beta \frac{\partial}{\partial} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (2.2)$$

Bu metot genellikle yorulma çalışmalarında kullanılır. Bu metotta infrared kameralar kullandığından bu yana yöntem, onların duyarlılığından etkilenmektedir. Bu nedenle mevcut kullanımı sınırlıdır.

2.2.6 Foto-elastik Metotlar

Malzeme gerilmeye maruz bırakıldığında, ışık hızı şeffaf malzemelerde anizotropik eğilim gösterir. Bu eğilim, fotoelastik etki olarak adlandırılır. Çapraz polarlar arasında, beyaz veya monokromatik ışıkta, bu tür nesnelere belirlendiğinde, fotoelastik etki saçaklı yapıların araya girmesine neden olur. Optik gerilme katsayısı n , bir kalibrasyon deneyi ile belirlenirse, oluşan saçaklı yapıların lokal maksimum gerilmeleri (eşitlik 2.3) vermektedir.

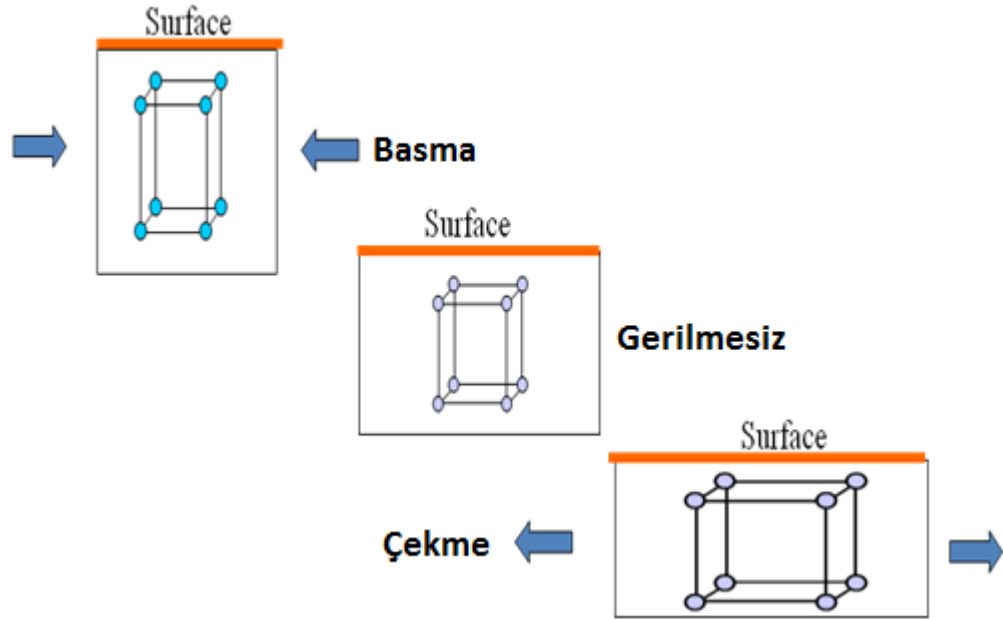
$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = \frac{fn}{t} \quad (2.3)$$

σ_{11} ve σ_{22} temel düzlemlerde ki gerilmeler, f saçak yapı ve t optik yol uzunluğudur. Fotoelastik ölçümler, genellikle gerilmelerin olduğu iki boyutlu epoksi reçine modelleri veya üç boyutlu modellerin kesim parçaları kullanılarak yapılır.

2.2.7 X-Işınları Kırınımı Yöntemi

Artık gerilme ölçümünde kullanılan kırınım metotları, temel olarak kristal yapıya sahip bir malzemeye X ışınları gönderilmesiyle, maksimum şiddetin elde edildiği açının ölçülmesine dayanır. Bu açılardan, Bragg kanununa göre kırınım düzlemlerindeki düzlemlerarası mesafe belirlenmektedir (Anderoğlu 2004). Bir malzemeye gerilme uygulanmadığı durumda kristal kafesi boyutlarında değişim olmaz. Ancak, çekme veya basma gerilmeleri uygulandığında, kristal kafes boyutları (artış-azalma) değişir. Bu değişim, kırınım desenlerinde (grafik), pik pozisyonlarının

açısal değişimi ile açıklanır. Böylelikle, pik açılarının kesin olarak ölçümü ile artık gerilmeler bulunabilir.

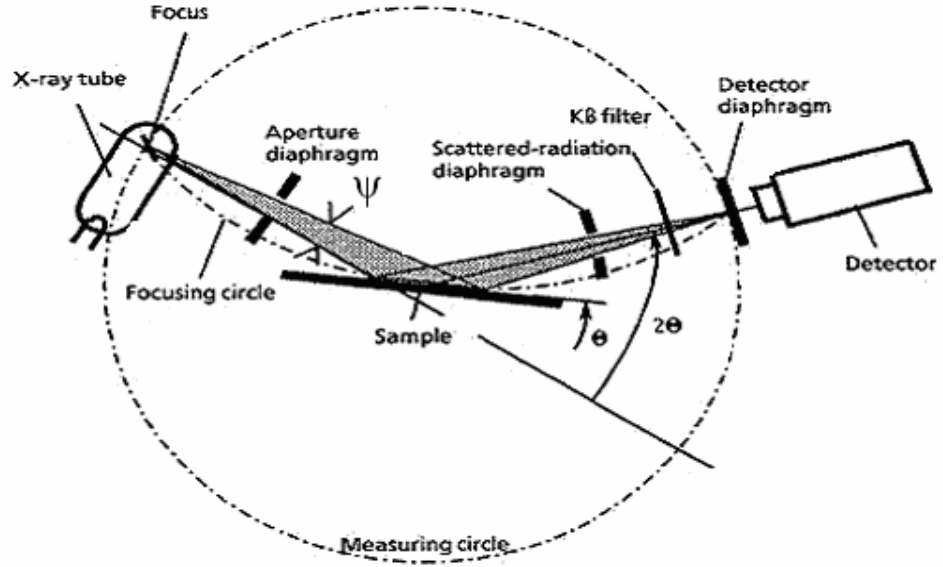


Şekil 2.8 Bir kristal kafesin basma (compression), çekme (tensile) gerilmeleri ve gerinmesiz durumundaki temsili görünüşleri

Atomlararası mesafelerdeki değişimler, malzemedeki elastik gerinmelerle ilişkilendirilir. X ışınları kırınımı (XRD) yönteminde artık gerilmelerin tespiti, Hooke Kanunu'na göre $\sigma = C\varepsilon$ atomik kafes içindeki birim şekil değiştirmelerin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Numunenin yüzeyine gönderilen monokromatik bir X-ışını, numuneyi tarar ve eşitlik (2.4)'de verilen Bragg Kanunu'na uyumlu, 2θ açısındaki düzlemlerde kırınıma uğrar. Paralel atom düzlemleri arasındaki mesafe (d), kırınım açısı (θ) pozisyonunun Bragg kanunu eşitliğinde yerine konulmasıyla hesaplanır. Bragg Kanunu:

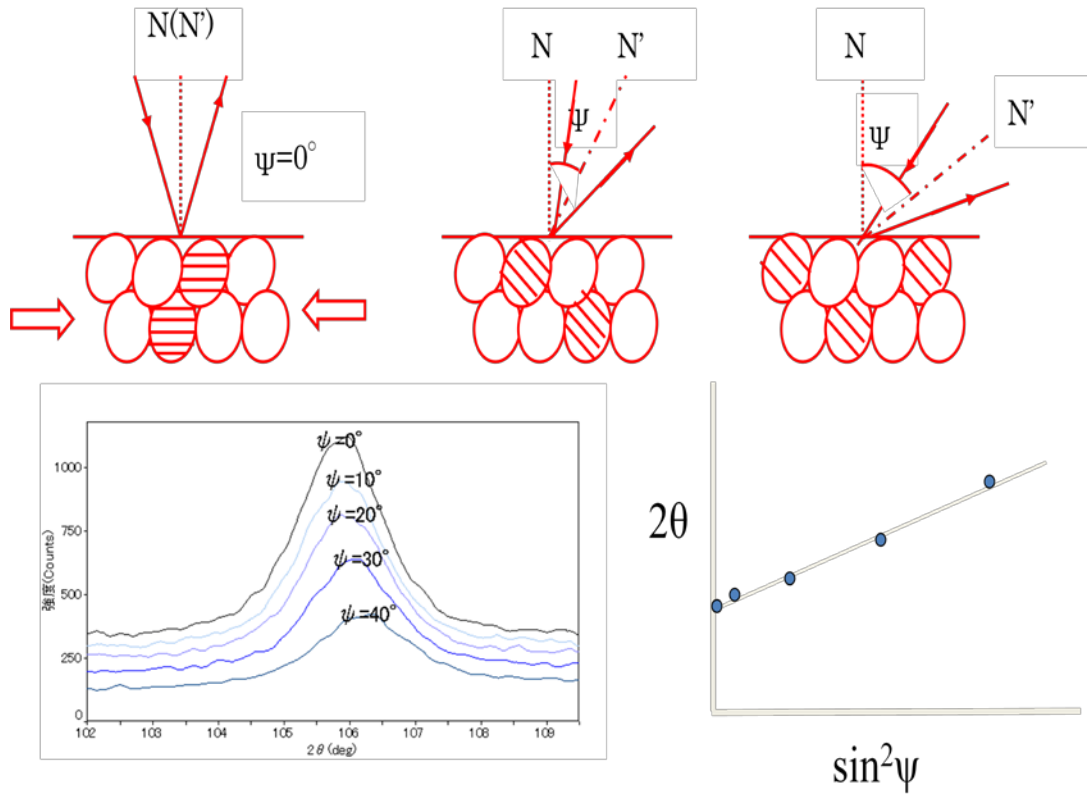
$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.4)$$

Burada n ; yansıyan ışının derecesi, λ ; monokromatik radyasyonun (tek renkli ışınım) dalga boyu, d ; aynı indise sahip paralel atom düzleminin arasındaki mesafedir (düzlemler arası mesafe). Yansıyan X-ışınları bir dedektörde kaydedilir (Asi ve Can, 2003).



Şekil 2.9 X-ışınları kırınımı metodu şematik görünümü

Numune ψ açısı kadar eğilirse, atomik düzlemler de ψ açısı kadar eğilecektir. Eğer numunede artık gerilme yoksa kırılan eğrilerin ikisi de üst üste gelecektir. Ancak eğer malzemede artık gerilme varsa farklı yönlerdeki atomik düzlemler sıkışacak veya genişleyecek ve pik değeri değişecektir.



Şekil 2.10 X-ışınları kırınımı (XRD) test tekniği

$\sin^2\psi$ tekniği malzemelerde x-ışınları difraksiyonu ile kalıntı gerilme ölçümü için kullanılan en yaygın tekniktir. Bagg kanununa göre belirlenen d mesafeleri ile $\sin^2\psi$ diyagramı çizilir. Bu diyagramdan elde edilen doğrunun eğiminin hesaplanması sonucunda artık gerilme (σ), aşağıdaki denklem (2.5)'te verilen eşitliğe bağlı olarak tespit edilir (Asi ve Can, 2003).

$$\sigma = \frac{E}{1 + \nu} \frac{1}{\sin^2 \psi} \frac{(d_\psi - d_0)}{d_0} \quad (2.5)$$

Burada, d_0 ; gerilmesiz malzemedeki düzlemlerarası mesafedir d_ψ ; ψ ölçüm açısındaki düzlemler arası mesafedir. E ; Elastisite modülü; Poission oran (Demirler ve Taptık, 2005)

X ışınları yöntemi çeşitli işlemler görmüş malzemelerin artık gerilme tayininde sıklıkla kullanılmaktadır. Sementasyon işlemi yapılmış numunelerin yüzeyden çekirdeğe doğru artık gerilme değerlerinin elde edilmesinde, elektrolitik parlatma (electropolishing) ile talaş kaldırılarak istenilen derinliklerdeki artık gerilme değerleri ölçülmektedir. İşlem görmüş bu malzemelerin; shot peening, ince kaplamalar, sementasyon işlemi ve kaynak işlemi gibi ısı etki ile etkilenmiş parçaların, XRD yöntemi ile artık ölçümü büyük bir doğrulukla yapılmaktadır.

2.3 Yarı Tahribatlı Artık Gerilme Ölçüm Metotları

Yarı tahribatlı bir metot olan indentasyon metodu, Bölüm 3'te kapsamlı olarak anlatılacaktır.

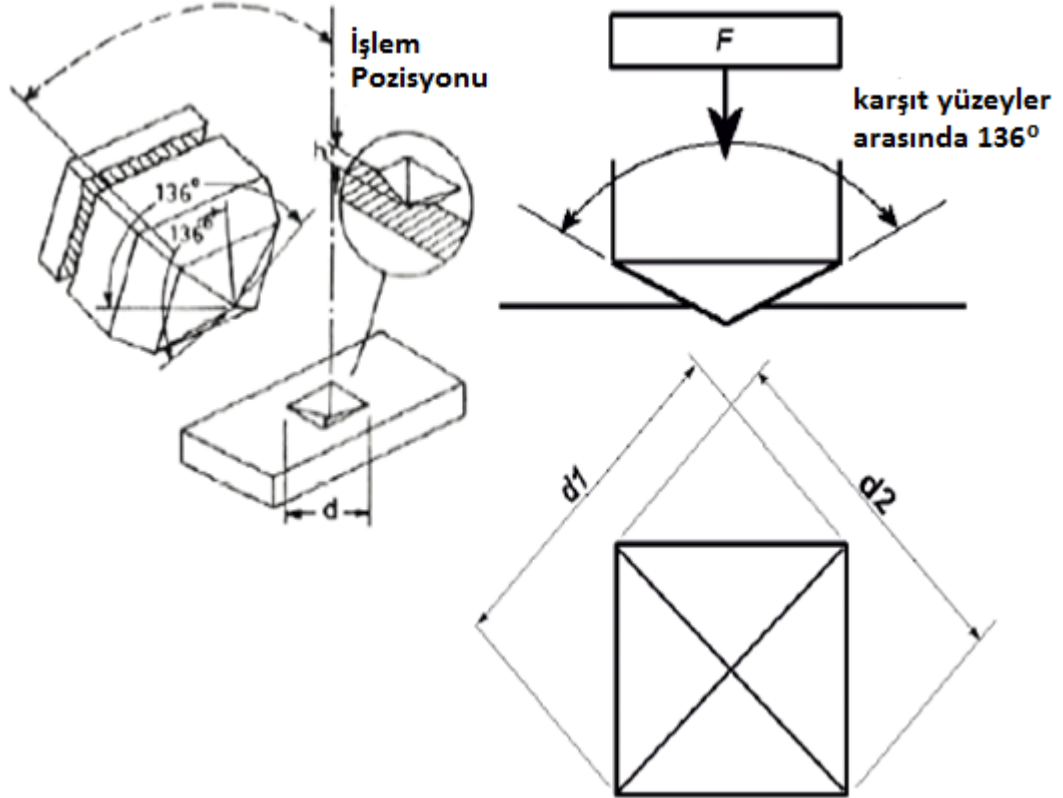
BÖLÜM ÜÇ

İNDENTASYON TEKNİĞİ İLE ARTIK GERİLME HESABI

3.1 Dinamik Ultra-Mikro Sertlik Test Cihazı (DUH) Deneyi

Bu deney, karbon veya azot ortamında sertleştirilmiş yüzeyler, ince filmlerin veya yüzey kaplamaların kalınlıkları üzerine bir değerlendirilme yapabilmek için uygulanır. Bunun yanı sıra, metalik alaşımlarda fazların sertliğinin tesbitinde, metalik karbürler ve cam, porselen gibi sert ve kırılğan malzemelerin sertliklerinin ölçümünde de kullanılmaktadır.

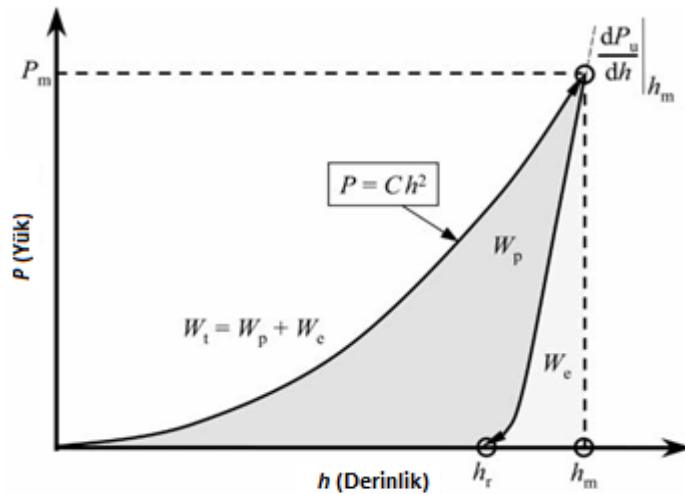
Dinamik ultra-mikro sertlik cihazı (DUH), dinamik mikro sertlik hassasiyetli bir ölçüm cihazıdır. Bu test cihazında, 136° 'lik tabanı kare piramit olan Vickers ucu kullanılmaktadır (Şekil 3.1). Ayrıca bu test cihazında, X10 ile X50 büyütme yapabilen metal mikroskobu bulunmaktadır.



Şekil 3.1 Vickers sertlik testi ve Vickers izinin şematik olarak ifadesi (Yao, 2005)

DUH cihazı ile sertlik yanında, aynı zamanda elastisite modülü de elde edilmektedir. Elastisite modülü, boşaltma safhasında maksimum test yükü ve bu yükün 1/2 veya 1/3'ü değerler aralığında otomatik olarak hesaplanmaktadır.

Sertliği ölçülecek numune tabla üzerine oturtulur. Bu tabla, X ve Y koordinatlarında kaydırılarak optik lensten önce X10 sonra X50 büyütmelemlerinde gözlem yapılarak net bir görüntü elde edinceye kadar indenterin uygulama yeri ayarlaması yapılır. Daha sonra tabla, elle indenterin altına getirilir. Bu cihaza bağlı bir bilgisayarda ilgili program açılır. Programda, loading-unloading (yükleme-boşaltma) modunda, artan yüklerle bir maksimum yük değeri ayarlanır. Bu maksimum indentasyon yükü, sabit bir deplasman hızıyla numune malzeme içerisine uygulanır (yükleme safhası). Bu maksimum indentasyon yüküne ulaşıldıktan sonra belli bir zaman bekleme yaptırılır (hold time). Daha sonra yüklemey kaldırılır ve indenter malzeme dışına geri çekilir (yük boşaltma safhası). Kuvvetler ve derinlikler (deplasman) ölçülerek veri toplama/depolama işlemini yapan bilgisayar yazılımı tarafından bir “ $P - h$ ” grafiğine aktarılır.



Şekil 3.2 İndentasyon yük-derinlik ($P-h$) eğrilerinin şematik grafiği

İndentasyon deneyinin bir enerji yaklaşımı açısından el alınacak olursa, toplam iş elastik ve plastik işlerin toplamı olarak ifade edilmektedir. Maksimum derinlik ile artık derinlik (h_r) arasında kalan bölge elastik iş değerini vermektedir (W_e). Başlangıç noktası ile artık derinlik arasında kalan bölge ise plastik işin (W_p) yapıldığını göstermektedir.

Toplam iş, C değerinin bir fonksiyonudur. Malzeme maksimum derinlikteki deformasyona ulaştığı zaman, yük kaldırılması esnasında, elastik olarak bir toparlanma meydana getirmektedir. Bu noktada artık derinlik oluşmaktadır. Maksimum derinlik ile artık derinlik (h_r) arasındaki bu bölgede gerçekleşen elastik toparlanma, aynı zamanda elastik iş bölgesidir. Toplam işte ki payı ise artık derinliğin maksimum derinliğe oranıdır.

$$\frac{W_e}{W_t} = 1 - \frac{W_p}{W_t} = 1 - \frac{h_r}{h_{\max}}$$

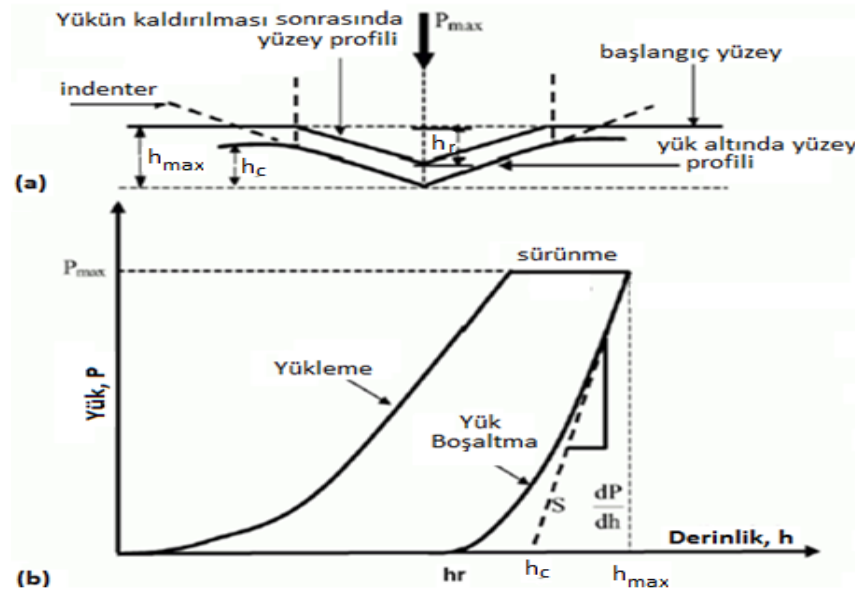
Eğer, $0,875 \leq \frac{h_r}{h_{\max}} \leq 1$ ise, pile-up

$0 \leq \frac{h_r}{h_{\max}} \leq 0,875$ ise, sink-in meydana gelir.

Yükleme safhasında malzemede meydana gelen deformasyon hem elastik hem de plastik karakterdedir (Şekil 3.2). Yük boşaltma safhasında ise yükleme safhasındaki elastik deformasyon geri döner. Yüklemeye ve yük boşaltma safhasının deformasyon karakteristiklerinin farkından ötürü, indentasyon deneyi sonunda malzeme yüzeyinde belirli bir derinliği olan iz oluşur. Boşaltma safhasının başlangıç kısmında $(dP/dh)_{\max}$ meydana gelen elastik toparlanma ve indentasyon sürecinde maksimum indentasyon yükü altında oluşan iz'in izdüşüm temas alanı kullanılarak, malzemenin elasto-plastik özellikleri elde edilebilmektedir (Oliver ve Pharr, 1992).

3.2 İndentasyon Tekniği

İndentasyon metodu, mekanik özellikleri bilinen; genellikle elmas benzeri çok sert malzemeden yapılmış rijit keskin bir batma ucunun (indenter), P batma yükünde ve yüzeyden itibaren h batma derinliğinde, homojen bir katı malzeme içerisine nüfuz etmesi sonucu, bir yüklemeye-boşaltma çevrimi (Şekil 3.3) boyunca $P-h$ değerlerinin sürekli olarak bilgisayar ortamına kaydedilmesi ile karakterize edilmiştir.



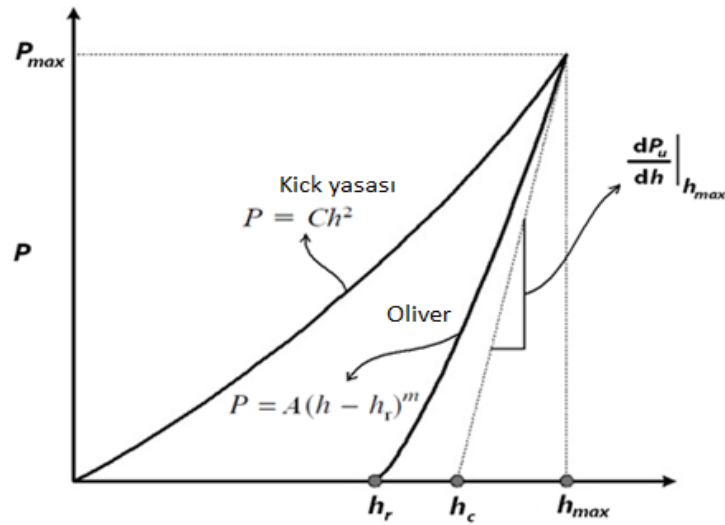
Şekil 3.3 a-) indantasyon kesiti b-) yükleme-yer değiştirme eğrisinde Oliver ve Pharr metodu kullanılarak değerlerin ifade edilmesi. (Uzun, Kölemen ve diğer., 2005)

Mikro-indentasyon tekniği (Nishibori ve diğer., 1978; Dub ve diğer., 2002) son yıllarda kullanılan ve geliştirilmekte olan bir yöntemdir. Bu teknikte mikron veya nano seviyelerde ki mekanik özellikler sıklıkla tartışma konusu olmaktadır. Bu tekniğin ince filmlerin ve bulk malzemelerin mekanik özelliklerinin ve lokal yapılarının ölçümü için faydalı olması beklenmektedir.

İndantasyon tekniği, mikro veya nano skalada çalışılırken, mikro veya nano sertlik, young modülü ve deformasyon karakteristiklerini (Reibold ve diğer., 2005) doğrudan belirleyebilen bir yöntemdir. Bu yöntemde elde edilen yüklemeye ve boşaltma (load-unload) eğrileri ile elastik-plastik dönüşümünün niteliği analiz edilebilmektedir.

3.2.1 İndantasyon Tekniği Verileri

Bir malzemenin indantasyon deneyi sonrasında elde edilen tipik bir $P - h$ eğrisi ve bu eğri üzerindeki önemli veri noktaları Şekil 3.4'de şematik olarak verilmiştir. Grafikte P eksenini indantasyon yükünü, h eksenini ise indenter batma derinliğini göstermektedir. P_{max} maksimum indantasyon yükü, h_{max} ise maksimum indenter batma derinliği değerine karşılık gelen veri noktalarıdır.



Şekil 3.4 Yükleme ve boşaltma $P - h$ eğrisi üzerindeki önemli noktalar

Yükleme safhasında, malzemenin tepkisi, genellikle $P = Ch^2$ bağıntısı ile tanımlanan Kick Yasası'nı takip eder. C karakteristik değeri, malzemenin batmaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Yükleme eğriliğinden bulunur (Giannakopoulos ve Suresh, 1999). İndantasyon deneyi sonucunda elde edilen maksimum yük altındaki (P_{max}) maksimum derinlik olan h_{max} ifadelerinden temas basıncı, $\rho_{ave} = P_{max}/A_{max}$ ile hesaplanmaktadır. Ayrıca yükleme eğrisinin C değeri de maksimum noktada ki yükün derinliğin karesine oranı şeklinde bulunur. Bu değerden akma noktası tayini aşağıda verilen formülden hesaplanır.

Yükleme-boşaltma eğrilerinden yararlanılması amaçlanan ve bu amaç doğrultusunda çok kullanılan bir bağıntı, Oliver ve Pharr bağıntısıdır. Oliver ve Pharr (1992) yük boşaltma eğrilerinin, deneysel bir kuvvet kuralı (Eşitlik 3.1) ile tutarlı bir ilişkisi vardır.

$$P = A(h - h_r)^m \quad (3.1)$$

Burada P ; indantasyon yükü, h ; penetrasyon (batma) derinliği, h_r ; yük boşaltma sonrasındaki son derinlik, A ve m deneysel yollarla elde edilen parametrelerdir.

Maksimum penetrasyon (batma) derinliği ($h = h_{max}$) ve yük boşaltma eğrisinin başlangıç kısmı eşitlik (3.1)'de yazılarak hem rijitlik hem de temas derinliği belirlenmektedir.

3.3 Elastisite Modül ve Sertlik Değerlerinin Ölçümü

Elastisite modül E ve mikrosertlik H değerleri, yükleme ve penetrasyon derinliği verileri ile açıklanabilmektedir (Uzun, O., Kölemen, U. ve diğer., 2005). Sertliği ve modülleri belirlemek için üç anahtar parametreye ihtiyaç vardır. Bunlar maksimum yük (P_{\max}), indenter temas alanı (A_c) ve yükü boşaltma başlangıç temas rijitliğidir ($S=dP/dh$). Geleneksel mikrosertlik testlerinde olduğu gibi, dinamik mikro-indentasyon sertliği de, indentasyon maksimum yükün (P_{\max}), iz alanına (A_c) bölünmesiyle bulunmaktadır (Uzun ve diğer. 2005). Böylece sertlik ifadesi eşitlik (3.2) 'de ki gibi yazılır.

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c} \quad (3.2)$$

Burada A_c temas alanı, yük kaldırıldığı andaki indenter'in, malzeme ile arasındaki derinlik mesafesi (h_c)'nin bir fonksiyonu olarak alındığında, $A_c = F(h_c)$ şeklinde ifade edilebilmektedir.

İndenter geometrisi, eksen-simetrik ve tepe yarı-açısı θ olan bir konşeklinde kabul edilirse, indenter geometrisi kullanılarak temas alanı eşitliği ile hesaplanabilir.

$$A_c = \pi(\tan^2\theta)h_c^2 \quad (3.3)$$

Berkovich, Vickers ve $\theta = 70,3^\circ$ olan konik indenter için temas alanı, eşitlik (3.4) şekiline dönüşür.

$$A_c = 26.43h_c^2 \quad (3.4)$$

Malzemelerin mikrosertliği, uygulanan indentastasyon test yüküne bağlıdır. İndentasyon boyut etkisi olarak bilinen bu olgu genellikle artan uygulama test yükleri (artan indentasyon boyutu) ile görünür mikrosertlikte bir azalma gösterir. Bu olgu, indentasyon süresince deformasyon sertleşmesi ve yük başlangıç plastik deformasyonu, indentasyon elastik toparlanma, malzemenin elastik/plastik

deformasyonu, indentasyon boyunca dislokasyon boyutunun oluşum döngüsü ..gibi birçok nedenden dolayıdır. İndentasyon deneylerinden elde edilebilecek bir diğer malzeme özelliği de Young modülüdür. Young modülü, $P - h$ eğrisinin boşaltma safhasının (Şekil 3.4) başlangıç kısmı eğimi (dP/dh) ve maksimum yük altındaki temas alanı (A_{\max}) değeri kullanılarak eşitlik (3.5)'den hesaplanabilmektedir (Giannakopoulos ve Suresh, 1999).

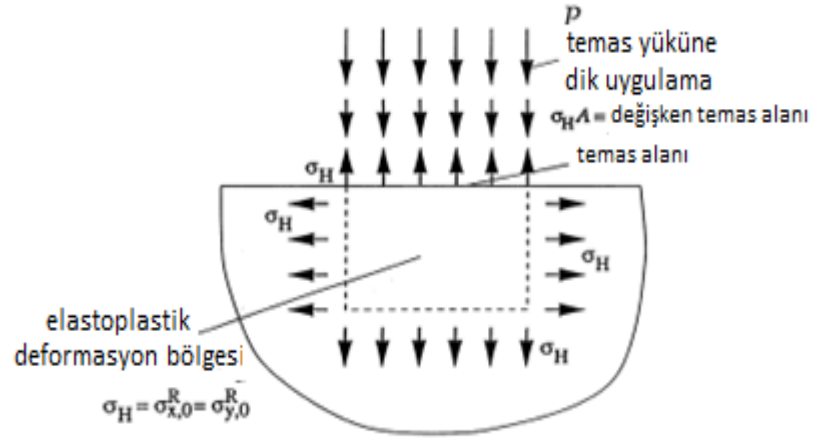
$$E^* = \left[\frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_{\text{in}}^2}{E_{\text{in}}} \right]^{-1} = \frac{1}{c^* \sqrt{A_{\max}}} \left(\frac{dP}{dh} \right) \quad (3.5)$$

Bu bağıntıdaki E^* değeri, indenter-numune sisteminin, indirgenmiş elastisite modülü olarak tanımlanmıştır. Bu etkin modül tanımlanarak, ideal rijitlikte olmayan indenterin, yük - derinlik davranışına etkisi hesaba katılabilmektedir (Oliver ve Pharr, 1992). Burada $c^*=1.142$ (vickers), 1.167 (berkovich); ν Poisson oran ; E young modülüdür. “in” indisi indenterine ait özellikleri belirtmektedir.

3.4 İndentasyon Yöntemi İle Artık Gerilme Ölçüm Tekniği

Artık gerilme ölçümü, indentasyon yük-derinlik ($P-h$) veri analizi sayesinde, çekme veya basma karakterdeki gerilmeli yüzeylerin temas alanları ile gerilmemiş yüzeylerin indentasyon temas alanları arasındaki farkın (Suresh ve Giannakopoulos, 1998) hesaplanmasına dayanır.

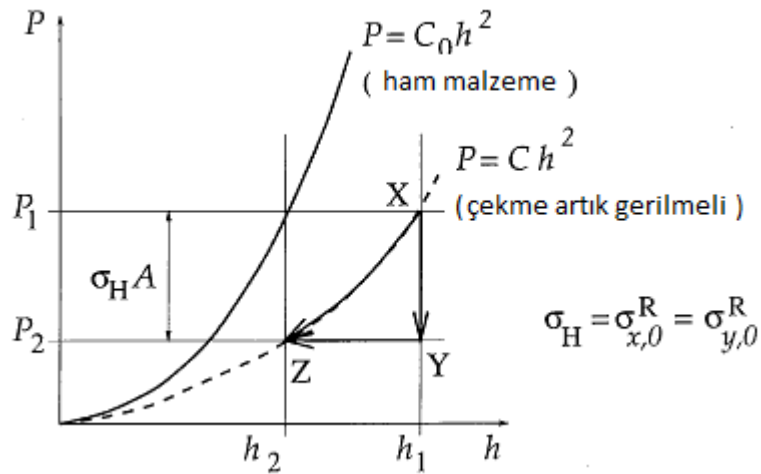
Bu çalışmada, temas alanları üzerinde ve indentasyon penetrasyon derinliklerinde artık gerilmelerinin etkileri araştırılmıştır. Ham (gerilmemiş) ve artık gerilmeli (çekme veya basma) malzemenin indentasyonu sonucu elde edilen yük-derinlik eğrileri Şekil 3.5 ve şekil 3.8'de şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 3.5'te, artık gerilmeli bir malzemenin yük-derinlik eğrileri, ham malzemenin yanında kalmaktadır. Bu sonuç, malzemede mevcut olan artık gerilmenin tipinin çekme artık gerilme tipi olduğunu göstermektedir. Aynı durum şekil 3.8 için düşünüldüğünde, şekilde artık gerilmeli bir malzemenin yük-derinlik eğrileri, ham malzemenin



Şekil 3.6 İndentasyon yüzeyinde çekme artık gerilmelerinin rolü

Böylece, elastik çekme artık gerilmeleri için, $\sigma_{xR}^0 = \sigma_{yR}^0$ gevşer ve indentasyon noktası X'den Y noktasına hareket eder (Şekil 3.4). Temas kuvveti, sabit penetrasyon derinliğinde ($h_1 = h_2$), P_1 noktasından P_2 noktasına doğru artar. Özetle, sabit bir penetrasyon derinliğinde X noktasından Y noktasına doğru hareket eder. Bu durum iki adımda gerçekleşmektedir (Şekil 3.6).

- (i) Yük P_1 'den P_2 yüküne azalır. $P_2 = P_1 - \sigma_{xR}^0 A_1 = P_1 - \sigma_{yR}^0 A_1 = P_1 - \sigma_H A_1$. Burada A_1 , P_1 yükü ve h_1 derinliğindeki gerçek temas alanıdır. Yük X noktasından Y noktasına hareket eder.
- (ii) Penetrasyon derinliği, sabit P_2 yükünde, h_1 den h_2 'e doğru azalır ve indentasyon durumu Y'den Z noktasına hareket eder.



Şekil 3.7 Çekme artık gerilmeli ve gerilmemiş bir malzeme için indentasyon durumundaki değişimin şematik gösterimi.

Bu sonuçlardan yola çıkarak, çekme artık gerilme hesabı için eşitlik (3.6) yazılır.

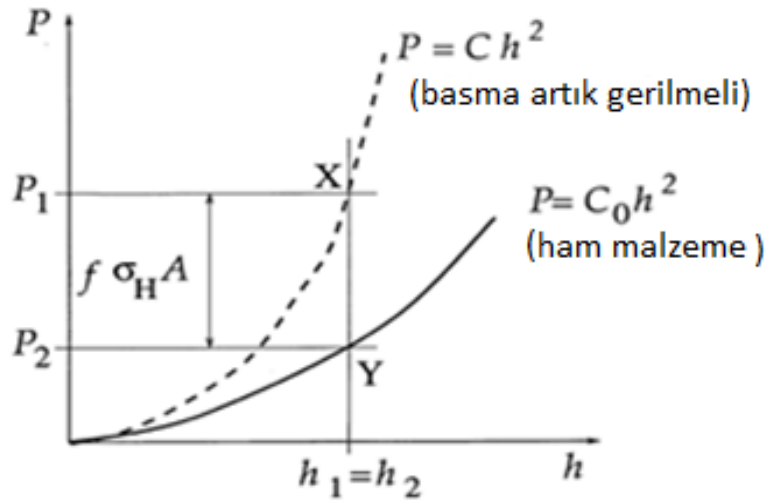
$$\frac{A_c}{A_0} = \left(1 - \left(\frac{\sigma_r}{\rho_{ave}} \right) \right)^{-1} \quad (3.6)$$

Burada A_c ve A_0 sırasıyla, artık gerilmeli (σ_r) ve artık gerilmesiz indentasyon temas alanlarıdır. ρ_{ave} ise ortalama temas basıncıdır ($\rho_{ave} = P_{max}/A_{max}$).

İdentasyon temas alanı oranı (A_c/A_0) bilindiğinde, çekme artık gerilme (σ_r) değeri, (3.6) eşitlikliğinden kolayca hesaplanabilmektedir.

3.4.2 Basma artık gerilmeleri

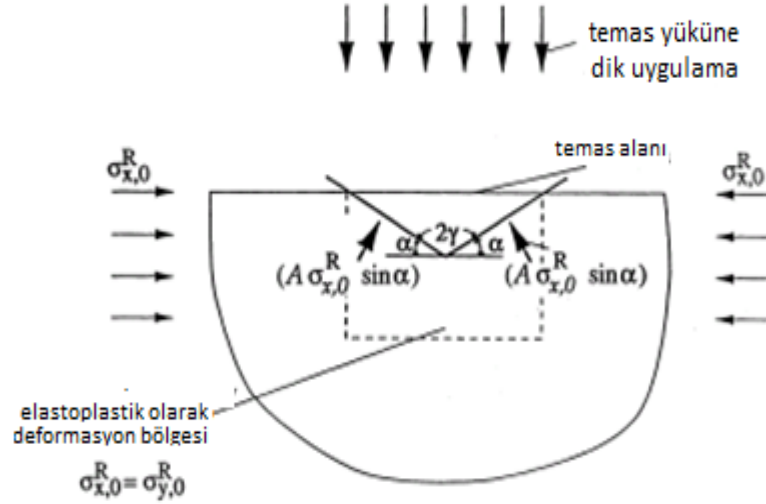
Burada, indentasyon sonrası basma artık gerilme durumunu ele alacağız. İndenter'i P_1 gibi bir yükte, artık gerilmeli bir malzemeye batırdığımızda, h_1 gibi bir derinlikte malzeme içerisine girer. Bu nokta, Şekil 3.8'de X sembolü ile gösterilmiştir. (Suresh ve Giannakopoulos, 1998).



Şekil 3.8 Artık gerilmeli ve artık gerilmesiz yüzeyler için indentasyon yük-derinlik (P-h) eğrileri.

İdentasyon h_1 derinliği sabit tutulduğunda, malzemedeki artık gerilmelerin relaksasyonuna (gevşemesine) izin verilir. Yani, sabit penetrasyon derinliğinde

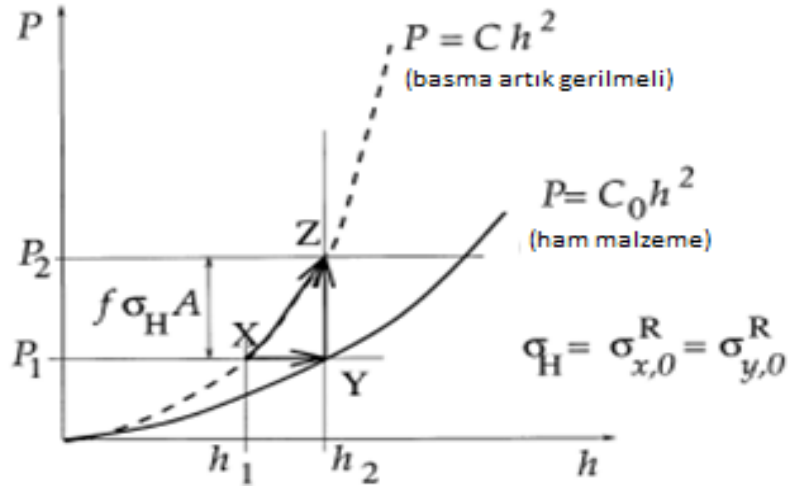
($h_1=h_2$) gevşeyen artık gerilmeler sonucu, $\sigma_{xR}^0 = \sigma_{yR}^0 = 0$ olur. ρ_{ave} değişmeden kalır. Sonuç olarak, indenter altındaki malzemenin gerilme durumundaki değişim, basma artık gerilmelerin gevşemesi süresince, hidrostatik olmak zorundadır. Bu hidrostatik gerilmeler $\sigma_H = \sigma_{x,0}^R = \sigma_{y,0}^R = \sigma_{z,0}^R$, z doğrultusunda $\sigma_H f A$ büyüklüğünde bir temas gerilmesi ile karşılaştıklarında oluşurlar (Şekil 3.8).



Şekil 3.9 indentasyon yüzeyinde basma artık gerilmelerinin rolü

Böylece, basma artık gerilmeleri için, $\sigma_{xR}^0 = \sigma_{yR}^0$ gevşer ve indentasyon noktası X'den Y noktasına hareket eder (Şekil 3.8). Temas kuvveti, sabit penetrasyon derinliğinde ($h_1=h_2$), P_1 noktasından P_2 noktasına doğru azalır. Özetle, sabit bir penetrasyon derinliğinde yük X noktasından Y noktasına doğru hareket eder. Bu durum iki adımda gerçekleşmektedir (Şekil 3.10).

- (i) Sabit P_1 yükünde penetrasyon derinliği h_1 'den h_2 derinliğine doğru artar. İndentasyon durumu, X noktasından Y noktasına hareket eder.
- (ii) Yük P_1 'den P_2 yüküne artar. $P_2 = P_1 + f \sigma_{xR}^0 A_I = P_1 + f \sigma_{yR}^0 A_I = P_1 + f \sigma_H A_I$. Burada A_I , P_1 yükü ve sabit h_1 derinliğindeki gerçek temas alanıdır. ($f = \sin \alpha$). Yük Y noktasından Z noktasına hareket eder.



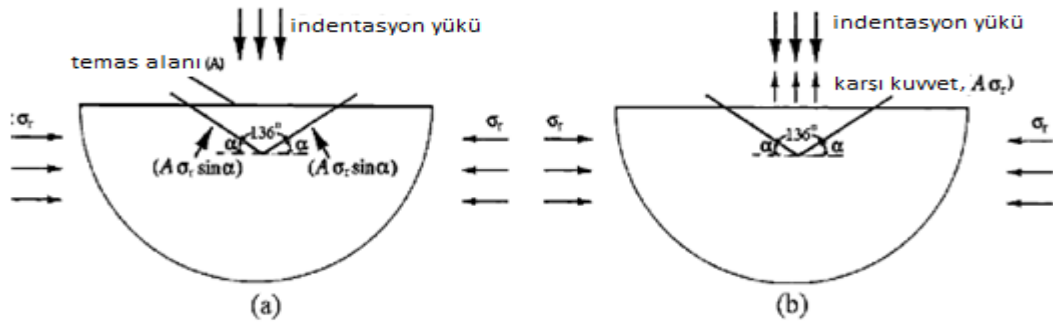
Şekil 3.10 Basma artık gerilmeli ve gerilmemiş bir malzeme için indantasyon durumundaki değişimin şematik gösterimi.

Bu sonuçlardan yola çıkarak, basma artık gerilme hesabı için eşitlik (3.7) yazılır.

$$\frac{A_c}{A_0} = \left(1 + \left(\frac{\sigma_r \sin \alpha}{\rho_{ave}} \right) \right)^{-1} \quad (3.7)$$

Burada A_c ve A_0 sırasıyla, artık gerilmeli (σ_r) ve artık gerilmemiş indantasyon temas alanlarıdır. ρ_{ave} ise ortalama temas basıncıdır ($\rho_{ave} = P_{max}/A_{max}$). İndantasyon temas alanı oranı (A_c/A_0) bilinirse, basma artık gerilme (σ_r) değeri, eşitlik (3.7) den kolayca hesaplanabilmektedir.

Suresh ve Giannakopoulos, (1998), basma artık gerilmelerinin çözümüne uygun olarak, Şekil (3.10a)'daki gibi indantasyon boyunca indenterin eğimli yüzeylerine gelen kuvvetin büyüklüğünün, $\sigma_r f A$ olduğunu rapor etmişlerdir. Vickers piramit uç açısı $\alpha = 22^\circ$ olduğu için, geometrik faktör, teorik olarak $f = \sin \alpha = 0.375$ değerindedir.



Şekil 3.11 İndenter teması altındaki bir malzemenin artık gerilmesinin şematik bir görünümü.

a) Suresh and Giannakopoulos (1998) yaklaşımı için b) Atar et al. (2003) yaklaşımı için

Bu çalışmada, indenterin eğimli yüzeylerin normaline etkiyen artık gerilme bileşenlerine oranla, indentasyon doğrultusunda (indentasyon temas alanına dik), uygulama indentasyon yüküne ters yönde, rA gibi bir değere sahip olan itme kuvvetinin daha fazla etkimesinden dolayı, geometrik faktor $\sin 90 = 1$ alınmıştır. Bu durumda, Şekil (3.11b)'de görüldüğü üzere net indentasyon yükü, uygulama indentasyon yük ile itme kuvveti arasındaki farktır. Bu suretle, Vickers piramit indenter kullanıldığında malzeme muayenasinde basma artık gerilmeleri hesabı için, bu duruma uygun olarak eşitlik (3.7)'nin modifiye edilmesi sonucu (Atar ve diğer., 2003) aşağıdaki eşitlik (3.8) kullanılmıştır:

$$\frac{A}{A_o} = \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma_r}{\rho_{ave}} \right) \right\}^{-1} \quad (3.8)$$

3.4.3 Temas Alanı Oranının Bulunması

Eşitlik (3.9)'dan (A_c/A_o) açıklanabilir. Burada, $A=A_c$.

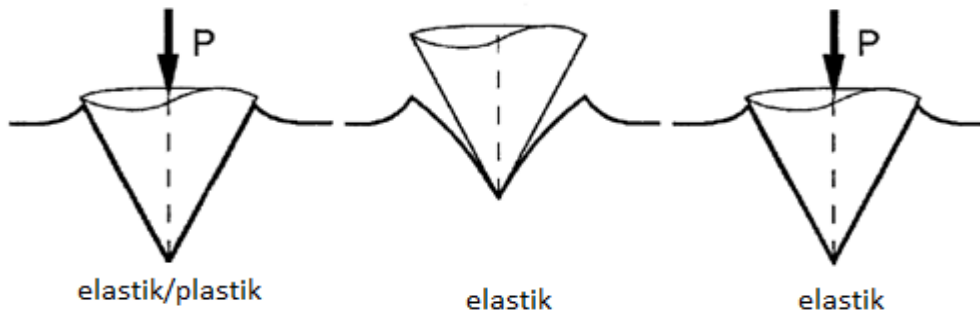
$$\frac{A}{A_o} = \left(1 + \frac{\sigma_y^R}{\sigma_u} \right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_y}{\sigma_u} \right) \cdot \left(1 + \ln \frac{E \tan \alpha}{3\sigma_y^R} \right)^{-1} \cdot \left(1 + \ln \frac{E \tan \alpha}{3\sigma_y} \right) \quad (3.9)$$

İndentasyon metodu ile gerçekleştirilen deneylerinde, elasto-plastik özellikleri; σ_y ve σ_y^R sırasıyla artık gerilmeli ve artık gerilmemiş yüzeylerin akma dayanımları, σ_u kopma dayanımıdır (Suresh ve Giannakopoulos, 1998). Bu elasto-plastik değerleri hesaplamak için gerekli olan maksimum yük altındaki temas alanı (A_c) değerini belirlemek, çoğu zaman çözülmesi gereken en öncelikli problem olarak ortaya çıkmaktadır. Çünkü konik bir indenter, numuneye batırıldığında, malzemede elastik toparlanma, yığılma (pile-up) ve göçme (sink-in) problemleri ile karşılaşmaktadır. Bu sebeple, gerçek temas alanı A 'yı batma derinliği h ile ilişkilendiren matematiksel ifadeler için geri analiz algoritmaları geliştirilmiş, indentasyon deneyi sonucunda, $P-h$ eğrisinden elde edilebilen C , h_r , h_{max} , dP_u/dh bağımsız değerleri ve sabit bir değer olarak alınan poisson oranı (ν) kullanılarak, geri analiz algoritmaları sistematik bir şekilde takip edilerek malzemenin elasto-plastik özellikleri belirlenebilmektedir.

3.5 İndentasyon Yönteminde Elasto-Plastik Hesaplanmasında Karşılaşılan Problemler

3.5.1 Elastik Toparlanma

Şekil 3.12’de görüldüğü gibi, konik bir indenter numuneye bastırıldığında hem elastik hem de plastik deformasyonlar bir arada meydana gelir. Oluşan iz tamamen indenterin şeklini almıştır. Fakat ilk boşaltma boyunca elastik toparlanma, temas şeklinin değişmesine neden olur. Tekrar yüklemeye ise tamamen elastik deformasyonla iz, yeniden indenterin şeklini alır. Bu çevrimde boşaltmada meydana gelen olay, tekrar yüklemeye meydana gelenin tam tersidir.



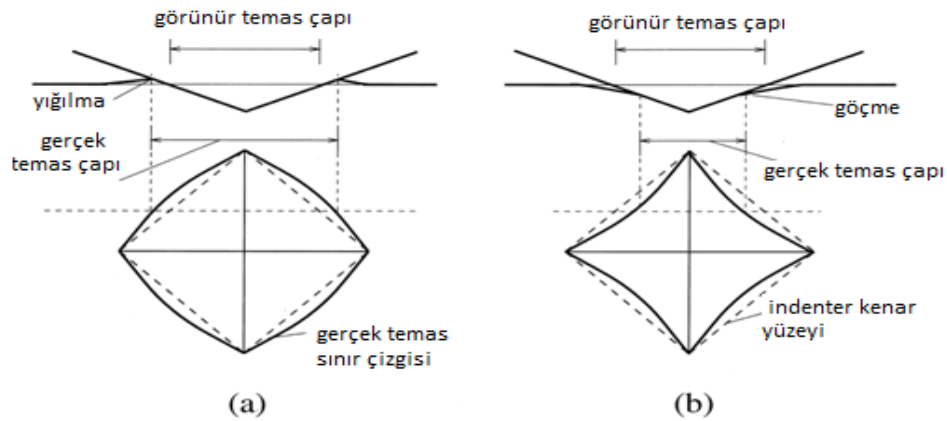
Şekil 3.12 Konik bir indenterin yükleme-boşaltma-tekrar yükleme sürecindeki deformasyonun şematik gösterimi. (Pharr ve Bolshakov, 2002)

Bu durum yüksek E/H oranına sahip olan malzemelerde (örn. yumuşak metaller) daha az görülürken, daha düşük E/H oranına sahip malzemelerde (örn. sert metaller, seramikler ve camlar) daha çok görülmektedir.

Bu durumda, yüksek yüzey çözünürlüğü sağlayan yöntemlerle incelense bile, gerçek A_c değerini belirlemek birçok malzeme için mümkün olmamaktadır.

3.5.2 Yığılma (Pile-up) ve Göçme (Sink-in)

Malzemenin, sahip olduğu plastik özellikler nedeniyle indentasyon esnasında indenter etrafında yığılma veya göçme oluşumu, indentasyon deneyi sonuçlarını doğru olarak yorumlama da problemler meydana getirmektedir. (Şekil 3.13)



Şekil 3.13 İndenterin çevresinde meydana gelen (a) yığılma ve (b) göçme olgularının şematik gösterimi (Giannakopoulos, Suresh, 1999).

Düşük deformasyon sertleşmesi gösteren bir metalde, plastik olarak yer değiştiren malzeme, plastik deformasyonun sıkıştırılmamasından dolayı indenterin çevresinde yığılma (Şekil 3.13a) eğilimindedir. Öte yandan yüksek deformasyon sertleşmesi gösteren malzemelerde, plastik olarak şekil değiştiren bölge, indenterden dışarı doğru itilerek, başlangıç yüzey seviyesinin altında bir iz (Şekil 3.13b) oluşur.

Her iki durum da, indentasyon deneyine başvurarak elasto-plastik özelliklerin belirlenmesi sürecinde, gerçek A_c değerini bulmada sorunlara yol açar.

3.5.3 İndentasyon Metodu ile Elasto-Plastik Özelliklerinin Elde Edilmesi

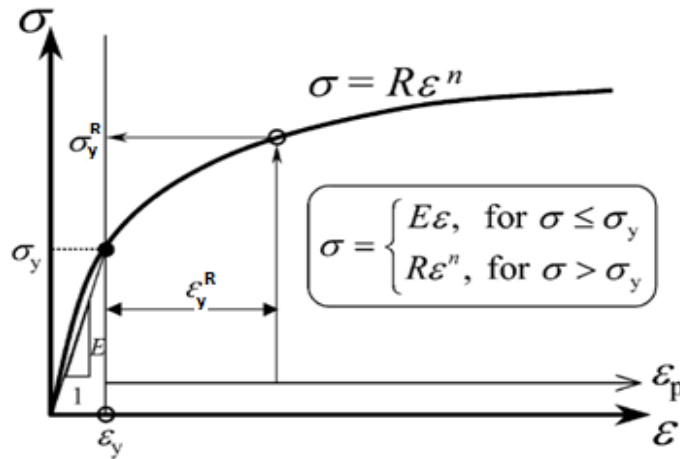
Yığılma ve göçme olguları nedeniyle indentasyon deneyi esnasında belirlenmesi zor olan gerçek temas alanı ile indentasyondan sonrası görünür temas alanı arasında büyük farklar oluşabilmektedir. Fakat indentasyon deneyinden mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için, indentasyon yüküyle gerçek temas alanı arasındaki bağıntının tam olarak bilinmesi gereklidir. Bu yüzden gerçek temas alanı A ile batma derinliği h arasında ilişki kuran, matematiksel ifadeler içeren metotlar geliştirilmiştir.

İndentasyon deneyi $P - h$ eğrisinden elde edilebilen C , h_r , h_{max} , dP_u/dh bağımsız değerleri kullanılarak, malzemelerin elasto-plastik özellikleri, keskin indentasyon deneyinin yığılma ve göçme olguları ile büyük deformasyon karakteristiklerini de içine alan bir bilgisayar programı yardımıyla belirlenebilmektedir. Bu bilgisayar

programı, bir seri analitik fonksiyonun sayısal çözümleme yöntemlerini kullanmaktadır.

3.6 Malzemenin Elasto-Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı

Birçok saf ve mühendislik alaşımının plastik deformasyon davranışı çoğu kez bir kuvvet kuralı ile ifade edilebilir. (Şekil 3.14)



Şekil 3.14 Kuvvet kuralına uyan elasto-plastik gerilme-şekil değiştirme davranışının şematik gösterimi (Dao ve diğer., 2001)

Basit elasto-plastik gerilme-şekil değiştirme davranışı;

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \text{for } \sigma \leq \sigma_y \\ R\varepsilon^n, & \text{for } \sigma \geq \sigma_y \end{cases} \quad (3.10)$$

şeklinde tanımlanır. Burada E , Young modülü; R , mukavemet katsayısı; n , sertleşme üsteli; σ_y , akma gerilmesi; ε_y , akma gerilmesine karşılık gelen şekil değişimidir.

$$\sigma_y = E\varepsilon_y = R\varepsilon_y^n \quad (3.11)$$

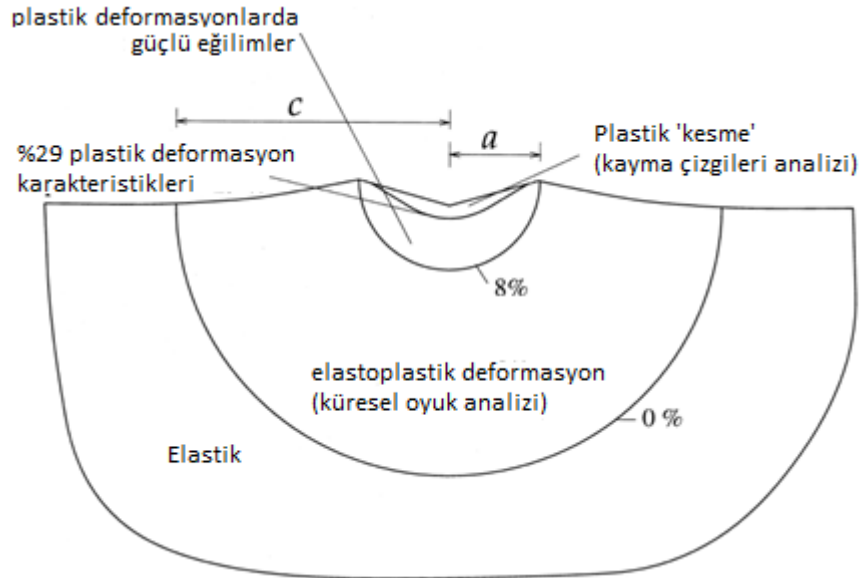
Burada akma gerilmesi σ_y , $\varepsilon = 0$ ' da tanımlanmıştır. Toplam deformasyon ε , yukarıdaki eğrinin doğrusal bölümü olan ε_y ve doğrusal olmayan bölümü ε_p olmak üzere iki bileşenden oluşmuştur.

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_p \quad (3.12)$$

(3.11) ve (3.12) eşitliklerinden, $\sigma > \sigma_y$ için eşitlik (3.13) yazılır.

$$\sigma = \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \varepsilon_p \right)^n \quad (3.13)$$

Malzeme davranışını tamamlamak için Poisson oranı (ν), önceden belirlenmiş sabit bir değer alınmıştır. Yukarıdaki varsayımlarla, bir malzemenin elasto-plastik davranışı E , ν , σ_y ve n parametreleri ile tam olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar ve sayısal hesaplamalar, keskin indenterın tam altında plastik deformasyonun farklı tiplerini birbirinden ayıran özel bir karakteristik eşdeğer plastik deformasyon olduğunu göstermiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Keskin indenter ucun altındaki farklı plastik deformasyon rejimleri
(Giannakopoulos ve Suresh, 1999)

En içteki bölge, malzemenin keskin indenter uç tarafından kesildiği bölgedir. Bu bölgeyi, elasto-plastik bir deformasyon bölgesinin sardığı yüksek plastik deformasyon gradyanları bulunan bölge takip eder. Özel karakteristik deformasyon, en içteki kesme bölgesini çevresinden ayırır. Tabor, bu karakteristik plastik

deformasyonun değeri için 0,08 değerini öngörse de, daha detaylı çalışmalar bunun 0,25 – 0,36 aralığında olduğunu göstermektedir (Giannakopoulos ve Suresh, 1999).

Bir malzemenin elasto-plastik davranışını tanımlarken, alternatif olarak karakteristik deformasyon değeri de kullanılabilir. Bu şekilde karakteristik deformasyon, temsili gerilmesi (σ_y^R) yeni bir akma dayanımı ve buna karşılık gelen temsili deformasyonu (ε_y^R) ile tanımlanır. Böylece elasto-plastik davranış, σ_y^R , σ_y ve n parametreleri ile tam olarak belirlenmiştir.

3.7 Temsili Deformasyon Değerinin (ε_r) Belirlenmesi

Temsili deformasyon kavramı ilk olarak, karşılık gelen Tabor, (1951) temsili gerilme değerini sertlik değeri ile ilişkilendirmek için temsili deformasyon kavramı ortaya atmıştır. İndenter ucundaki malzemenin deformasyona uğrayan bölgelerinin, Tabor %8-10, Giannakopoulos ve Suresh %29'un üzerinde bir plastik “kesme” karakteristiği gösterdiğini öne sürmüştür (Şekil 3.15).

$$\frac{H}{\sigma_Y^R} = \frac{P_{ave}}{\sigma_Y^R} \approx 3,0 \quad (3.14)$$

Bu çalışmada temsili plastik deformasyon değeri $\varepsilon_r = 0,033$ olarak belirlenmiştir. $\varepsilon_r = 0,033$ değeri, σ_y ve $\sigma_{0,29}$ 'un aritmetik ortalaması olan σ_r değerine karşılık gelen ε_r 'nin bulunmasıyla elde edilmiştir.

$$\sigma_Y^R = \frac{\sigma_Y + \sigma_{0,29}}{2} \quad (3.15)$$

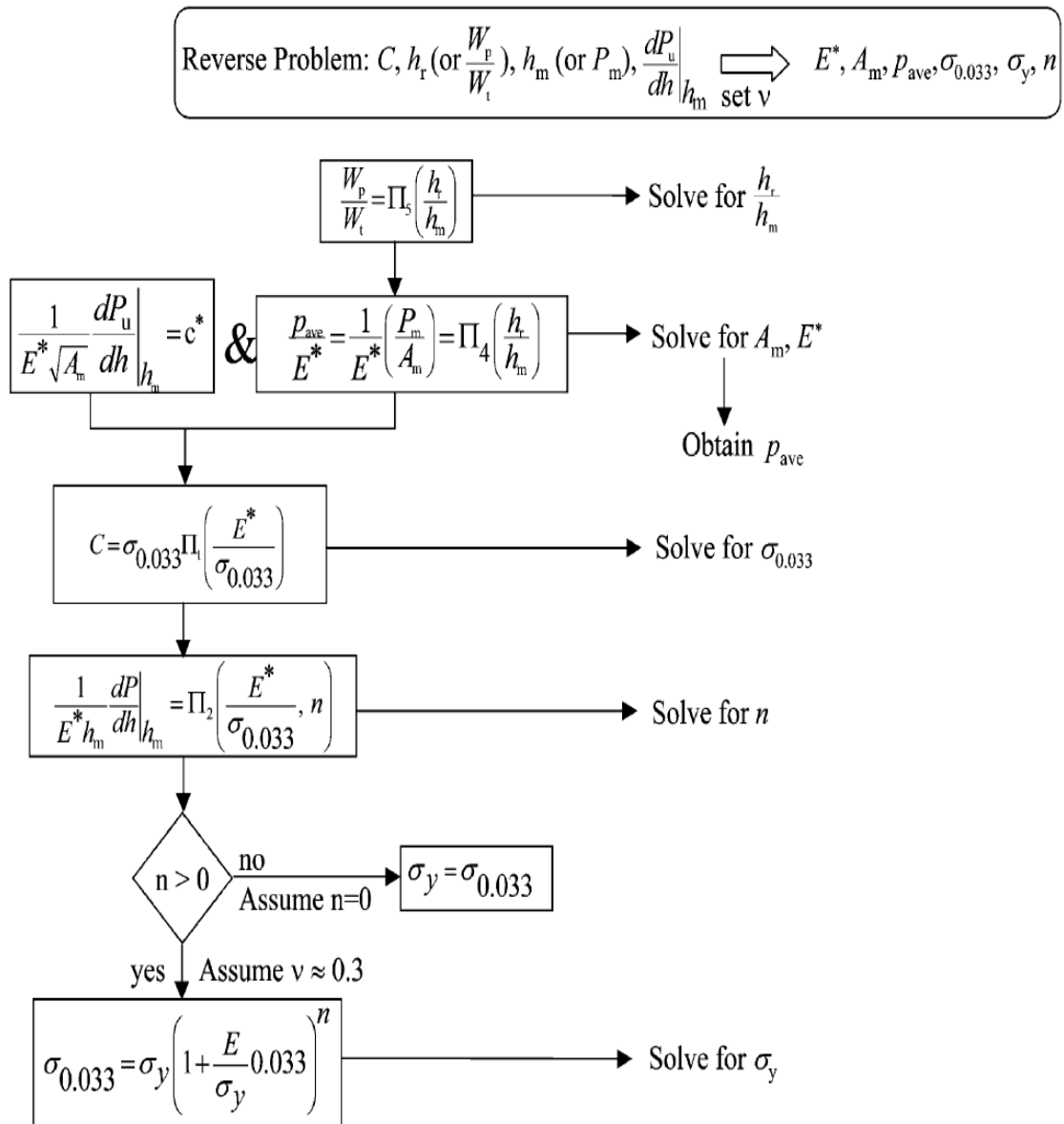
Eğer $\sigma_y \approx \sigma|_{\varepsilon=0,002}$ olarak alınırsa aşağıdaki eşitlik (3.16) gibi olur. Bu eşitlik düzenlendiğinde plastik deformasyon, eşitlik (3.17) şeklinde bulunur.

$$R\varepsilon_Y^{Rn} = \frac{R \cdot 0,002^n + R \cdot 0,29^n}{2} \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_Y^R = \left(\frac{0,002^n + 0,29^n}{2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.17)$$

3.8 Geri Analiz Algoritmaları ve Birimsiz Fonksiyonlar

İndentasyon deneyi $P - h$ eğrilerinden elde edilebilen C , h_r , h_{max} , dP_u/dh bağımsız değerlerinden yola çıkarak ve Poisson oranı (ν), geri analiz algoritmaları, sistematik bir şekilde takip edilerek malzemenin elasto-plastik özellikleri belirlenebilmektedir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Geri analiz algoritmalarını gösteren akış diyagramı (Dao ve diğer., 2001)

Akış şemasında kullanılan, birimsiz fonksiyonlar ise aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$\Pi_1 = \frac{C}{\sigma_{0.033}} = -1.131 \left[\ln\left(\frac{E^*}{\sigma_{0.033}}\right) \right]^3 + 13.635 \left[\ln\left(\frac{E^*}{\sigma_{0.033}}\right) \right]^2 - 30.594 \left[\ln\left(\frac{E^*}{\sigma_{0.033}}\right) \right] + 29.267$$

$$\Pi_2 \left(\frac{E^*}{\sigma_{\mathbf{Y}}^{\mathbf{R},n}} \right) = \frac{1}{E^* h_m} \frac{dP_u}{dh} \Big|_{h_m} = (-1.40557n^3 + 0.77526n^2 + 0.15830n - 0.06831) \left[\ln\left(\frac{E^*}{\sigma_{0.033}}\right) \right]^3$$

$$+ (17.93006n^3 - 9.22091n^2 - 2.37733n + 0.86295) \left[\ln\left(\frac{E^*}{\sigma_{0.033}}\right) \right]^2 + (-79.99715n^3$$

$$+ 40.55620n^2 + 9.00157n - 2.54543) \left[\ln\left(\frac{E^*}{\sigma_{0.033}}\right) \right] + (122.65069n^3 - 63.88418n^2$$

$$- 9.58936n + 6.20045)$$

$$\Pi_4 = \frac{P_{ave}}{E^*} \approx 0.268536 \left(0.9952495 - \frac{h_r}{h_m} \right)^{1.1142735}$$

$$\Pi_5 = \frac{W_p}{W_t} = 1.61217 \left\{ 1.13111 - 1.74756 \left[-1.49291 \left(\frac{h_r}{h_m} \right)^{2.535334} \right] - 0.075187 \left(\frac{h_r}{h_m} \right)^{1.135826} \right\}$$

$$\Pi_6 = \frac{1}{E^* \sqrt{A_m}} \frac{dP_u}{dh} \Big|_{h_m} = c^* \quad (c^* = 1.2105)$$

BÖLÜM DÖRT

X-IŞINLARI KIRINIMI YÖNTEMİ İLE ARTIK ÖSTENİT TAYİNİ

4.1 Giriş

Artık östenit, dönüşüm sertleştirmesi sırasında martenzite dönüşmeden, oda sıcaklığına kadar kalabilen östenittir. Isıl işlem görmüş parçaların mekanik özelliklerini, temperlenmiş martenzitten sonra en çok artık östenit etkilemektedir. (Parrish, 1999). Artık östenit miktarının yapıda fazla bulunması halinde, karbürleşmiş parçaların sertliği, aşınma dayanımı ve yorulma dayanımları azalır. Karbürleşmiş çeliklerde artık östenit varlığında, parçanın çalışması esnasında, östenitin martenzite deformasyon destekli dönüşümü sonucu, parçada istenmeyen hacim artışı meydana gelir. Artık östenit ölçümlerinin doğruluğunun ve güvenilirliğinin önemi buradadır. Çeliğin mekanik özelliklerine olumsuz yönde etkidiğinden dolayı sementasyon çeliklerinden takım çeliklerine kadar, artık östenit miktarının mümkün olduğu kadar azaltılması gereklidir. Artık östenit miktarının belirlenmesinde X-ışını kırınımı yöntemi, hızlı ve doğru sonuçlar vermesi nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir.

X-ışını kırınımı yöntemi, kafes düzlemleri arasında meydana gelen mesafe değişimlerini Bragg Kanununu kullanarak belirler. Bu yöntemde kullanılacak numuneler hassas bir şekilde belli standartlara göre hazırlanır. Numune hazırlama sırasında oluşabilecek deformasyon destekli artık östenit dönüşümü önlenmelidir.

Araştırmada AISI 5115 (16MnCr5) sementasyon çeliğinin ve AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliğinin artık östenit ölçümü, XRD 3003 PTS model X-ışınları cihazında yapılmıştır.

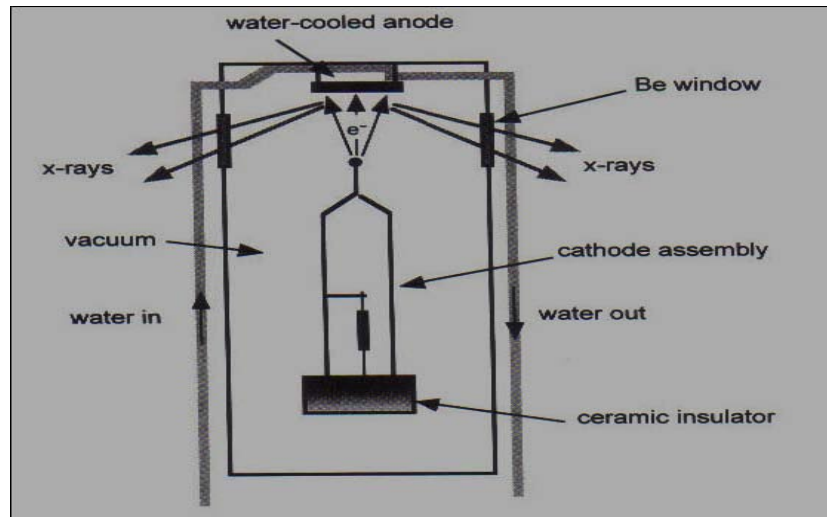
4.2 X- Işınları Üretimi

X ışınları ilk olarak 1895 yılında Röntgen tarafından bulunmuştur. Günümüzde hala onun bulduğu yöntem ile üretilmektedir. Yüksek voltaj altında hızlandırılmış

elektronlar, metal bir hedefe çarptırılır. Bir vakum içerisinde bir tungsten katot filamanın ısıtılması ile üretilirler. Katot yüksek negatif potansiyele sahip olur ve elektronlar anoda doğru hızlanır. Elektronların hızlandırıcılar ile anoda çok yüksek bir hızda çarparları sonucu enerji kaybı olur. Bu enerji x ışınlarıdır. Madde içerisine kolayca girerler.

4.2.1 X-Işın Tübü

X ışın tübü, bir elektron kaynağı (katot), bu elektronları hızlandırıcı bir düzenek ve elektronları frenleyerek, metal hedefe yönlendiren hızlandırıcıdan oluşan bir vakum kaptır. Elektronlar uçlarına ısıtma devresi bağlanmış bir tungsten filamandan yayılır. Elektron yoğunluğu, filamanın sıcaklığıyla orantılı olarak artar. Tüp su ile soğutulur.



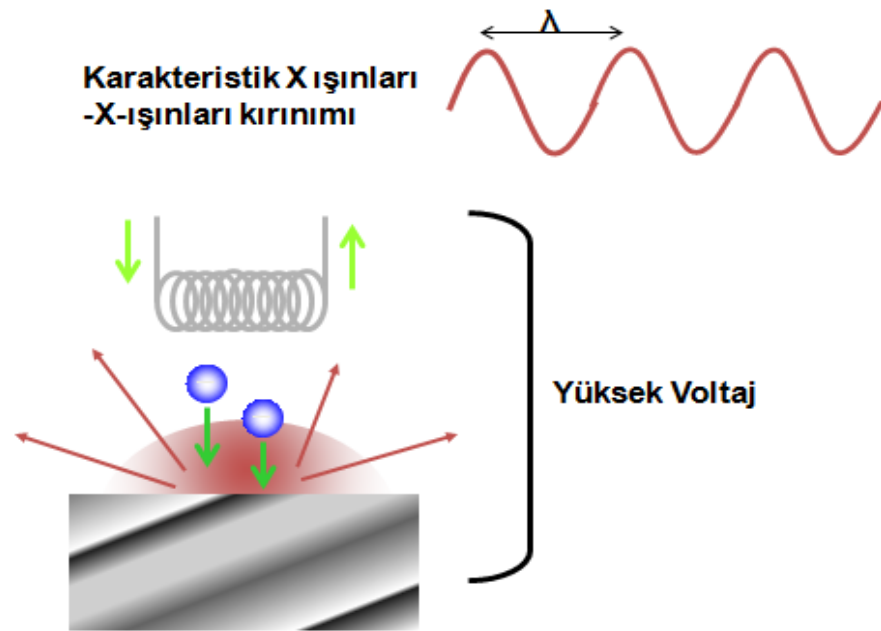
Şekil 4.1 X ışını tübü şematik gösterimi (Anderoglu, 2004)

Serbest elektronlara yeterli hızı verebilmek için filamanın çevresine yüksek negatif gerilim taşıyan bir silindir geçirilir. Antikatot tungstenden yapılmış içi oyuk bir kütledir ve yüksek gerilim kaynağının pozitif kısmına bağlanmıştır. Katotun yaydığı elektronlar anoda doğru hızlanarak hedef metale çarparlar. Hedef metal (anot) yumuşak yapıda bir metalden oluşturulduğu için çarpan bu elektronlar metale içerisine girerek yavaşlar. Bu şekilde elektronlara büyük bir negatif ivme verilmiş olur. Elektronlar bu negatif ivme ile birdenbire yavaşlatıldığında kaybettiği kinetik enerji, X ışını olarak yayılır.

Bir başka şekilde, elektriksel bir uyarılmayla atom çekirdeğine çok kuvvetli bir şekilde bağlı olan iç elektronlardan biri ilk halin (yörünge) dışına fırlatılır. Atom elektronlarının elektron durumlarında oluşan bu “boşluk” yine içte bulunan ama çekirdeğe daha zayıf bağlı bir başka elektronun bu “boş” duruma geçişiyle doldurulur. Bu iki düzey arasındaki enerji farkı bir foton biçiminde ortaya çıkar. Bu foton, görünür fotonlardan yaklaşık 10.000 kat daha fazla enerjiye sahiptir. Planck sabiti eşitliği ile ($E=h.v=h.c/\lambda$) E enerjisine ve v frekansına sahip bu fotonun angström düzeyinde dalga boylarına sahip olduğu bulunmuştur.

4.2.2 X Işıklarının Yapısı

Dalga boyları mor ötesi ışınlarından daha küçüktür ve $0.03-20\text{\AA}$ (angström) arasında değişir. Normal ışık gibi X ışınması da atomun bir elektronunun bir halden daha düşük enerjili bir başka hale geçiş yaptığı bir atom sürecinden kaynaklanır. İkisi arasındaki fark, ilgili elektronun enerji düzeyleri sıralamasındaki konumundan ileri gelir. Görünür ışık yayımından sorumlu elektronların atom çekirdeğine zayıf bir şekilde bağlı dış elektronlar olmasına karşın X ışınması yayımında atom çekirdeğine çok kuvvetli bir şekilde bağlı iç elektronlar söz konusudur.

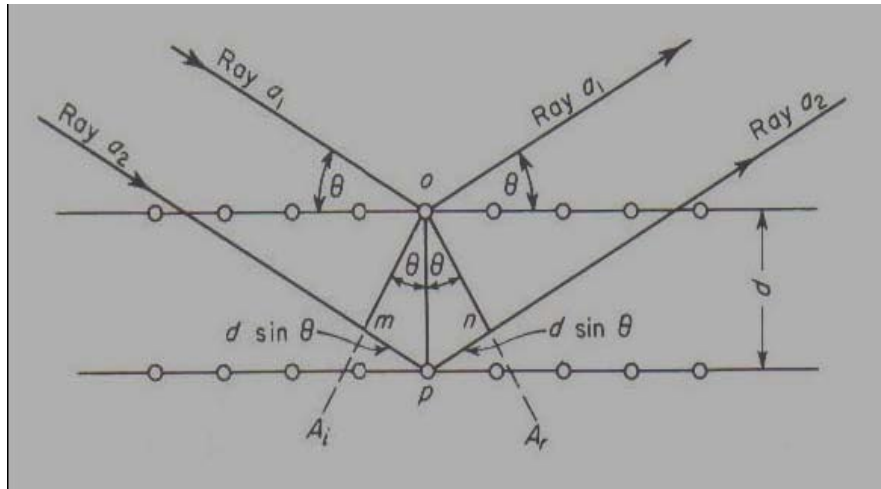


Şekil 4.2 X-ışınları üretimi şematik gösterimi

4.3 Artık Östenit Miktarının Hesaplanması

X ışınları kırınımı yöntemi, östenit ve ferrit/martenzit fazları miktarlarının belirlenmesinde, kantitatif veri toplamak için kullanılır. Fazların kırınım veri analizlerini yapmak için Jade programı kullanılır. Bu program daha önceki veriler ile fazlardan elde edilen verileri (pikleri) karşılaştırır. X-ışınları kırınımı yöntemi ile artık östenit tayini, ASTM E975, SAE453 standartlarına göre yapılır.

Bir numunenin yüzeyine gönderilen X-ışını, Bragg Kanunu'na göre 2θ açısında kırınım göstererek yansıma yapar. Bu yansıyan X ışınlarının dedektör üzerinde toplanması ile 2θ yansıma açısı belirlenir. Yansıma açısının Bragg kanunu eşitliğinde kullanılarak, düzlemler arası mesafeyi belirlenir. Jade programı kullanılarak her bir pikin alanlarının integrasyonu yapılarak, varolan her bir fazın şiddetleri hesaplanır. (Pappas, 2006). Bu suretle belirli kristal yapıya sahip fazların karakteristik difraksiyon paternleri şiddet-açı ($I-2\theta$) grafiği elde edilir.



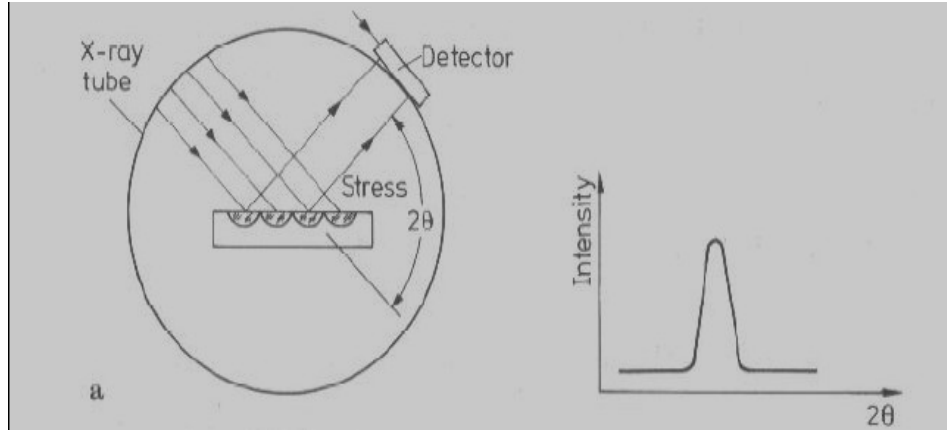
Şekil 4.1 Bragg Kanunu şematik gösterimi

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (n:1, 2, 3\dots) \quad (4.1)$$

Burada n; yansıyan ışının sayısı, λ ; dalga boyu, d; komşu iki paralel düzlemin atomları arasındaki mesafedir (düzlemler arası mesafe).

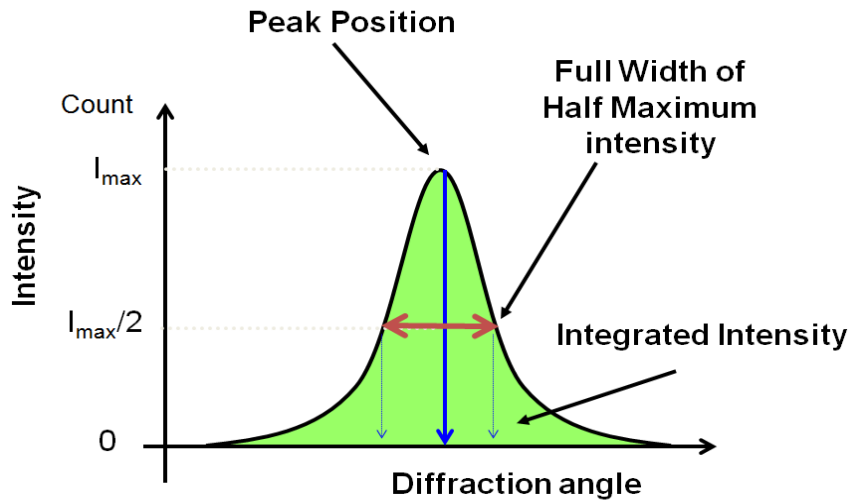
4.3.1 Kantitatif Analiz

Jade programı kullanılarak her bir pik için alan hesabı yapılarak, malzemenin içerisinde mevcut olan her bir fazın şiddetleri hesaplanır. Çeliklerde faz miktarı, kırılma piklerinin şiddetleri ile doğru orantılıdır.



Şekil 4.2 Genel bir difraktometri ve karakteristik difraksiyon piki ($I-2\theta$) şematigi.

Bir malzeme, x ışınlarıyla radyasyona tabi tutulursa, karakteristik difraksiyon paternleri ($I-2\theta$) elde edilir (Yalçın Y. 1999). Bu paternde oluşan piklerin şiddetleri (pik alanları) malzeme içinde bulunan fazların miktarıyla orantılıdır. Kırılma piklerinin şiddeti (I), pik yüksekliği ile pik yüksekliğinin yarısındaki pik genişliği ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır (Full Width of Half Maximum Intensity (FWHM)).



Şekil 4.5 Kırınım şiddetinin pik alanından bulunması (FWHM)

X-ışını kırınımında martenzit fazları ile ferrit fazlarının şiddetleri yaklaşık aynı olduğu için aşağıda ferrit ve östenit fazları için verilen eşitlikler martenzit ve östenit fazları içinde geçerlidir (ASTM E 975-84). Ferrit ve östenit fazlarından oluşan bir malzeme için iki fazın pik şiddetleri arasındaki oran, aşağıdaki eşitlik (4.2) de verilmektedir.

$$\frac{I_{\alpha}^{hkl}}{I_{\gamma}^{hkl}} = \left[\left(\frac{R_{\alpha}^{hkl}}{R_{\gamma}^{hkl}} \right) \left(\frac{V_{\alpha}}{V_{\gamma}} \right) \right] \quad (4.2)$$

I_{α}^{hkl} : Ferrit piklerinin alanı,

I_{γ}^{hkl} : Östenit piklerinin alanı

V_{α} : Ferrit piklerinin hacim oranı,

V_{γ} : Östenit piklerinin hacim oranı

R_{α}^{hkl} ve R_{γ}^{hkl} faktörleri aşağıdaki eşitlik (4.3) te verilmektedir.

$$R^{hkl} = \frac{1 \left(|F|^2 p LP e^{-2M} \right)}{v^2} \quad (4.3)$$

Burada;

$(F)^2$: Yapı faktörü. Kristal yapıya bağlıdır.

p: Multiplicity faktörü

LP: Lorentz – polarizasyon $\left(LP = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \right)$ faktörü

e^{-2M} : Debye Waller veya sıcaklık faktörü. Bu faktör, ölçülen şiddet üzerine atomların termal titreşimlerinin etkisini hesaba katar. $(M = B(\sin 2\theta)/\lambda^2)$.

B: Malzeme sabitidir ve 0.0037 alınabilir.

Ferrit veya martenzit ile östenit faza sahip bir çelik için; $V_{\alpha} + V_{\gamma} = 1$ olduğu için, yapıdaki östenit miktarı (V_{γ}) aşağıda eşitlik (4.4) den bulunmaktadır.

$$\% RA = (V_{\gamma})100 = \left(\frac{\frac{I_{\gamma}}{R_{\gamma}}}{\frac{I_{\gamma}}{R_{\gamma}} + \frac{I_{\alpha}}{R_{\alpha}}} \right) 100 \quad (4.4)$$

Burada R fazları ile ilgili bir faktördür. Teorik olarak hesaplanmaktadır. I (şiddet), bir faz için, onun pikinin altında kalan hesaplanmış toplam alandır. V , fazın hacimsel miktarıdır. Östenit fazı γ , ferrit/martenzit fazı ise α ile gösterilmiştir.

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Giriş

Bu çalışmada, AISI 5115 ve AISI 52100 bulk malzemelerinin ısıtılma işlemi görmesi sonucunda oluşan artık gerilmelerin, indentasyon metodu ile ölçümü yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, Atar ve diğer. (2003) ve Suresh ve Giannakopoulos (1998) metodları ayrı ayrı kullanılarak ve birbirleriyle karşılaştırarak genel bir durum değerlendirilmesi yapılmıştır. İlk olarak malzemelerin mekanik özellikleri Shimadzu Dynamic ultra-mikro hardness test cihazında 200 mN, 400 mN, 600 mN, 800 mN ve 1000 mN uygulama yükleri altında, yükleme-yük boşaltma (loading-unloading) hassasiyetli analiz sayesinde, yüke bağlı olarak malzemelerin sertlik ve young modülleri (elastisite) elde edilmiştir. Bu verilerden, sertlik(H)-kuvvet(F) ve young modülü(E)-kuvvet(F) eğrileri Excel programı yardımı ile çizilmiştir. Farklı kalitelere, ham (ısıtılma işlemi görmemiş) ve ısıtılmalı malzemelerin farklı uygulama yükleri altında, indentasyon karakteristiklerini açıkladıktan sonra, artık gerilmeler iki farklı indentasyon yaklaşımı (Atar ve diğer., 2003 ve Suresh ve Giannakopoulos, 1998) ile hesaplanmıştır.

5.2 Araştırmada Kullanılacak Malzemeler

Bu deneysel çalışmada, AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliği ve AISI 5115 (16MnCr5) sementasyon çeliklerinden imal edilmiş çubukların ısıtılma işlemi öncesi ve sonrasında numuneler elde edilmiştir. Bu numunelerin kimyasal kompozisyonu Tablo 5.1 ve Tablo 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.1 AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliğinin kimyasal kompozisyonu

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)
0.966	0.236	0.468	0.008	0.005	1.580	0.107	0.110

Tablo 5.2 AISI 5115 (16MnCr5) sementasyon çeliklerinin kimyasal kompozisyonu

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)
0.14-0.16	0.15-0.40	1.0-1.30	0.035	0.05	0.8-1.1

Yüksek karbonlu sertleşebilir (hardenable steel) AISI 52100 rulman çeliği, rulman ve yataklarda, düşük karbonlu yüzey sertleştirilebilir (case carburized) AISI 5115 sementasyon çeliği, sürtünmesiz yataklarda, dişlilerde, şaft, aks ve kamlarda kullanılır (Stickels ve Janotik, 1980).

Yüzey sertleştirme işlemi yapılmış bu çeliklerin ısıtma işlemleri sonucunda, farklı zamanda soğuma ve farklı mikroyapıdan dolayı yüzeyden çekirdeğe doğru farklı iç gerilmeler oluşur. Yüzeylerde basma artık gerilmeleri oluşması sonucu, malzemenin kullanım ömrü ve performansı artmaktadır.

Bu çalışmada, sertleştirme ve yüzey karbürleme (sementasyon) işleminin artık gerilmelere etkisini tespit etmek için ısıtma işlemi görmüş numunelerde meydana gelen artık gerilmeler incelenmiştir.

5.3 Numune Hazırlığı

5.3.1 Numunelerin Isıtma İşlemi

Ø11 mm, Ø20 mm çapında ve 20 cm boylarındaki, 16MnCr5 ve 100Cr6 çeliklerinin ısıtma işlemi için karbürleme programı, sırasıyla 960°C ve 840°C sıcaklık derecelerinde karbon gaz atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Karbürleme prosesi boyunca, fırın 960°C sıcaklığında %1.2 C ve 840°C sıcaklığında %0.45 C karbon potansiyeline ayarlanmıştır. Daha sonra, 16MnCr5 çeliği için son yüzey karbon oranı %0.8C potansiyeli altına indirilirken, 100Cr6 çeliği için karbon oranı %0.8C potansiyeli üzerine çıkartılmıştır. Numunelere bu sıcaklıklardan itibaren doğrudan yağda su verme işlemi yapılmıştır. Sonrasında bu çeliklere 80°C sıcaklığında, 1 saat süresince tavlama işlemi yapılmıştır.

5.3.2 Numunelerin Kesme İşlemi

Numuneler, ısıtma işlemi görmüş ve ham olan 20 cm boylarındaki çubuklardan tel erozyon kesme cihazında (EDM), Ø11 mm ve Ø22 mm çapında ve 0,5 mm kalınlıkta

kesilerek diskler şeklinde hazırlanmıştır.

5.3.3 Numunelerin Zımparalama ve Parlatma İşlemi

Numunelerin herbiri, kesit alanından inceleme yapılacak şekilde polyester bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numunelere 80, 220, 400, 800, 1000 ve 1200 gritlik SiC zımparalar ile zımparalama işlemi yapılarak yüzeyler parlatma aşaması için hazır hale getirilmiştir. Her zımparalama aşamasında numune 90° çevrilerek yüzeydeki çiziklerin aynı yönde oluşması sağlandı. Bu oluşum, numunenin daha kolay parlamasını sağlamaktadır. 1 (µm) mikron mertebesindeki elmas pasta yardımıyla zımparalanmış numunelerin yüzeyi ayna parlaklığında olana kadar parlatmaya devam edildi. Yüzeyde zımparalamadan kaynaklanan çizikler parlatma safhasında yok edildi. Parlatma işlemi tamamlandığında, numuneler mekanik çalışmalar ve karakterizasyon çalışmaları için hazır hale getirilmiş oldu.

5.3.4 Numunelerin Hazırlığı Sonrasında Yapılan Karakterizasyon ve Mekanik Test Çalışmaları

Bu numuneler, metalografik olarak, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve Optik Mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada ısıtma işlemi görmüş ve ısıtma işlemi görmemiş numuneler XRD cihazında incelenmiş ve numunelerin kırınım pikleri (martenzit ve östenit) elde edilmiştir.

Daha sonra numuneler üzerinde mekanik olarak, Dynamic Ultra Micro Hardness (DUH) test cihazında, 200, 400, 600, 800 ve 1000 mN maksimum yükler altında çalışılmıştır. Isıtma işlemi görmüş ve ısıtma işlemi görmemiş numunelerin herbiri için, yükleme-boşaltma çevrimi altında yük-penetrasyon derinliği eğrileri elde edilmiştir. Yük-derinlik ($P-h$) eğrilerinin elde edilmesinin yanısıra eş zamanlı olarak, herbir numunenin elastisite modülleri ve sertlik değerleri, test cihazı ile bağlantılı olan bir bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Yükleme-boşaltma eğrilerinin sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu, artık gerilmelerin tipi (çekme-basma) belirlenmiştir.

Çekme veya basma karakterli herbir artık gerilme değerleri için ilgili eşitlikler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

5.4 Karakterizasyon Çalışmaları

5.4.1 Metalografik Çalışmalar

5.4.1.1 Optik Mikroskop

Test numunelerinin mikroyapı değerlendirmeleri optik mikroskop kullanarak yapılmıştır. Optik mikroskop, malzemelere uygulanan özel ısıl işlemler sonucunda oluşan metalurjik mikroyapıları karakterize etmek için kullanılır.

Optik mikroskop, video kamera ve yazılım programları ile hem dijital görüntü alma hem de görüntü üzerinde analiz yapma imkânı sağlar. Numune hazırlama işlemi uygulanmış düzgün yüzeyli parçaların yüzeylerinden yansıyan ışık yardımıyla görüntü alır. Nikon-ECLIPSE ME600D marka optik mikroskopta 50, 100, 200, 500 ve 1000 kat büyütme yapabilmektedir. Isıl işlem sonrası oluşturulmuş yeni yüzeylerin mikroyapı özellikleri bu mikroskop yardımıyla belirlenebilmektedir.

Sementasyon işlemi yapılmış numunelerin mikroyapı çalışması için, pürüzsüz ve parlak bir şekilde hazırlandıktan sonra 15 sn süresince %2 Nital çözeltisi ile dağlanmış daha sonra deiyonize su ile durulanmış, aseton ve alkol ile yıkanmış ve kurulanmıştır. Daha sonra metalurjik mikroyapı değerlendirmeleri, Nikon ECLIPSE ME600D marka optik mikroskopta çeşitli büyütmelerde çekilen mikrofotografılarla yapılmıştır.

5.4.1.2 Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

SEM mikroyapı fotoğrafları numunelerin karakteristik özelliklerini belirlemede oldukça faydalıdır. Isıl işlem ve indentasyon çalışmaları sonrasında malzemelerin yüzey morfolojilerini belirlemek amacıyla JEOL JJM 6060 marka taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskopu; yüksek voltaj

altında hızlandırılmış elektronların bir numune üzerine gönderilmesi sonucu, elektronlarla numune atomları arasında oluşan çeşitli etkileşimlerden yararlanılması prensibi ile çalışır. Bu çalışmada ısıtıl işlem görmüş ve ısıtıl işlem görmemiş numunelerin yüzey topoğrafyası SEM cihazında incelenmiştir.

5.4.2 X-Işınları Cihazı (XRD)

X ışın kırınımı cihazı, östenit ve ferrit/martenzit fazlarının şiddetlerini elde etmek bu suretle kantitatif veri toplamak için kullanılır. Bu yöntemde kullanılan Jade programı, fazların kırınım veri analizlerini yapmada kullanılmaktadır. Bu çalışmada ısıtıl işlem görmüş ve ısıtıl işlem görmemiş numunelerin kırınım pikleri (martenzit ve östenit) XRD cihazında incelenmiştir.

5.5 Mekanik Test Çalışmaları

5.5.1 Dinamik Ultra-Mikro Sertlik Test Cihazı (DUH)

Malzemelerin sertlik ve elastisite modülü tayini için Shimadzu DUH- W201, DUH-W201S model dinamik ultra-mikro sertlik cihazı kullanılmaktadır. 0,1 μm yarıçaplı Vickers batıcı uca sahip olan cihaz, indentasyon yükleme-boşaltma (loading-unloading) metodlarıyla çalışmaktadır. Bu çalışma ile 16MnCr5 ve 100Cr6 çeliklerinin 200, 400, 600, 800 ve 1000 mN maksimum yükler altında elastisite modülü, sertliği değerleri ve yükleme-boşaltma verileri elde edilmiştir.

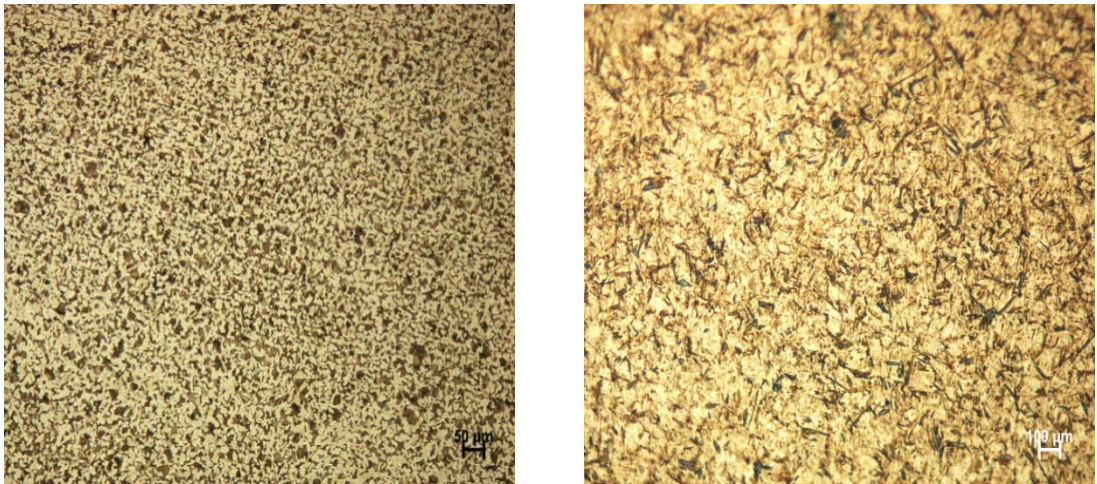
BÖLÜM ALTI

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Karbürleme yöntemi ile 100Cr6 ve 16MnCr5 numunelerine ısıtma işlemi uygulanmıştır. Numuneler, iç gerilme yaratmayacak şekilde belirli standartlarda hazırlanmıştır. Yüzeylerin karakteristik özelliklerini belirleme aşamasında Optik mikroskop ve SEM cihazlarından faydalanılmıştır. Artık östenit miktarının belirlenmesi için XRD analizi yapılmıştır. Shimadzu Dynamic Ultra-Micro Hardness Test cihazı (DUH) test cihazında, farklı yükler altında numunelerin sertlik ve young modüllerinin belirlenmesi için çalışılmıştır. AISI 5115 ve AISI 52100 ısıtma işlemi görmüş ve ham malzemelerin yükleme eğrileri elde edilmiştir. Sonuçlara göre, her bir numunede basma artık gerilme karakteristikleri ortaya çıktığı görülmüştür.

6.1 Optik Mikroskop Analizi

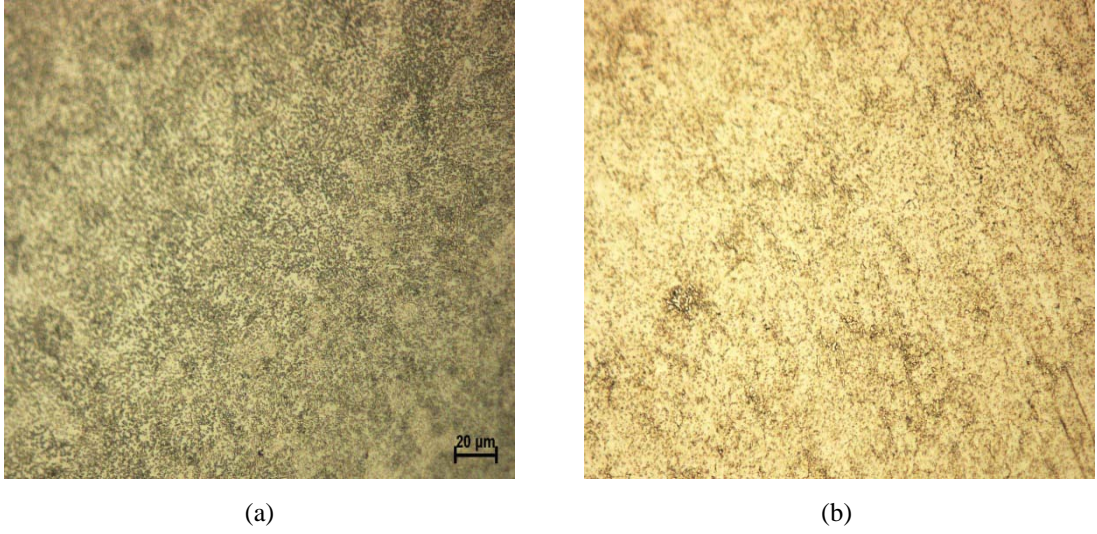
Optik mikroskop analizi, malzemenin yapısı veya malzeme üzerine sonradan yapılan çeşitli işlemler sonucu oluşan fazları gözlemlemek, malzemenin mikroyapı özellikleri hakkında bilgi almak için kullanılır. Bu çalışmada, ham ve ısıtma işlemi görmüş malzemenin mikroyapıları incelenmiş, numunelerin içyapıları hakkında bilgi edinilmiştir.



(a)

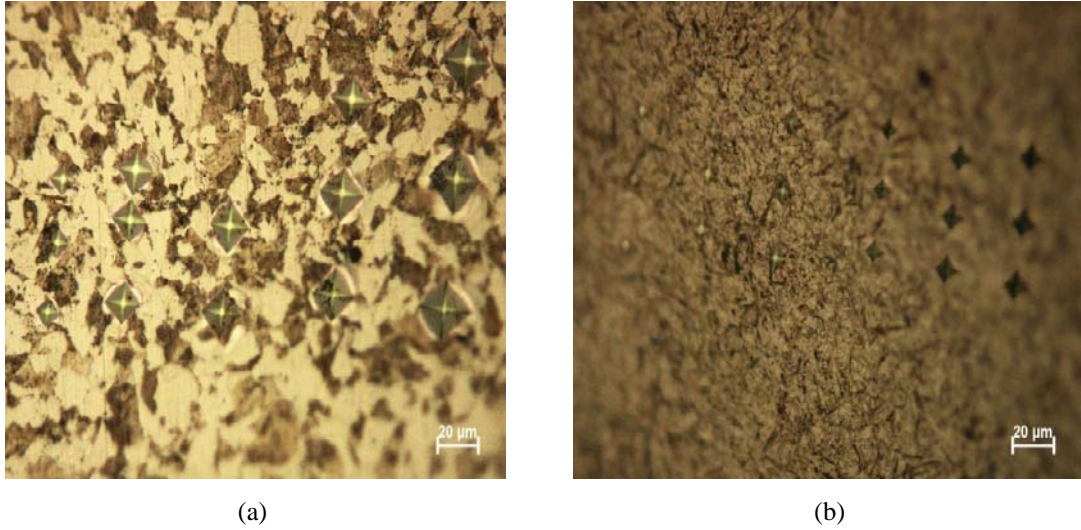
(b)

Şekil 6.1 16MnCr5 çeliğinin mikroyapı görüntüleri (a) 100X büyütmede ham malzeme (b) 500X büyütmede ısıtma işlemi görmüş

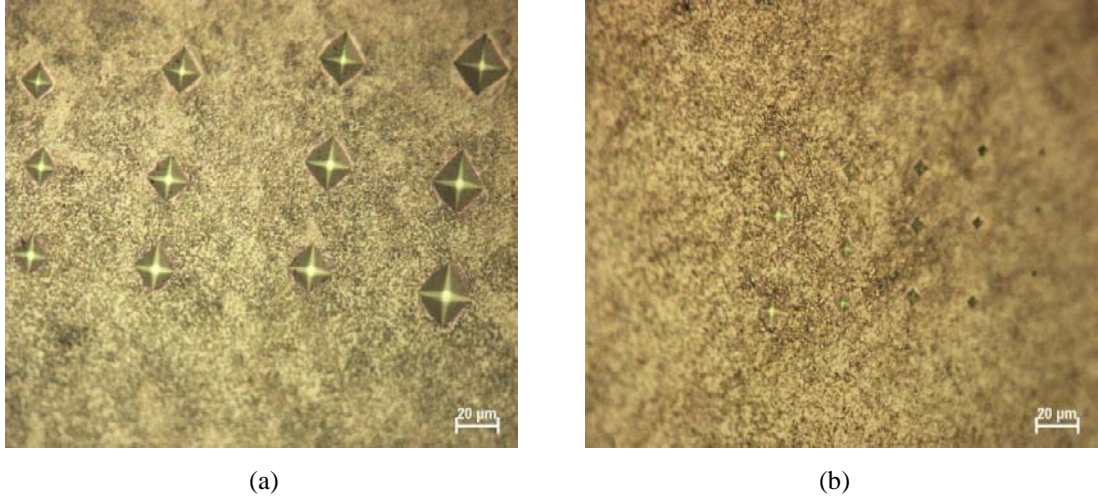


Şekil 6.2 100Cr6 çeliğinin mikroyapı görüntüleri (a) 500X büyütmede ham (b) 500X büyütmede ısıtılmış

16MnCr5 çeliğinin Şekil 6.1 a) ferrit matris içerisinde perlit yapısı, b) martenzit yapısı görülmektedir. Şekil 6.2 a) ferrit matris içerisinde ince dağılmış küresel sementit b) küresel sementit ve martenzit yapı görülmektedir.



Şekil 6.3 16MnCr5 çeliğinde farklı yükler altında oluşan Vickers indenter izlerinin optik mikroskop görüntüleri (a) 500X büyütmede ham (b) 500X büyütmede ısıtılmış



Şekil 6.4 100Cr6 çeliğinde farklı yükler altında oluşan Vickers indenter izlerinin optik mikroskop görüntüleri (a) 500X büyütmede ham (b) 500X büyütmede ısıtılmış

Şekil 6.3 de, 16MnCr5 çeliğine uygulanan yüklerin bir kısmına ait a) ferrit-perlit yapısı üzerinde Vickers izleri görülmekte b) martenzit yapı içerisinde 200-1000 mN yüklerinde uygulanmış Vickers izleri görülmektedir.

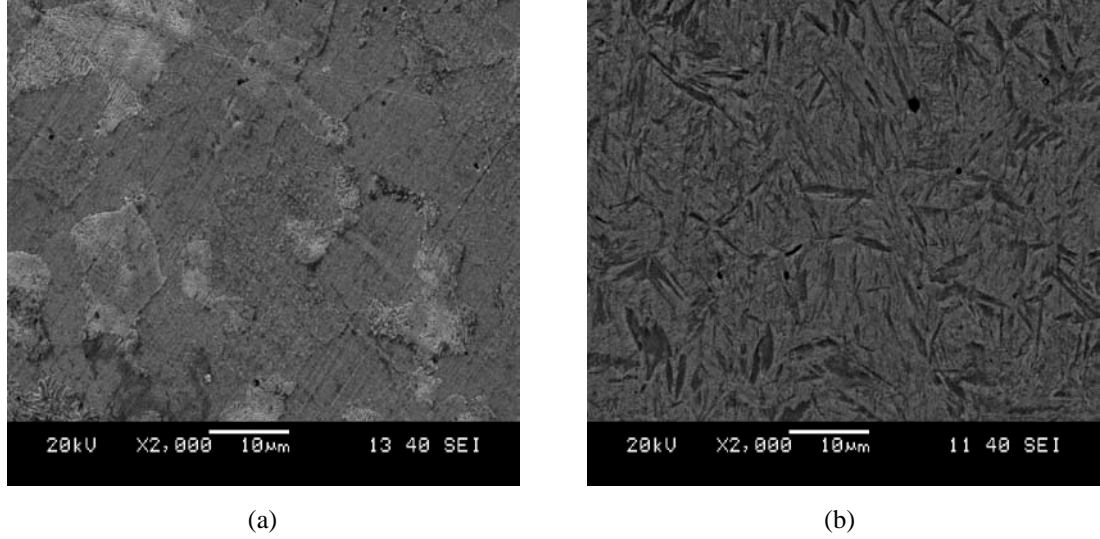
100Cr6 çeliğinin Şekil 6.4 a) ferrit-sementit yapısı üzerinde 200,400,600 ve 800 mN yüklerinde uygulanmış Vickers izleri görülmekte b) ince dağılmış küresel seimentit ve martenzit yapı 200-1000 mN yüklerinde uygulanmış Vickers izleri görülmektedir.

6.2 SEM Analizi

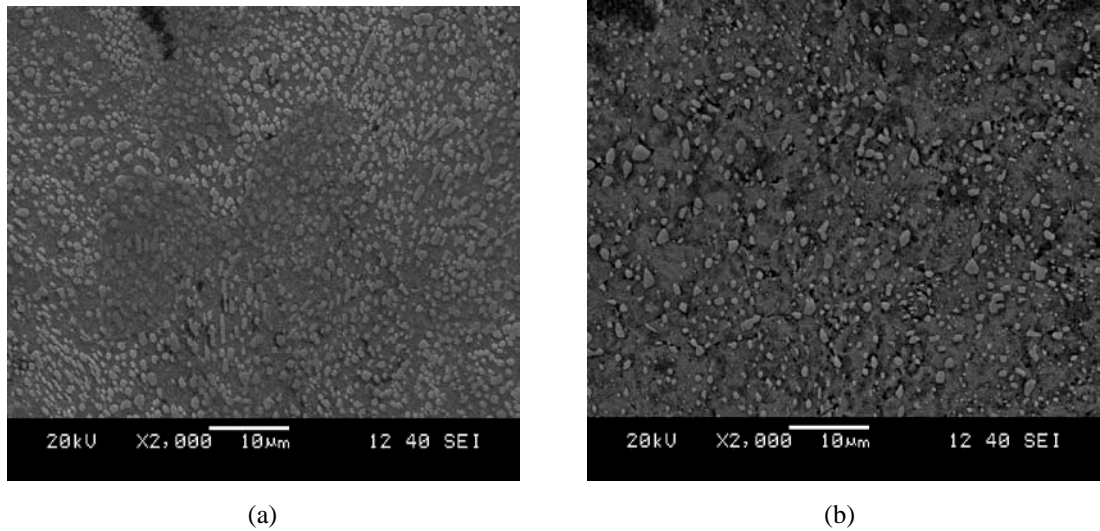
Ham ve ısıtılmış numunelerin SEM cihazında görüntüleri incelenmiştir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6' de sırasıyla ham ve ısıtılmış 16MnCr5 ve 100Cr6 numunelerinin 2000 büyütmede SEM fotoğrafları görülmektedir.

SEM görüntüleri sonucunda 16MnCr5 numunesinin ısıtılmış olmamış durumda ferrit perlit yapıları, ısıtılmış sonrasında ki yapıya bakıldığında, martenzit yapı görülmektedir. 100Cr6 numunesinin ısıtılmış olmamış durumda ferrit seimentit yapıları, ısıtılmış sonrasında ki yapıya bakıldığında seimentit martenzit yapılar görülmektedir. Fotoğraflarda, ısıtılmış öncesi inklüzyonlar ve ısıtılmış sonrası

yapıda karbürler, inklüzyon ve artık östenit yapısı (açık rekli olan kısımlarda) olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.5 16MnCr5 çeliğinin 2000 büyütmede ki SEM görüntüleri (a) ısıl işlem görmemiş (b) ısıl işlem görmüş



Şekil 6.6 100Cr6 çeliğinin 2000 büyütmede SEM görüntüleri (a) ısıl işlem görmemiş (b) ısıl işlem görmüş

6.3 X-Işınları Cihazı (XRD) Analizi

Bu çalışmada, yüzey sementasyon işlemi uygulanmış 16MnCr5 ve sertleştirme işlemi yapılmış 100Cr6 rulman çeliğinin mikroyapılarında mevcut bulunan artık gerilme miktarının belirlenmesi için Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme

Mükemmelliyet Merkezinde X-ışınları kırınımı cihazı (XRD 3003 PTS) kullanılmıştır. Artık östenit ölçümünde numunelerin X ışınları kırınımı koşulları ve parametreleri;

Radyasyon : Cr, ψ oscillation : 3°, $K\alpha$: 2.291 Å, Filtre : Vanadium
Zaman sabiti 10 sn ve tarama hızı 0.05°/dak.

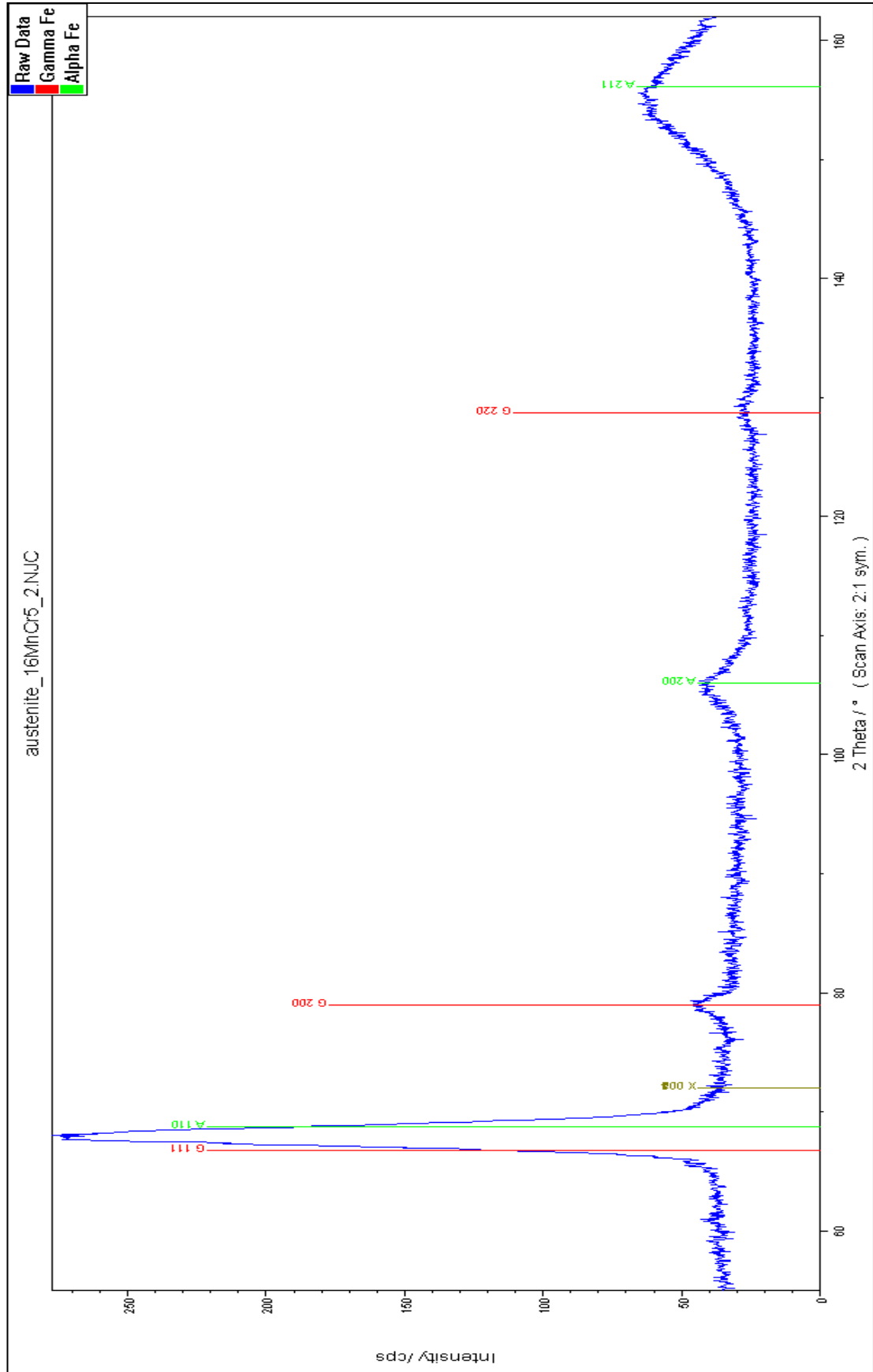
X-ışınları kırınımı yönteminde öncelikle kırınım piklerinin eğrileri elde edilmektedir. Daha sonra Jade yazılımı, bu pik eğrilerinin altında kalan alanı, FWHM yöntemi ile hesaplar. Bu piklerde oluşan bir grup için toplam alan, malzemede mevcut olan herbir fazın şiddet toplamına eşittir. XRD 3003 PTS cihazı ile bölüm 4'te tanımlanan algoritmalar ile numunelerin artık östenit analizleri yapılmıştır. ASTM E 975-84 standardı, rastgele yönlenmiş kabul edilen numunelerin artık östenit miktarları hesaplanmasında kullanılmıştır.

Bu deneyde, AISI 5115(16MnCr5) sementasyon çeliği ve AISI 52100 (100Cr6) rulman çeliği için bulunan Latis düzlemleri ve Bragg açıları;

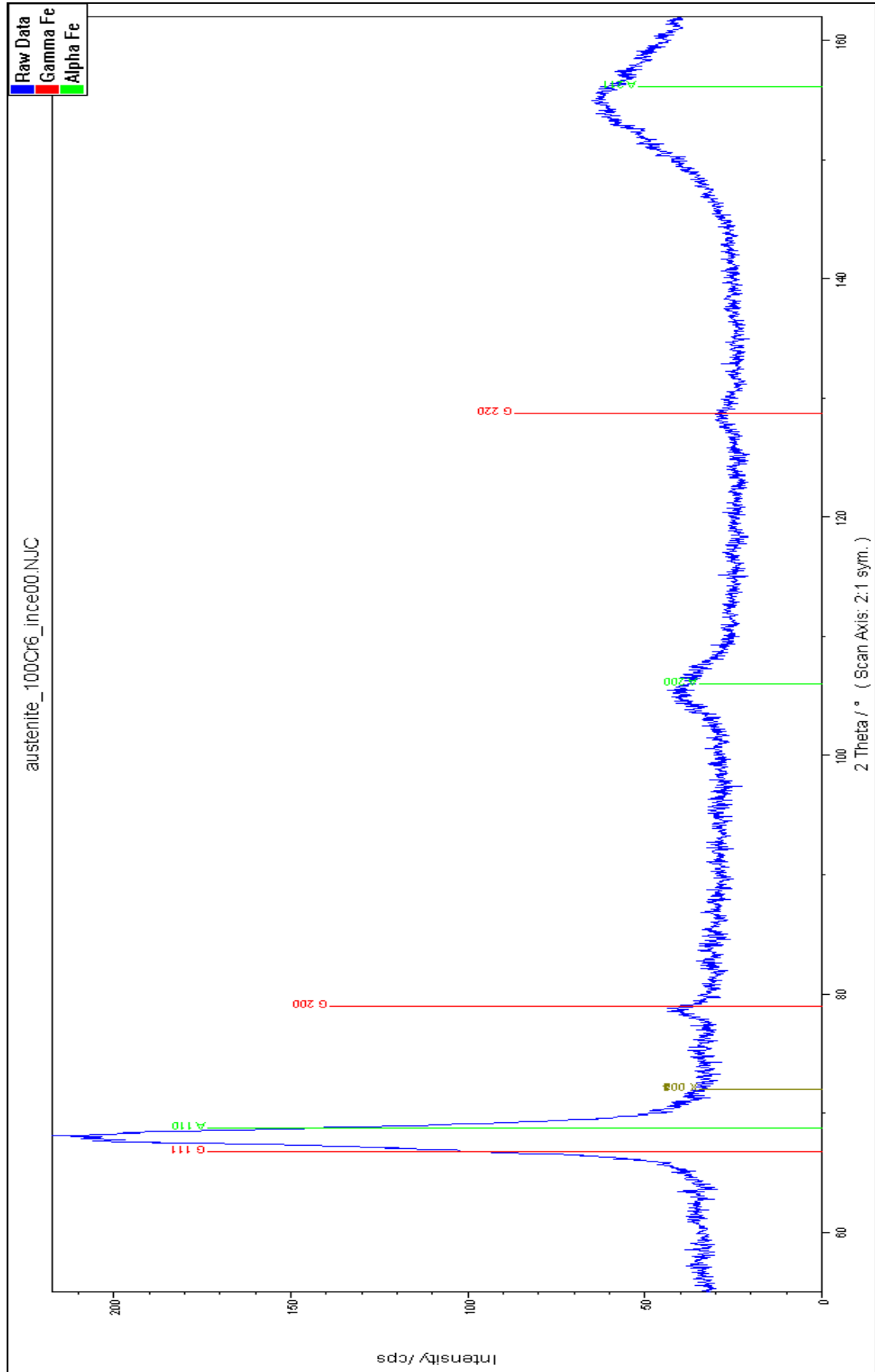
Östenit pikleri : (111), 67°; (200), 78°; (220), 128°,
Martenzit pikleri: (110), 68°; (200),106°; (211), 155°

16MnCr6 sementasyon çeliğinin kırınım pikleri şekil (6.7) de görülmektedir. 16MnCr6 sementasyon numunesinin mikroyapısında bulunan artık östenit miktarı Tablo (6.1) de görülmektedir. artık östenit miktarı 16MnCr5 numunesi için %11.1 olarak hesaplanmıştır.

100Cr6 rulman çeliğinin kırınım pikleri şekil (6.8) de görülmektedir. 100Cr6 rulman çeliği numunesinin mikroyapısında bulunan artık östenit miktarı Tablo (6.2) de görülmektedir. Artık östenit miktarı 100Cr6 numunesi için %21.2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.7 16MnCr5 Numunesine ait XRD paternleri



Şekil 6.8 100Cr6 Numunesine ait XRD paternleri

Tablo 6.1 16MnCr5 Numunesine ait XRD sonuçları

Phase	Angle(theo)/°	Angle(calc)/°	R (Cr)	I(calc)/cps	R/Rmax - I/Imax /%	Fwhm /°	Quantity /%
<input checked="" type="checkbox"/> Gamma Fe	66.7918	67.2918	77.2	42.4	100.0 - 100.0	0.9842	
<input checked="" type="checkbox"/> Gamma Fe	78.9946	78.6913	36.6	4.2	47.4 - 10.0	1.0198	11.1
<input checked="" type="checkbox"/> Gamma Fe	128.7056	128.4786	57.1	21.2	74.0 - 50.1	5.0000	
<input checked="" type="checkbox"/> Alpha Fe	68.7863	68.2863	105.0	97.5	44.3 - 186.5	1.1541	88.9
<input checked="" type="checkbox"/> Alpha Fe	106.0360	106.0781	23.4	3.8	9.9 - 7.3	2.1548	
<input checked="" type="checkbox"/> Alpha Fe	156.1165	155.6165	237.0	52.3	100.0 - 100.0	5.0000	

Retained Austenite: 11.1 %
+0.0 %
0.0 %
Copy
OK

Tablo 6.2 100Cr6 Numunesine ait XRD sonuçları

Phase	Angle(theo)/°	Angle(calc)/°	R (Cr)	I(calc)/cps	R/Rmax - I/Imax /%	Fwhm /°	Quantity /%
<input checked="" type="checkbox"/> Gamma Fe	66.7918	67.2918	77.2	46.4	100.0 - 100.0	0.8862	
<input checked="" type="checkbox"/> Gamma Fe	78.9946	78.8262	36.6	14.2	47.4 - 30.7	1.9704	21.2
<input checked="" type="checkbox"/> Gamma Fe	128.7056	128.5378	57.1	114.7	74.0 - 247.1	5.0000	
<input checked="" type="checkbox"/> Alpha Fe	68.7863	68.2863	105.0	152.0	44.3 - 54.6	1.2257	78.8
<input checked="" type="checkbox"/> Alpha Fe	106.0360	106.4254	23.4	1.5	9.9 - 0.5	1.1310	
<input checked="" type="checkbox"/> Alpha Fe	156.1165	155.6165	237.0	278.3	100.0 - 100.0	5.0000	

Retained Austenite: 21.2 %
+0.0 %
0.0 %
Copy
OK

Şekil 6.1b ve Şekil 6.2b' de 16MnCr5 ve 100Cr6 ısıtılmış numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Bu yapılarda koyu görünenler martenzit yapısını açık renkte görünenler ise artık östenit yapısını göstermektedir. X- ışınları kırınımı test sonuçları, 16MnCr5 sementasyon çeliğinin mikroyapısında artık östenit miktarının %11.1 ve 100Cr6 rulman çeliğinin yapısında ise %21.2 olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, Şekil 6.1b ve Şekil 6.2b deki optik mikroyapı fotoğraflarında görülmekte olan artık östenit yapısına uygun çıkmıştır. Aynı zamanda, şekil (1.6) da şematik olarak verilen karbon konsantrasyonuna bağlı olarak bu iki farklı çeliğin yapısı içerisinde kalan artık östenit miktarı ile elde edilen artık östenit miktarları (%11.1 ve %21.2) arasında uygun ve orantılı bir sonuç elde edilmiştir.

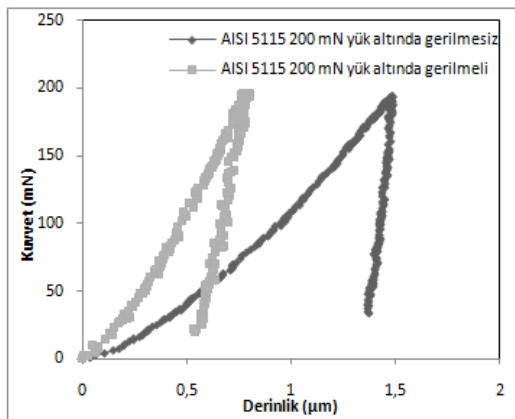
6.4 Dinamik Ultra-Mikro Sertlik Test Cihazı (DUH) Çalışması

DUH cihazı, indentasyon yönteminde kullanılmakta olup, bu yöntem son on yılda mekanik özelliklerin yanı sıra artık gerilmelerin tayini için dikkati çeken bir yöntemdir. Bu yöntemle malzeme yüzeyinden çok küçük bir bölgede analiz yapılarak malzemeye ait elastisite modülü, sertlik, kırılma tokluğu değerleri gibi mekanik özellikler yanında artık gerilmelerde belirlenebilmektedir. Farklı analiz modlarına sahip bu cihazda, yüzey kaplamasına ait yükleme- boşaltma (loading - unloading) eğrileri yani kuvvet-derinlik ($P-h$) eğrileri elde edilerek elastisite modülü, sertliğin derinlikle değişimi elde edilebilmektedir.

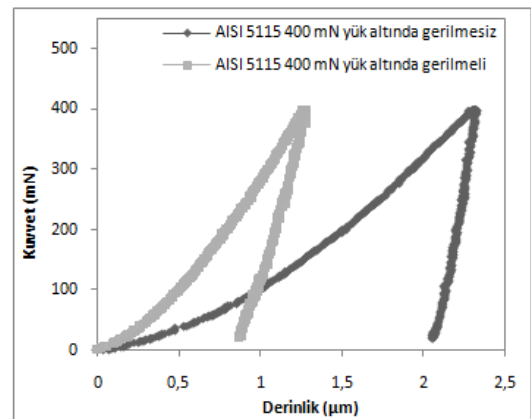
Bu çalışmada ise, indentasyon tekniği kullanılarak 200, 400, 600, 800, 1000 mN yüklerinde AISI 5115 ve AISI 52100 ısıtılmış ve ısıtılmamış numunelere ait yükleme-boşaltma eğrileri elde edilmiş aynı zamanda elastisite modülü ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, her bir numune de basma artık gerilme karakteristikleri ortaya çıktığı görülmüştür.

6.4.1 Yükleme-Yük Boşaltma Eğrileri (Load-Unload Curves) Analizi

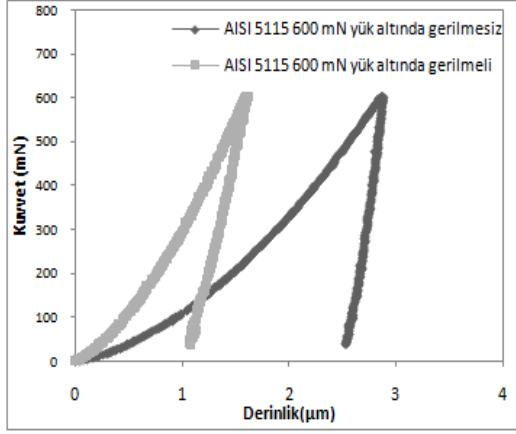
6.4.1.1 AISI 5115 Çeliği Yükleme- Yük Boşaltma Eğrileri



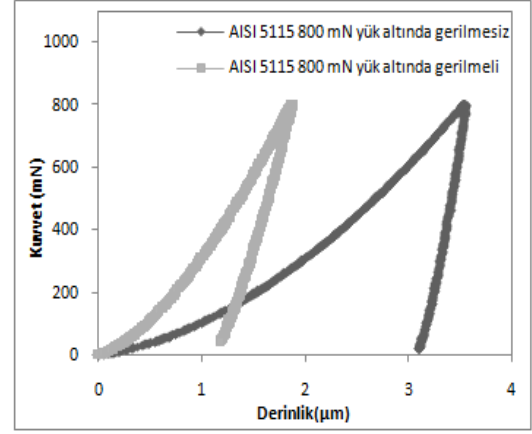
(a)



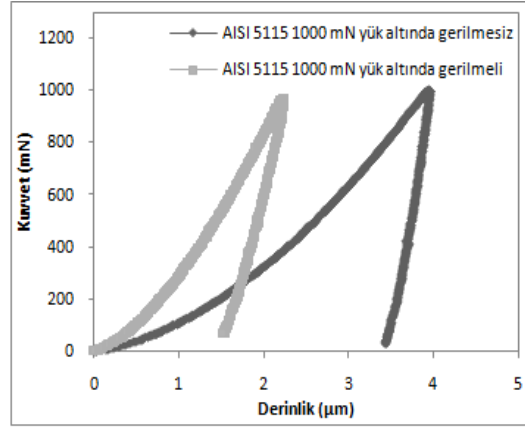
(b)



(c)

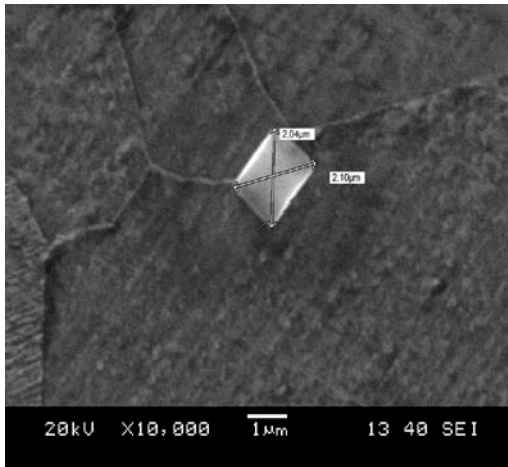


(d)

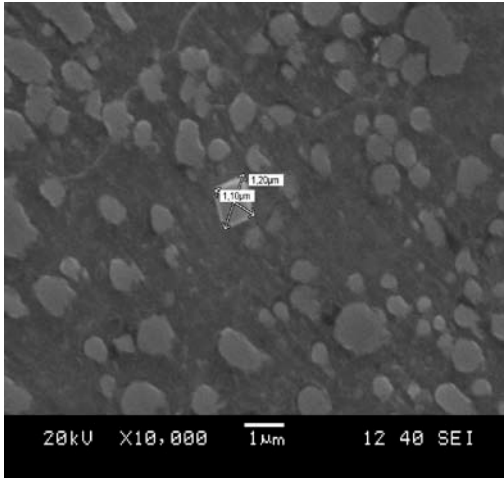


(e)

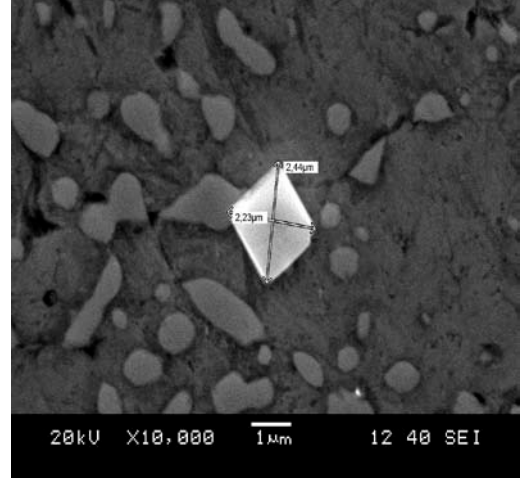
Şekil 6.9 AISI 5115 kalite çeliklerin yükleme-boşaltma (loading- unloading) eğrileri a) 200 mN b) 400 mN c) 600 mN d) 800 mN e) 1000mN



Şekil 6.10 16MnCr5 çeliğinin SEM görüntüleri (a) ısı işleme görmemiş (b) ısı işleme görmüş



(a)

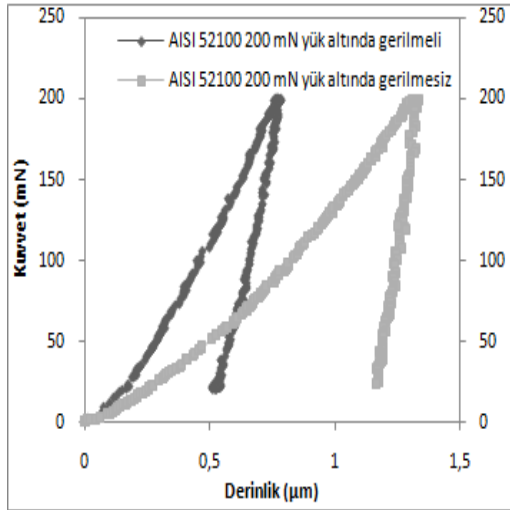


(b)

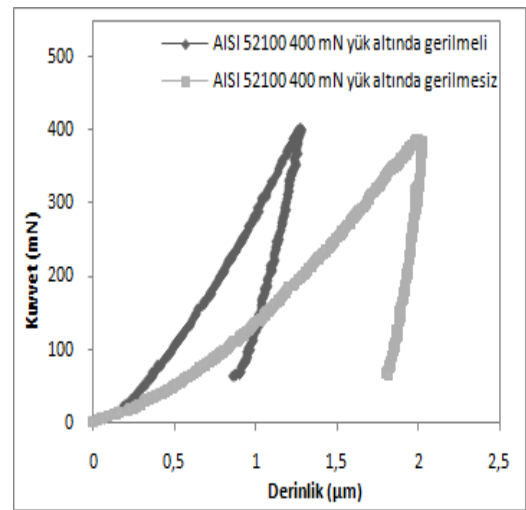
Şekil 6.11 100Cr6 çeliğinin SEM görüntüleri (a) ısıt işlem görmemiş (b) ısıt işlem görmüş

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11' de ham ve ısıt işlem görmüş 16MnCr5 ve 100Cr6 numunelerinin indentasyon çalışması sonrasında oluşan DUH izlerinin 10000 büyütmede SEM fotoğrafları görülmektedir.

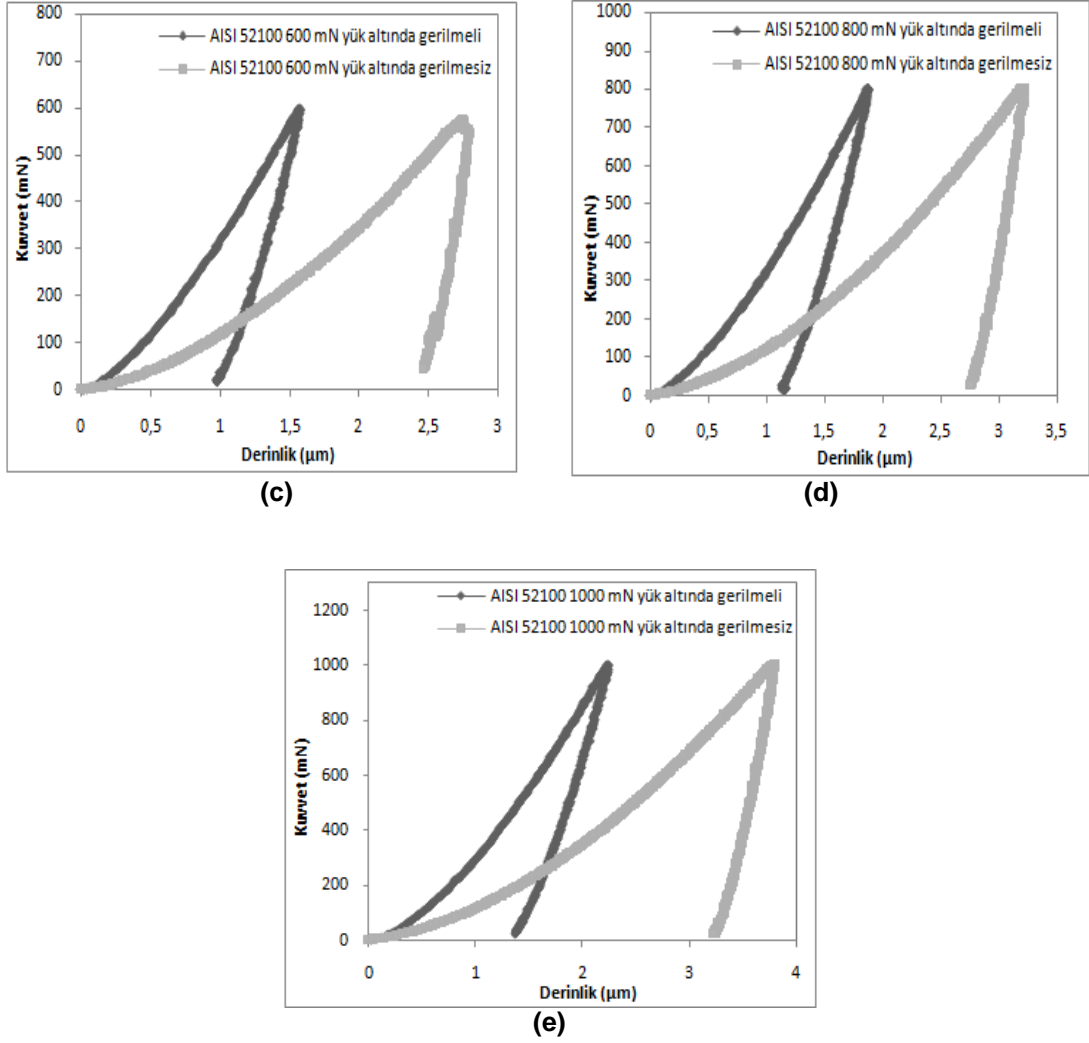
6.4.1.2 AISI/SAE 52100 Çeliği Yükleme-Yük Boşaltma Eğrileri



(a)



(b)



Şekil 6.12 AISI 52100 kalite çeliklerin yükleme-boşaltma (loading- unloading) eğrileri a)200 mN b) 400 mN c) 600 mN d) 800 mN e) 1000mN

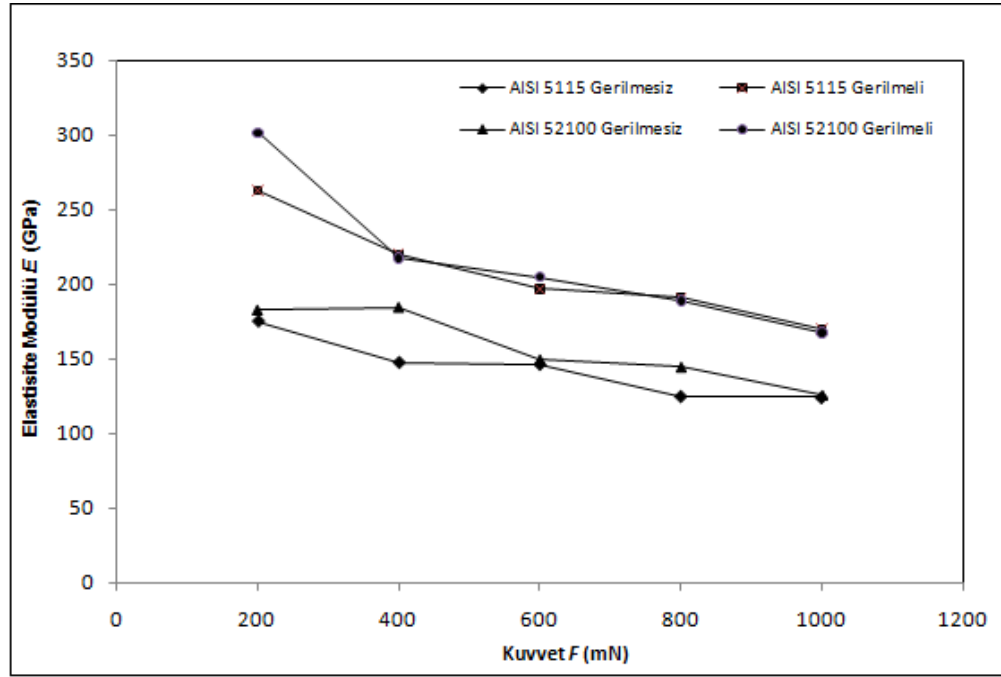
Şekil 6.9 ve Şekil 6.12’da AISI 5115 (16MnCr5) ve AISI 52100 (100Cr6) kalite çeliklerinin indentasyon eğrilerinde görüldüğü gibi, ısıtılmış durumdaki yükleme eğrileri (loading), ham durumdaki yükleme eğrilerinin solunda kalmıştır. Bu durumda, numunede ısıtılmış işlem sonucu oluşan gerilmelerin basma karakterli artık gerilmeler olduğu görülmüştür.

6.4.2 Elastisite Modül (E) Analizi

Elastisite modülü, geleneksel yöntemler dışında sertlik ölçüm yöntemine ait kuvvet derinlik eğrilerinden elde edilebilmektedir. Elastisite modülü, kuvvet-derinlik

eğrisinin yük boşaltma (unloading) kısmındaki (P_{max} -%20 P_{max} aralığı) eğimi yardımı ile hesaplanabilmektedir.

Gerilmeli ve gerilmemiş AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklerinin farklı maksimum yükler altındaki hesaplanmış elastisite modülleri (E) Şekil 6.13 de görülmektedir.



Şekil 6.13 Artık gerilmeli ve gerilmemiş AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklerinin kuvvet-elastisite (F - E) grafiği

Gerilmemiş AISI 5115 numunesinin elastisite modülü, 200 mN uygulama yükünde 174,71 GPa'dan 1000 mN yükünde 124 GPa değerine sürekli bir düşüş göstermiştir; ancak değerler birbirine yakın seviyelerde değişme göstermiştir. Gerilmemiş AISI 52100 numunesinin elastisite modülü, 200 mN yükünde 182,45 GPa'dan 400 mN yükünde 184,33 GPa değerine hafif bir artış olmuş, daha sonra sürekli bir azalma göstererek 1000 mN yükünde 125,33 GPa değerine düşüş göstermiştir.

Gerilmeli AISI 5115 numunesinin elastisite modülü, 200 mN uygulama yükünde 262,67 GPa'dan 1000 mN yükünde 169,67 GPa değerine sürekli bir düşüş göstermiştir; ancak değerler birbirine yakındır. Gerilmeli AISI 52100 numunesinin

elastisite modülü, 200 mN yükünde 301,67 GPa'dan 400 mN yükünde 217,33 GPa değerine keskin bir düşüş olmuş, daha sonra sürekli bir azalma göstererek 1000 mN yükünde 167,43 GPa değerine düşüş göstermiştir.

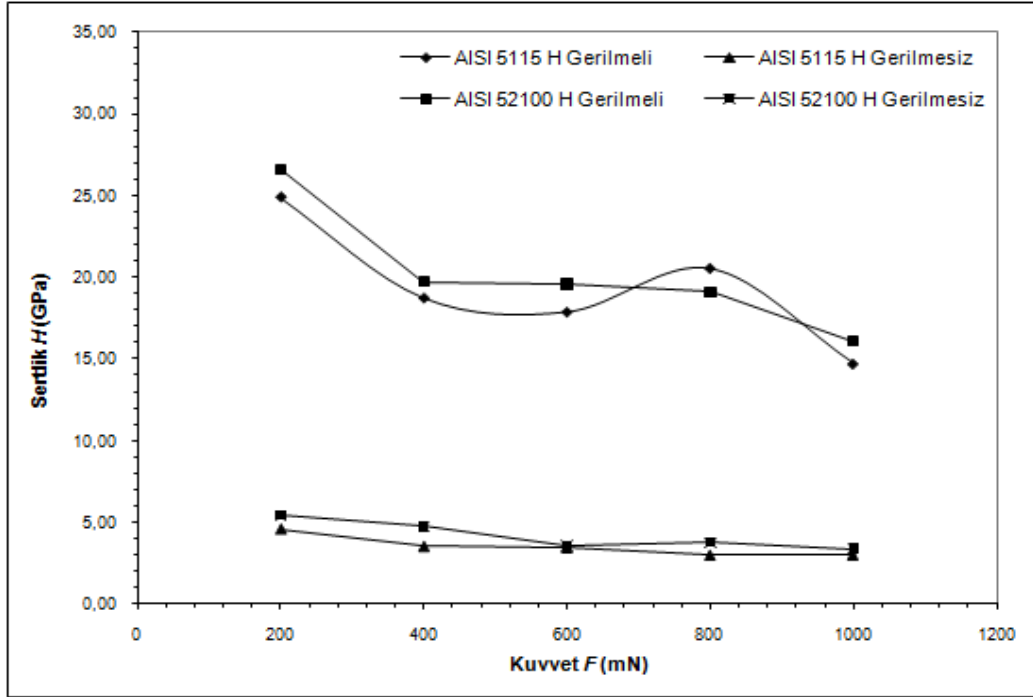
Artan yüklere bağlı olarak elastisite modülünde meydana gelen bu sürekli düşüşün ana nedeni literatürde batma derinliği etkisi olarak geçen "*Indentation size effect*" tir. Artan yüklere bağlı olarak artan batma derinliği sonucu elde edilen mekanik özelliklerin başında gelen elastisite modülü, sürekli azalış göstererek deformasyona bağlı olarak değişmiştir. Bu değişim belli bir kritik noktada artık derinlikten bağımsız hale gelip malzemenin tümünü temsil eden kabul edilebilir bir değer haline gelmektedir. Bu nedenlerden ötürü çalışmada 200 mN değerinden başlanılarak 1000 mN çıkılıp, elastisite modülünün ve daha ilerde sertliğin derinlikle olan değişimi belirlenmiştir.

Şekil 6.15'te de görüldüğü üzere, 200 mN dan 1000 mN artırılan yük değerleri sonucu elastisite modülünde genel olarak 180 GPa dan 125 GPa ya kadar düşüş göstermiştir. Fakat 600 mN ile 1000 mN arası detaylı incelendiğinde, elastisite modülünde ki düşüş aralığı oldukça azalmış ve artık 1000 mN ve üzeri değerlerde yükten dolayısıyla derinlikten bağımsız hale geleceği düşünülmektedir.

Geleneksel mukavemet hesabıyla yapılan çekme testi analizinde de çeliğe ait olan elastisite modülünün 200 GPa değerlerinde olması beklenmektedir. Artık gerilmeli ve gerilmesiz yapılan analizlerde elastisite modülü bu değere çok yakın değişmektedir.

6.4.3 Sertlik (H) Analizi

Gerilmeli ve gerilmesiz 16MnCr5 ve 100Cr6 çeliklerine dinamik sertlik ölçüm sonuçları 200, 400, 600, 800, 1000 mN yüklerinde analiz edilmiştir.



Şekil 6.14 Artık gerilmeli ve gerilmesiz AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklerinin kuvvet-sertlik ($F-H$) grafiği

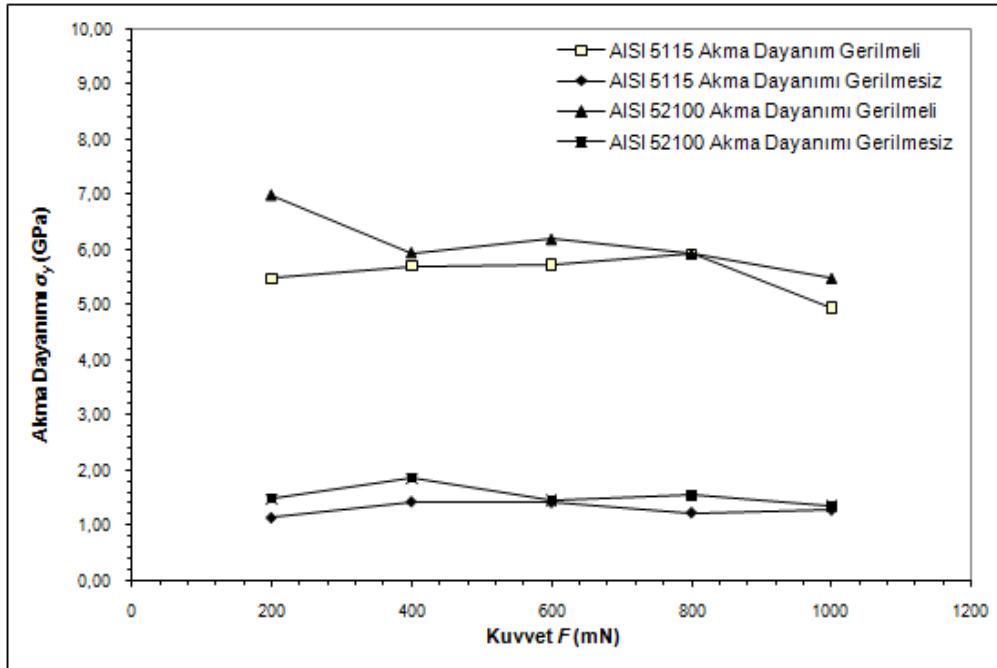
Numunelerin sertlik çalışmaları Şekil 6.14’de gösterilmiştir. Uygulama yükünü 200 mN’den 1000 mN değerine çıkardığımızda, ısıl işlem görmemiş AISI 5115 ve 52100 kalite çeliklerinin sertlik değerleri sırasıyla 200 mN uygulama yükünde 4,59’den 1000 mN yükünde 3,04 GPa değerine ve 200 mN yükünde 5,40 değerinden 1000 mN yükünde 3,38 GPa değerine düşmüştür. Ancak her iki gerilmesiz numunenin sertliği, birbirine yakın değerlerdedir. Benzer uygulama yükleri altında (200 mN-1000 mN), sırasıyla 24,92 değerinden 14,69 GPa ve 26,60 değerinden 16,09 GPa değerlerine azalmıştır.

Isıl işlem sonrasında basma artık gerilmeleri oluşması (azalan temas alanı) sonucu, gerilmeli AISI 5115 numunesinin sertliği yüksek değerlere çıkmış, indantasyon boyut etkisinden dolayı, 200 mN yükünde 24,92 GPa’dan 600 mN yükünde 17,87 GPa değerine bir düşüş yapmış, 800 mN yükünde 20,55 GPa değerine artış göstermiş sonra tekrar 1000 mN yükünde 14,69 GPa değerine düşmüştür. Gerilmeli AISI 52100 numunesinin sertliği, 200 mN yükünde 26,60 GPa’dan sürekli bir düşüş göstererek 1000 mN yükünde 16,09 GPa değerine azalmıştır.

Teorik bilgilerle karşılaştırılan sertlik analiz sonuçlarında, artan yüke ve batma derinliğine bağlı olarak azalan sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Azalan sertlik değerine ana neden olarak batma derinliği etkisini söyleyebiliriz. Numunelerdeki sertlik analiz sonuçlarını kendi içinde değerlendirirken bu etki her zaman karşımıza çıkacaktır. Fakat ısıtıl işlem öncesi ve sonrası değerler göz önüne alındığında değerlerin yüksek şekilde değişimi batma derinliği etkisiyle birlikte ısıtıl işlem sonucunda malzeme içyapısı ve faz değişimlerinden ortaya çıkan değişimlerdir.

6.4.4 Akma Dayanımı ve Çekme Dayanımı

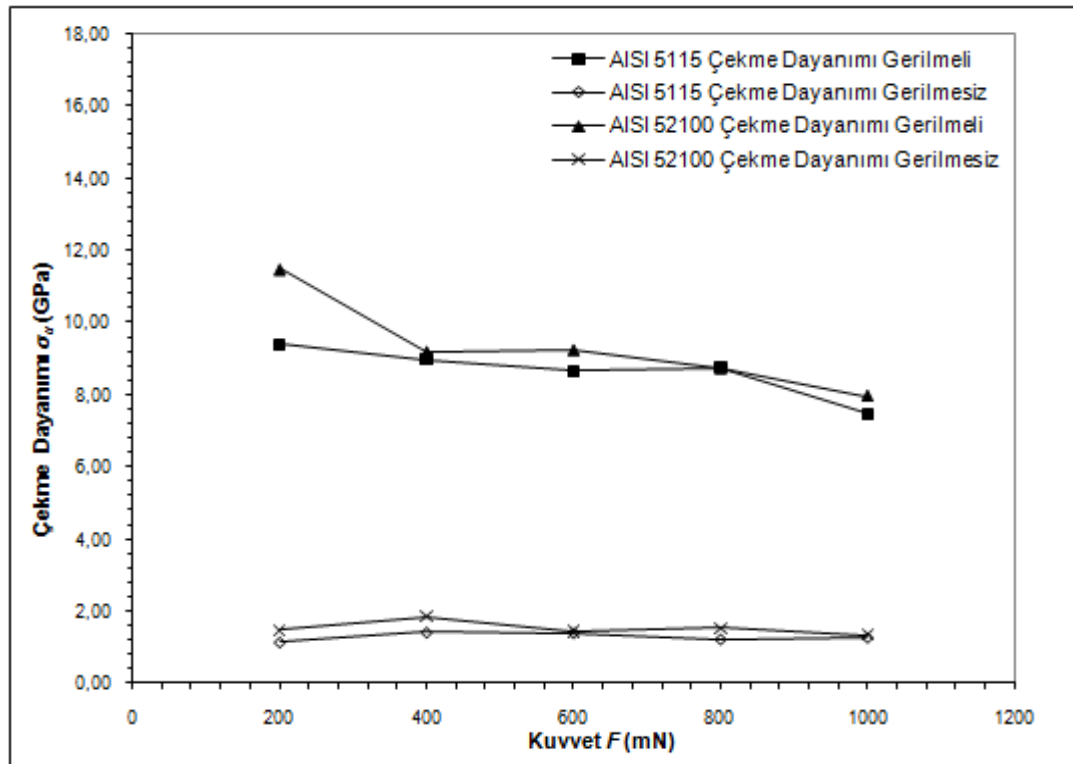
Numunelerin akma ve çekme dayanımları, geri algoritma prensibine göre (Suresh ve Giannakopoulos, 1998), yük-derinlik (P-h) indentasyon verileri analiz edilerek belirlenmiştir. Bu hesaplama prensibi AISI 5115 ve 52100 kalite çelikleri ve onların ısıtıl işlemli numuneleri için uygulanmıştır. Akma ve çekme dayanım değerleri ham ve ısıtıl işlem görmüş numuneler arasında (Şekil 6.15 ve Şekil 6.16) farklılık göstermektedir. Herbir sonuç, uygulanan yüklerden ve indentasyon boyut etkisinden etkilenmiştir.



Şekil 6.15 Artık gerilmeli ve gerilmesiz AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklerinin kuvvet- akma dayanımı ($F-\sigma_y$) grafiği

Numunelerin akma dayanımları Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Gerilmemiş AISI 5115 numunesinin akma dayanımı, 200 ve 1000 mN yük aralığında çok az bir değişim göstermiştir. 200 mN yükü altında 1,13 GPa'dan 400 mN yükünde 1,42 GPa değerine yükselmiş daha sonra 1000 mN yükünde 1,27 GPa değerine düşmüştür. Gerilmemiş AISI 52100 numunesinin akma dayanımı, 200 mN yükünde 1,47 GPa'dan az bir dalgalanma göstererek 1000 mN yükünde 1,35 GPa değerine düşüş göstermiştir. Her iki numunenin 600 ve 800 mN daki değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır.

Isıl işlem rejimi sonrasında, gerilmeli AISI 5115 numunesinin akma dayanımı, 200 mN yükünde 5,47 GPa'dan sürekli bir artış ile 800 mN yükünde 5,91 GPa değerine bir yükselmiş, sonra tekrar 1000 mN yükünde 4,94 GPa değerine düşmüştür. Gerilmeli AISI 52100 numunesinin akma dayanımı, 200 mN yükünde 6,98 GPa'dan 400 mN yükünde 5,94 GPa değerine düşmüş, daha sonra 600 mN yükünde 6,18 GPa değerine yükselmiş ve tekrar düşüş göstererek 1000 mN yükünde 5,47 GPa değerini almıştır.



Şekil 6.16 Artık gerilmeli ve gerilmemiş AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklerinin kuvvet- çekme dayanımı (F - σ_y) grafiği

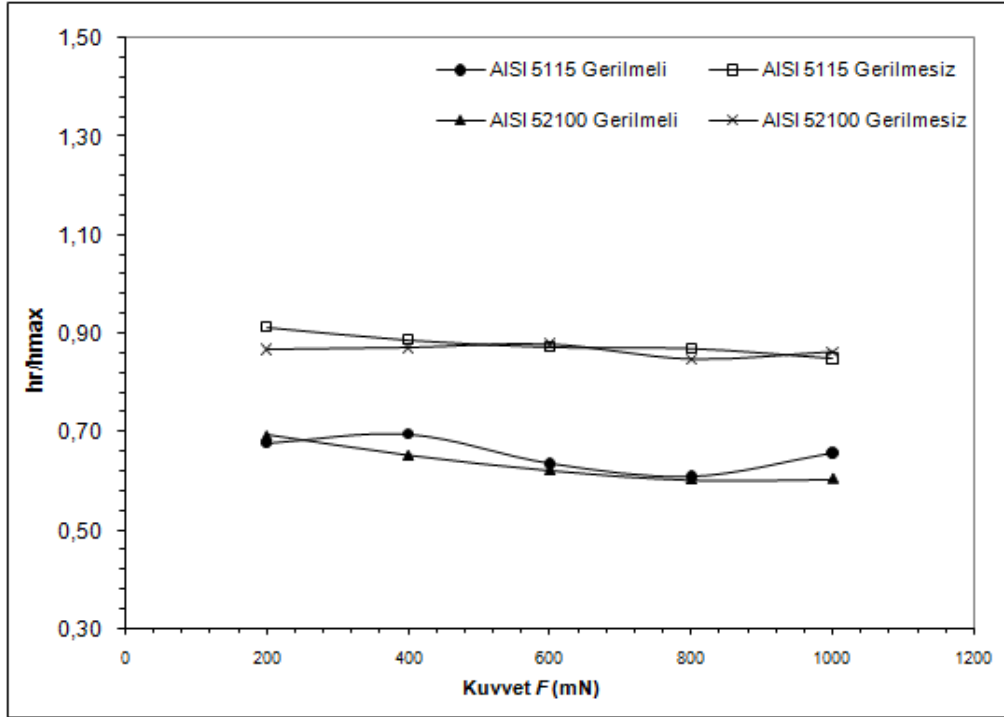
Isıl işlem rejimi sonrasında, gerilmeli AISI 5115 numunesinin çekme dayanımı, 200 mN yükünde 9,39 GPa değerinden 800 mN yükünde 8,75 GPa değerine kadar fazla bir değişim göstermemiş, 1000 mN yükünde ise 7,46 GPa değerine düşmüştür. Gerilmeli AISI 52100 numunesinin çekme dayanımı, 200 mN yükünde 11,48 GPa'dan 400 mN yükünde 9,18 GPa değerine keskin bir düşüş vardır, yükün artırılması ile birlikte 1000 mN'da 7,96 GPa değerine azalmıştır.

6.4.5 h_r/h_{max} ve Yükleme Eğriliği (C)

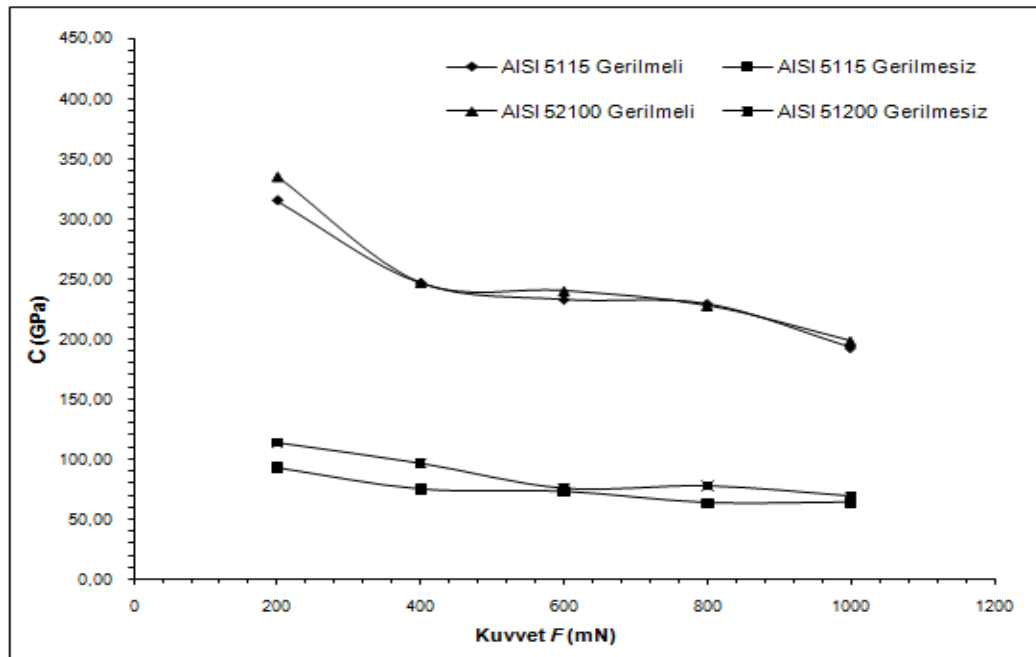
h_r/h_{max} ve C değerleri numunelerin elastik özelliklerini göstermektedir. C sembolü, $P=Ch^2$ gibi indentasyon eğrisinin yükleme kısmındaki etkendir. Şekil 6.17 te görüldüğü gibi AISI 5115 ve AISI 52100 numunesinin ısıl işlem rejimi sonrasında artık derinliğin maksimum derinliğe oranı (h_r/h_{max}); gerilmemiş numunelerin oranından daha düşüktür. Ayrıca, her iki kalite çeliklerin gerilmeli ve gerilmemiş numunelerinin durumlarında da benzerlik görülmektedir. Bu grafiğe bakılarak, batma derinlik oranları, gerilmeli numunelerin elastik değişimlerinin, gerilmemiş numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Isıl işlem görmüş ve ham numunelere aynı yük altına yapılan deneylerde (h_r/h_{max}) oranın birbirinden farklı çıkmasının ana nedeni yapılan ısıl işlemin malzeme üzerinde bıraktığı etkidir. Bu etki aynı yük altına aynı malzemede farklı batma derinlikleri ortaya çıkarmıştır. Isıl işlem öncesi oran 0,90 değerlerinde değişirken, ısıl işlem sonrası 0,70 değerine düşüş göstermiştir.

Malzemelerin batmaya karşı gösterdiği direnç olan C katsayısı ısıl işlem öncesi artan yüklere bağlı olarak 150 GPa ile 100 GPa arasında değişirken ısıl işlem sonrası bu değer oldukça artmış 350 GPa ile 270 GPa arasında değişim göstermiştir. Çünkü ısıl işlem sonrası malzemenin batmaya karşı gösterdiği direnç artmıştır. Bir başka deyişle aynı yük altında ısıl işlem sonrasında daha az batma derinliğine ulaşılmıştır.



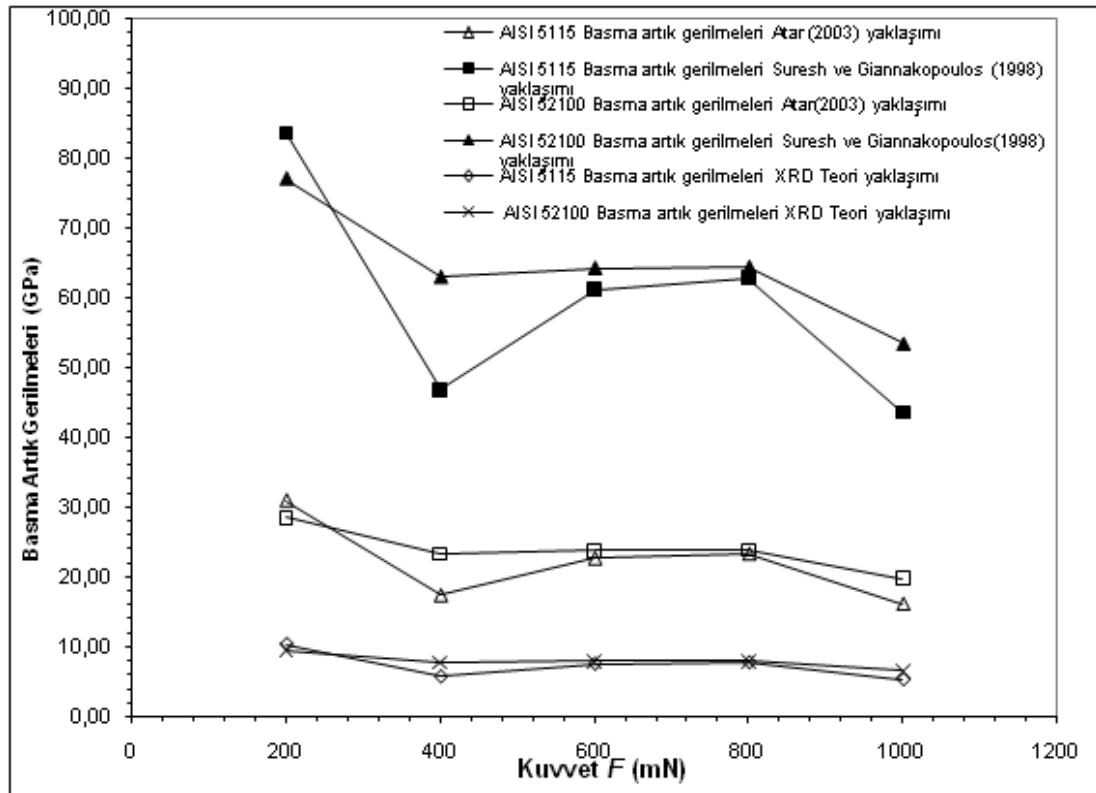
Şekil 6.17 Artık gerilmeli ve gerilmesiz AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklerinin h_r/h_{max} grafiği



Şekil 6.18 Artık gerilmeli ve gerilmesiz AISI 5115 and AISI 52100 kalite çeliklerinin $C -$ Kuvvet (F) eğrileri

6.5 Artık Gerilme Hesaplamaları

Şekil 6.9 ve Şekil 6.12 da AISI 52100 ve AISI5115 kalite çeliklerin yüklenme-boşaltma eğrilerinden bunların ısıl işlemleri sonucunda, basma karakterli artık gerilmeler olduğu görülmüştü. Bölüm 3’te bahsedilen geri analiz algoritmaları kullanılarak, herbir malzemenin elasto-plastik özellikleri belirlenmiştir. Buradan temas alanları oranı ısıl işlemlili ve ısıl işlemsiz numuneler için bulunmuştur. Bu sonuçlardan yola çıkarak, Atar (2003) ve Suresh ve Giannakopoulos (1998) metotlarının herbiri numuneler üzerine uygulanmıştır. Böylece her iki yaklaşım ile basma artık gerilme değerleri hesaplanmıştır. AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklerinin basma artık gerilme değerleri indentasyon metodu ile Şekil 6.18 ‘de gösterildiği şekilde bulunmuştur. Bu değerlerin yanı sıra XRD teorisi yaklaşımı da karşılaştırma yapılabilmesi için yer almıştır. Temas alanları arasındaki farkların hesaplanması sonucunda, bu farkların artık gerilme sonuçlarını doğrudan etkilediği görülmüştür.



Şekil 6.21 AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklerinin (üç farklı teori için) farklı yükler altında basma artık gerilme değişimleri

Tablo 6.1 AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklerinin farklı yaklaşımlar ile çeşitli indentasyon yükleri altında basma artık gerilme değerleri

Kuvvet/Basma Artık Gerilme	Yaklaşımlar	Kuvvet (mN)					
		AISI Kalite Numune	200 mN	400 mN	600 mN	800 mN	1000 mN
Basma Artık Gerilme Değerleri (GPa)	Suresh ve Gianna. (1998)	5115	83,48	46,83	61,11	62,83	43,51
		52100	76,92	62,96	64,21	64,36	53,43
	Atar (2003)	5115	30,83	17,33	22,61	23,25	16,10
		52100	28,46	23,29	23,76	23,81	19,77
	XRD Teorisi	5115	10,30	5,78	7,54	7,75	5,37
		52100	9,49	7,76	7,92	7,94	6,59

Suresh ve Giannakopoulos (1998) yaklaşımı ile AISI 5115 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 83,48 GPa'dan 1000 mN yükünde 43,51 GPa değerine düşmüştür. AISI 52100 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 76,96 GPa'dan 400 mN yükünde 62,96 GPa değerine düşmüş, 1000 mN yükünde 53,43 GPa değerine düşmüştür.

Atar (2003) yaklaşımı ile AISI 5115 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 30,89 GPa'dan 400 mN yükünde 17,33 GPa değerine düşmüş, sonra hafif bir artış göstermiş, 1000 mN yükünde 16,10 GPa değerine azalmıştır. AISI 52100 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 28,46 GPa değerinden 1000 mN yükünde 19,77 GPa değerine düşmüştür. 400, 600 ve 800 mN yüklerinde yakın gerilme değerleri vermiştir.

Atar ve Giannakopoulos'un geçmiş çalışmaları temel alınarak yapılan hesaplamalar oldukça yüksek artık basma gerilmeleri ortaya çıkarmıştır. Kullanılan teorilerden elde edilen bu sonuçlar birbiri içinde yaklaşık 3 kat fark olduğunu gösteren değerlerdir. Teorik hesaplama tekrar incelendiğinde Atar ve Giannakopoulos arasındaki bu farkın temas açısı ~~çerçevesinde~~ kaynaklanmaktadır.

XRD teorisi yaklaşımı ile AISI 5115 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN uygulama yükü altında 10,30 GPa'dan 400 mN uygulama yükünde 5,78 GPa değerine düşmüş, sonra çok az bir artış göstererek 800 mN yükünde 7,75 GPa

değerine yükselmiş, 1000 mN yükünde 5,37 GPa değerine tekrar düşmüştür. AISI 52100 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 9,49 GPa değerinden 1000 mN yükünde 6,59 GPa değerine düşmüştür. XRD yöntemiyle teorik olarak hesaplanan ve grafiğe işlenen bu değerler ise Atar'ın çalışmasındaki deneysel ve uygulamalı XRD yöntemiyle hesaplanan artık gerilme karşılaştırması baz alınmıştır. Çalışmalarında hem XRD yöntemiyle hemde indentasyon yöntemiyle artık gerilme hesabı farklı numunelerde yapılmış ve birbiri arasında bağıntı kurulmuştur. Bu bağıntıya göre indentasyon yöntemiyle hesaplanan artık gerilme değerleri XRD yöntemine göre 3 kat fazla çıkmıştır. Bu çalışmada ise literatürdeki indentasyon yöntemiyle artık gerilme hesapları karşılaştırılmış olup Atar'ın sonuçları AISI 5115 ve AISI 52100 kalite çeliklere uygulanmıştır. Uygulama sonucunda ise GPa seviyelerinde değerlere ulaşılmıştır. Yapılan indentasyon deneyleri incelendiğinde mikrometre seviyelerinde batma derinliklerine ulaşılmıştır. Bu oldukça küçük deformasyon değerlerinde, yapıdaki fazların tamamını kapsayan bir değere ulaşılması hedeflenmiştir. Mekanik değerlerin belirlenmesinde uygun makro değerlere ulaşılan deformasyonda artık gerilme hesaplamaları yapılmıştır. Yinede artık gerilme sonuçları malzemelerin teorik mukavemetlerinden fazla değerlerde bulunmuştur. İndentasyon sonucu oluşan deformasyona bağlı hesaplanan artık gerilmeler, minimum yükte yaklaşık 10 taneyi içermektedirken maksimum yükte ise yaklaşık 25 taneyi kapsamaktadır. Ölçülen alan baz alındığında ise minimum ve maksimum yükte temas alanı 2,25 mikrometre ile 9,29 mikrometre arasında değişmektedir. Dolayısıyla ölçüm yapılan alan malzemenin mikron seviyesindeki bir bölgesini içine almaktadır. Teoride ise bu durum detaylandırılmamış olmasına rağmen, yapıda ısıtılma sonucunda östenit ve martenzit fazları arasındaki kristal kafes sistemlerindeki farklılıklar taneler için oldukça küçük bir bölgede yüksek gerilim bölgeleri yaratmaktadır. Bu etki mikrometre seviyesindeki deformasyonlarda kendini daha kolay göstermektedir. Her ne kadar indentasyon deneyi ile malzemelerin makro seviyedeki mekanik özelliklerinin aynı seviyelerde belirlendiği yük aralığı seçilsede, artık gerilme hesabında kullanılan görünür alanlardaki ve batma derinliğindeki yüksek farklar, artık gerilmelerin GPa seviyelerinde çıkmasına neden olmuştur.

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR

7.1 Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, AISI 5115 and AISI 52100 kalite çeliklerinin artık gerilmeleri üzerine indentasyon metodu ile çalışılmıştır. Bu çeliklerin sertlik, young modülü, akma dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri, artık gerilme tipi ve büyüklüğü belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar sırasıyla:

1- Optik Mikroskop Analizi:

16MnCr5 sementasyon ve 100Cr6 rulman çelikleri numunelerinin mikroyapı incelemeleri sonucu; 16MnCr5 çeliği numunesinin ham durumunda mikroyapısının ferrit matrisi içerisinde perlit yapı, sementasyon işlemi sonrasında mikroyapısının martenzit yapı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ısıtma işlemi görmüş ve ham 16MnCr5 çelik numunelerde 200, 400, 600, 800 ve 1000 mN uygulama yükleri sonucu oluşan vickers izlerinin fotoğrafları görülmektedir.

100Cr6 çeliği numunesinin ham durumunda mikroyapısının küresel sementit ve perlit yapı, ısıtma işlemi sonrasında mikroyapısının sementit ve martenzit yapı olduğu gözlemlenmiştir. Isıtma işlemi görmüş ve ham numuneler üzerinde 200, 400, 600, 800 ve 1000 mN uygulama yükleri sonucu oluşan vickers izlerinin fotoğrafları görülmektedir.

2- SEM Analizi:

SEM görüntüleri sonucunda 16MnCr5 numunesinin ham haldeyken ferrit perlit yapıları, ısıtma işlemi sonrasında ki yapıya bakıldığında, martenzit yapı görülmektedir. 100Cr6 numunesinin ham haldeyken ferrit sementit yapıları, ısıtma işlemi sonrasında ki yapıya bakıldığında sementit martenzit yapılar görülmektedir. Fotoğraflarda, ısıtma işlemi öncesi inklüzyonlar ve ısıtma işlemi sonrası yapıda karbürler, inklüzyon ve artık östenit yapısı (açık rekli olan

kısımlarda) olduğu düşünülmektedir. İndentasyon çalışması sonucu oluşan piramit iz gözlenmiştir.

3- Yükleme-Yük Boşaltma (Load-Unload Curves) Eğrileri Analizi:

AISI 5115 (16MnCr5) ve AISI 52100 (100Cr6) kalite çeliklerinin ısıtma işlemi görmüş durumdaki yükleme eğrileri (loading), ham durumdaki yükleme eğrilerinin solunda kalmıştır. Bu sonuca göre, numunede ısıtma işlemi sonrasında oluşan gerilmelerin basma karakterli artık gerilmeler olduğu görülmüştür.

4- X-Işınları Yöntem İle Artık Östenit Tayini:

16MnCr5 numunesinin artık östenit tayini sonucunda hesaplanan artık östenit miktarı %11.1 bulunmuştur. 100Cr6 numunesinin artık östenit tayini sonucunda hesaplanan artık östenit miktarı %21.2 bulunmuştur.

5- Elastisite Modül (E) Analizi:

Ham AISI 5115 numunesinin elastisite modülü, 200 mN yükünde 174,71 GPa'dan 1000 mN yükünde 124 GPa değerine sürekli bir düşüş göstermiştir; ancak değerler birbirine oldukça yakındır. Ham AISI 52100 numunesinin elastisite modülü, 200 mN yükünde 182,45 GPa'dan 400 mN yükünde 184,33 GPa değerine çok az bir artış olmuş, daha sonra sürekli bir azalma göstererek 1000 mN yükünde 125,33 GPa değerine düşüş göstermiştir.

Isıtma işlemi görmüş AISI 5115 numunesinin elastisite modülü, 200 mN yükünde 262,67 GPa'dan 1000 mN yükünde 169,67 GPa değerine sürekli bir düşüş göstermiştir; ancak değerler birbirine yakındır. Isıtma işlemi görmüş AISI 52100 numunesinin elastisite modülü, 200 mN yükünde 301,67 GPa'dan 400 mN yükünde 217,33 GPa değerine keskin bir düşüş olmuş, daha sonra sürekli bir azalma göstererek 1000 mN yükünde 167,43 GPa değerine düşüş göstermiştir.

6- Sertlik (H) Analizi:

Numunelerin sertlik çalışmaları Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Uygulama yükünü 200 mN'dan 1000 mN değerine çıkardığımızda, ısıtma işlem görmemiş AISI 5115 ve 52100 kalite çeliklerinin sertlik değerleri sırasıyla 200 mN yükünde 4,59'den 1000 mN yükünde 3,04 GPa değerine ve 200 mN yükünde 5,40 değerinden 1000 mN yükünde 3,38 GPa değerine düşmüştür. Ancak her iki gerilmemiş numunenin sertliği, birbirine yakın değerlerdedir. Benzer uygulama yükleri altında (200 mN- 1000 mN), sırasıyla 24,92 değerinden 14,69 GPa ve 26,60 değerinden 16,09 GPa değerlerine azalmıştır.

Isıtma işlem rejimi sonrasında basma artık gerilmeleri oluşması (azalan temas alanı) sonucu, gerilmeli AISI 5115 numunesinin sertliği, 200 mN yükünde 24,92 GPa'dan 600 mN yükünde 17,87 GPa değerine bir düşüş yapmış, 800 mN yükünde 20,55 GPa değerine artış göstermiş sonra tekrar 1000 mN yükünde 14,69 GPa değerine düşmüştür. Isıtma işlem görmüş AISI 52100 numunesinin sertliği, 200 mN yükünde 26,60 GPa'dan sürekli bir düşüş göstererek 1000 mN yükünde 16,09 GPa değerine düşmüştür. Genel olarak, ham ve ısıtma işlem görmüş numunelerin sertlik değerlerinin artan yüklerle azaldığı görülmüştür.

7- Akma Dayanımı ve Çekme Dayanımı Analizi:

Ham AISI 5115 numunesinin akma dayanımı, 200 ve 1000 mN yük aralığında çok az bir değişim göstermiştir. 200 mN yükü altında 1,13 GPa'dan 400 mN yükünde 1,42 GPa değerine yükselmiş daha sonra 1000 mN yükünde 1,27 GPa değerine düşmüştür. Ham AISI 52100 numunesinin akma dayanımı, 200 mN yükünde 1,47 GPa'dan az bir dalgalanma göstererek 1000 mN yükünde 1,35 GPa değerine düşüş göstermiştir. Her iki numunenin 600 ve 800 mN daki değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır.

Isıtma işlem rejimi sonrasında, gerilmeli AISI 5115 numunesinin akma dayanımı, 200 mN yükünde 5,47 GPa'dan sürekli bir artış ile 800 mN yükünde 5,91 GPa değerine bir yükselmiş, sonra tekrar 1000 mN yükünde

4,94 GPa değerine düşmüştür. Isıl işlem görmüş AISI 52100 numunesinin akma dayanımı, 200 mN yükünde 6,98 GPa'dan 400 mN yükünde 5,94 GPa değerine düşmüş, daha sonra 600 mN yükünde 6,18 GPa değerine yükselmiş ve tekrar düşüş göstererek 1000 mN yükünde 5,47 GPa değerini almıştır.

Isıl işlem rejimi sonrasında, gerilmeli AISI 5115 numunesinin çekme dayanımı, 200 mN yükünde 9,39 GPa değerinden 800 mN yükünde 8,75 GPa değerine kadar fazla bir değişim göstermemiş, 1000 mN yükünde ise 7,46 GPa değerine düşmüştür. Isıl işlem görmüş AISI 52100 numunesinin çekme dayanımı, 200 mN yükünde 11,48 GPa'dan 400 mN yükünde 9,18 GPa değerine keskin bir düşüş vardır, yükün artırılması ile birlikte 1000 mN'da 7,96 GPa değerine azalmıştır.

8- h_r/h_{max} ve Yükleme Eğriliği (C)

AISI 5115 ve AISI 52100 numunesinin ısıl işlem rejimi sonrasında artık derinliğin maksimum derinliğe oranı (h_r/h_{max}), gerilmesiz numunelerin oranından daha düşüktür. Ayrıca, her iki kalite çeliklerin ısıl işlem görmüş ve ham numunelerinin durumlarında da benzerlik görülmektedir. Bu grafiğe bakılarak, batma derinlik oranları, ısıl işlem görmüş numunelerin elastik değişimlerinin, gerilmesiz numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Isıl işlem görmüş numunelerin C değerleri (direnc eğriliği), ham AISI 5115 ve AISI 52100 numunelerinde çok az bir değişimle birlikte değerleri birbirine yakın seyretmiştir. Isıl işlem görmüş numunelerde bu değerler yine birbirlerine çok yakındır. Artan uygulama yükleri ile sürekli bir düşüş göstermiştir.

9- Artık Gerilme Hesaplamaları:

Suresh ve Giannakopoulos, (1998) yaklaşımı ile AISI 5115 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 83,48 GPa'dan 400 mN yükünde 46,83 GPa değerine düşmüş, daha sonra 800 mN yükünde 62,83 GPa değerine kadar artış göstermiş, 1000 mN yükünde 43,51 GPa değerine

düşmüştür. AISI 52100 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 76,96 GPa'dan 400 mN yükünde 62,96 GPa değerine düşmüş, 600 ve 800 mN yüklerinde hafif artış göstermiş, 1000 mN yükünde 53,43 GPa değerine düşmüştür.

Atar (2003) yaklaşımı ile AISI 5115 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 30,89 GPa'dan 400 mN yükünde 17,33 GPa değerine düşmüş, sonra az bir artış göstermiş, 1000 mN yükünde 16,10 GPa değerine azalmıştır. AISI 52100 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 28,46 GPa değerinden 1000 mN yükünde 19,77 GPa değerine düşmüştür. 400, 600 ve 800 mN yüklerinde yakın gerilme değerleri vermiştir.

XRD teorisi yaklaşımı ile AISI 5115 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 10,30 GPa'dan 400 mN yükünde 5,78 GPa değerine düşmüş, sonra az bir artış göstererek 800 mN yükünde 7,75 GPa değerine yükselmiş, 1000 mN yükünde 5,37 GPa değerine tekrar düşmüştür. AISI 52100 numunesinin basma artık gerilme değerleri, 200 mN yükü altında 9,49 GPa değerinden 1000 mN uygulama yükünde 6,59 GPa değerine düşmüştür.

7.2 Öneriler

- 1- Bir sonraki çalışmada, AISI 5115 ve 52100 kalite çelikleri için X-ışınları tekniği ile artık gerilme tayini yapılması tavsiye edilebilir. Her iki tekniğin karşılaştırılması ile indentasyon tekniğinin artık gerilme ölçümünde endüstriyel alanda uygulanabilirliği ile daha iyi açıklanabilecektir.
- 2- Başka bir çalışmada, indentasyon tekniği ile artık gerilme tayini, yarı iletkenler, kaplamalar ve ince film kaplamalar üzerine geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Asi, O. ve Asi, D. (2003). An investigation of residual stresses developed in carburized SAE 8620 steel. *Gazi University Journal of Science* 16, 725-732.
- Asi, O. ve CAN, A. Ç. (2003). The comparison of the residual stresses between carburized and only quenched steels. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 7(2), 183-187.
- ASTM E 975-84, Standart Practise For X-Ray Determination Of Retained Austenite In Steel With Near The Random Crystallographic Orientation, ASTM (1989).
- Atar, E., Sarioğlu, C. ve diğer., (2003). Residual stress estimation of ceramic thin films by X-ray diffraction and indentation techniques. *Scripta Materialia* 48, 1331-1336.
- Chen, X., Yann, J., Anette, M.K. (2006). On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation. *Materials Science and Engineering: A* 46, 139-149.
- Anderoglu, O. (2004). *Residual stress measurement using x-ray diffraction*, Master Thesis, Texas A&M University.
- Demirler, U. ve Taptık, Y. (2005). FBB TiN kaplamalarda taban malzemenin kalıntı gerilme üzerine etkisi. *itüdergisi/dmühendislik* 4(1), 95-102
- Dilmeç, M., Yiğit, O., Halkacı, H.E. (2008). Measurement of residual stresses with layer removal method and comparison with other methods. *Mühendis ve Makine* 49, 20-27.

- Dronavalli, S. B. (2001). *Residual stress measurements and analysis by destructive and non destructive techniques*, Master Thesis, Graduate College University of Nevada, Las Vegas.
- Dub, S., Novikov, N., Milman, Y. (2002). The transition from elastic to plastic behaviour in an Al-Cu-Fe quasicrystal studied by cyclic nanoindentation. *Philosophical Magazine A* 82, 2161–2172.
- Giannakopoulos, A. E., ve Suresh S., (1999). Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation. *Scripta Materialia*, 40(10), 1191-1198.
- Hummel, R. E. (2004). *Understanding materials science*, (2nd edition). Springer.
- Karataş, Ç., Fetullayev, E., Kafkas, F. (2001). The research into the residual stresses on the root's teeth of a gear wheel made of AISI 5115 steel. *Journal of Faculty Engineering Architecture Gazi University* 16, 9-18.
- Nishibori, M. ve Kinoshita, K. (1978). Ultra-microhardness of vacuum-deposited films I: Ultra-microhardness tester. *Thin Solid Films* 48, 325-331.
- Oliver, W.C. ve Pharr, G.M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic-modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research* 7, 1564-1583.
- Pappas, N. (2006). Calculating Retained Austenite In Steel Post Magnetic Processing Using X-Ray Diffraction. *B.S. Undergraduate Mathematics Exchange*, 4(1).
- Pharr, G. M., ve Bolshakov A. (2002). Understanding nanoindentation unloading curves. *Journal of Materials Research*, 17(10), 2665-2666.

- Reibold, M., Belger, A. et al. (2005). The impact of nanoindentation at room temperature upon the real structure of decagonal AlCoNi quasicrystals. *Physica Status Solidi A-Applications and Materials Science* 202, 2267–2276.
- Sahin, S., Toparli, M. et al. (2003). Modelled and measured residual stress in a biomaterial joint. *Journal of Materials Processing Technology* 132, 235-241.
- Stickels, C.A. & Janotik, A.M. (1980). Controlling residual stress in 52100 bearing stress by heat treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A* 11, 467-473.
- Suresh, S. & Giannakopoulos A.E. (1998). A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation. *Acta Materialia* 46, 5755-5767.
- Tabor, D., (1951). *Hardness of Metals*. Oxford: Clarendon Press.
- Uzun, O., Kölemen, U., Çelebi, S., Güçlü, N. (2005). Modulus and hardness evaluation of polycrystalline superconductors by dynamic microindentation technique. *Journal of European Ceramic Society*, 25, 969-977.
- Yalçın Y. (1999). Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir’de Kalıntı Östenit Miktarının X-ışını Difraksiyonu ile Belirlenmesi. *Metal Dünyası*, 68, 31-34
- Yao, Z. (2005). *Development of an Indentation method for material surface mechanical properties measurement*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Morgantown, Virginia.
- Yelbay, H. İ. (2008). Tahribatsız yöntemlerle kalıntı gerilim ölçümündeki gelişmeler. *3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition*, İstanbul.
- Yiğit, O., Dilmeç, M. ve Halkacı, H. S. (2008). Tabaka kaldırma yöntemi ile kalıntı gerilmelerin ölçülmesi ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması. *Mühendis ve Makine*, 49 (579).