

**AISI 4140 ÇELİĞİNDE SERTLİK,YORULMA DAYANIMI VE
KALICI GERİLME İLİSKİSİ**

Mehmet SUBASI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2006
ANKARA**

Mehmet SUBASI tarafından hazirlanan AISI 4140 ÇELIGINDE SERTLIK, YORULMA DAYANIMI VE KALICI GERILME ILISKISI adli bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun oldugunu onaylarim.

Yrd. Doç.Dr. Çetin KARATAS

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmistir.

Baskan: : Prof. Dr. Muammer NALBANT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Çetin KARATAS

Üye : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

Üye : Prof. Dr. Ulvi SEKER

Üye : Prof. Dr. A. Tamer ÖZDEMİR

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazim kurallarına uygundur.

**AISI 4140 ÇELİGINDE SERTLIK, YORULMA DAYANIMI VE KALICI
GERİLME İLİSKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Mehmet SUBASI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2006**

ÖZET

Bu çalışmada; sertleştirilmeye tabi tutularak farklı sertlik değerleri elde edilmiş AISI 4140 çelik malzemesinin yorulma dayanımının kalıcı gerilmeye etkisi katman kaldırma (elektro kimyasal) yöntem kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler 40, 45 ve 50 HRC sertlik değerine getirilerek deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda tornalanmış, 40, 45 ve 50 HRC sertleştirilmiş numunelerin yorulma dayanımları sırası ile 463, 783, 792, 739 MPa olarak bulunmuştur. 45 HRC sertleştirilmiş numunede yorulma dayanımı en iyi çıkmıştır. Kalıcı gerilme ölçümleri sonucunda numunelerin yüzeylerinde kalıcı çekme gerilmeleri bulunmuştur. Bulunan değerler sırası ile 210, 169, 299, 203 MPa'dır.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Kalıcı gerilmeler, sertleştirme, elektro kimyasal işleme, yorulma dayanımı
Sayfa Adedi : 107
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Çetin KARATAS

**RELATION OF HARDENING, FATIGUE STRENGTH AND RESIDUAL
STRESS IN AISI 4140 STEEL
(M.Sc. Thesis)**

Mehmet SUBASI

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2005

ABSTRACT

In this work, an AISI 4140 steel material having different hardness grades has been examined due to the effect of fatigue strength versus residual stress using electro-chemical layer removing technique. The sample materials used in the work first had been brought to 40,45,50 HRC hardness grades and then the experiments were carried out. At the end of the experiments, the fatigue strengths of the materials which were turned and quenched to the HRC 40, 45, 50 grades have been found to be 463,783,792 and 739 MPa respectively. Fatigue strength has been found to be the best in 45 HRC quenched specimen. At the end of the measurements of residual stresses, tensile residual stresses have been observed on the surface of the samples. These measurements are 210, 169, 299 and 203 MPa respectively.

Science code : 708.3.028
Key Words : Residual stresses, hardening, electro chemical processing,
fatigue strength
Page Number : 107
Adviser : Assis. Prof. Dr. Çetin KARATAS

TESEKKÜR

Bu alışma süresince, konu tespitinden son aşamaya kadar her türlü yardımı esirgemeyen ve değerli katkılarıyla beni yönlendiren saygı değer tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. etin KARATAS'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Ars. Gör. Fırat KAFKAS'a, çalışmalarım boyunca göstermiş oldukları sabır ve desteklerden dolayı aileme, nisanlıma ve emegi geçen bütün arkadaşlarıma tesekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TESEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
SEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARASTIRMASI.....	3
3. YORULMA.....	25
3.1. Yorulmada Çatlak Olusumu.....	27
3.2. Yorulma Kirilmaları.....	28
3.3. Yorulmayı Etkileyen Faktörler.....	30
3.3.1. Malzeme cinsinin, bileşiminin ve yapısının etkisi.....	30
3.3.2. Yüzey özelliklerinin etkisi.....	32
3.3.3. Çentik etkisi.....	33
3.3.4. Gerilmelerin etkisi.....	34
3.3.5. Korozyon ortamının etkisi.....	39
3.3.6. Sıcaklığın etkisi.....	40
3.3.7. Frekansın (Deney hızının) etkisi.....	41
3.4. Yorulma Deney Türleri	42
3.4.1. Wöhler yorulma deneyi.....	42

	Sayfa
4. KALICI GERİLME ve YORULMA İLİSKİSİ.....	48
4.1. Kalıcı Gerilmelerin Oluşumu ve Yorulma Dayanımı.....	50
4.1.1. Mekaniksel metotlar ile oluşturulan kalıcı gerilmeler	51
4.1.2. Termal metotlar ile oluşturulan kalıcı gerilmeler	53
4.1.3. Kaplama metotları ile oluşturulan kalıcı gerilmeler	55
4.1.4. İmalat metotları ile oluşturulan kalıcı gerilmeler.....	56
4.2. Kalıcı Gerilme Ölçüm Metotları.....	57
5. MATERYAL VE METOT.....	58
5.1. Giriş.....	58
5.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	58
5.3. Deney Cihazları ve Takımlar	60
5.4. Deneylerin Yapılışı	63
5.4.1. Yorulma deneyleri	63
5.4.2. Kalıcı gerilme deneyleri	64
6. SONUÇ VE TARTISMA.....	67
6.1. Giriş.....	67
6.2. Yorulma Deney Sonuçları.....	67
6.3. Kalıcı Gerilme Deney Sonuçları.....	74
6.3.1. Törnelenmiş numuneler.....	74
6.3.2. 40 HRC sertleştirilmiş numuneler.....	79
6.3.3. 45 HRC sertleştirilmiş numuneler.....	84
6.3.4. 50 HRC sertleştirilmiş numuneler.....	89
6.3.5. Yorulma işlemi uygulanmamış ve belirlenen seviyelerde yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	94

	Sayfa
6.3.6. Yorulma kalıcı gerilme ilişkisi.....	99
6.4. Sonuç..	102
6.5. Öneriler	103
KAYNAKLAR.....	104
ÖZGEÇMİS.....	107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. % 0,23 C’lu çeligin kimyasal kompozisyonu (%).....	5
Çizelge 2.2. Numune malzemelerinin kimyasal bileşimleri (%).....	6
Çizelge 2.3. AISI 4140 çeligin kimyasal bileşimi	12
Çizelge 2.4. Dökme demir malzemenin kimyasal bileşimi (%).....	17
Çizelge 2.5. İndüksiyon sertleştirme parametreleri.....	19
Çizelge 2.6. Numunenin kimyasal yapısı.....	20
Çizelge 2.7. AISI 4140 deney malzemesinin kimyasal bileşimi.....	22
Çizelge 5.1. AISI 4140 çeliginin kimyasal bileşimi	58
Çizelge 5.2. Su verilmiş ve temperlenmiş AISI 4140 çeliginin mekanik özellikleri.....	58
Çizelge 5.3. Isıl işlem parametreleri.....	60
Çizelge 5.4. Kalıcı gerilmesi ölçülen numune seviyeleri.....	64
Çizelge 5.5. Kalıcı gerilme deney numuneleri grupları.....	65
Çizelge 6.1. AISI 4140 Yorulma dayanımı değerleri.....	71
Çizelge 6.2. Tornalanmış AISI 4140 çeliginin farklı seviyelerdeki kalıcı gerilmeleri.....	78
Çizelge 6.3. 40 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginin farklı seviyelerdeki kalıcı gerilmeleri.....	83
Çizelge 6.4. 45 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginin farklı seviyelerdeki kalıcı gerilmeleri.....	88
Çizelge 6.5. 50 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginin farklı seviyelerdeki kalıcı gerilmeleri.....	93
Çizelge 6.6. Farklı sertliklerdeki yorulma işlemi uygulanmamış AISI 4140 çeliginin yüzeyindeki çekme kalıcı gerilme değerleri.....	95
Çizelge 6.7. Deneylerden elde edilen sonuçlar.....	101

SEKİLLERİN LİSTESİ

Sekil	Sayfa
Sekil 2.1. Sekil 2.1. Numune örneği.....	3
Sekil 2.2. % 0,2 Uzamada yorulma testi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin kalıcı gerilme profilleri.....	4
Sekil 2.3. Yorulma çevrimleri ile kalıcı gerilmenin azalması	6
Sekil 2.4. Dövme (Almen) siddetinin kalıcı gerilmelere etkisi.....	9
Sekil 2.5. Yorulma testinde çekme kalıcı gerilmesinin azalması.....	10
Sekil 2.6. Deney numunesi.....	13
Sekil 2.7. Isınım uygulanmamış AISI 4140 çeliginin yorulma grafiği.....	13
Sekil 2.8. Isınım uygulanmış AISI 4140 çeliginin yorulma grafiği.....	14
Sekil 2.9. Yüksek enerjili elektron isini ile ısınanmış AISI 4140 çeliginin yorulma grafiği.....	15
Sekil 2.10. İndüksiyonla sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginin yorulma grafiği.....	15
Sekil 2.11. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş çeligin yorulma limitinde sertliğin etkisi.....	16
Sekil 2.12. Bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş numunelerdeki kalıcı gerilme dağılımları.....	17
Sekil 2.13. Bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş numunelerin S-N grafiği.....	18
Sekil 2.14. Yüzeydeki kalıcı gerilme durumu.....	20
Sekil 2.15. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş numunedeki kalıcı gerilme dağılımı.....	21
Sekil 2.16. İndüksiyon ile ısıtılıp sertleştirilip temperlenen numunedeki kalıcı gerilme dağılımı.....	22
Sekil 2.17. Yorulma deney numuneleri a) Havadaki yorulma b) Korozyonlu yorulma deneylerinde kullanılan deney numuneleri.....	23

Sekil	Sayfa
Sekil 2.18. Temperlenen ve nitrürlenen numunelere ait yorulma diyagramlari.....	24
Sekil 3.1. Yorulma ömrünün ve bunun gerilme seviyelerine bağımliliginin sematik görünümü.....	26
Sekil 3.2. Bir extrusion (�ekme) ve bir intrusion (basma) meydana getiren kayma hareketi.....	27
Sekil 3.3. Malzemelere asiri y�k uyguladığında malzemede olusan kırılma tipleri.....	29
Sekil 3.4. Degisik islem g�rm�s malzemelerin yorulma limit degerleri	31
Sekil 3.5. D�s�k karbonlu �elik için yük/uzama grafigi.....	35
Sekil 3.6. Alüminyum alasimi için gerilme-gerinim egrisi.....	36
Sekil 3.7. Tavlanmış bir yumusak çeligin gerilme-gerinim egrisi.....	37
Sekil 3.8. Gerilme denemesi.....	39
Sekil 3.9. Yorulma deneylerinde kullanılan Wöhler makinelerinin prensip semasi.....	44
Sekil 3.10. Wöhler makineleri “Serbest Uçlu Kiris” test düzenegi.....	44
Sekil 3.11. Yorulma gerilim periyotlari.....	45
Sekil 3.12. �elik ve demir olmayan malzemelerin tipik Wöhler diyagrami.....	46
Sekil 4.1. Metallerin islenmesi sırasında kalici gerilmelerin genel olusumu a) Levhanin haddelenmesi sırasında homojen olmayan deformasyon, b) Levha kalınlığı boyunca olusan kalici gerilme dagilimi	49
Sekil 4.2. Elastik olmayan egmede kalici gerilme dagilimi a)Elastik olamayan yükleme esnasında gerilme dagilimi b)Yük kaldırıldıktan sonraki elastik iyilesme c)Yükleme bosaltmadan sonra ortaya çıkan kalici gerilme dagilimi.....	52

Sekil	Sayfa
Sekil 4.3. Çelikte bilyeleme sonucu oluşturulan basma kalici gerilmesinin çekme dayanimına karsiligi.....	53
Sekil 4.4. SAE 1045 çeligiden yapilmis 40 mm çapındaki indüksiyon sertlestirilmis saft numunelerin x-ray yöntemi ile ölçülmüs kalici gerilme dagilimleri.....	55
Sekil 4.5. Bilyelenmis ile krom kaplanmış 4130 çeliginde krom kaplamanın aksenel yüklemde yorulma davranisina etkisi.....	56
Sekil 5.1. Deney numunesi.....	59
Sekil 5.2. Deneylerde kullanılan numune gruplari.....	60
Sekil 5.3. Yorulma deney cihazı.....	61
Sekil 5.4. Sematik olarak kalici gerilme deney cihazı 1) Pompa 2) Asit 3) Gösterge 4) DC Güç kaynagi 5) Kablo 6) Linear Gage 7) Numune 8) Katot 9) Hortum 10) Asit deposu.....	62
Sekil 5.5. Numune üzerindeki maksimum gerilme.....	63
Sekil 5.6. Koruyucu malzeme ile kaplanmış numune.....	65
Sekil 6.1. AISI 4140 tornalanmış numunenin S-N grafigi.....	68
Sekil 6.2. AISI 4140 40 HRC sertlikteki numunenin S-N grafigi.....	69
Sekil 6.3. AISI 4140 45 HRC sertlikteki numunenin S-N grafigi.....	70
Sekil 6.4. AISI 4140 50 HRC sertlikteki numunenin S-N grafigi.....	70
Sekil 6.5. AISI 4140 çeliginin farklı sertliklerdeki yorulma dayanimleri.....	71
Sekil 6.6. AISI 4140 sadece tornalanmış numunenin kalici gerilmesi.....	75
Sekil 6.7. AISI 4140 tornalanmış ve %10 yorulmuş numunenin kalici gerilmesi.....	76
Sekil 6.8. AISI 4140 tornalanmış ve %20 yorulmuş numunenin kalici gerilmesi.....	76

Sekil	Sayfa
Sekil 6.9. AISI 4140 tornalanmış ve %30 yorulmuş numunenin kalıcı gerilmesi.....	77
Sekil 6.10. Tornalanmış ve farklı seviyelerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	78
Sekil 6.11. Tornalanmış AISI 4140 çeliginde seviye-gerilme ilişkisi.....	79
Sekil 6.12. 40 HRC sertliğindeki numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	80
Sekil 6.13. 40 HRC sertliğinde ve %10 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri	80
Sekil 6.14. 40 HRC sertliğinde ve %20 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	81
Sekil 6.15. 40 HRC sertliğinde ve %30 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	82
Sekil 6.16. 40 HRC sertliğinde ve farklı değerlerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	83
Sekil 6.17. 40 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginde seviye-gerilme ilişkisi.....	84
Sekil 6.18. 45 HRC sertliğindeki numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	85
Sekil 6.19. 45 HRC sertliğinde ve %10 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	85
Sekil 6.20. 45 HRC sertliğinde ve %20 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	86
Sekil 6.21. 45 HRC sertliğinde ve %30 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	87
Sekil 6.22. 45 HRC sertliğinde ve farklı değerlerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	87
Sekil 6.23. 45 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginde seviye-gerilme ilişkisi.....	88
Sekil 6.24. 50 HRC sertliğindeki numunelerin kalıcı gerilmeleri.....	89

Sekil	Sayfa
Sekil 6.25. 50 HRC sertliginde ve %10 yorulmus numunelerin kalici gerilmeleri.....	90
Sekil 6.26. 50 HRC sertliginde ve %20 yorulmus numunelerin kalici gerilmeleri.....	91
Sekil 6.27. 50 HRC sertliginde ve %30 yorulmus numunelerin kalici gerilmeleri.....	92
Sekil 6.28. 50 HRC sertliginde ve farkli degerlerde yorulmus AISI 4140 numunelerin kalici gerilmeleri.....	92
Sekil 6.29. 50 HRC sertlestirilmis AISI 4140 eliginde seviye-gerilme iliskisi.....	93
Sekil 6.30. Yorulmamis numunelerin yüzeyindeki kalici gerilme dagilimi.....	95
Sekil 6.31. %10 seviyede yorulmus numune grubu.....	97
Sekil 6.32. %20 seviyede yorulmus numuneler.....	97
Sekil 6.33. %30 seviyede yorulmus numuneler.....	98

SIMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$s_{0,2}$	Akma dayanımı (MPa)
s_{ϕ}	Çekme dayanımı (MPa)
s_s^{rc}	Malzeme yüzeyindeki basma kalıcı gerilmesi (MPa)
s_m^{rc}	Malzemedeki maksimum basma kalıcı gerilmesi (MPa)
d	Numune çapı
E	Elastisite modülü (MPa)
F	Kuvvet (N)
h	Numuneden kesilen tabaka kalınlığı (mm)
K	Katsayı
K_f	Çentik faktörü
K_t	Teorik gerilme konsantrasyonu
q	Çentik hassasiyet indeksi
a	Lineer ısı genleşme katsayısı
$S-N$	Yorulma grafiği

Kısaltmalar	Açıklama
AISI / SAE	Amerikan Çelik Standardi
EKI	Elektro Kimyasal İşleme

1. GIRIS

Dünyada bilimsel ve teknolojik gelismeler bas döndürücü bir hizla ilerlemektedir. Yapilan arastirma ve gelistirme çalismalari ile yeni teknolojiler keşfedilmektedir. Bu gelismeler sayesinde farklı bilim alanlari birbirini tetikler hale gelmistir. Örneğin elektronik ve bilgisayar alanındaki gelismeler makine ve imalat alanındaki gelismeleri çok yakından etkilemistir.

Dinamik olarak zorlanmaya maruz makine parçalarının tasarımı sırasında kullanılan klasik mukavemet hesapları yerini yorulma dayanımını da dikkate alan hesaplama yöntemine bırakmaktadır (1).

Uygulamada çoğu zaman kuvvetin zamanla çok çabuk değişerek tesir ettiği de görülür. Yapılan deney sonuçlarına göre yükü belirli iki değer arasında tutarak, periyodik olarak değiştirmek ve değişimin sayısını yüzbinlerce arttırmakla, bir malzemenin statik sınırların çok altında yorulmasına sebep olunabilir. Yükleme boşaltmanın periyodik olarak çok tekrarı, cismin içinde meydana gelen termal ve mekanik olaylar yüzünden iç yapıda çözülme, yorulma ve kopmalar meydana getirmektedir. Buradaki kopmanın en önemli nedeni, yükün şiddetinden çok, onun periyodik olarak uzun bir süre değişmesidir. İç mekanizması çok karmaşık olan bu olaya, malzemenin yorulması denir.

Makine parçaları imal edilirken veya imalat sonrası bir işleme tabi tutulduğunda parçada iç gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler parçanın ömrünü kısaltıcı yönde etkide bulunur. Bazı hallerde ise, bu gerilmeler istenerek oluşturularak parçadaki gerilme dağılımını iyileştirmek suretiyle ömür uzatılır (1).

Günlük hayatımızda çok önemli bir yere sahip olan metal esaslı malzemelerin yorulmasının çeşitli işlemler ile minimize edilmesi hatta yok edilmesi için çalışmalar artmıştır. Isıl işlem, malzemenin önemli bazı mekanik özelliklerini iyileştirdiği gibi, metalik malzemenin yorulma dayanımını da arttırmaktadır.

Yapılan arastirmalarda makine parçalarının islenmesi ve isil islemi esnasında oluşan kalici gerilmelerin parçalara distan uygulanan gerilmeler ile birleserek etkiledigi sonucuna ulasilmistir. Ayrica bilyeleme isil islemler ile birlikte yapılması ile yorulma dayanımındaki artışın %100'e kadar çıktığı sonucuna varılmıştır.

Kalici gerilmeler mühendislik malzemelerinin yorulmalarında önemli rol oynar. Çünkü yorulma çatlakları genellikle yüzeyde baslar. Kalici gerilmelerin yüzeyde oluşması genellikle bu amaç için çok uygundur. Yüksek gerilme alanlarında, basma gerilmeleri genellikle yararlı sayılır. Çünkü basma gerilmeleri çatlak oluşumuna ve gelişimine engel olur. Bununla birlikte çekme gerilmeleri zararlıdır, çünkü çekme gerilmeleri; yüzeyde çatlak oluşumuna ve gelişimine yardımcı olur ve gerilmeli korozyon çatlamlarına öncülük eder (2- 3).

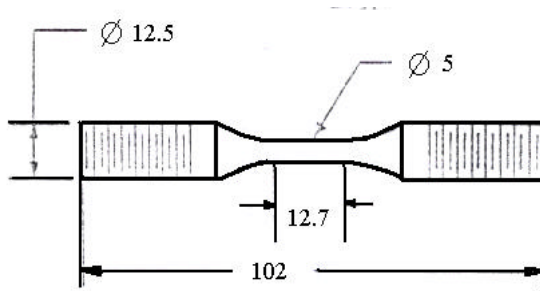
Bu çalışmada, sertleştirilmeye tabi tutularak farklı sertlik değerleri elde edilmiş AISI 4140 çelik malzemesinin yorulma dayanımının kalici gerilmeye etkisi katman kaldırma (elektro kimyasal) yöntem kullanılarak incelenmiştir. AISI 4140 çelik malzemesinde yorulma dayanımını uzatacak ve kalici gerilme ile yorulma dayanımının en uyumlu olduğu parametreler belirlenmeye çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR ARASTIRMASI

Alasim elementlerinin (karbon hariç), çeliklerin yorulma dayanımını artırması aynı zamanda çeliklerin içyapısını da degistirmesine baglidir. Özellikle uygun su verme ve temperleme işlemleri ile statik çekme dayanımı da artmaktadır. Isıl işlem uygulanacak çelik paçalarda alasim elementlerinin en önemli rolü çeliklerin su alma derinliğini arttırarak, sertliğin yüzeyden itibaren daha derin kısımlara kadar artmasını sağlamak ve dolayısıyla yorulma dayanımını artırmaktır (19). Bu konular üzerine yapılmış çalışmalar asagida verilmiştir.

Russell A. Chernenkoff, çalışmasında bilyalı dövülmüş toz metalurjisi çeliklerinde kalıcı gerilmenin yorulmaya etkisini incelemiştir. Numunelerde %0.1 ile %0.2 uzama seviyelerinde kalıcı gerilmelerin degisimleri araştırılmıştır (4).

Araştırmada kullandıkları materyal; yüksek saflıkta ATOMET 1001 çelik tozuyla %2 bakır, %35 magnezyum sülfür, %75 Acrawax 'C' ve grafitin karışımıdır. Numuneler 1150 °C'de 30 dakika hidrojen içinde sinterlendikten sonra, fırın oda sıcaklığına soğutulmuştur, yavaş hava akımı girişimi ile yüzeydeki pul atılmıştır, azot atmosferinde 980 °C sıcaklıkta indüksiyonla tavllanmış ve daha sonra önceden 260 °C ısıtılmış kapalı bir kalıpta 1600 tonluk hidrolik preste dövülmüştür. Sekil 2.1'de numune gösterilmiştir (4).



Sekil 2.1. Numune örneği (4)

yorulma testi uygulanmamış numunenin kalıcı gerilme profili ile karşılaştırıldığı zaman %30 azalmıştır (4).

Radhakrishnan V.M. ve Prasad R.C., yorulma testi uygulamasında yüzeydeki kalıcı gerilmenin nasıl azalmaya çalıştığını, ön gerginliğin farklı değerleri için yüzeydeki kalıcı basma gerilmesinin niceliğini incelemişlerdir. Çalışmalarında yorulma testlerinin uygulanmasına uygun %0.23 C'lu çelik kullanmışlardır. Kullanılan materyalin kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.1'de verilmiştir (5).

Çizelge 2.1. % 0,23 C'lu çeligin kimyasal kompozisyonu (%)

C	Si	Cr	Mn	P	S
0,23	0,1	0,14	0,82	0,03	0,04

Yüzey gerilme ölçümleri geri yansıtıcı X-ray metodu kullanılarak Cr-K α radyasyon ile yapılmıştır (5).

Yüzeydeki kalıcı gerilmenin plastik deformasyona bağlı olarak $t_R = t_0 (e_p)^{0.78}$ tipte azalmaya dayanabileceği belirlenmiştir. Azalmayı veren eşitlik,

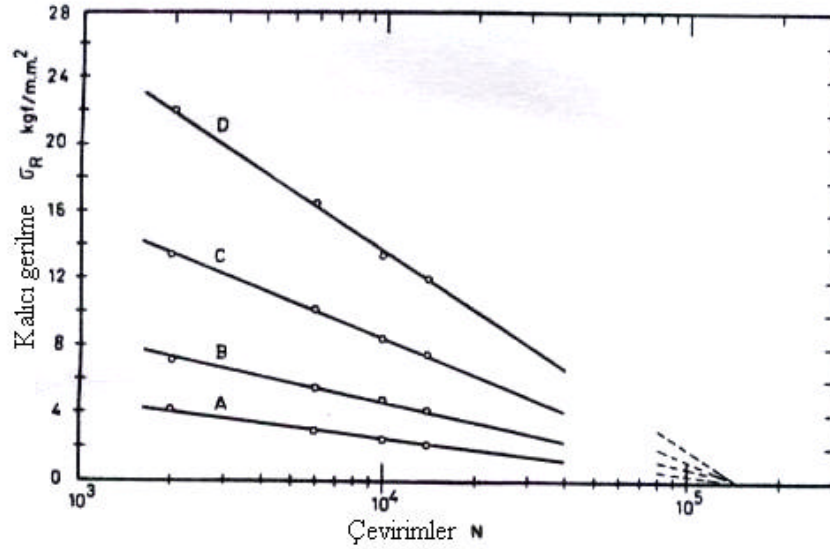
$$t_{RI} = t_{R0} - K \log N \quad [2.1]$$

şeklindedir.

Kalıcı gerilmedeki azalmayı belirlemek $\log N$ 'e bağlıdır. Buradaki N yorma testindeki çevrim sayısıdır. K sabiti kalıcı gerilmenin ilk değerine bağlıdır. e_p plastik uzama fonksiyonudur. t_{RI} hemen anında meydana gelen kalıcı gerilme değeridir. t_{R0} ve t_0 sabittir (5).

Çalışmada kullanılan numunelerdeki yorulma dayanımı çevrimleri (N) ile kalıcı gerilmenin (t_R) azalması Şekil 2.3'de gösterilmiştir (5).

Sekil bütün durumlarda kalıcı gerilme çizgilerinin (t_R) $N = 1.5 \times 10^5$ çevrim noktasına yönelerek azaldığı 10^5 çevrim civarında hepsinin azaldığını göstermektedir. 2000 çevrimin üzerinde ilk olarak hızlı azalma daha sonra üstel olarak azalmada yavaşlama olmuştur (5).



Sekil 2.3. Yorulma çevrimleri ile kalıcı gerilmenin azalması (5)

Wang et al., 20Cr, 30CrMo, 40Cr, GC4 (40CrMnSiMoVA), 45 çelikleri ve LC9 alüminyum alasımları üzerinde, bilyalı dövme işlemi sonucunda oluşan kalıcı gerilme değerlerini X-isini metodu ile ölçmüşlerdir. 15x10x50 mm boyutlarındaki numuneler, bilyalı dövüldükten sonra elektro-parlatma işlemine tabii tutulmuştur. Numunelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir (6).

Çizelge 2.2. Numune malzemelerinin kimyasal bileşimleri (%)

Malzeme	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
20Cr	0,23	0,26	0,59	0,0040	0,015	1,28	-	-
30CrMo	0,33	0,26	0,53	0,0092	0,008	1,14	-	0,19
40Cr	0,41	0,19	0,72	0,0090	0,030	1,00	0,08	-
GC4	0,42	1,33	1,64	0,0040	0,008	1,23	0,51	0,17
45	0,45	0,27	0,65	0,0300	0,030	0,20	0,18	0,21

Yapılan alışmalar sonucunda, elde edilen verilere uygun olarak aşagıdaki ampirik formüller ortaya konulmuştur.

Malzemenin ekme dayanımı (s_b) ve akma dayanımı ($s_{0,2}$) bilindiği takdirde, yüzeydeki kalici basma gerilme değerleri (s_s^{rc}) ve maksimum kalici basma gerilme değerleri (s_m^{rc}) hesaplanabilir (6).

$$s_s^{rc} = 120 + 0,5s_{0,2} (\pm 30) \text{ (MPa)} \quad [2.2]$$

$$s_m^{rc} = 70 + 0,667s_b (s_b < 1000 \text{ MPa}) \text{ (MPa)} \quad [2.3]$$

$$s_m^{rc} = 430 + 0,323s_b (s_b \geq 1000 \text{ MPa}) \text{ (MPa)} \quad [2.4]$$

Reynier et al., uçak endüstrisine yeni giren çok yüksek yorulma, korozyon ve kırılma tokluguna sahip alüminyum lityum alasimi 2091'in yorulma davranışlarını incelemislerdir. Numuneler nce 520°C'de 20 dakika su verme, 135°C'de 12 saat yaslandırma ısıl işlemine tabii tutulmuş ve bunların bir kısmı bilyali dvlmştş. 150-160 m derinlikte X-isini metodu ile yapılan lmler sonucu bilyali dövülen numunelerdeki sertlik ve yorulma mukavemetinin artısının %20 kadar olduğunu belirtmektedirler (7).

Li et al., yaptıkları araştırmada, elektroliz yöntemi ile yapılan nikel kaplamadaki i gerilmelerin, X-isini metoduyla yapılan incelemesi sonucu çekme özelliğine sahip gerilmeler olduğu grlmştş. Çekme özelliğine sahip iç gerilmelerin varlığından dolayı kaplamada çatlak olusacak ve bu çatlaklar alt tabakalarda gerilme yigilmesi olusumuna sebep olacaktır. Eğer bu gerilme siddeti ana malzemeyi oluşturan çeliğin yorulma başlangıç değerine ularırsa çelikte çatlaklar başlayacaktır. Elektroliz yöntemi ile kaplanmış çeliğin yorulma mukavemetinde azalma; kaplama i kusurları ve i gerilmelerin bilesimi ile olusacaktır. Kaplanmış eliğin sekil almasında bazı azalmalar olmasına rağmen, elektrolizle nikel kaplamayla orta karbonlu çeliğin çekme özellikleri fazla etkilenmez. Li ve diğerleri yaptıkları çalışmada, esas azalmanın yorulma mukavemetinde olduğunu ve bu azalmanın, gerilme düzleminde

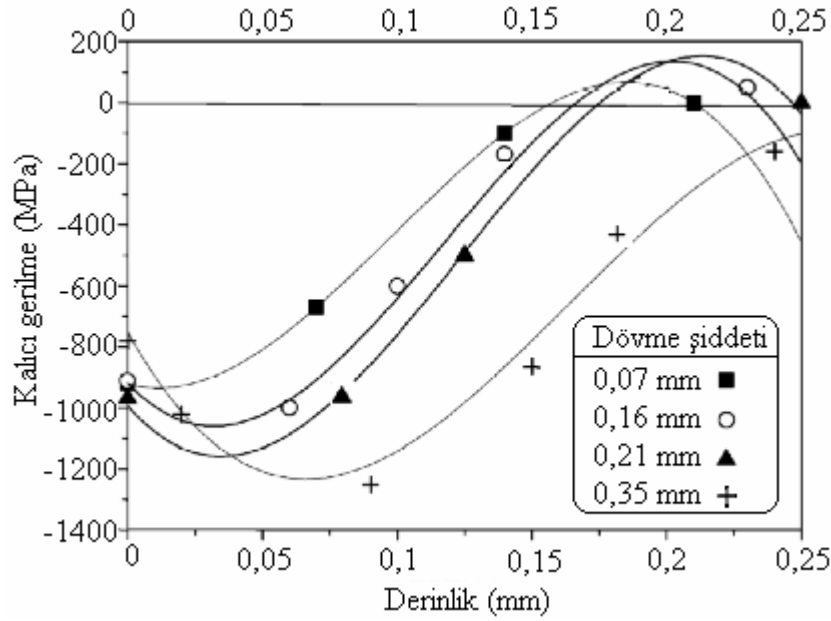
% 12,3 ve % 28,6 arasında olduğunu tespit etmiş ve bilyalı dövmenin elektroliz yöntemi öncesi veya sonrası yapılmasıyla oluşturulan basma gerilmesiyle, nikel tabakasında çatlakların ilk yayılımına karşı direnç sağlandığını ve yorulma mukavemetinin de belirgin bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir (8).

Torres ve Voorwald, araştırmalarında, bilyelenmiş AISI 4340 çeliginde yorulma ömrüne bilyeleme etkisi, yorulma süreci sırasında kalıcı basma gerilme alanlarının davranışı ve yorulma örneklerinde çatlak başlama noktalarını incelemişlerdir (9).

Çalışmada AISI 4340 çeliginin yorulma ömründeki artışı araştırıp göstermede, dört adet bilyeleme şiddeti uygulamışlardır (0,07mm – 0,16mm – 0,21mm – 0,35mm). Malzemenin bileşiminde (%) 0,41 C – 0,73 Mn – 0,8 Cr – 1,74 Ni – 0,25 Mo ve 0,25 Si bulunmaktadır. Malzeme 50 – 53 HRC sertliğinde ve yorulma limiti de 800 MPa'dır. Dövme işlemi için S 230 (Ø0,6 mm) çelik bilyalar kullanılmıştır. Yorulma testleri eksenel çevirme hareketi ile yapılmıştır. Kalıcı basma gerilme alanları x -isini ile ölçülmüştür. Yorulma süresinde, mevcut kalıcı basma gerilme alanlarındaki beklenen azalma incelenmiştir. İlave olarak, çatlaklı (kırılmış) yorulma örneklerinde, kırılma başlama noktaları hakkında bilgi elde etmek için elektron mikroskobu kullanılarak inceleme yapılmıştır. X -isini yöntemiyle yapılan ölçüm sonuçları Şekil 2.4'de verilmiştir (9).

Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, AISI 4340 çeliginin yüzeyinde oluşan en yüksek kalıcı basma gerilmesi, 0,21 mm şiddetindeki dövme sonucu olmuştur. Fakat 10^5 çevrim için elde edilen kalıcı gerilme değerleri daha farklı çıkmıştır. 10^5 çevrim için yüzeydeki en yüksek kalıcı gerilme değeri 0,35mm şiddetindeki dövmede elde edilmiştir (9).

Bilyeleme şiddetindeki artış ve bu nedenle orijinal kalıcı basma gerilmesi alanının boyutundaki artış 53 HRC sertliğindeki AISI 4340 çeliginin yorulma ömründe gerekli artışı sağlamamıştır (9).



Sekil 2.4. Dövme (Almen) şiddetinin kalıcı gerilmelere etkisi (9)

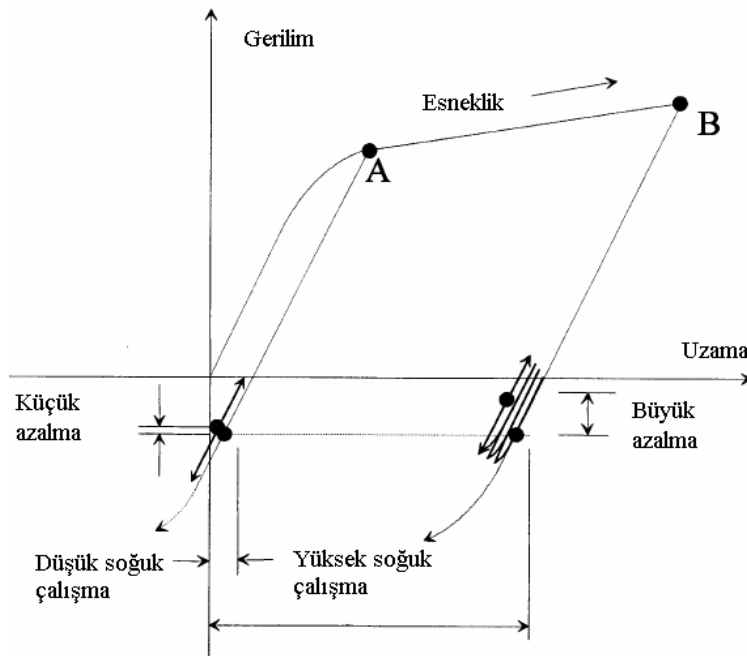
AISI 4340 çeliginde kalıcı basma gerilme alanlarının yorulma ömrünü iyileştirdiği, bununla birlikte döndürme bükme testlerinde yorulma süreci esnasında tam uzama değerinde kalıcı basma gerilme alanlarının zorlamaları azalttığı görülmüştür (9).

En kompleks parçada yorulma direncini arttırmak en iyi bilyeleme şartlarını belirlemek, parçadaki bir çok degiskene bağlı olduğu görülmüştür. Yorulma süreci esnasında kalıcı gerilmedeki azalmayı; bilyeli dövme ile yaratılmış kalıcı basma gerilmelerinin etkilediği görülmüştür. Yüzey altındaki kırık başlangıcı kalıcı basma gerilme alanlarıyla engellenmiştir (9).

Zhuang Z.W ve Halford R.G., araştırmalarında periyodik yükleme altında kalıcı gerilmenin azalmasını incelemişlerdir (10).

Yapılan yorulma testlerinde, kalıcı gerilmenin dağılımı, yorulma testinin çalışma derecesi, gerilmelerin anlamları ve yorulma testlerinin çevirim sayısı üzerinde dikkatle durulması gereken parametreler olduğu anlatılmıştır. Kalıcı gerilmenin azalması fikrinden dolayı analitik modeller önermişlerdir. Ayrıca yorulma testlerinde kalıcı

basma gerilmesinin azalarak yorulma dayaniminin azalacagini belirtmislerdir. Sekil 2.5’de sematik olarak çekme çevriminin tesiri ile olusan sonuç gösterilmektedir. Daha fazla çekme çevrimi olusan çekme kuvvetini arttirdigi, ilk bölgede olusan basma kuvvetinin çekme çevriminden sonra gerçekten azaldigi görölmüştür. Çok fazla çekme çevrimi basma kuvvetini azaltmistir. Sekil 2.5’de sematik olarak iki çekme çevrimi durumlari (düşük çevrim A ve yüksek çevrim B) gösterilmiştir. Çevrimler sonucunda düşük çevrimde daha az yüksek çevrimde daha çok azalma olduğu görölmüştür. Bu durum kalici basma gerilmesi içinde aynidir (10).



Sekil 2.5. Yorulma testinde kalici çekme gerilmesinin azalması (10)

Teodosio, J.R., Cindra, F.M., Pedrosa, P.D, çeliklerde yorulma çevrimleri esnasında kalici gerilmelerin azalması isimli çalismalarında bilyelemeden sonra orta ve yüksek sayıdaki çevrimlerle yorulma dayaniminin azalmasına bagli olarak kalici gerilmelerin konumunu incelemislerdir. Incelemelerinde iki tip çelik kullanılmıştır: Yüksek dayanimli düşük alasimli kaynakli birlestirilmiş çelik ve %50 ostenit, %50 ferrit içeren iki paslanmaz çelik. Gerilmeler X-ray difraksiyon metodu ile ölçölmüştür. İki tip çelik için sonuçların gösterdiği, yüzeydeki basma gerilmelerinin yorulma dayanimini arttırdığıdır. 180.000 çevrimden sonra, bölgesel tavllanmış, esas metal ve kaynakli metalin tümünde yüzeydeki kalici basma gerilmelerinin azaldığı

ve çekme gerilmesi olduğu görülmüştür. 10^6 çevrim üzerinde kalıcı basma gerilmeleri azalmıştır ve kırılma görülmüştür. %80 yükleme için yüzeydeki kalıcı basma gerilmesi dogrusal azalmıştır. Yaklasik 200.000 çevrimde kalıcı basma gerilmeleri azalmıştır, yorulma çatlakları belirmistir ve kırilmalar olmustur (11).

Lee, Kwang-Soo, Song, Ji-Ho., sertlikten dolayı yorulma ömrü gerilmesi için tahmini metotlar isimli çalışmalarında alüminyum ve titanyum alasımları için yorulma özelliklerinin tahmininde sertleştirme ile elde edilen en yüksek çekme gerilmesinden yararlanarak sertleştirme metotları önerilmiştir. Inceledikleri tüm metotlar içerisinde en kullanışlı olan Roessle-Fatemi ‘nin sadece sertlik ve elastik modülüne bağlı olan metottur. (s_B en yüksek çekme gerilmesi) Çalışmada karşılaştırma yaptıkları esitlikler şunlardır (12):

Çelikler için;

1. Mitchell’in denklemi

$$s_B = 3,45 \text{ HB (MPa)} \quad [2.5]$$

2. Roessle-Fatemi ‘nin denklemi

$$s_B = 0,0012 (\text{HB})^2 + 3,3 \text{ HB (MPa)} \quad [2.6]$$

3. Kloos-Velten ‘nin denklemi

$$s_B = 3,29 \text{ HV} - 47 \text{ (MPa)} \quad \text{için } \text{HV} \leq 445; \quad [2.7]$$

$$s_B = 4,02 \text{ HV} - 374 \text{ (MPa)} \quad \text{için } \text{HV} > 445;$$

4. JSMS (Malzeme bilimi topluluğu Japonya) ‘nin denklemi

$$s_B = \frac{(\text{HV}-1,837)}{0,304} \quad (\text{MPa}) \quad [2.8]$$

Çelikler için sertlik değişim denklemleri

JSMS 'nin denklemleri

$$HV = 8,716 + 0,963 (HB) + 0,0002 (HB)^2 \quad [2.9]$$

$$100 \leq HB < 500$$

$$HV = 241,8 - 3,514 (HRC) + 0,181(HRC)^2 \quad [2.10]$$

$$20 \leq HRC < 60$$

Choo, Seong-Hun, Lee S., Golkovski, M., G., otomobil krank mili için kullanılmış AISI 4140 çeliginde hızlı elektron isini yaymanın yorulma özellikleri ve yüzey sertliğindeki etkileri isimli çalışmalarında AISI 4140 çeliginde yorulma özelliklerinin gelişmesi ve yüzey sertleştirmede yüksek enerjili hızlı elektron isini yaymanın etkilerini incelemişlerdir (13). Çalışmada dört tip deney numunesi kullanılmıştır.

- Isınanmamış AISI 4140
- Isınanmış AISI 4140
- Yüksek enerjili elektron isini ile ısınanmış AISI 4140
- Indüksiyonla sertleştirilmiş AISI 4140

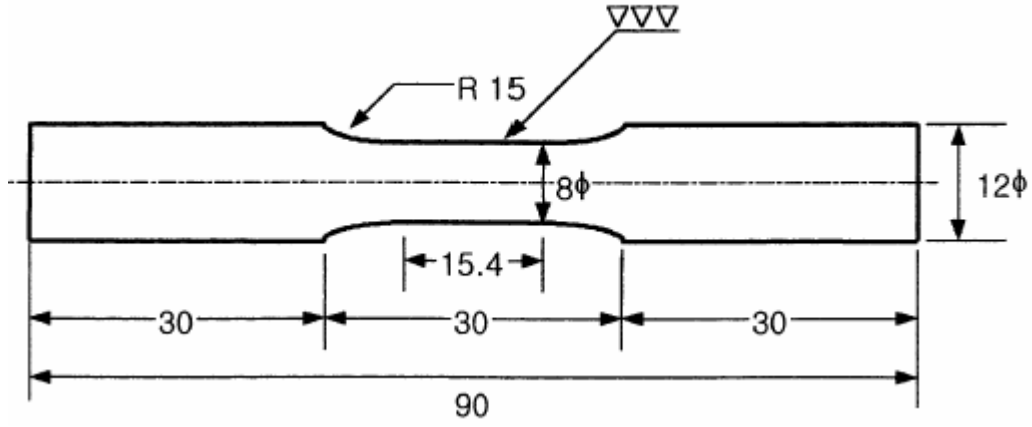
Yapılan tüm deneyler oda sıcaklığında 50 Hz frekanslı bir döndürme egme yorulma test makinesinde (R=-1) yapılmıştır.

Çalışmada kullandıkları AISI 4140 çeliginin kimyasal bileşimi Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. AISI 4140 çeligin kimyasal bileşimi

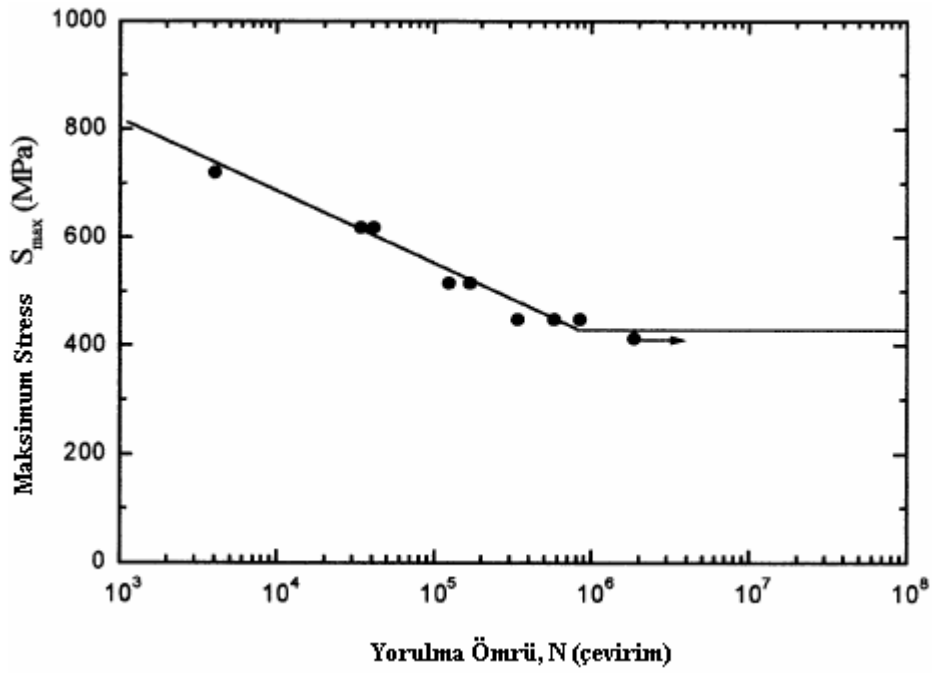
Element	C	Mn	Si	Cr	S	P	Mo	Ni	Cu
%	0.421	0.80	0.236	1.03	0.016	0.013	0.167	0.009	0.075

Çalışmada kullanılan deney numunesinin teknik resmi Şekil 2.6 verildiği gibidir.

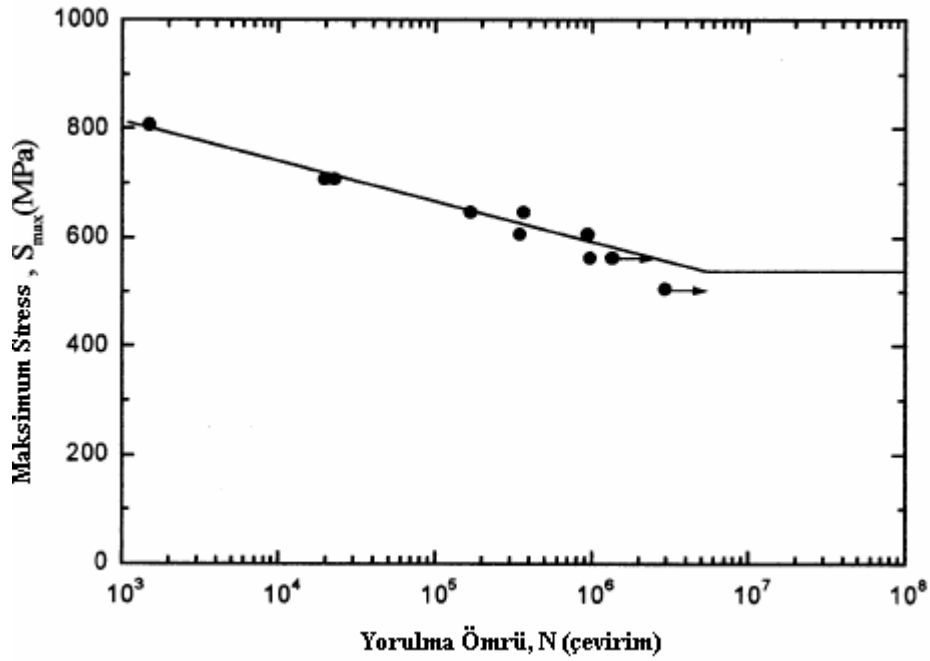


Sekil 2.6. Deney numunesi (13)

Yapılan deneyler sonucunda isinim uygulanmamış deney numunesinin yorulma dayanımı (Sekil 2.7) 418 MPa, isinim uygulanmış deney numunesinin yorulma dayanımı (Sekil 2.8) 540 MPa bulunmuştur.



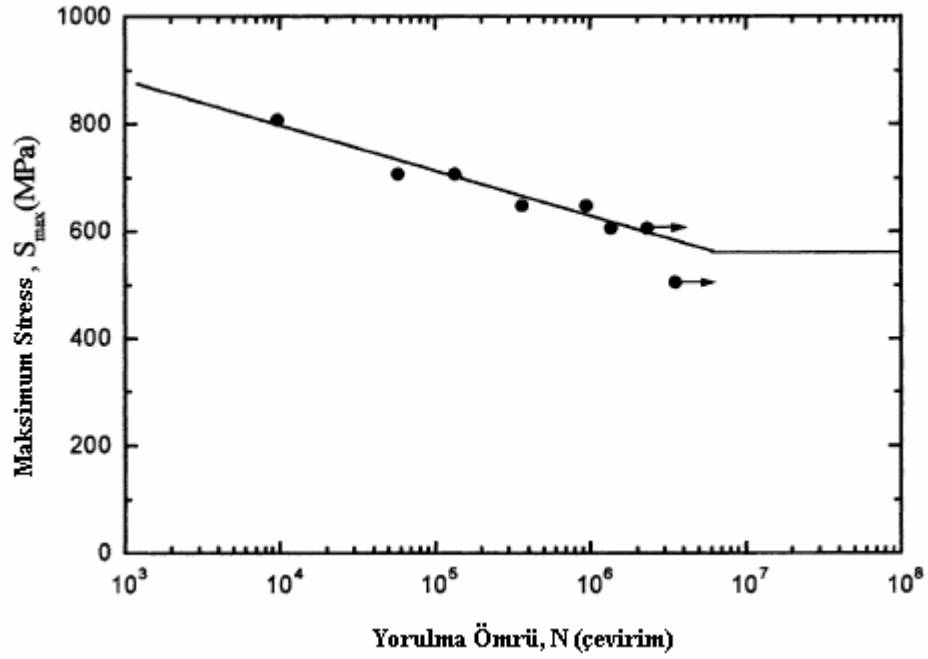
Sekil 2.7. Isinim uygulanmamış AISI 4140 çeliginin yorulma grafiği (13)



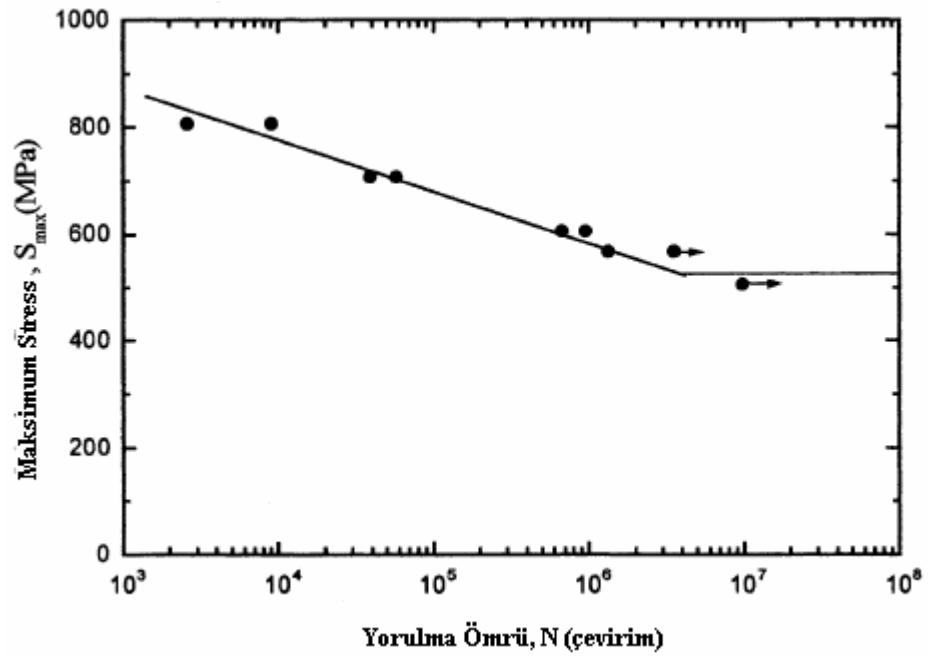
Sekil 2.8. Isinim uygulanmış AISI 4140 çeliginin yorulma grafiği (13)

Yapılan deneyler sonucunda yüksek enerjili elektron isini ile isinlanmış deney numunesinin yorulma dayanımı (Sekil 2.9) 563 MPa bulunmuştur. Isinim uygulanmamış ve isinim uygulanmış ile yüksek enerjili elektron isini ile isinlanmış AISI 4140 çeliginin yorulma grafikleri karşılaştırıldığında yorulmada %35 lik bir artış görülmüştür.

Yapılan deneyler sonucunda indüksiyonla sertleştirilmiş deney numunesinin yorulma dayanımı (Sekil 2.10) 529 MPa bulunmuştur.



Sekil 2.9. Yüksek enerjili elektron isini ile isinlanmış AISI 4140 çeliginin yorulma grafiği (13)



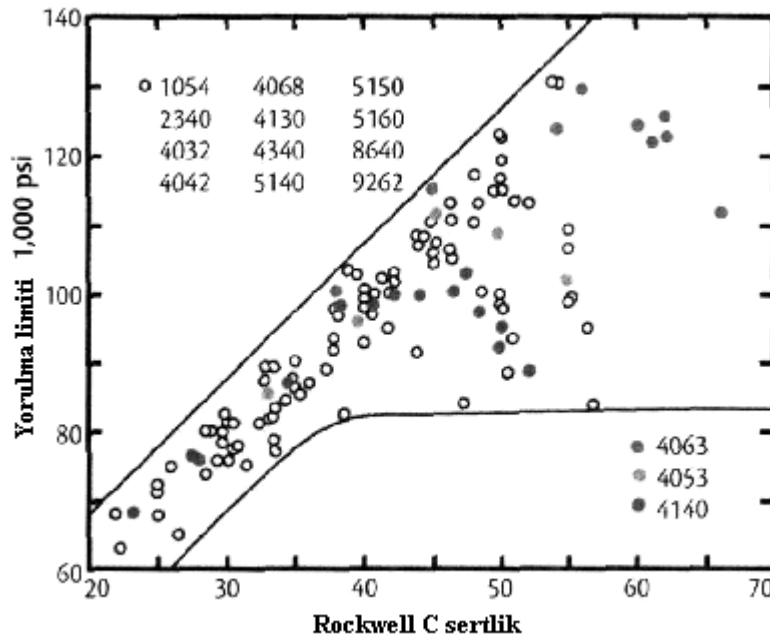
Sekil 2.10. İndüksiyonla sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginin yorulma grafiği (13)

Yapılan çalışmada Cr ve Mo nin ilave edilmesi ile yağda sertleştirmede yavaş soğutma oranı altında aynı martenzit yapı olarak AISI 4140 çeliginde en iyi dayanım ve sertleşebilirlik elde edildiği görülmüştür. Bu çelikte sıcaklık ve zaman oranı austenite-banite dönüşümleri için genişlemiş ve austenite-perlit dönüşümünde çok azalmıştır.

Aken, D.,V., çeligin yorulma dayanımı sınırı isimli çalışmalarında Rockwell C sertlik değeri ile yorulma sınırı arasındaki bağlantıyı incelemiştir. Şekil 2.11’de HRC sertlik değerlerinin yorulma sınırına karşılık değerleri verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi çalışmamızda kullandığımız AISI 4140 malzemesi 45 HRC sertlikte maksimum yorulma sınırına ulaşmaktadır. Verilen grafikte 150,000 psi yada 150 ksi 1,034 MPa esittir. 100 ksi de 690 MPa esittir (14). Yapılan çalışmada;

$$S_{FL} = 15 + 0,435 S_{YP} \quad [2.11]$$

formülü bulunmuştur. Bu formülde S_{FL} yorulma limitini , S_{YP} akma noktasının ksi cinsinden değeridir.



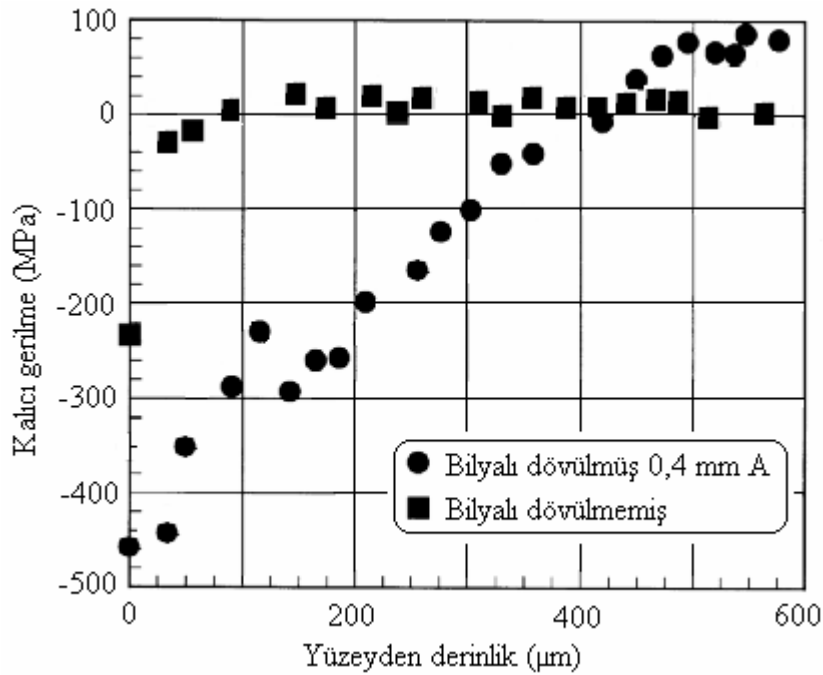
Şekil 2.11. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş çeligin yorulma limitinde sertliğin etkisi (14)

Ochi et al., dökme demir numunelerin bir bölümünü tornalama işleminden sonra bilyalı dövmeşlerdir. Numunelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 2.4’de gösterilmiştir (15).

Çizelge 2.4. Dökme demir malzemenin kimyasal bileşimi (%) (15)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mg
3,75	2,29	0,35	0,016	0,0072	0,50	0,030	0,020	0,034

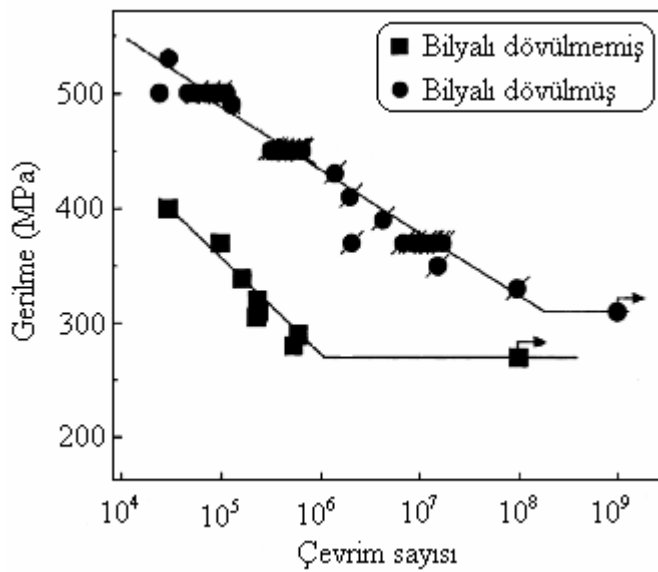
Bilyalı dövme işleminde kullanılan çelik bilyaların sertlikleri 53 HRC olup, çapları 0,6 mm ve bilyalı dövme siddeti 0,4 mm A seçilmiştir. Bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş numunelerdeki kalıcı gerilme değerleri, X-isini metodu ile ölçülmüş olup deney sonuçları Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. Bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş numunelerdeki kalıcı gerilme dağılımları (15)

Çalışma sonunda, bilyali dövülmemiş numune yüzeyindeki kalıcı basma gerilme değerinin, bilyali dövülmüş numunenin yüzeyindeki kalıcı basma gerilme değerinden düşük olduğu gözlemlenmiştir (15).

Ochi ve diğerleri, yaptıkları diğer bir çalışmada bilyali dövülmüş numunelerin, yorulma ömürlerini de incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçları Şekil 2.13’de verilmiştir (15).



Şekil 2.13. Bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş numunelerin S-N grafiği (15)

Kristoffersen, H., Vomacka, P., yaptıkları çalışmada silindirik parçalarda indüksiyon sertleştirme ile oluşan sert katmanlardaki kalıcı gerilmeler araştırılmıştır. Ayrıca indüksiyon sertleştirmeden önce sertleştirilmiş ve temperlenmiş ve sadece normalize edilmiş numunelerin mikro yapısı incelenmiştir. Çalışmada yüzeydeki küçük büyüklükteki kesme gerilmeleri de araştırılmıştır. Çalışmadaki deneylerde büyük parçalar denenmiş ve indüksiyon sertleştirmenin parametrelerinin kalıcı gerilmelere etkisi gösterilmiştir (16).

Deneylerde AISI 4140 (SS2244) çeligi kullanılmıstır. Deneylerde kullanılan çelik Çizelge 2.5’de gösterilen farklı frekans ve sıcaklıklarda indüksiyon sertleştirmeye tabi tutulmuştur (16).

Deneylerde kullanılan parçalar sertleştirilip temperlenerek 30 HRC sertliğe, sadece normalize edilen numuneler ise 15 HRC sertliğe getirilmiştirlerdir. Bu sertlik değerlerindeki numunelerin yüzeylerindeki kalıcı gerilmeler Şekil 2.14’de gösterilmiştir.

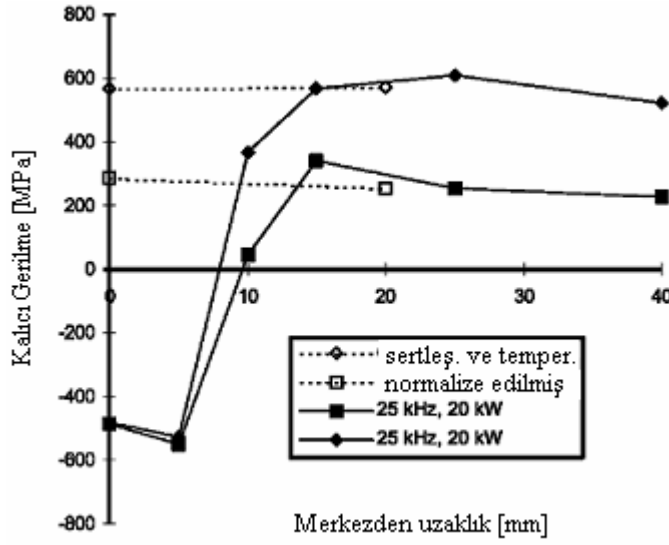
Çizelge 2.5. Indüksiyon sertleştirme parametreleri

Numune	Frekans [kHz]	Güç [kW]	Isıtma zamanı [s]	Sıcaklık ^a [°C]	Mikroyapı ^b
1	25	20	2,2	967	ST
2	25	30	1,1	1016	ST
3	300	20	2,9	941	ST
4	300	30	2,0	1035	ST
5	25	20	2,5	946	N
6	25	30	1,3	1024	N
7	300	20	3,3	977	N
8	300	30	2,2	1061	N

^a Yüzeydeki maksimum sıcaklık

^b Indüksiyon sertleştirmeden önceki mikroyapı, ST; sertleştirilmiş ve temperlenmiş, N; normalize edilmiş

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre sertleştirilmiş ve temperlenmiş numuneler ile normalize edilmiş numunelerin yüzeylerinde kalıcı çekme gerilmesi olduğu gözlemlenmiştir (16).



Sekil 2.14. Yüzeydeki kalıcı gerilme durumu (16)

Ishigami, H., Matsui, K., Jin, Y., Ando, K., basınçlı, yansıtma ve iki kere bilyeleme ile kalıcı basma gerilmesinin artırılmasının çalışılması isimli araştırmada sertleştirilmiş, temperlenmiş ve indüksiyonla ısıtılmış orta karbonlu çeligin kalıcı basma gerilme dağılımı incelenmiştir. Kullanılan numunenin kimyasal yapısı Çizelge 2.6. verilmiştir (17).

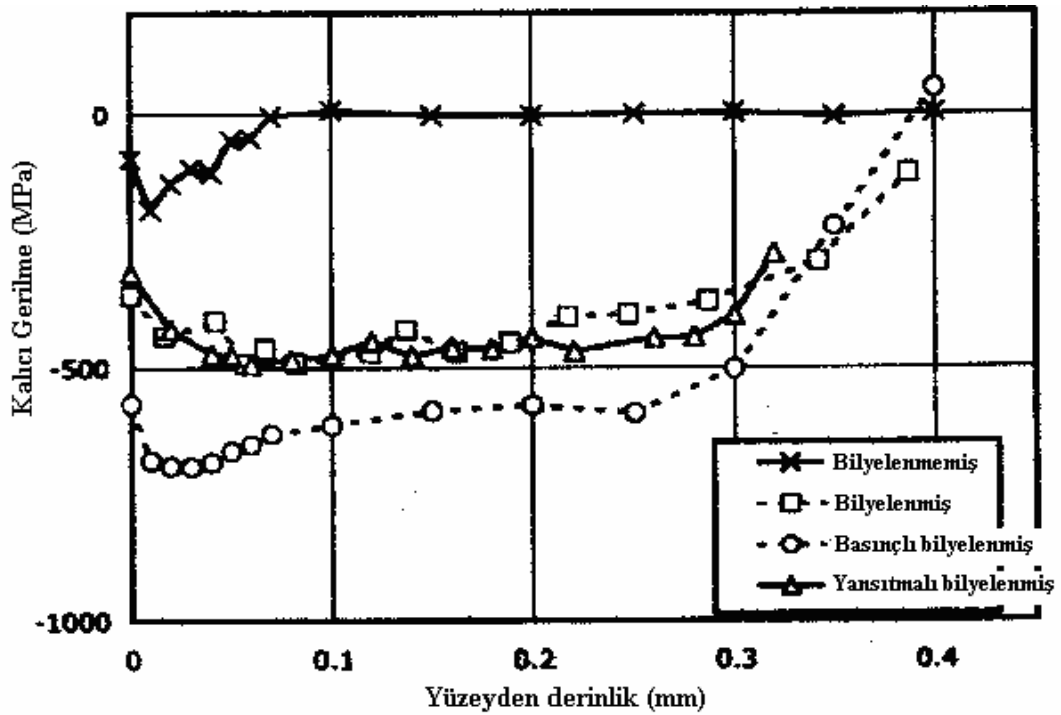
Çizelge 2.6. Numunenin kimyasal yapısı (17)

C	Si	Mn	P	S
0,51	0,19	0,64	0,015	0,013

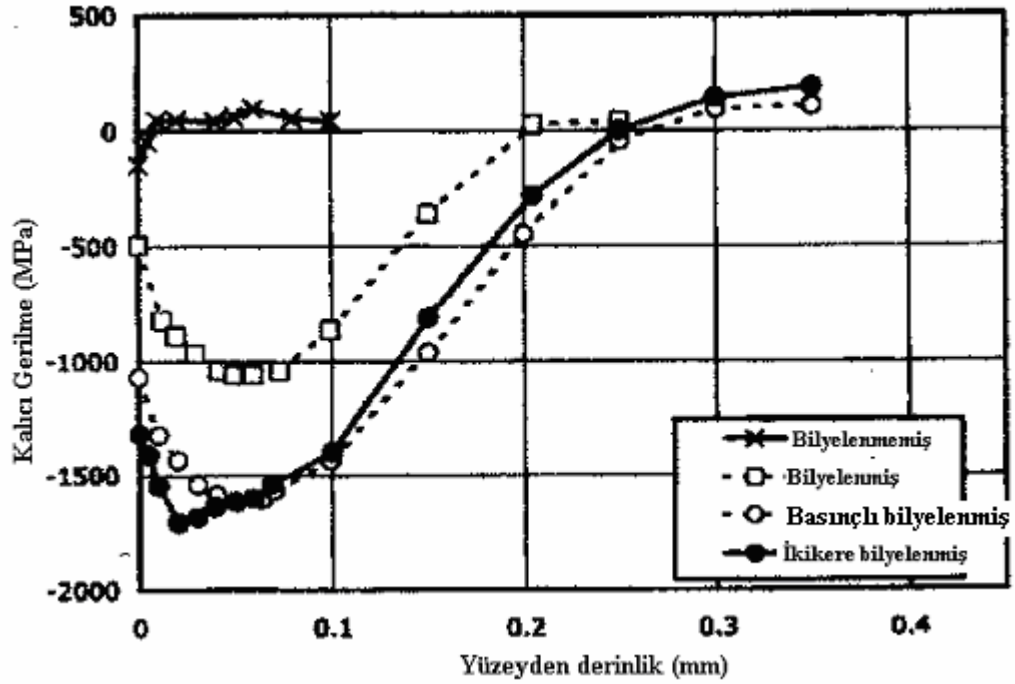
Numunenin sertleştirme ve temperleme işlemi 550 °C 'de yapılmış ve 30 HRC sertlik elde edilmiştir. Indüksiyon ile ısıtılıp sertleştirilen temperlenen numunede 60 HRC sertlik elde edilmiştir. Numunelerdeki kalıcı gerilme ölçümleri X-isini metodu ile yapılmıştır.

Sertleştirilmiş ve temperlenmiş numuneler üzerinde yapılan kalıcı gerilme ölçümleri sonucunda Sekil 2.15'deki sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlara göre bilyelenmemiş numunenin 0,1 mm altında basma üstünde ise kalıcı çekme gerilmesi olduğu görülmüştür (17).

İndüksiyon ile ısıtılıp sertleştirilip temperlenen numuneler üzerinde yapılan kalıcı gerilme ölçüm sonuçları Sekil 2.16'da görülmektedir. Sonuçlara göre indüksiyonla ısıtılıp sertleştirilmiş ve temperlenmiş bilyeleme işlemine tabi tutulmamış numunede yüzeyin yaklaşık 0,1 mm altında kalıcı çekme gerilmesi görülmüştür. Normal bilyeleme ve basınçlı bilyeleme sonucunda ise numunenin yüzeyinde kalıcı basma gerilmesi görülmüştür (17).



Sekil 2.15. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş numunedeki kalıcı gerilme dağılımı (17)



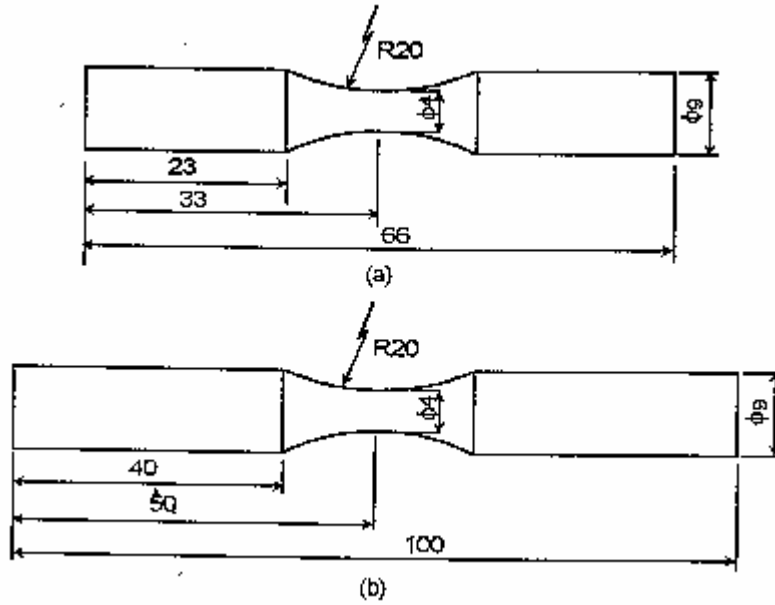
Sekil 2.16. İndüksiyon ile ısıtılıp sertleştirilip temperlenen numunedeki kalıcı gerilme dağılımı (17)

Genel K., iyon nitrülenmiş AISI 4140 çeliginin yorulma ve korozyonlu yorulma davranışı isimli çalışmasında AISI 4140 çeliginin havada ve korozyonlu ortamda yüzeyi iyon nitrülenmiş parçaların yorulma davranışını incelemiştir. Çalışmada kullanılan AISI 4140 malzemesinin kimyasal bileşimi Çizelge 2.7’de verilmiştir (18).

Çizelge 2.7. AISI 4140 deney malzemesinin kimyasal bileşimi (18)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
%	0,41	0,21	0,83	0,027	0,027	0,9	0.18

Çalışmada kullanılan deney numuneleri Sekil 2.17’de verilmiştir.

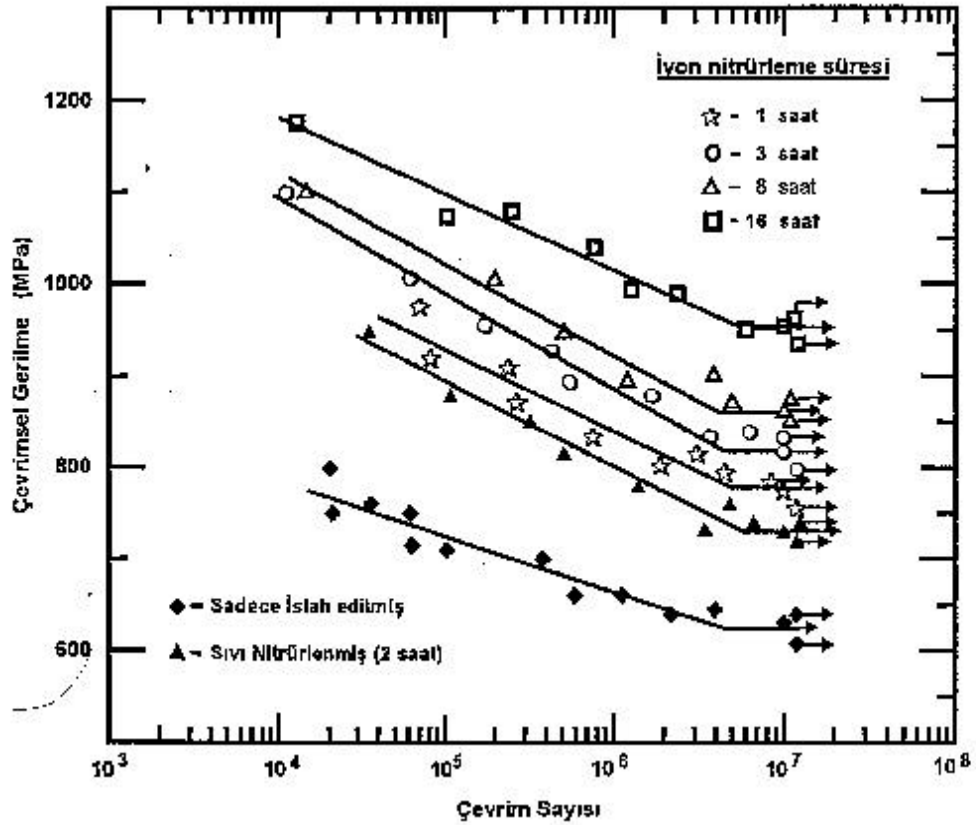


Sekil 2.17. Yorulma deney numuneleri

- a) Havadaki yorulma
- b) Korozyonlu yorulma deneylerinde kullanılan deney numuneleri (18)

Çalışmada kullanılan deney parçaları 860 °C'de yağda su verilerek sertleştirilmiştir. Daha sonra NaCl-KCl-BaCl₂ tuz banyosunda 600 °C'de 1 saat süreyle temperlenmiştir. İşlem sonunda deney parçaları 30HRC sağladığı görülmüştür.

Yapılan çalışmada ıslah edilmiş numunelerin yorulma dayanımı 630 MPa bulunmuştur (Sekil 2.18). Çalışma sonucunda nitrürleme süresine bağlı olarak yorulma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.



Sekil 2.18. Temperlenen ve nitrürlenen numunelere ait yorulma diyagramları (18)

3. YORULMA

Yapıların sabit yüklerden baska, tekrarlanan hareketli yüklere maruz kaldığı bilinmektedir. Hareketli yüklerin, toplam yükün önemli bir oranını teşkil etmesi halinde, yapılara değişken kuvvetler etkilemekte ve bunun sonucunda yapı elemanlarında değişik gerilmeler meydana gelmektedir (19).

Klasik elastisite teorisine göre, akma gerilmesi altındaki yüklemeye maruz malzemelerde sadece elastik deformasyonun meydana geleceği kabul edildiği gibi, yükleme hızının tesirli olmadığı hallerde, gerilmenin değeri maksimum çekme gerilmesini aşmadığı müddetçe malzemede tahribat beklenmez. Buna rağmen, maksimum çekme gerilmesinin, hatta akma gerilmesinin altında dinamik yükler altında çalışılan malzemelerin bir süre sonra tahrip olduğu mühendislik uygulamalarında çok sık bir şekilde rastlanmaktadır. Bu şekilde değişen yükler altında malzemenin tahribine yorulma denir. ASTM standartları yorulmayı, bir malzemede bazı bölge ve bölgelerdeki değişken gerilme (stress) ve şekil değişimi (strain)'in meydana getirdiği ve belirli bir sayıda yüklemeden sonra çatlak veya kırılma ile sonuçlanan işlem şeklinde tarif etmektedir (20).

Yorulma olayı esas itibarıyla iki kısımdan ibarettir:

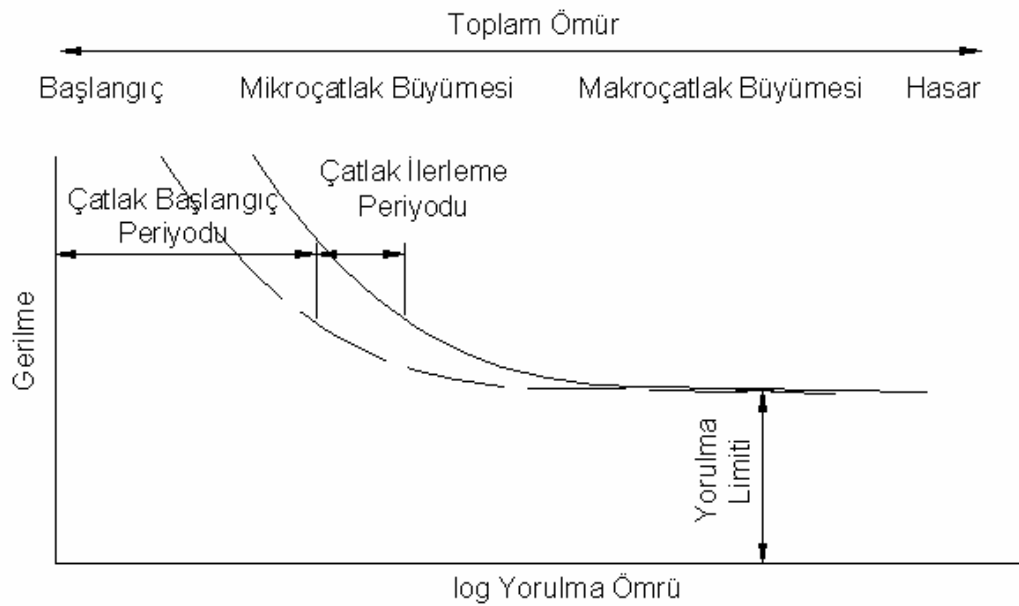
- i) Çatlak başlangıcı,
- ii) Çatlak ilerlemesi

Çatlak başladıktan sonra yavaşça ilerler fakat çatlağın yayılma hızı kademeli olarak artar. Bir zaman sonra çatlak o denli büyür ki kesitin kalan kısmındaki gerilme malzemenin maksimum çekme gerilmesini geçerek kırılma meydana gelebilir (20).

Düzgün veya çentikli parçalarda, belirli bir ortalama gerilme için parçanın kırılmadan veya belirli bir şekil değiştirmeyi aşmadan sonsuz çevrim sayısında taşıyabileceği gerilme genliğine yorulma dayanımı adı verilir. Müsaade edilebilir

şekil değistirmenin miktarı yorulma deneyinin yapıldığı şartlara veya deney malzemesi cinsine bağlıdır (21).

Benzer numunelerin sabit koşullarda belirli bir gerilme altında çatlama (veya kopma) gösterdikleri (N) çevrim sayılarının medyan ortalamasına yorulma ömrü denir (22). Şekil 3.1’ de yorulma ömrünü ve bunun gerilme seviyelerine bağımlılığının sematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1. Yorulma ömrünün ve bunun gerilme seviyelerine bağımlılığının sematik görünümü (23)

Yorulma, uygulamalarda çok sık rastlanan bir hasar mekanizmasıdır. Nitekim, makine elemanlarında meydana gelen hasarların %80’i yorulmadan kaynaklanır. Yorulma olayına neden olan tekrarlı gerilmeler; eğilme, burulma hatta titreşim sebebiyle oluşabilir. Yorulma bu yüklerden bir veya birkaçının etkimesi ile oluşur. Örneğin uçak motorundaki piston koluna yaklaşık 200 saatlik uçuş süresi içinde 25 milyon tekrarlı gerilme etki eder. Miller, yataklar, civatalar, yaylar, dişliler, türbin kanatları, motor parçaları ve raylı sistem tekerlekleri tekrarlı gerilmeler altında çalışırlar. Bu nedenle, bu elemanların tasarımında yorulmanın dikkate alınması esastır (24).

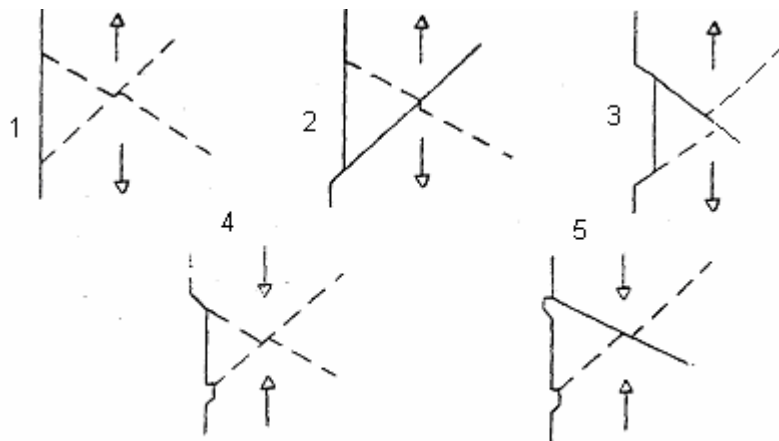
3.1. Yorulmada Çatlak Olusumu

Malzemelerde yorulma, iki safhada geliserek kirlmaya yol açar:

- i) Çatlak tesekkülü,
- ii) Mikroskobik ebattaki çatlagin büyüyerek makroskobik boyuta ulasmasi.

Malzemelerde belirli bir yükleme sayisindan sonra meydana gelen kayma bantlari çatlak tesekkülüne yol açar. Yüzeyde görülen bu kayma bantlari, zamanla numune yüzeyinden içeriye nüfus etmektedirler. Tekrarli yüklemenin baslangicinda meydana gelen kayma bantlari, yükleme süresince artmaktadır. Çok hafif bir elektrolitik parlatma yüzeydeki kayma bantlarini kaldırarak, kalici kayma bantlarini ortaya çıkarmaktadır. Malzeme ömrünün yaklasik %5'inden sonra görülen kalici kayma bantlarinda çatlak meydana gelmektedir (25).

Sekil 3.2'de görüldüğü gibi yorulma olayinda yüzeyde görülen en önemli degisiklik kayma bantlarinin hareketine bagli olarak ortaya çıkan "extrusion" (çekme) ve "intrusion" (basma) adi verilen girinti ve çıkintilarin meydana gelmesidir (25).



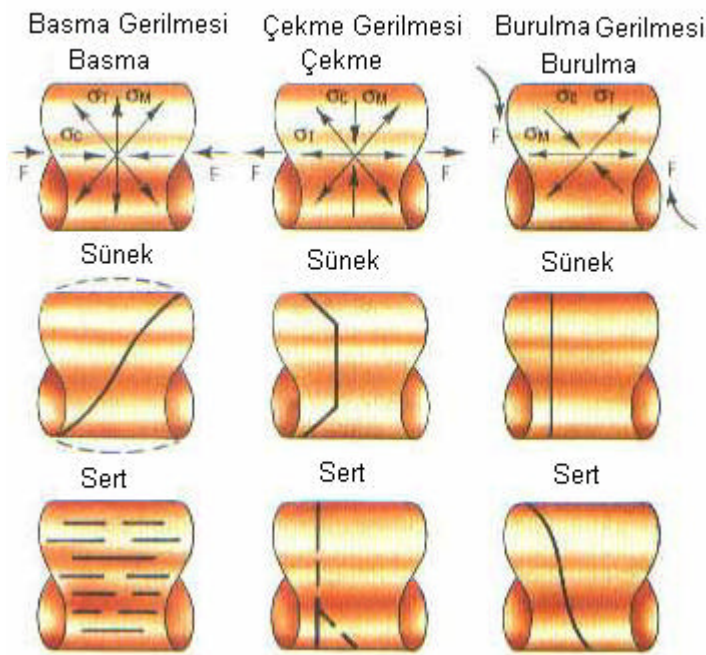
Sekil 3.2. Bir extrusion (çekme) ve bir intrusion (basma) meydana getiren kayma hareketi (25)

3.2. Yorulma Kirilmaları

Sürekli artan zorlamalarda şekil değiştirmenin tek yönlü olmasına karşın, yorulma zorlamasında kuvvet veya moment, dolayısıyla şekil değiştirme sürekli yön değiştirerek artma - azalma gösterir. Söz konusu şekil değiştirmeler malzemenin kristal kafesi tarafından tam elastik olarak karşılanabildikleri sürece tehlikeli değildir. Küçük kalıcı şekil değiştirmelerde kırılma olmadan kristal kafesi tarafından taşınabilirler. Kalıcı şekil değiştirmeler kristal kafesin çarpılması ile değil, kafesin değişik bölümlerinin yeni bir denge durumu sağlanıncaya kadar ötelenmesi yoluyla oluşurlar. Kafes kısımlarının birbirlerine göre ötelenmelerine kayma adı verilir ve olay kayma düzlemleri olarak adlandırılan tercihli bazı düzlemlerde olur. Kayma düzlemlerinin kristal kafesindeki konumu kristal yapısı ile ilgilidir (26).

Yorulma zorlamaları sonucu meydana gelen kayma, tek yönlü zorlamalardaki gibi dislokasyonların oluşumu ve ilerlemesi ile açıklanır. Bu şekil değiştirme mekanizması, parlatılmış deney parçalarının yüzeyinde yorulma sınırına yakın zorlamalar altında kayma çizgileri oluşmasıyla görünür duruma gelebilir. Tek yönlü zorlamalarda olduğu gibi yorulma zorlamaları sırasında da pekleme olayı görülür. Pekleme sadece şekil değiştirmenin miktarına değil, ayrıca az da olsa frekansa bağlıdır. Yorulma zorlaması uygulanan malzemelerde yapılan metalografik incelemeler, pekleme sonucu yapı değişikliklerinin oluştuğunu kanıtlamıştır. Bazı gözlemlerde ancak kayma ve yerel sıcaklık artışlarının varlığı ile açıklanabilecek çökelmeler görülmüştür. Tekrarlanan şekil değiştirmeler kristal kafes tarafından sürekli olarak taşınmadığı için, yorulma zorlamasının pekleme dışında hasar etkisi de vardır. Kaymaların miktarına ve bir ölçüde de frekansa bağlı olarak belirli bir çevrim sayısından sonra ortaya çıkan hasara, malzeme yapısıyla ilgili olarak hangi olayların yol açtığı yeterince araştırılmış ve tatmin edici bir kuramsal açıklama yapılmış değildir. Bununla birlikte örneğin x-isini araştırmaları hasar başlangıç kademeleri hakkında bazı bilgiler sağlamış ve yorulma sırasında iç gerilmelerin meydana geldiğini göstermiştir (26, 22).

Simdiye kadar elde edilen bilgilere dayanarak, yorulma zorlamasi sırasında tekrarlanan kalici sekil degistirmelerin yeteri kadar birikimi sonucu, malzemenin ayrilma dayaniminin asildigi noktalarda mikroskobik boyuttan da küçük çatlaklar olustugu söylenebilir. Zorlama sırasında disaridan verilen enerjinin büyüklüğüne bagli olarak bunlar mikro ve makro çatlaklar olarak birlesir ve sonunda bu çatlaklar herhangi bir yorulma kirlmesine neden olur (25). Sekil 3.3’de malzemelere asiri yük uyguladiginda malzemede olusan kirlma tipleri gösterilmistir.

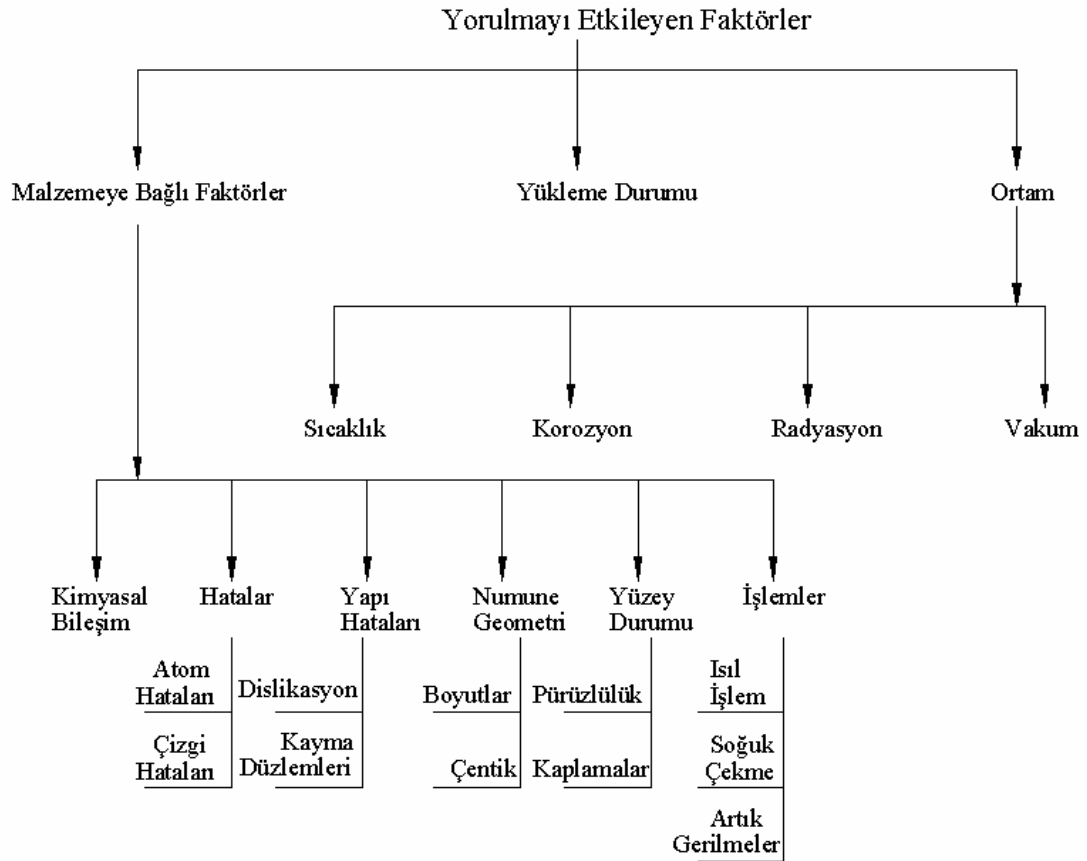


Sekil 3.3. Malzemelere asiri yük uyguladiginda malzemede olusan kirlma tipleri

Hasar çok küçük ve sinirli bir bölgede baslayip çatlak olarak ilerlediginden disaridan herhangi bir kalici sekil degistirme görülmez ve bu nedenle yorulma kirlmaları sekil degistirmesiz olarak nitelenir. Hasarin ilk olustugu nokta çogunlukla yüzeyde veya yüzeyin hemen altindadir, ancak heterojenliklerin veya malzeme hatalarının durumuna göre malzemenin iç kısmında da bulunabilir (25).

3.3. Yorulmayı Etkileyen Faktörler

Yorulmayı etkileyen faktörler aşağıdaki semada özetlendiği gibidir.



3.3.1. Malzeme cinsi, bileşimi ve yapısının etkisi

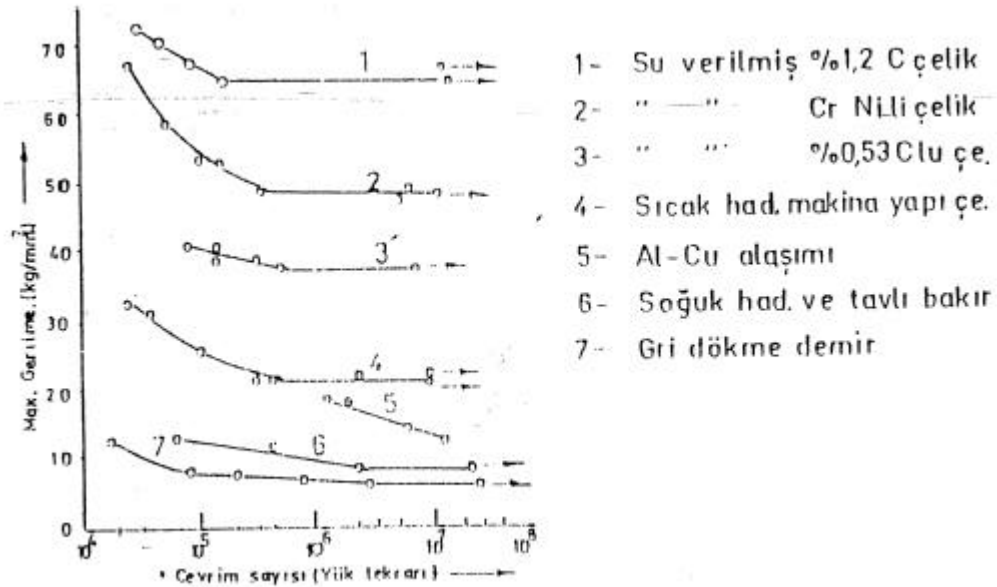
Genellikle malzemenin statik çekme dayanımı arttıkça, malzemenin yorulma dayanımı sınırı da yükselir.

Çeliklerde alarim elementleri statik çekme dayanımını arttırarak, yorulma dayanımını da arttırırlar. Çekme dayanımını arttırmadan sadece yorulma dayanımını arttıran alarim elementi yoktur (22).

Alarim elementlerinin (karbon hariç) çeliklerin yorulma dayanımı arttırması aynı zamanda çeliklerin içyapısını da degistirmelerine bağlıdır. Özellikle uygun su verme

ve menevisleme işlemleri ile statik çekme dayanımı da artmaktadır. Isıl işlem uygulanacak çelik paçalarda alasım elementlerinin en önemli rolü çeliklerin su alma derinliğini arttırarak, sertliğin yüzeyden itibaren daha derin kısımlara kadar artmasını sağlamak ve dolayısıyla yorulma dayanımını arttırmaktır. Bu egrilerden izleneceği gibi, statik çekme dayanımları yüksek olan malzemelerin yorulma dayanımı da yüksektir. Çelik malzemelerde, genellikle 10^6 çevrim civarında Yorulma Dayanımı Sinirine varılmaktadır. Demir- dişi malzemelerde ise, örneğin şekilde Al - Cu alasımı için, belirli bir yorulma sınırı yoktur (22).

Sünek malzemelere uygulanan son mekanik işlemlerin de yorulma dayanımına etkisi vardır. Soğuk işlem ile sertliği ve yüzey düzgünlüğü arttırılan malzemenin yorulma dayanımı sıcak işlem görmüş aynı malzemeye oranla daha yüksektir. Tane boyutunun yorulma olayına etkisi birçok malzemeler için ihmal edilebilecek durumdadır (22). Şekil 3.4'de değişik işlem görmüş malzemelerin yorulma sınırı değerleri görülmektedir.



Şekil 3.4. Değişik malzemelerin yorulma limit değerleri (26)

3.3.2. Yüzey özelliklerinin etkisi

Yorulma olaylarında çatlak oluşumu genellikle yüzeyde baslar. Çünkü egme ve burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda en yüksek gerilme yüzeylerde oluşur. Eksenel gerilme halinde, gerilmenin tüm kesimde üniform olarak dağılması beklenirken rasgele yönelmiş çok taneli malzemelerde gerilme üniform dağılmayıp yüzeyde maksimum değerler alabilir.

Yüzeyde başlayan yorulma çatlaklarının kendisi daha sonra çentik etkisi göstereceğinden gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlakların hızla ilerlemesine yol açacaktır. Bu nedenle malzemenin yorulma dayanımını arttırmak büyük ölçüde yüzey çatlaklarının oluşumunu engellemekle olur. Çatlaklara engel olma yüzey özelliklerinin artırılması ile mümkündür (22).

Özellikle sert malzemelerde yüzeyin düzgünlüğü yorulma dayanımını büyük ölçüde artırmaktadır. Örneğin yüzeyi parlatılmış bir numunenin yorulma dayanımı sınırı, tornada kabaca işlenmiş bir numuneye oranla %15 ila %40 daha yüksektir. Yüzeydeki pürüzlülükler birer çentik etkisi yaparak, gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlak oluşumuna neden olmaktadır (22).

Yüzey düzgünlüğü yanında, yüzey sertliğinin artırılması da, çatlama karşı direnci arttıracığından, yorulma dayanımının artmasını sağlarlar. Çeliklerde sementasyon, nitrürasyon ve benzeri yüzey sertleştirme işlemleri yorulma dayanımı açısından oldukça fayda sağlamaktadır. Öte yandan karbon çeliklerinin tavlanması ve sıcak işlenmesi esnasında yüzeyde karbon azalması oluşur. Yüzeydeki 1 mm'lik bir tabakada böyle bir olayın görülmesi yorulma dayanımını oldukça düşürür. Karbon azalması ile yüzeyde yumuşak tabaka elde edileceğinden çatlak küçük gerilmelerde dahi oluşacaktır (22).

3.3.3. Çentik etkisi

Parça kesitinde çentik, delik ve ani değişimlerin bulunması yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü büyük ölçüde azaltmaktadır. Parça kesitinde görülen bu tür süreksizlikler gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlak başlangıcına neden olurlar. Çentik etkisi çentigin şekil ve boyutlarına bağlıdır (22).

Makine parçalarındaki ani kesit daralmaları, yağ deliği, yolluk, vida dişi ve benzeri kısımlar daima çentik etkisi gösterirler.

Mühendislik uygulamalarında, yorulma dayanımının saptanması için daha gerçekçi bir yaklaşım, gerilme konsantrasyonlarının etkisini göz önünde bulundurmakla yapılır. Bu amaç için bazı faktör veya katsayılar tanımlanmıştır. Bunlardan birisi (K_f) ile gösterilip *Çentik Faktörü* veya *Yorulma Dayanımı Küçültme Faktörü* adını alır (Esitlik 3.1).

$$K_f = \frac{\text{Çentiksiz Yorulma Dayanımı Siniri}}{\text{Çentikli Yorulma Dayanımı Siniri}} \quad [3.1]$$

K_f değeri çentigin şekline, çentigin etkinliğine, malzeme cinsine, gerilme türüne ve gerilme şiddetine bağlı olup değişen bir değerdir. Çentik hassasiyetini sağlamak için, çentik türünün etkili olmadığı bir katsayı veya faktörün kullanılması daha uygun görülmüştür (22).

Basit geometrik şekilli çentiklerde elastisite teorisinden faydalanılarak yapılan hesaplamalarla, diğer durumlarda foto-elastisite tekniğinden faydalanılarak yapılan ölçümlerle, çentik tabanındaki max. gerilme saptanmaktadır. Buna göre (K_t) ile gösterilip *Teorik Gerilme Konsantrasyonu Faktörü* adı verilen bu faktör tanımlanmaktadır (Esitlik 3.2).

$$K_t = \frac{\text{Çentik tabanındaki maks. gerilme}}{\text{Çentik kesitindeki ortalama (anılan) gerilme}} \quad [3.2]$$

(K_f) ve (K_t) degerlerinden faydalanilarak (q) *Çentik Hassasiyeti Indeksi* tanımlanmaktadır (Esitlik 3.3).

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad [3.3]$$

$K_f=1$ durumunda $q=0$ olup, malzeme çentikten etkilenmemektedir. $K_f=K_t$ durumunda ise $q=1$ olup, malzeme çentige asiri derecede hassastir, (q) degeri numune boyutu ve çentigin geometrik sekline bagli oldugundan, malzemeye ait sabit deger olarak alinamaz (22).

3.3.4. Gerilmelerin etkisi

Dayanim, bir malzemenin kendisine uygulanan kuvvetlere karsi akmadan ve kirlmadan gösterdigi dirençtir. Genel olarak, dayanim bir muayene parçasına veya elemana aksenel yönden uygulanan statik yüke karsi gösterilen direnç olarak isimlendirilir. Halbuki, tokluk ise malzemenin enine kesitine, dinamik veya sok olarak uygulanan yüke karsi malzemenin gösterdigi direnç olarak tanımlanir. Çünkü bu yüklemeler daha sonra muayene parçasının veya makine elemani üzerindeki çatlakların artmasına neden olmaktadır (27).

Sekil 3.5’de malzemeye uygulanan kuvvet ve karsilik gelen uzama degerleri grafik olarak çizilmistir.

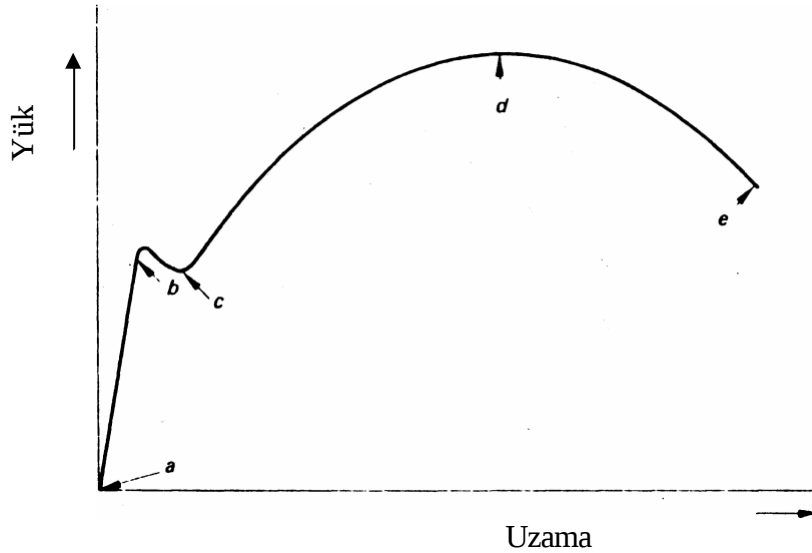
1. a dan b ye uzama degeri yükle dogru orantilidir, örnek parça üzerinden yük kaldırılırsa malzeme ilk boyuna döner. Malzemenin hafif bir yük altında gösterdigi bu özellige 'elastiklik' denir.

2. b den c ye dogru yük artisi olmamakla birlikte numunenin aniden uzamasi gözlenecektir. Yük kaldırildigi takdirde numune ilk boyutuna geri dönmeyecektir. Malzemede kalici sekil degisimi baslangici olur, bu akma noktasidir. Akma

gerilmesi, akma noktasındaki gerilmedir ve b noktasındaki yükün örnek parçanın ilk kesit alanına bölümü ile elde edilir. Tasarımcılar genel olarak bu degerin %50'sini “emniyet katsayısı” olacak şekilde çalışırlar.

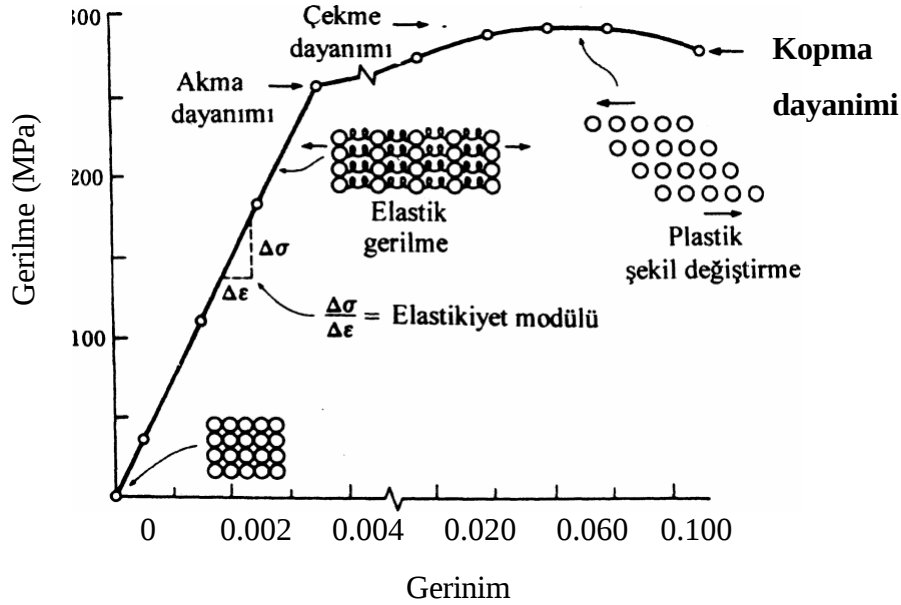
3. Artık c den d ye yük ve uzama arasında doğru oranti yoktur. Eger yük kaldırılabilir geri dönüş olmayacaktır. Bu yük altında malzeme plastiklik özelliği göstermektedir.

4. d noktası malzeme için en yüksek gerilme (E.Y.G.) olarak tanımlanır. Değeri ise d noktasındaki yükün, malzemenin ilk kesit alanına bölümü ile elde edilir. Malzemelerin dayanımında karşılaştırma değeri olarak faydalı olmasına rağmen, uygulamada önemli değildir. Mühendislik cihazları genelde kopma noktasında çalıştırılmaz, d noktasından e ye doğru örnek parçanın yükü azalırken uzamasının arttığı gözlenir. Gerçekte deney çubuğu incelmekte (boyun vermekte), böylece de birim alana düşen yük, yani gerilme sürekli artmaktadır. Sonuçta deney çubuğu e noktasında kopmaktadır (27).



Sekil 3.5. Düşük karbonlu çelik için yük/uzama grafiği (27)

Sekil 3.6’da alüminyum alasimi için gerilme- gerinim egrisi görülmektedir.



Sekil 3.6. Alüminyum alasimi için gerilme-gerinim egrisi (28)

Uygulamada, yük ve uzama değerlerinin kullanımı sinirlidir. Bu değerler özel ölçülerdeki muayene çubuklarından elde edilir. Sekil 4.4’de grafikte görüldüğü gibi grafiklerde genelde yük eksenini gerilme, uzama eksenini ise gerinim (birim uzama) olarak nitelendirilir (28).

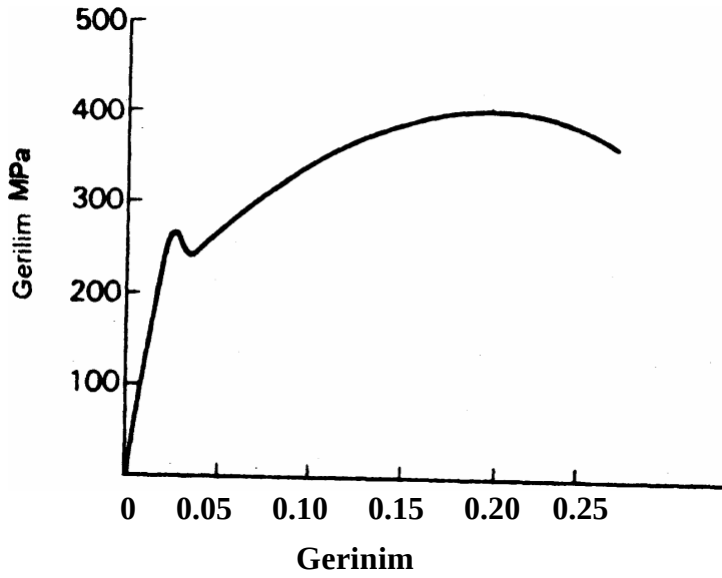
$$\text{Gerilme} = \frac{\text{Yük}}{\text{Kesit alanı}} \quad [3.4]$$

$$\text{Gerinim} = \frac{\text{Uzama}}{\text{İlk boy}} \quad [3.5]$$

Sekil 3.7’de tavllanmış bir çeliğin tipik gerilme/gerinim egrisi görülmektedir. Bu egriden aşağıdaki bilgiler ortaya çıkarılabilir:

- Uzun bir plastik bölgesi olması nedeni ile sünek bir malzemedir.

- Elastik bölgedeki eğimi dik olması nedeni ile, oldukça kati bir malzemedir.
 - Oranti sınırı (elastik sınırı) yaklaşık 230 MPa'da oluşmaktadır.
 - Üst akma noktası yaklaşık 260 MPa'da oluşmaktadır.
 - Alt akma noktası yaklaşık 230 MPa'da oluşmaktadır.
- En yüksek dayanımı yaklaşık 400 MPa'da oluşmaktadır (27).



Sekil 3.7. Tavlanmış bir yumuşak çeliğin gerilme-gerinim eğrisi (27).

Yorulma deneylerinde gerilme türünün etkisi önemlidir. Genellikle aksel gerilme ile düzlemsel eğme gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar birbirine çok yakındır. Burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar çok farklıdır. Burma gerilmelerinin uygulanması ile bulunan Yorulma Dayanım Sınırının, düzlemsel eğme gerilmesinin uygulanması ile bulunan Yorulma Dayanım Sınırına oranı, karbonlu çeliklerde 0.48 ila 0.64, alüminyum çeliklerde 0.44 ila 0.71, demir dışı metallerde 0.52 dir (22).

Aynı tür gerilme için ortalama gerilme, gerilme genliği ve gerilme oranının etkileri de önemlidir. Ortalama gerilme arttıkça, malzemenin belirli bir çevrim sayısına dayanabileceği gerilme genliği (veya gerilme aralığı) azalmaktadır. Gerilme genliğinin büyük olduğu durumlarda, malzemenin büyük çevrim sayılarına

dayanabilmesi için ortalama gerilmenin sifira yaklasmasi gerekir. Gerilme araligi küçüldükçe malzemenin Yorulma Dayanım Siniri yükselmektedir (22).

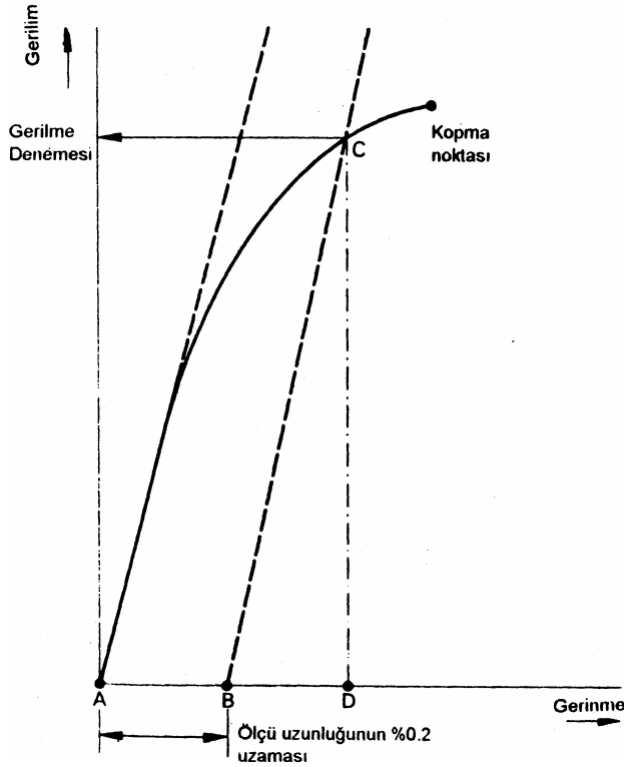
Deney öncesi numunede olusan kalici iç gerilmeler de yorulma olayini etkilerler. Genellikle numune yüzeyinde olusturulan basma yönünde kalici iç gerilmeler yorulma dayanım siniri ve yorulma ömrünü artırmaktadırlar (22).

Gerilme denemesi (Deneme akma dayanımı)

Bazi malzemelerde elastik davranıstan plastik davranısa geçis gerilmesi kolaylıkla tespit edilemez. Bu durumda offset, akma veya deneme olarak adlandırılan akma gerilmesi belirlenebilir (28).

Gerilme denemesi, plastik gerinmenin binde 1 veya 2'sine karsilik gelen gerilme olarak tanımlanır. Sekil. 3.8'de nispeten düşük süneklige sahip sertleştirilmiş ve tavllanmış orta karbonlu elik malzemenin tipik gerilme-gerinme grafigi görülmektedir. Eger C noktası ele alınırsa, karsilik gelen gerinme D noktasında verilir ve bu nokta ise elastik ve plastik özelliklerin birlestigi bir noktadır. Bu noktada eger gerilme yavaşça kaldırılırsa, gerinme azalır ve gerilme-gerinme grafiginin bosalmis sekli CB ile gösterilir (27).

Yükün kaldırılması sırasında, elastik sekil değisimi düzelir ve böylece grafik yükleme sırasındaki ilk durumdaki grafige dogrusal paralel hat olusturur. B noktası bu nedenle plastik sekil değisimini ve AB ise plastik gerinimi temsil eder. Gerilme denemesi, akma siniri belli olmayan malzemeler için kullanılır. Plastik gerinimin yüzde 0,2'si gibi özel bir değerdeki gerinimine karsilik gelen gerilme değeri akma siniridir. AB ölçüsü ise akma sinirine karsilik gelen uzamadır. C noktasındaki gerilme değeri, gerilme denemesinin yüzde 0,2'sidir. Deney ubuğu C noktasına kadar gerildiginde, AB'de plastik, BD'de ise elastik sekil değisimi meydana gelmektedir (27).



Sekil 3.8. Gerilme denemesi (27)

Gerilme denemesinde 15 saniye yükleme yapılıp, yük kaldırıldıktan sonra, deney çubuğunun kalıcı uzaması, muayene uzunluğunun yüzde 0.2'sinden büyük değildir. Böylece malzemenin tüm özellikleri ile ilgili işlemler tamamlanmış olur (27).

3.3.5. Korozyif ortamın etkisi

Korozyonun kimyasal etkisi ile yorulmanın mekanik etkisinin aynı anda oluşmasına korozyonlu yorulma olayı denir (22).

Yorulma olayından önce malzemenin korozyona uğraması, yorulma dayanımını azaltır. Burada, korozyonun sebep olduğu yüzeydeki çok küçük oyuklar (pürüzler) çentik etkisi yaparak malzemenin yorulma dayanımının düşmesine neden olurlar.

Korozyon ve yorulma olaylarının beraber olustugu durumlarda, yorulma dayaniminda daha büyük düşüşler görülür. Korozyonun buradaki etkin rolü çatlak tesekkülünü ve çatlagin ilerlemesini hizlandirmasidir.

Korozyon, yorulma deneyinde uygulanan frekansin etkisini de degistirmektedir. Koroziif ortamlarda, frekansin etkisini azaltmak için mümkün oldugu kadar yüksek hizlarda çalisilmalidir. Küçük hizlarda, deney zamani uzayacagindan korozyon daha etkili olacak ve frekansin etkisini dolayli olarak etkileyecektir (22).

3.3.6. Sicakligin etkisi

Oda sicakliginin altinda yapilan deneylerde, sicaklik düstükçe yorulma dayanimi artmaktadır. Ancak sicakligin oda sicakliginin altina inmesi malzemenin çentik hassasiyetini arttirmaktadır.

Oda sicakliginin üstünde yapilan deneylerde genellikle sicaklik yükseldikçe, yorulma dayanimi düşmektedir. Sadece düşük karbonlu çeliklerde 200 ila 300°C arasinda yorulma dayaniminda artis görülür. Bu olay 200-300°C arasinda düşük karbonlu çeliklerin deformasyon yaslanmasina ugrayarak çekme dayanimlarinin artmasina baglidir (22).

Deney sicakligi belirli bir sicakliga çiktiginda sürünme olayi daha etkili olur. Kopma, yorulmadan çok sürünme sonucunda gerçekleşir. Bu iki olayi birbirinden ayiran kirlilma türüdür. Yorulmada kirlilma tane içinde (transgranüler), sürünmede tane sinirinda (intergranüler) olmaktadır (22).

Makine parçalarının kullanilma esnasinda sicaklik degisimlerine ugramalari, isisal gerilmelere yol açarak yorulmaya neden olabilirler. Sicakligin T kadar degismesiyle, malzemede olusan gerilme;

$$s = a \cdot E \cdot \Delta T \quad [3.6]$$

dir. Bu esitlikte;

a = lineer ısı genleşme katsayısı

E = elastisite modülüdür.

Sayet bir defalık ani sıcaklık değişimi malzemenin çatlamasına yol açmısa bu olaya ısı (termal) sok adı verilir. Sayet çatlama çok sayıda tekrarlanan ısı gerilmeler sonucunda olursa bu olaya ısısal (termal) yorulma adı verilir.

Ostenitik paslanmaz çeliklerde ısı iletim katsayısı küçük, ısı genleşme katsayısı büyük olduğundan, bu malzeme termal yorulma olayına çok hassastır (22).

3.3.7. Frekansın (Deney hızının) etkisi

Frekansın yorulma deney sonuçlarına etkisi kesin olarak saptanamamıştır. Deney cihazlarının çoğunda uygulanan 200 ila 10.000 çevrim /dakika'lık frekansın deney sonuçlarını pek etkilemediği kabul edilmektedir (22).

Düşük karbonlu çeliklerde, alüminyum alaşımlarında ve bakırda çok yüksek deney hızlarında yorulma dayanımı sınırının da yükseldiği görülmüştür. Çok düşük deney hızlarında da yorulma dayanımı sınırının azaldığı kabul edilmektedir (22)

Öte yandan çok yüksek frekanslarda, malzemede oluşan ısılarda kısa zamanda yayınamaması, yorulma deneyi sonuçlarını olumsuz yönde etkileyeceği kabul edilmektedir (22).

3.4. Yorulma Deney Türleri

Çalışma esnasında bir parçaya gelecek gerilme değişik tür ve siddette olabilir. Ancak yorulma deneylerinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında kantitatif bilgiler edinebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli gerilme türleri ele alınmıştır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyotlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar kriter kabul edilerek teknik yorumlar yapılabilmektedir.

Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Gerilme türüne göre baslıca yorulma deneyi türleri şunlardır (22):

1. Eksenel gerilmeli yorulma deneyi
2. Eğme gerilmeli yorulma deneyi
 - a - Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi,
 - b - Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi.
3. Burma gerilmeli yorulma deneyi
4. Birleşik Gerilmeli Yorulma Deneyi

3.4.1. Wöhler yorulma deneyi

Dinamik yük altında çalışan parçaların yorulma davranışları hakkında doğru bilgi edinebilmek için bu parçaların gerçek kullanım koşullarında denenmeleri gerekir. Ancak bu yöntem zaman alıcı ve pahalı olduğundan, belirli standartlara göre hazırlanan örnekler ile basit laboratuvar deneyleri yapılarak malzemelerin yorulma davranışları hakkında temel bilgiler edinilebilir (22).

Yorulma deneyleri için en çok kullanılan cihazların başında Wöhler makinesi gelir. Bu makinede, deney örneği bir ucu destekli kol biçiminde olup, bir elektrik motoru ile döndürülen milin ucuna yerleştirilir. Bir bilyeli rulman vasıtası ile örneğe statik yük uygulanır. Örnek döndükçe sinüzoidal olarak değişen gerilme yüzeyde en büyük değerine ulaşırken, merkezde sıfır olur. Kullanılan örneğin boyutları yorulma

makinesinin biçimine göre değişir. Çapı gittikçe azalan örnekler kullanıldığı gibi, silindirik örneklerde kullanılabilir. Silindirik örneklerin yüzeyleri boyunca düzenli gerilme elde edebilmek için çift noktadan yükleme yapılabilir. Wöhler makinelerinin sematik resmi Şekil 3.9'da verilmektedir (24).

Yorulma makinelerinin çekme-basma, çarpma, burma, egme ve egme-burma gerilmeleri uygulayan çeşitleri de vardır. Yorulma deneylerinde kullanılan örneklere farklı büyüklükte tekrarlı gerilmeler uygulanır ve her örneğin kırılması için gerekli çevrim sayısı ölçülür (24).

Şekil 3.10'da görüldüğü gibi silindirik bir numunenin islenmiş bir ucu motor tarafındaki bağlama aparatına (ayna veya pense) bağlanır. Diğer uçtan ağırlık asılır. Başlangıçta numune üst yüzeyine çekme gerilmesi etki ederken alt yüzey basma gerilmesine maruz kalır. Numune 90 derece döndükten sonra normal olarak çekme ve basmada bulunan bölgelerin üzerine gerilme etki etmez. Toplam 180 derece döndükten sonra, normal olarak çekme etkisi altındaki bölge şimdi basma etkisi altındadır. Bu nedenle herhangi bir noktadaki gerilme sıfır gerilmeden maksimum çekme gerilmesine ve sıfır gerilmeden maksimum basma gerilmesine giderek bir devir tamamlanır. Numune üzerine etkiyen maksimum gerilme aşağıdaki ifade ile verilir (28).

$$\sigma = 10.18 LF / d^3 \quad [3.7]$$

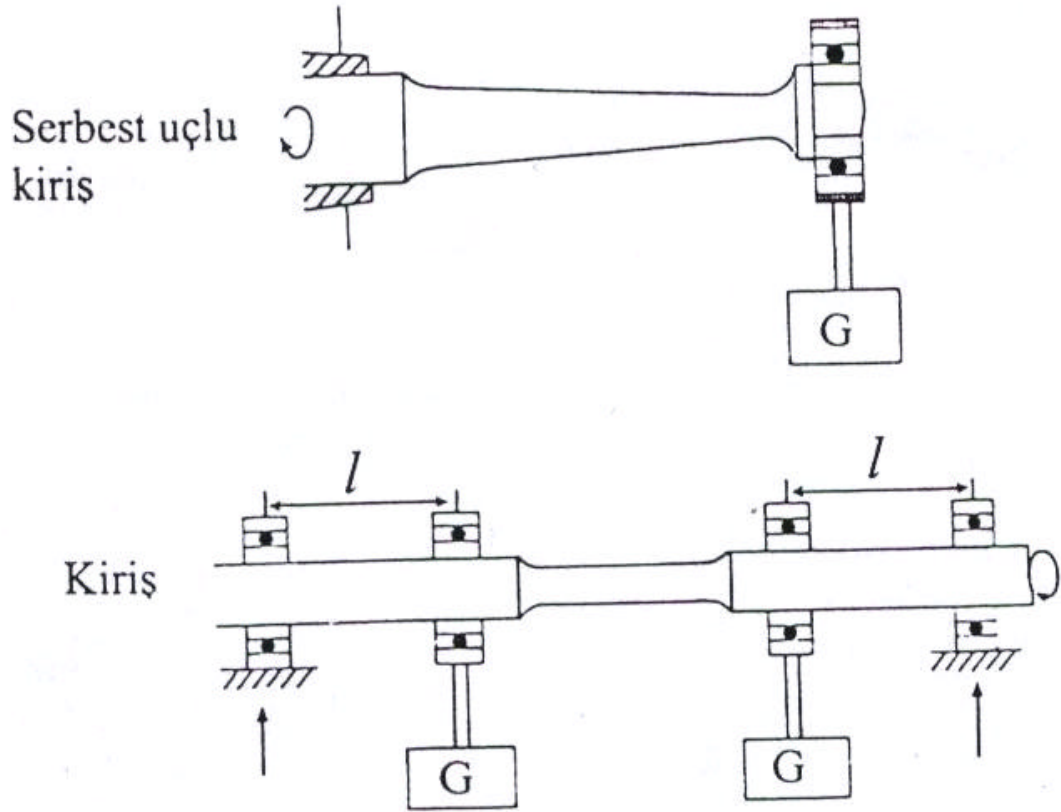
Burada;

L : Çubukun boyu (mm)

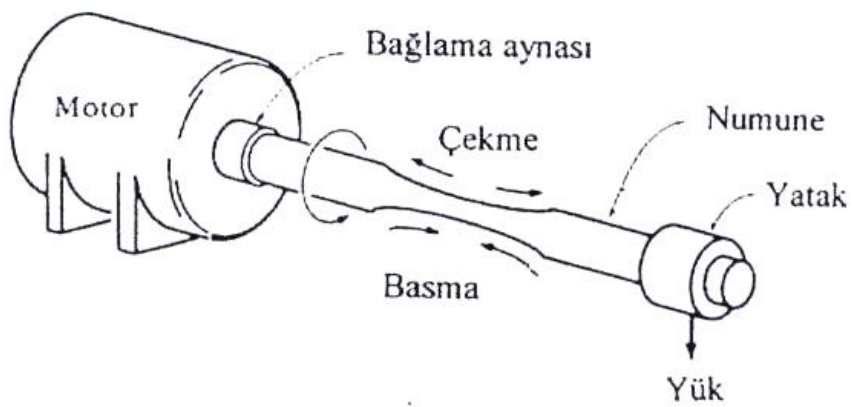
F : Yük (N)

d : Çap (mm)

dir.

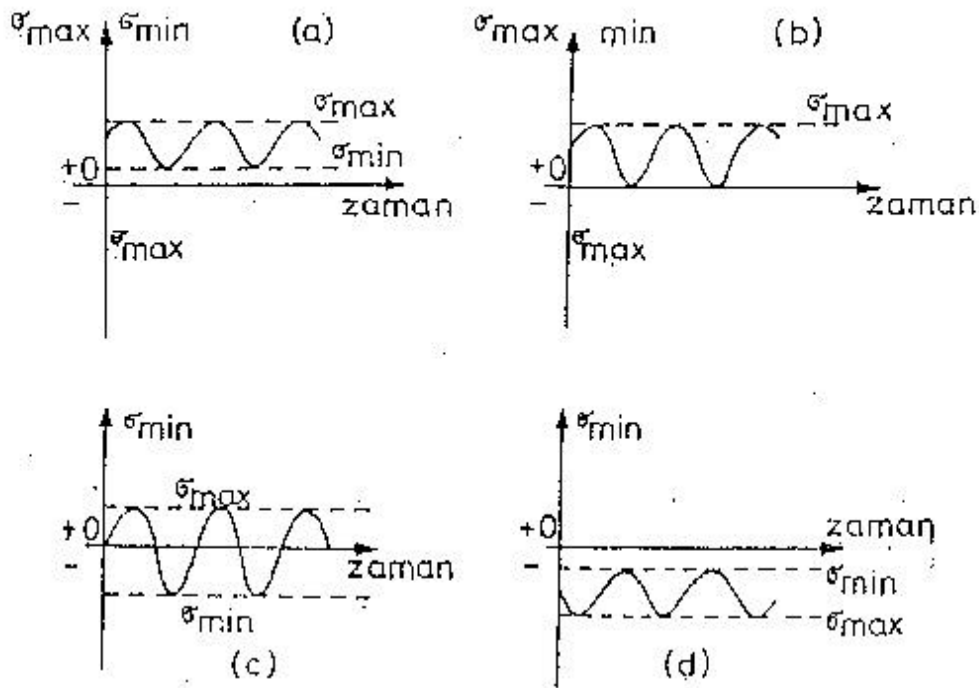


Sekil 3.9. Yorulma deneylerinde kullanılan Wöhler makinelerinin prensip seması (24)



Sekil 3.10. Wöhler makineleri “Serbest Uçlu Kiriş” test düzeneği (28)

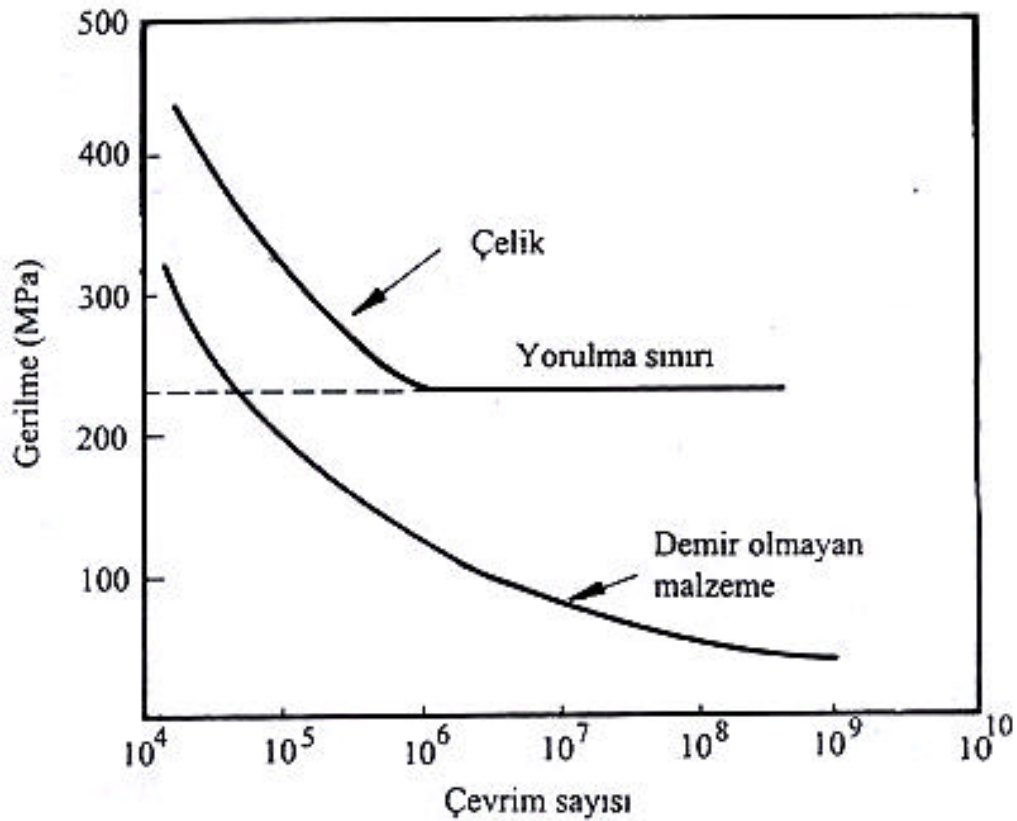
Yorulma cihazlarında bulunan tertibat sayesinde cisme uygulanan gerilmeler iki sınır arasında zamanın sinüzoidal bir fonksiyonu olarak, değiştiği belirtilmiştir. Şekil 3.11'de $\sigma_{\min}$ ve $\sigma_{\max}$ 'un muhtelif durumlarına göre gerilme zaman eğrisinin şekilleri görülmektedir. Çekme gerilmeleri (+) olarak alındığına göre, (a) da malzeme yalnız değişken çekme kuvvetlerinin etkisi altındadır ($R>0$). (b) de yine malzemeye yalnız çekme gerilmeleri etkiliyorsa da burada ($\sigma_{\min}$) sifıra esittir ($R=0$). (c) halinde ise $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$ olup bu durumda cisme aynı değerlerde maksimum çekme ve maksimum basma gerilmesi arasında değişen gerilmeler etkilemektedir ($R=-1$). Yorulmada bu durum özel bir haldir, buna alternatif gerilme hali denilmektedir. (d) de ise malzeme yalnız değişken basma gerilmelerinin etkisi altındadır ($R<-1$) (19).



Sekil 3.11. Yorulma gerilme periyotları (19)

Gerilmenin $\sigma_{\max} + \sigma_{\min} / 2$ 'den itibaren artarak $\sigma_{\max}$ 'a esit olması ve bundan sonra azalarak $\sigma_{\min}$ 'e düşmesi ve bunu izleyerek tekrar başlangıçtaki değerini almasıyla malzemeye bir yükleme işlemi yapılmış olur. Bu işlem deney aletlerindeki özel tertibat sayesinde belirli bir süre içinde belirli defa tekrarlanır. Bu şekilde saniyede yapılan yükleme sayısına yorulma deneyinin frekansı denilir. Genel olarak frekans, belirli bir kosulu asmamak şartı ile mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Bu

taktirde yorulma deneylerinin süresi kisa olabilir. Yüksek frekansli özel yorulma aletlerinde, dakikada 6000-8000 frekans degerine kolaylikla ulasabilmektedir. Çelik ve demir disi malzemelerin Wöhler egrileri Sekil 3.12’de verilmistir.



Sekil 3.12. Çelik ve demir olmayan malzemelerin tipik Wöhler diyagramı (24)

Demir çelik gurubuna giren malzemelerin yorulma egrileri, oda sicakliginda belli bir gerilme degerinde, belli bir çevirim sayisindan sonra yatay hale gelir. Yorulma diyagraminda egrinin yatay duruma geldigi gerilmege, yorulma siniri denir. Bu gerilmenin altindaki tekrarli gerilmelerde malzemenin sonsuz çevirime dayanabilecegi kabul edilir. Ancak demir disi malzemeler 100 milyon çevirim sayisindan sonra bile belirgin bir yorulma siniri göstermez.

Yorulma degerinden iki önemli büyüklük belirlenir. Bunlardan birisi yorulma ömrü, diğeri yorulma dayanimidir. Yorulma ömrü; belirli büyüklükte tekrarli gerilme etkileyen bir malzemenin kirlmesine kadar geçen çevirim sayisini gösterir. Yorulma

dayanımı ise; bir malzemenin belirli bir çevrim sayısı sonunda kırılmasına neden olan gerilme değeri olarak tanımlanır.

Demir – çelik grubu malzemelerde yorulma sınırı, demir disi malzemelerde ise, dayanım sınırı söz konusudur. Dayanım sınırı, gerilme altındaki malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı demektir. Demir ve çelik gibi malzemelerde yorulma sınırı (σ_y) ile çekme dayanımı (σ_{ϵ}) ve Brinell sertliği (BSD) arasında verilen bağıntı vardır.

$$\text{Yorulma sınırı } (\sigma_y) \approx \pm 0,5 \cdot \sigma_{\epsilon} \approx \pm 0,18 \cdot \text{BSD} \quad [3.8]$$

şeklindedir.

Demir disi malzemelerde ise belirli bir yorulma sınırı yoktur. Ancak yorulma dayanım sınırı olarak aşağıdaki bağıntının geçerli olduğu varsayılır (24).

$$\text{Yorulma Dayanımı Sınırı (YDS)} \approx 1 / 3 \sigma_{\epsilon} \quad [3.9]$$

4. KALICI GERİLME ve YORULMA İLİSKİSİ

Dis etkiler altında meydana gelen gerilmeler genellikle iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

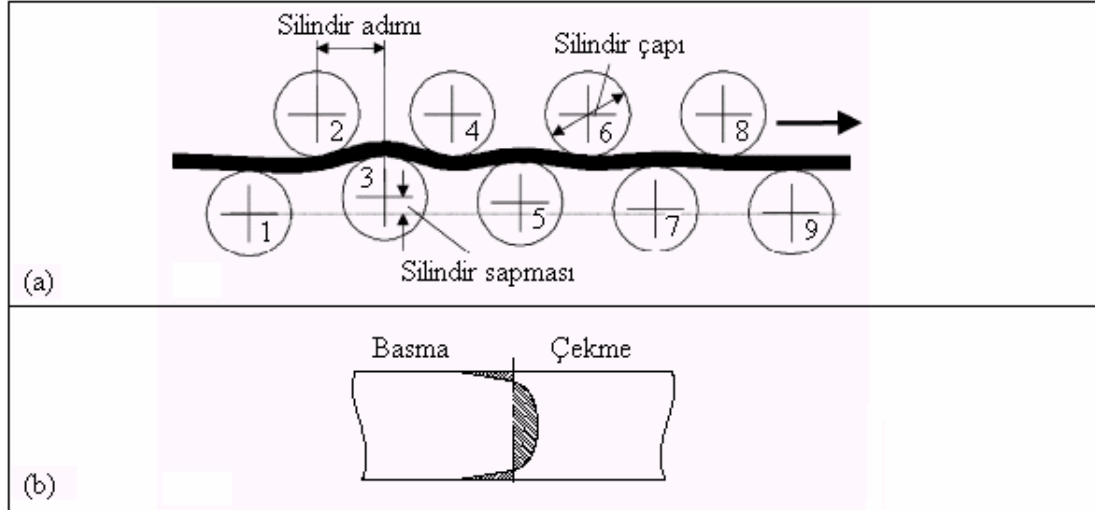
- a) Dis etkilerin kalkması ile cisimde kaybolan gerilmeler ve
 - b) Dis etkilerin kalkması ile cisimde kalan gerilmelerdir.
- Kalan bu gerilmelere kalıcı (artık) gerilmeler denmektedir.

Kalıcı gerilmeler, dış kuvvetlerden bağımsız olarak bir cisimde meydana gelen gerilmeler sistemi olarak da tanımlanır. Bir başka ifadeyle kalıcı gerilmeler, dış kuvvete bağlı olmayan ve bir parçada “hapsedilmiş” gerilmeler şeklinde düşünülmektedir (3).

Bir makine elemanı eğer hiç kalıcı gerilme bulundurmadan üretilmiş olsa bile özellikle değişken yüklemenin söz konusu olduğu servis şartlarında kalıcı gerilmeler ortaya çıkabilir. Bundan dolayı tasarım mühendisi bu tür gerilmeleri dikkate almak zorundadır (29).

Metallerin işlenmesi esnasında kalıcı gerilmelerin genel oluşumu Şekil 4.1 (a) da gösterilmektedir. Haddelendirme işlemini gösteren bu örnekte levhanın sadece üst yüzeylerinde plastik akma meydana gelmektedir. Levhanın merkezindeki lifler sıkıstırmadan etkilenmezken, levhadaki yüzey taneleri deforme olur ve uzamaya çalışır. Levha sürekli denge durumunu korumak zorunda olduğundan, merkez ve yüzey bölgelerinde rahat bir uzamaya uğramalıdır. Yüzey lifleri levhanın merkez liflerini uzatmaya çalışırken, merkez lifleri yüzey liflerinin uzamasına engel olmaya çalışır. Bu durumda, levhanın merkezinde çekme ve yüzeyde basma özelliğine sahip kalıcı gerilmelerin oluştuğu bir gerilme modeli ile sonuçlanır. Cisimlerde oluşan kalıcı gerilme sistemi statik olarak dengede olmalıdır. Şekil 4.1. (b) deki yatay yöndeki kalıcı gerilme bölgeleri dengededir. Kalıcı basma gerilmelerine bağlı eğri altında kalan alan kalıcı çekme gerilmeleri altında kalan alanı dengelemelidir.

Ancak, üç boyutlu kalıcı gerilme modellerinin bulunması, gerçek durumu daha da karmaşık yaptığı unutulmamalıdır (7).



Sekil 4.1. Metallerin işlenmesi sırasında kalıcı gerilmelerin genel oluşumu
a) Levhanın haddelenmesi sırasında homojen olmayan deformasyon
b) Levha kalınlığı boyunca oluşan kalıcı gerilme dağılımı

Kalıcı gerilmeler sadece elastik gerilmelerdir. Kalıcı gerilmenin ulaşabildiği maksimum değer malzemenin akma gerilmesi ile sınırlıdır. Gerilme bu değeri geçtiği anda, ters yönlü bir dış kuvvet yoksa, akma gerilmesi değerine ininceye kadar malzeme kendisini boşaltır. Bir diğer ifade ile plastik deformasyon meydana gelerek kalıcı gerilme değeri düşer (29).

Yüzeyde uygun basma özelliğine sahip kalıcı gerilme bileşeninin oluşumu, muhtemelen yorulma performansının artırılmasının çok etkili bir yoldur. Yüzeyde arzu edilen basma türü kalıcı gerilmelerin meydana getirilmesinde kullanılan en önemli ticari metotlar, dönen rulolarla yüzeyin haddeden geçirilmesi ve bilyalı dövme ile sağlanır (3).

Kalıcı gerilmeleri anlayabilmek için gerekli kabuller:

- Kalıcı gerilme sistemi dengededir.
- Kalıcı gerilme sistemleri üç boyutludur.

- Kalici gerilmeler, çekme ve basma türü kalici gerilmeler ile ifade edilir.
- Malzemenin atomik kafes yapisi içerisinde giren yabancı atomlar kalici gerilme sistemlerini etkiler.
- En iyi yorulma direnci, yorulma çatlaklari dogrultusuna dik bir dogrultuda olusturulacak basma özelligine sahip türdeki kalici gerilmeler ile saglanabilmektedir.
- Kalici gerilme sistemleri, metaldeki termal, mekaniksel veya kimyasal degisikliklerin sebep oldugu durumlarda yada birçok imalat islemleri yardimiyla biçimlendirilebilir ve degistirilebilir
sekinde özetlenir (3).

4.1. Kalici Gerilmelerin Olusumu ve Yorulma Dayanimi

Parçalarda kalici gerilme olusturma metotlari dört ana gruba ayrilir.

- a) Mekaniksel metotlar ile
 - b) Termal metotlar ile
 - c) Kaplama metotlari ile
 - d) Imalat metotlari ile
- sekinde siniflandirilir.

Bu metotlari hemen hemen hepsi tüm metallerde uygulanabilir. Fakat bazı yöntemler özel metal aileleri ile sinirlidir (30). Problem, kalici gerilmelerin kaynaklariinin bilinmesinden ve kontrol edilmesinden ibarettir; bunlar bilindigi taktirde, kalici gerilmelerden istenilen yönde sonuç elde edilebilmektedir. Kalici gerilmeler faydali ve zararli olarak siniflandirilabilir. Yorulma açısından özellikle makine parçalarında degisik yöntemler ile isteyerek meydana getirilen ve yüzey bölgelerinde çekme gerilmesi bulunmasi durumu faydali kalici gerilme sistemi olarak düşünölmelidir. Çünkü yorulma olayinin gerçektelebilmesi için; yüzeyde çekme gerilmesinin bulunmasi, bu gerilmenin belirli bir deger üzerinde olmasi ve tekrarli degisken yüklemenin etkili olmasi kosullariinin yerine getirilmesi gerekmektedir (29).

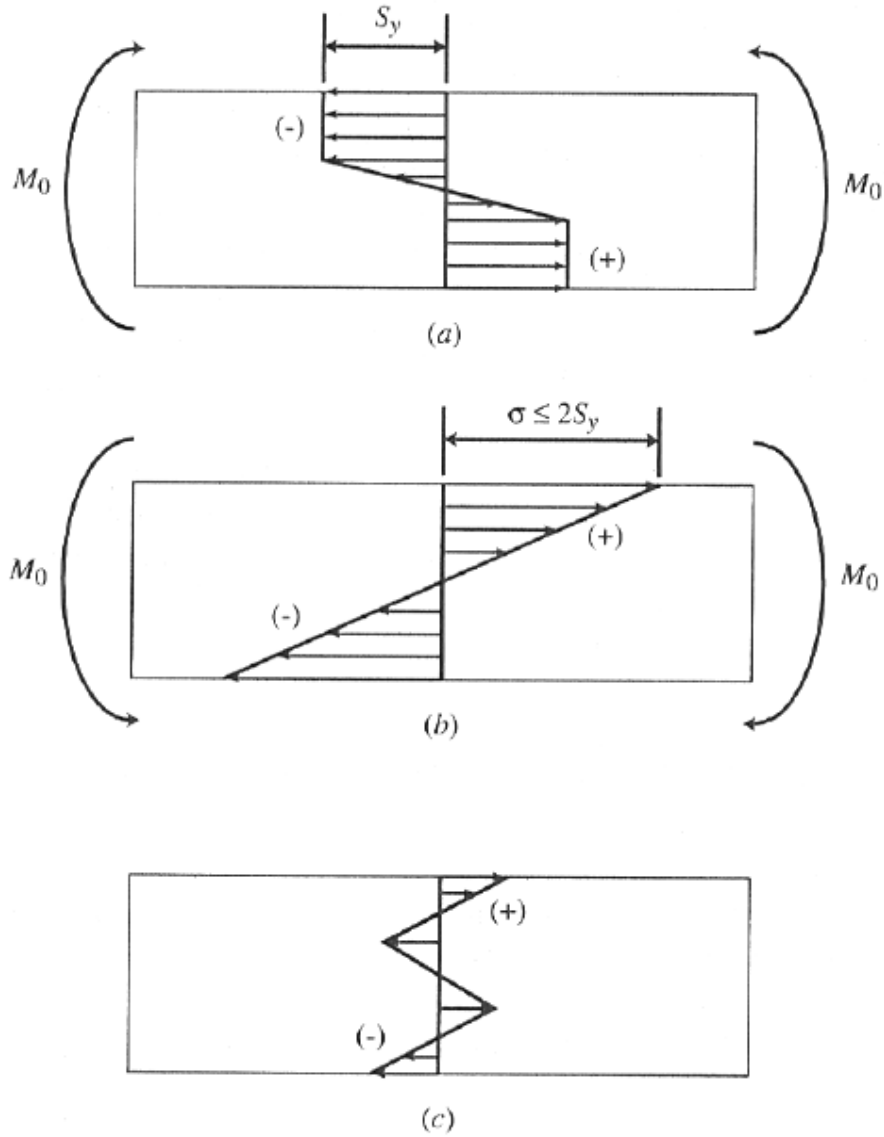
4.1.1. Mekaniksel metotlar ile olusturulan kalici gerilmeler

Bunlar bölgesel plastik deformasyonlar olarak düşünülebilir. Malzeme üzerinde bölgesel uygulanan dış yükler sonucu meydana gelen bölgesel plastik deformasyonlar kalici gerilmelerin dogmasına neden olurlar (30).

Bu prensibe verilebilecek en güzel örnek, metal bir yüzeye bilyalı dövme isleminin yapılmasıdır. Bilya ile dövme işlemi, bir çok küçük çukurla yüzeyde basma özellikli ön gerilmelerin meydana getirilmesini sağlar.

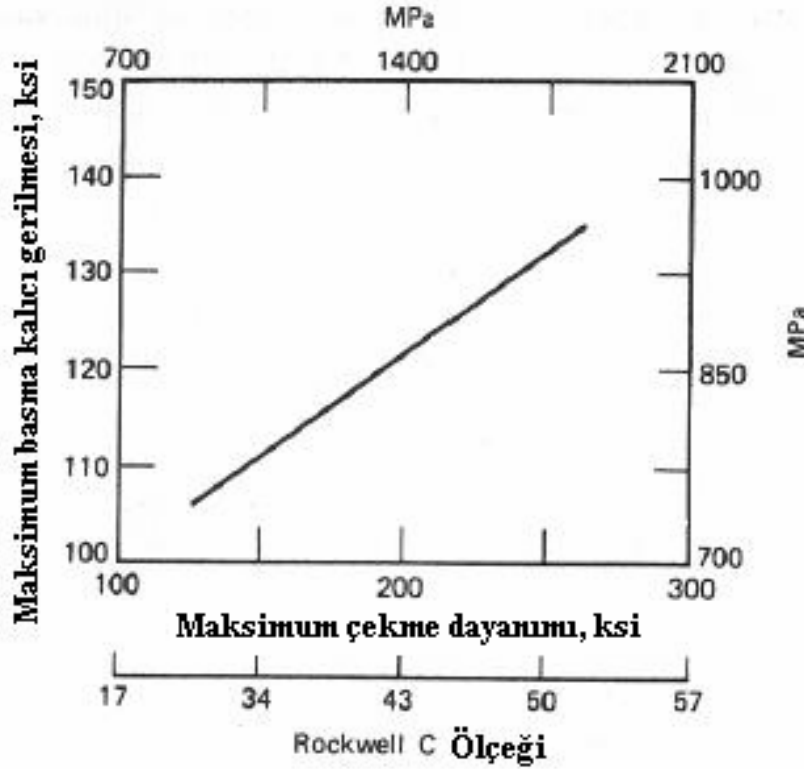
Brinel sertlik ölçme deneyine benzer tarzda, is parçasının üzerine bir bilya daldırılmaya çalışılırsa malzeme kenarlara doğru yayılır. Çünkü bu bölgede malzeme plastik deformasyona ugramıştır. Ancak daha iç bölgelerde ise elastik sınır geçilememiştir. Bilya üzerinden yük kaldırıldığında bu bölgedeki malzeme eski şeklini almaya çalışacaktır. Ancak plastik deformasyona ugramış bölge buna izin vermeyecektir. Böylece kalici gerilmeler ortaya çıkacaktır. Böyle bir işlem sonucu oluşan kalici gerilme dağılımı Sekil 4.1 (b)'de görülmektedir (29).

Sekil 4.2'de parça geometrisi, moment ve akma gerilmesine (S_y) bağlı olarak uygulanmış olan momentin olusturduğu gerilmenin derinliğe göre dağılımı verilmiştir. Sekil 4.2 (a)'da parçaya disaridan moment uygulandığında parçanın üst liflerinde basma alt liflerinde çekme gerilmesi olustugu görülmektedir. Sekil 4.2 (b)'de yük yada moment kaldırıldığında elastik yay geri dönüşüm gerilmenin dağılımı görülmektedir. Sekil 4.2 (c)'de ise parçaya yük yüklenip kaldırıldığında ortaya çıkan gerilme dağılımı görülmektedir (30).



Sekil 4.2. Elastik olmayan egmede kalici gerilme dagilimi
a) Elastik olamayan yükleme esnasinda gerilme dagilimi
b) Yük kaldirildiktan sonraki elastik iyilesme
c) Yükleme bosaltmadan sonra ortaya çıkan kalici gerilme dagilimi (30)

Mekanik yöntemlerden biri olan bilyeleme sonucu parçada olusan kalici basma gerilmelerinin çekme dayanimi ile iliskisi Sekil 4.3'de görülmektedir. Grafige göre çekme dayanimi arttika kalici basma gerilmesi de artmaktadır.



Sekil 4.3. Çelikte bilyeleme sonucu oluşturulan kalıcı basma gerilmesinin çekme dayanımına karşılığı (30)

4.1.2. Termal metotlar ile oluşturulan kalıcı gerilmeler

Parça şekillendirmede kullanılan imalat işlemleri mikro yapı, son yüzey ve kalıcı gerilme gibi kapsamlı değişkenleri içerir. Bir çok üretim işlemleri nitrürasyon, karbürasyon, alevle ya da indüksiyon sertleştirme, gerilme giderme, sertleştirme ve temperleme, lehimleme, kaynak, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, sıcak haddeleme, dövme, döküm gibi termal işlemleri içerir. Termal işlemlerden dolayı oluşan kalıcı gerilmelerin bazıları yararlı bazıları zararlıdır. Termal işlemler parçaların yorulma dayanımlarını arttırmak için kullanılan çok eski yöntemlerdir. Çeligin yüzeyini sertleştirme termal metotlara ilk örnektir (30). Sertleştirme işlemleri sonucu iş parçasının yüzey bölgesinde hacim değişiklikleri de ortaya çıkar. Semantasyon işleminde yüzeyde meydana gelen martenzitik dönüşüm sonucu hacimde artış görülür. Nitrürasyonda ise düşük sıcaklıkta yüzeye yayılan azot atomları yüzeye nitrürler oluşturarak çökelir ve hacim artışına neden olur. Sonuçta iç gerilmeler doğar (29).

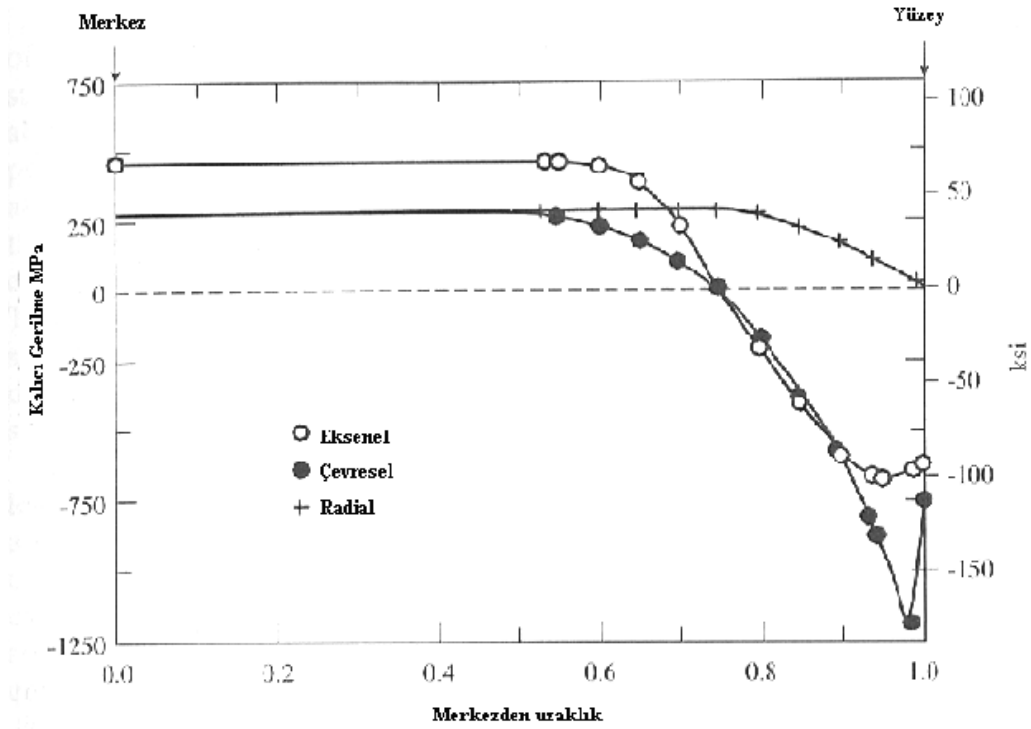
Bir metal ısıtıldığında ve hemen ardından soğutulduğunda meydana gelen farklı genleşmeler, ısı kaynaklı kalıcı gerilmelerin oluşumunun temel nedenidir. Tam veya yüzey sertleştirme ısı işlemlerinde ısı parçasının farklı bölgelerinde farklı sıcaklıkların bulunmasından iç gerilmeler doğar. Zira bu işlem esnasında doğal olarak dış yüzey bölgelerinde soğuma hızı daha yüksektir. Ayrıca faz dönüşümü sonucu da kalıcı gerilmeler meydana gelmektedir (2 -3).

Ayrıca kaynaklı birleştirmelerde lokal ergitme ve birleştirilen ısı parçalarında farklı soğuma hızlarından dolayı iç gerilmeler oluşur (29).

Isıl kaynaklı kalıcı gerilmelerin oluşumu iki faktörün sonucu olarak ortaya çıkar: Sıcaklık (ısının olması ya da soğuma) ve zorlama. Hem ısı hem de zorlayıcı faktörler kalıcı gerilmelerin oluşumuna veya kalıcı gerilme modelinin etkilenmesine yol açmaktadır (3).

Karbonlu çeliğin sertleştirilmesi, nitrürasyon, karbürasyon, indüksiyon sertleştirme gibi benzer metotlar yüzey sertleştirmede en iyi yöntemlerdir. Şekil 4.4’de SAE 1045 40 mm çapındaki indüksiyon sertleştirilmiş saft çeliğinin (eksenel, çevresel, radyal yönlerinde) kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Parçanın kabuk sertliği 50 HRC ve iç sertliği yaklaşık 10 HRC’ dir.

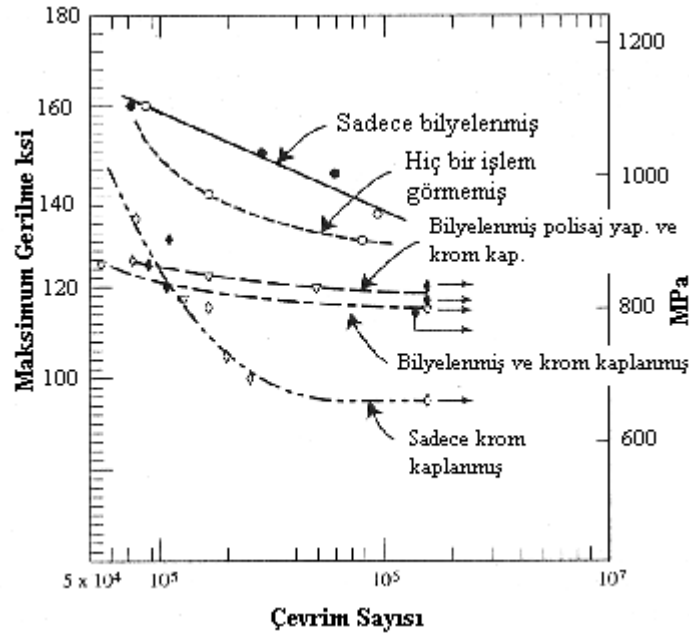
Şekil 4.4’de görüldüğü gibi eksenel ve çevresel kalıcı gerilmeler yüzeyde basma, merkeze doğru inildikçe çekme gerilmesine dönüşmektedir. Indüksiyon sertleştirme prosedürü ve malzemeye bağlı olarak, indüksiyon sertleştirilmiş saftlarda kalıcı gerilme değerleri ve kabuk derinliği değerleri bir birine orantılıdır (30).



Sekil 4.4. SAE 1045 çeligidenden yapılmış 40 mm çapındaki indüksiyon sertleştirilmiş saft numunelerin x-ray yöntemi ile ölçülmüş kalıcı gerilme dağılımları (30)

4.1.3. Kaplama metotları ile oluşturulan kalıcı gerilmeler

Elektrolitik kaplama, yumuşak kaplama materyalleri kadmium, çinko, kalay yada bakır gibi veya sert kaplama materyalleri krom ve nikel gibi kaplamaları içerir. Kaplama yapılan parçanın korozyona karşı direnci ve estetik görüntüsü iyileşir. Ayrıca krom kaplama aşınma direncinin ve aşınmış çok küçük parçaların düzeltilmesinde kullanılır. Krom yada nikel kaplama ile önemli miktarda çekme kalıcı gerilmeleri oluşur. Krom yada nikel kaplanmış parçalarda yorulma dayanımı önemli ölçüde düşüş gösterir (Sekil 4.5). Uzun ve orta ömürlü yüksek dayanimli çeliklerde kaplama kalınlığına bağlı olarak yorulma dayanımlarında düşüşler olur. Fakat düşük dayanimli çeliklerde düşük yorulma çevriminin altında dış yükleme ile kalıcı gerilmelerdeki azalmadan dolayı önemli miktarda plastisite (yogrukluk) meydana gelir (30).



Sekil 4.5. Bilyelenmiş ile krom kaplanmış 4130 çeliginde krom kaplamanın eksenel yüklemde yorulma davranışına etkisi (30)

Yüzey kaplamaları kalıcı gerilme modelini etkileyebilir. Genellikle kaplama malzemesinin yüzeyinde çekme türü kalıcı gerilmeler meydana gelirken ana malzemede bunu dengeleyecek basma türü kalıcı gerilmeler meydana gelir. Buna bağlı olarak kaplama tabakasında kolayca oluşan yorulma çatlakları ana malzemeye iletilir (3).

4.1.4. İmalat metotları ile oluşturulan kalıcı gerilmeler

İmalat operasyonlarından olan tornalama, frezeleme, planyalama, delme gibi ve asınma operasyonlarından olan taslama, polisajlama, honlama gibi operasyonlar yorulma dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Tüm yüzey operasyonlarını içeren bu metotlarda yorulma çatlakları oluşabilir ve gelişebilir. Bunlar yorulma dayanımını etkileyen dört büyük faktör içerirler. Bu dört büyük faktör son yüzey, soğuk çalışma, mikro yapıdaki muhtemel hal değişimleri ve kalıcı gerilmelerdir. Yorulma dayanımına katkısı bulunan bu dört faktörden kalıcı gerilmeler en baskın faktörlerden olabilir. Kullanılan metallerde ve farklı işleme operasyonlarında yüzeydeki kalıcı gerilmeler genellikle çekme alt yüzeylerde kalıcı basma gerilmeleri

olusur. Yüzeyden merkeze inildikçe kalici çekme gerilmeleri sıklıkla küçülür, yaklaşık 0,02-0,2 mm arası; bundan dolayı polisaj yapılarak kalici gerilmelerin bir kısmı yok edilebilir (30).

4.2. Kalici Gerilme Ölçüm Metotları

Kalici gerilme ölçüm metotlarını üç grupta toplayabiliriz.

1. Mekanik metotlar;

- a) Delik delme metodu
- b) Halka delik delme metodu
- c) Derin delik delme metodu
- d) Kesit alma ve katman kaldırma metodu

şeklinde sıralanmaktadır..

Bu metotlar tahribatlı ya da yarı tahribatlı olarak da anılır ve bunlar dikkat gerektiren işlemler yardımıyla (delik delerek, katmanlar kaldırarak) bileşenin geometrisinde oluşturulan değişime bağlıdır. Bu metotlarda gerilmedeki bileşke değişiklikler ölçülür ve ondan sonra orijinal gerilme üyeleri belirlenir.

2. Isınların kullanıldığı metotlar;

- a) X-ışını metodu
- b) Nötron difraksiyon metodu

şeklinde sıralanmaktadır..

İnce bir yüzey katmanındaki kalici gerilmeyi belirlemek için kullanılan X-ışınları tahribatsızdır. Kalici gerilmeleri ölçmek için numune yüzeyinin nötron bombardımanına maruz bırakıldığı, nötron kırınım metotları da bu gruba dahil edilebilir.

3. Diğer metotlar,

- a) Manyetik metot
- b) Ultrasonik metot

şeklinde sıralanmaktadır (2 -3).

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Giris

Bu çalışmada, tornalanmış ve farklı sertlik değerlerinde sertleştirme işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 çelik malzemesinde oluşan kalıcı gerilmeler, katman kaldırma esasına dayanan elektro kimyasal yöntem ile ölçülerek, bu malzeme için yüzeydeki kalıcı gerilme değerinin yorulma dayanımı ile ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

5.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan AISI 4140 çeligi basınç kapları, uçak yapı parçaları, oto aksları, aks mafsalları gibi geniş bir alanda kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan çeligin Spektrel analizi Çizelge 5.1’de verilmiştir. Çizelge 5.2’de de AISI 4140 çeliginin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. AISI 4140 çeliginin kimyasal bileşimi

Element	C	Mn	Si	Cr	S	P	Mo
%	0,41	0,83	0,21	0,9	0,027	0,027	0,18

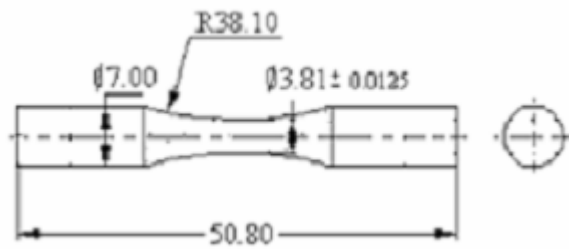
Çizelge 5.2. Su verilmiş ve temperlenmiş AISI 4140 çeliginin mekanik özellikleri (31)

Temperleme Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı MPa	Akma Dayanımı MPa	Sertlik HRC
204	1771	1640	51
316	1551	1433	48
427	1247	1137	40
538	951	834	30
649	758	654	20<=

Kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. Genellikle değişik araştırmacılar kullandıkları cihaza uygun farklı numune tipleri geliştirmişlerdir. Deneylerde kullanılan numuneler ASTM E-466 ve 468'e göre hazırlanmıştır (32-33) (Şekil 5.1).

Yorulma deneyi numunelerinin hazırlanmasında büyük özen gerekmektedir. Talas kaldırma işlemi malzemeye uygun kesici takım ile yapılmalı ve iç gerilmelerin oluşmasını engellemek için asiri deformasyonlardan (büyük pasolardan) ve asiri ısınmalardan kaçınılmalıdır. Talas kaldırma esnasında özellikle enlemesine çizik ve çentiklerin oluşmamasına dikkat edilmelidir. Bu nedenden dolayı numuneler 16 mm çapında soğuk haddelenmiş ham malzemeden, CNC torna tezgahında işlenmiştir (Şekil 5.1). Ayrıca ham malzeme yüzeyindeki haddelemeye kaynaklanan gerilmeler 16 mm çapındaki malzemeden işlenerek ortadan kaldırılmıştır.

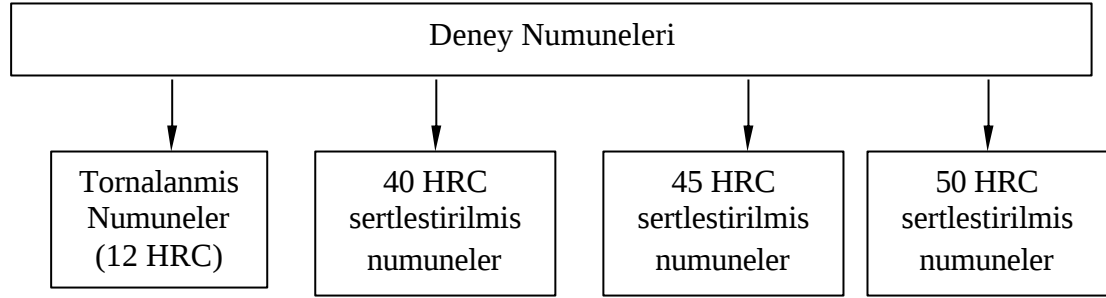
Talas kaldırmadan sonra numune ya taslanmalı ya da çeşitli numaralardaki zımparalar ile yüzey kalitesi artırılmamıştır. Çalışmada kullanılan numunelerin yüzey kalitesini arttırmak için sırasıyla 180, 220, 400, 600, 800 ve 1200 numara zımpara ile aksel olarak zımparalanarak, tornada işleme sırasında meydana gelmiş dairesel çizikler bertaraf edilmiştir.



Şekil 5.1. Deney numunesi

Deney numunelerinin hepsi CNC torna tezgahında işlenip, zımpara ile yüzey kalitesi artırıldıktan sonra dört gruba ayrılmıştır. Şekil 5.2'de de görüldüğü gibi numunelerin bir kısmı sadece tornalanmış kalan numuneler ise üç gruba ayrılarak 40, 45, 50 HRC sertlikte sertleştirilmişlerdir. Tornalanmış ve parlatma işlemi yapılmış numuneler

KOSGEB tesislerinde ± 1 HRC toleransta istenilen sertlik degerlerine getirilmistir (Çizelge 5.3). Daha sonra her grubun S-N grafigi olusturulmustur.



Sekil 5.2. Deneylerde kullanılan numune gruplari

Çizelge 5.3. Isil islem parametreleri

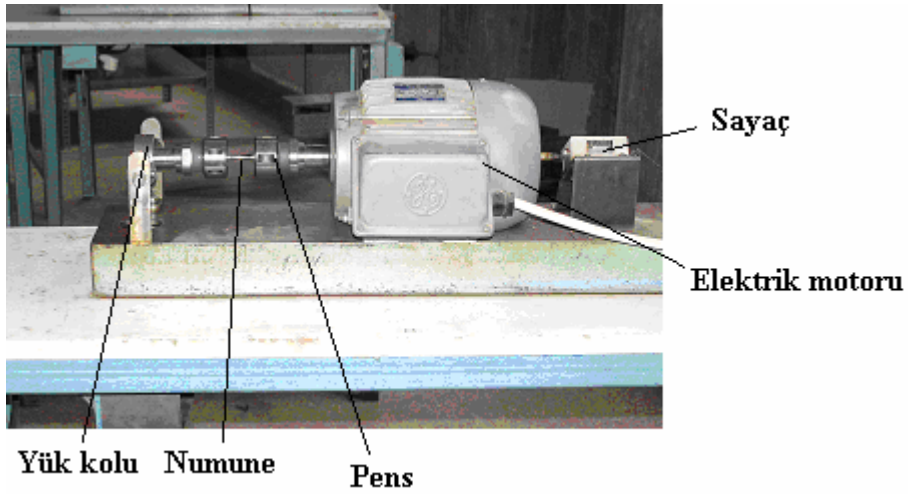
Sertlik degeri (HRC)	Sertlestirme sicakligi (°C)	Sertlestirme suresi (saat)	Sertlestirme ortami	Temperleme sicakligi (°C)	Temperleme suresi (dak)
40	850 °C	1	Yag	400 °C	40 dak
45	930 °C	1	Yag	400 °C	40 dak.
50	930 °C	1	Yag	350 °C	40 dak

Tüm gruplari S-N grafigleri olusturulduktan sonra elde edilen yorulma dayanimi degerlerinin %10, %20, %30 üst degerlerinde numuneler kopmayacak sekilde yorulma testine tabi tutulmustur (Çizelge 5.4). Numunelerin bu seviyelerdeki ve islem görmemis hallerindeki kalici gerilmeler ölçülmüştür.

5.3. Deney Cihazlari ve Takimlar

Yorulma deneyleri saft hizi 2800 d/d olan “Masa üstü dönen egmeli (Wöhler) yorulma makinesi” kullanilarak yapilmistir.

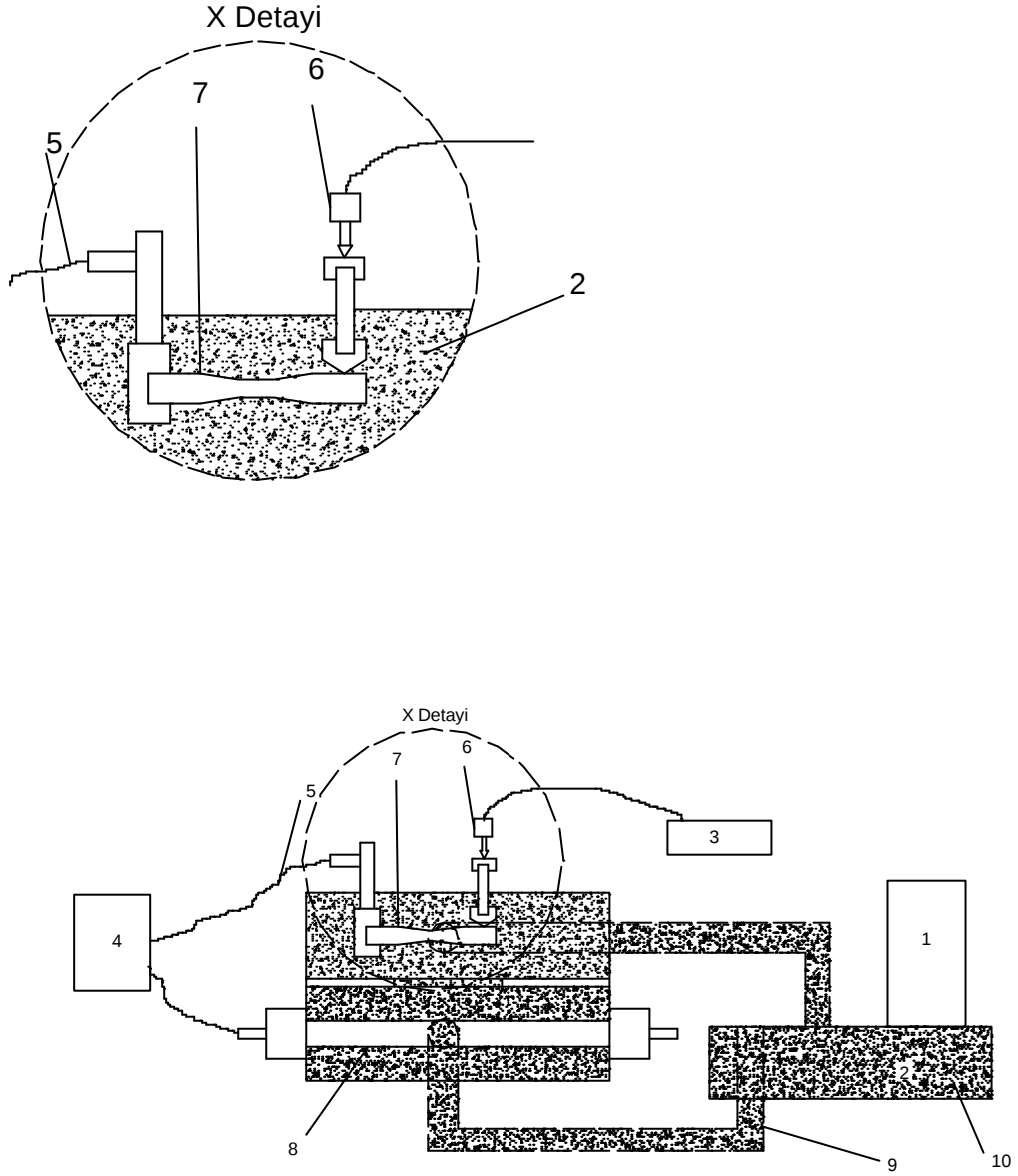
Uygulanan gerilme sonrasinda numunenin kaç devir sonra koptugu yine makine üzerinde bulunan bir sayaç yardimi ile tespit edilmistir.



Sekil 5.3. Yorulma deney cihazı

Bu çalışmada kalıcı gerilmelerin ölçümleri, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde bulunan kalıcı gerilme ölçüm cihazında yapılmıştır. Kalıcı gerilme ölçüm cihazı Sekil 5.4’de sematik olarak gösterilmiştir. Numunedeki sehimin ölçümü 0,0001 hassasiyetindeki Linear Gage ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihazın elektro kimyasal kısmı elektrolit, anot (numune), katot, elektrolit havuzu ve DC güç kaynagından oluşmaktadır. Elektrolit havuzu polietilen malzemeden yapılmış bir plastik hazneden ibarettir. DC güç kaynagi olarak, voltaj ve akım değeri ayarlanabilen bir doğru akım güç kaynagi kullanılmıştır.

Elektro kimyasal işlemede, malzeme tipleri ve bunlara uygulanan elektrolitler incelenmiş ve AISI 4140 malzememizin kimyasal bileşimi dikkate alınarak en uygun elektrolit tipinin, fosforik asit (430 ml), sülfirik asit (330 ml), gliserin (100 ml) ve su (140 ml) karışımı ile elde edilen elektrolit olduğu anlaşılmıştır.



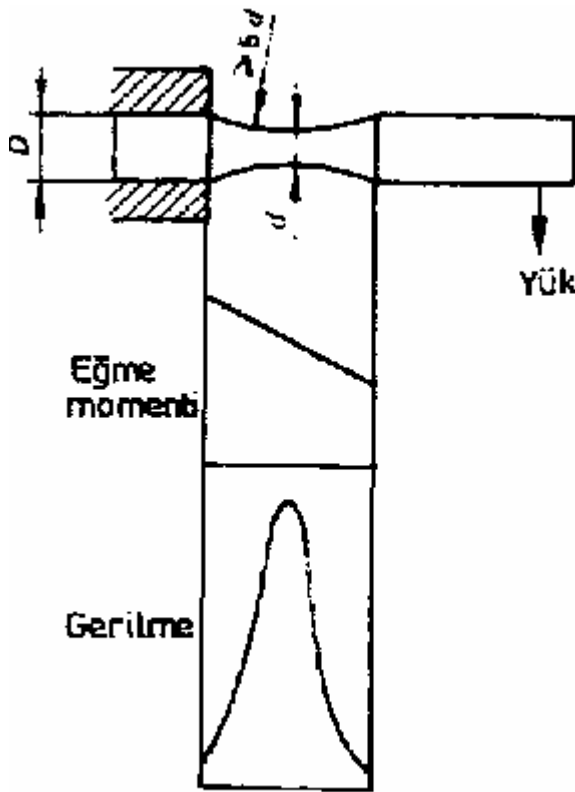
Sekil 5.4. Sematik olarak kalıcı gerilme deney düzeneyi

- 1)Pompa 2) Asit 3) Gösterge 4) DC Güç kaynagi 5) Kablo 6) Linear Gage
7) Numune 8) Katot 9) Hortum 10) Asit deposu

5.4. Deneylerin Yapilisi

5.4.1. Yorulma deneyleri

Yorulma deneyi için numuneler test cihazına 7 mm'lik pensler ile bağlanmıştır. Pensler arasındaki mesafe TSE 1143'e uygun olarak numunenin en dar kesitinde oluşacak maksimum gerilme hesaplanarak bulunmuştur. Numunelerin en dar kesitinde oluşan maksimum gerilme Şekil 5.5'de gösterilmektedir. Numunelere yükün uygulanması da Şekil 5.5'de görüldüğü gibi numunenin uç kısmından olmuştur.



Şekil 5.5. Numune üzerindeki maksimum gerilme

Çalışmada yorulma grafiklerinin oluşturulmasında aynı numune grubu için 12 numune kullanılmıştır. Grafikler oluşturulur iken ilk önce literatür araştırılması yardımı ile numunelerin akma sınırlarına yakın değerler tespit edilmiştir. Daha sonra akma sınırından aşağıya doğru belirlenen aralıklar ile inilerek o numune grubunun

yorulma dayanım sınırı tespit edilmistir. Yorulma grafikleri olusturulur iken her yüklemede üç numune kullanilmistir. Ardında her numune grubu için tespit edilen yorulma dayanımı değerinin  izelge 5.4’de gösterilen %10, %20, %30 üst değerlerinde numuneler kopmayacak sekilde yorulma testine tabi tutularak kalici gerilme deneylerinde kullanılacak numuneler hazirlanmistir.

Çizelge 5.4. Kalici gerilmesi ölçülen numune seviyeleri

Numune	Yorulma Dayanımı	%10	%20	%30
Tornalanmıs	463 MPa	511 MPa	557 MPa	613 Mpa
40 HRC sert.	783 MPa	877 MPa	969 MPa	1014 Mpa
45 HRC sert.	792 MPa	877 MPa	969 MPa	1060 Mpa
50 HRC sert.	739 MPa	831 MPa	877 MPa	969 Mpa

Yorulma deneyleri sırasında bir gerilme seviyesinde kopmayan numuneler diğer bir gerilme seviyesinde kullanılmamistir. Deneyler esnasında yorulma makinesinde bir numune bağlı iken elektrik kesintisi vs. sebeple makine durduğunda deneye tekrar bastan ve yeni bir numune ile baslanmıs ve o numune deneyde kullanılmamistir. Uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamıs ise deney 10^7 çevrim sayısını geçince kesilmistir. Deneyler, Wöhler yorulma test cihazında periyodik olarak basma ve çekme yüklemesi yapılarak olduğu için $R = -1$ ’dir. Bütün yorulma deneyleri laboratuvar şartlarında yapılmistir.

5.4.2. Kalici gerilme deneyleri

Numunelerdeki kalici gerilme değerleri katman kaldırma tekniği esasına dayanan elektro kimyasal yöntem ile  l  lm st r. Bu işlemde parça yüzeyinden katmanların kaldırılması yüzeye gönderilen elektronlar yardımıyla olmaktadır.

Elektro kimyasal islemede, kullanılan malzemenin kimyasal bileşimine uygun elektrolit seçimi çok önemlidir. Deneylerde kullandığımız AISI 4140 malzemesine

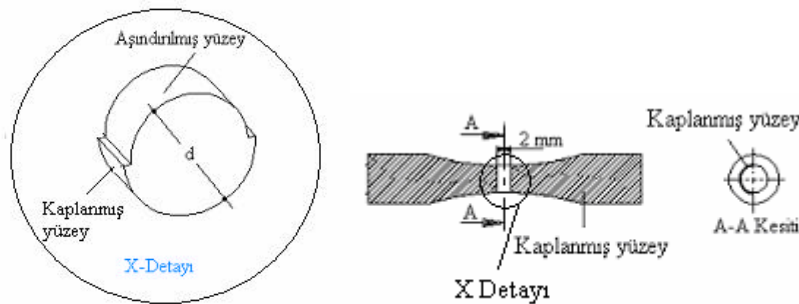
en uygun elektrolit tipinin, fosforik asit (430 ml), sülfirik asit (330 ml), gliserin (100 ml) ve su (140 ml) karışımı ile elde edilen elektrolit olduğu anlaşılmıştır. Deneylere başlamadan önce bu karışım hazırlanmıştır. Elektrolitin hazırlanmasından sonra numunelerdeki sehim ölçen Linear Gage ölçüm cihazı kalıcı gerilme deney setine monte edilmiştir.

Deneylerde Çizelge 5.5’de gösterilen AISI 4140 çeligidinden hazırlanmış numune grupları ölçülmüştür.

Çizelge 5.5. Kalıcı gerilme deney numuneleri grupları

Kalıcı Gerilme Deney numuneleri			
Yorulma testi uygulanmamış	Seviyelerinde yorulma testi uygulanmış		
Sadece tornalanmış	511 MPa	557 MPa	613 Mpa
40 HRC sertleştirilmiş	877 MPa	969 MPa	1014 MPa
45 HRC sertleştirilmiş	877 MPa	969 MPa	1060 MPa
50 HRC sertleştirilmiş	831 MPa	877 MPa	969 Mpa

Deneye başlanmadan önce numunelerin en dar kesit ölçüleri alınmıştır. Daha sonra numunelerin asındırma yapılmayacak kısımları koruyucu malzeme ile kaplanmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Koruyucu malzeme ile kaplanmış numune

Elektro kimyasal işleme her bir numune için 30 dakika sürmüs olup, bu süre sonunda numunelerden 0,45 mm tabaka kaldırılmıştır. 30 dakikalık deney süresince her 30

saniyede bir ölçü alınarak yaklaşık 0,006 mm'lik katmanlardaki gerilme değerleri kaydedilmiştir. Numunelerde inilen bu derinlik, literatür de yapılan çalışmalar incelendiğinde yeterli kabul edilmiştir. Her numune grubu için 15 ölçüm yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalamaları alınmıştır.

6. SONUÇ VE TARTISMA

6.1. Giris

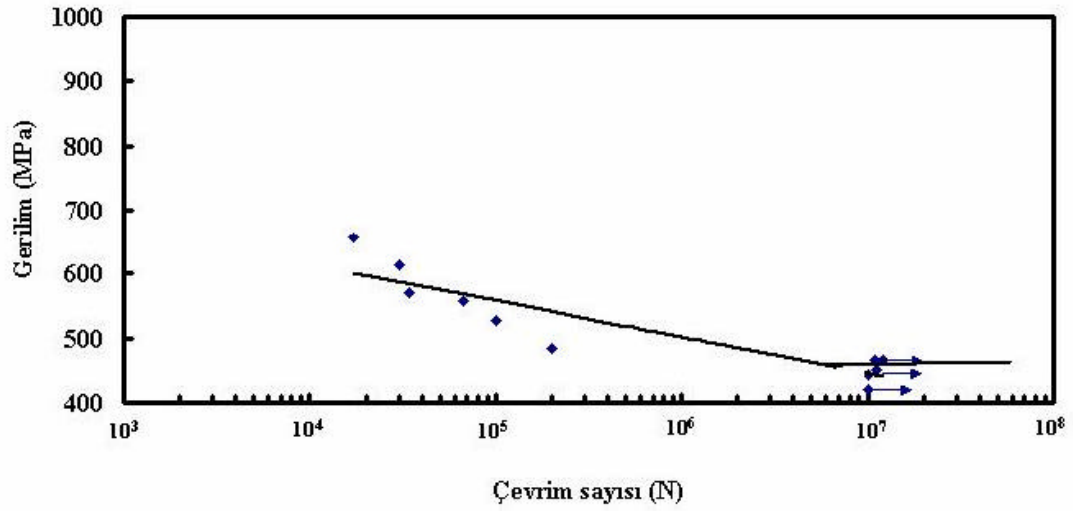
Degisik imal yöntemleriyle üretilmiş makine elemanlarında olusabilecek kalici gerilmelerin çok iyi bir sekilde analizinin yapılması gerekmektedir. Kalici gerilmeler parça çalışma performansini belirleyen bir kriter olmakla beraber, parça tasarımı ve ömrünü tayin etmede dikkate alınması gereken bir parametredir.

6.2. Yorulma Deney Sonuçlari

Numunelerin yorulma testleri döndürme egme test makinesinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Wöhler eğrisi'ni kullanarak Microsoft Excel programı ile logaritmik olarak grafikleri çizilmiştir.

Yorulma deneylerinde ilk olarak sadece tornalanmış, 40, 45, 50 HRC sertleştirilmiş tüm numunelerin S-N grafikleri çıkartılmıştır. Ardından kalici gerilme ölçümü yapılacak numunelerin yorulma deneyleri yapılmıştır.

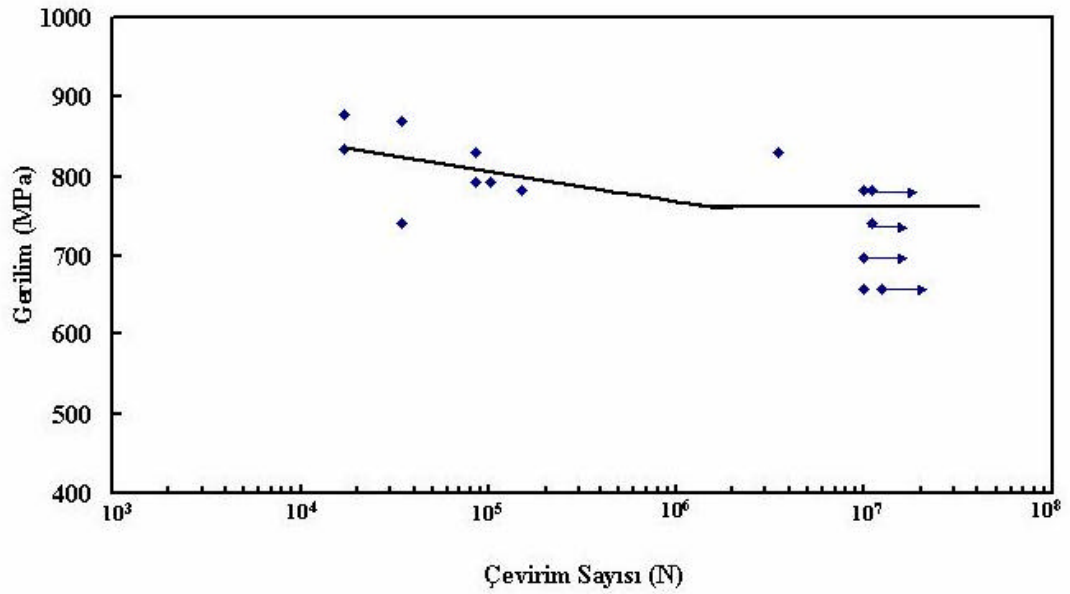
Sekil 6.1'de tornalanmış numunenin S-N grafiği görülmektedir. Grafiğin olusturulmasına tornalanmış AISI 4140 çeliginin akma sinirine yakın bir degerde gerilme uygulanarak başlanmıştır. Ardından numuneye uygulanan gerilmeler 10, 20 MPa azaltılarak deneylere devam edilmiştir. Bu gerilmeler sonucunda numunenin kaç çevrim sonunda koptuğu test cihazı üzerindeki sayaç yardımı ile tespit edilmiştir. Uygulanan gerilme degerinde numune kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısını geçince durdurulmuştur. Elde edilen veriler logaritmik olarak grafiğe çevrilmiştir. Bu işlem sonucunda tornalanmış numunenin yorulma dayanımı 463 MPa olarak bulunmuştur (Sekil 6.1).



Sekil 6.1. AISI 4140 tornalanmış numunenin S-N grafiği

Choo, ve arkadaşlarının (13), otomobil krank mili için kullanılmış AISI 4140 çeliginde hızlı elektron isini yaymanın yorulma özellikleri ve yüzey sertliğindeki etkileri isimli çalışmalarında işlem görmemiş AISI 4140 çeliginin yorulma dayanımını 418 MPa bulmuştur. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında yaklaşık 40 MPa fark olduğu görülmüştür. Bu farkında bu çalışmada kullanılan malzemede Si 0,21, Cr 0,9 iken Choo, ve arkadaşlarının (13), çalışmasındaki Si 0,23 ve Cr 1,03 olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sekil 6.2’de 40 HRC sertleştirilmiş numunenin S-N grafiği görülmektedir. Grafiğin oluşturulması için numuneye ilk olarak 877 MPa gerilme uygulanmıştır. Uygulanan bu gerilme altında numunenin çevrim sayısı sayaç yardımı ile bulunduktan sonra belirlenen aralıklarda gerilme azaltılarak S-N grafiği çizilmiştir. Uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısını geçince durdurulmuştur. Elde edilen veriler logaritmik olarak grafiğe çevrilmiştir. Bu işlem sonucunda 40 HRC sertleştirilmiş numunenin yorulma dayanımı 783 MPa olarak bulunmuştur (Sekil 6.2).

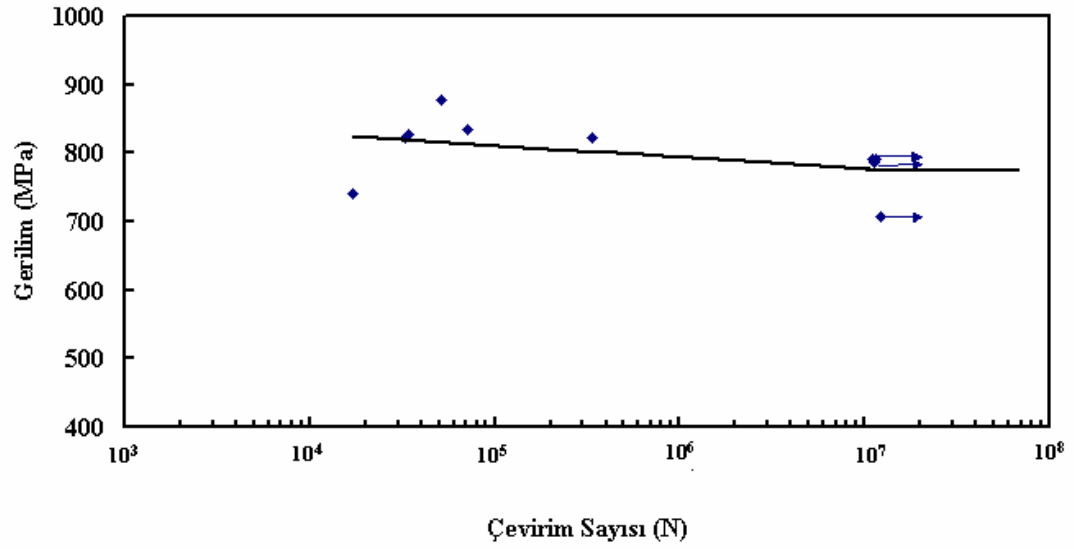


Sekil 6.2. AISI 4140 40 HRC sertlikteki numunenin S-N grafiği

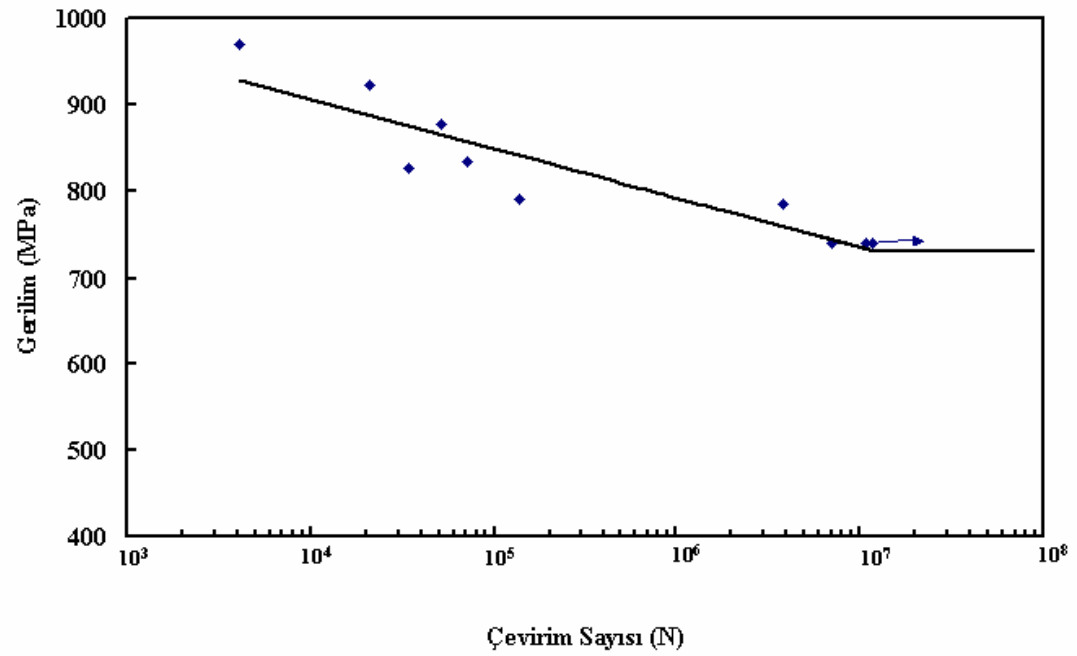
Sekil 6.3’de 45 HRC sertleştirilmiş numunenin S-N grafiği görülmektedir. Grafiğin oluşturulması için numuneye ilk olarak 877 MPa gerilme uygulanmıştır. Daha sonra numunelere 834, 822 MPa gibi azalan gerilmeler uygulanarak S-N grafiği çizilmiştir. Uygulanan gerilmeler sonucunda numunenin kaç çevrim sonunda koptuğu test cihazı üzerindeki sayaç yardımı ile tespit edilmiştir. Uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısını geçince durdurulmuştur. Elde edilen veriler logaritmik olarak grafiğe çevrilmiştir. Bu işlem sonucunda 45 HRC sertleştirilmiş numunenin yorulma dayanımı 792 MPa olarak bulunmuştur (Sekil 6.3).

Sekil 6.4’de 50 HRC sertleştirilmiş numunenin S-N grafiği görülmektedir. Grafiğin oluşturulmasına 50 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginin literatürden elde edilen akma sınırına yakın bir degerde numuneye gerilme uygulanarak başlanmıştır. Grafiğin oluşturulması için numuneye uygulanan ilk gerilme 970 MPa’dır. Ardından numuneye uygulanan gerilme azaltılarak deneylere devam edilmiştir. Uygulanan gerilmeler sonucunda numunenin kaç çevrim sonunda koptuğu test cihazı üzerindeki sayaç yardımı ile tespit edilmiştir. Uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısını geçince durdurulmuştur. Elde edilen veriler logaritmik

olarak grafiğe çevrilmiştir. Bu işlem sonucunda 50 HRC sertleştirilmiş numunenin yorulma dayanımı 739 MPa olarak bulunmuştur (Sekil 6.4).



Sekil 6.3. AISI 4140 45 HRC sertlikteki numunenin S-N grafiği



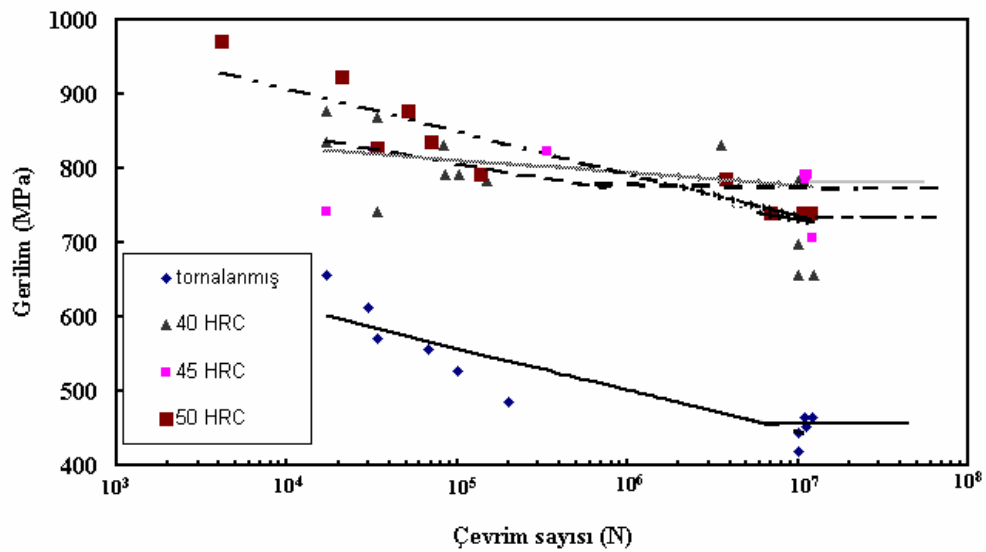
Sekil 6.4. AISI 4140 50 HRC sertlikteki numunenin S-N grafiği

Tornalanmış numunede bulunan yorulma dayanımı değeri 40 HRC sertlikteki numunenin yorulma dayanımı ile karşılaştırıldığında 40 HRC sertlikteki numunenin yorulma dayanımında yaklaşık % 69 'luk bir artış ortaya çıkmıştır. 40 ve 45 HRC sertlikteki numunelerin yorulma dayanımı değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Fakat 40-45 HRC sertlikteki numunenin yorulma sınırı 50 HRC sertlikteki numunenin yorulma sınırı ile karşılaştırıldığında yorulma sınırında yaklaşık % 0,7 oranında azalma olmuştur (Çizelge 6.1., Şekil 6.5).

Tornalanmış ve farklı sertliklerde sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginde Şekil 6.5 ve Çizelge 6.1'de görüleceği gibi sertleştirme yorulma dayanımını artırmıştır. Ancak en iyi yorulma dayanımı 45 HRC sertleştirilmiş numunede olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.1. AISI 4140 Yorulma dayanımı değerleri

Sertlik Değeri (HRC)	Yorulma Dayanımı(MPa)	Tornalanmış numuneye göre artış (%)
Tornalanmış	463	-
40	783	69
45	792	71
50	739	60



Şekil 6.5. AISI 4140 çeliginin farklı sertliklerdeki yorulma dayanımları

Ochi et al (15), dökme demir numunelerin bir bölümünü tornalama işleminden sonra bilyalı dövmeşlerdir. Daha sonra bilyalı dövülen ve dövülmeyen numunelerin S-N grafiklerini çıkarmışlardır. Çalışma sonucunda yüzeyine mekanik bir metot olan bilyeleme yapılmış olan numunenin yorulma dayanımı 310 MPa, işlem görmemiş numunenin ki ise 270 MPa bulunmuştur. Bu çalışmada da termal bir metot olan sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numunelerin yorulma dayanımları hiçbir işlem görmemiş numuneye göre yüksek çıkmıştır.

Lee ve arkadaşlarının (12), sertlikten dolayı yorulma ömrü gerilmesi için tahmini metotlar isimli çalışmalarında kullandıkları [2.6], [2.10] numaralı esitliklerindeki amprik formülleri çalışmamızdaki sertlik değerlerine uyguladığımızda 40 HRC sertleştirilmiş numunelerin yorulma dayanımı 756 MPa çıkmaktadır. Deneyler sonucunda 40 HRC sertleştirilmiş numunenin yorulma dayanımı 783 MPa bulunmuştur. Aradaki fark görüldüğü gibi 27 MPa olmaktadır. 40 HRC sertlikteki fark gibi çalışmamızdaki diğer 45, 50HRC sertliğindeki malzemelerimizde elde edilen yorulma değerleri literatürdeki denklemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında 24, 35 MPa farklar olduğu gözlenmiştir. Bununda deneyin yapılışı ve sertleştirme koşullarının farklı olması olabileceği düşünülerek elde edilen sonuçların tutarlı olduğu kanısına varılmıştır.

Genel K. (18), iyon nitrülenmiş AISI 4140 çeliginin yorulma ve korozyonlu yorulma davranışı isimli çalışmasında 860 °C’de yağda su verilerek sertleştirilmiştir daha sonra NaCl-KCl-BaCl₂ tuz banyosunda 600 °C’de 1 saat süreyle temperlenmiş 30HRC sertliğindeki deney parçaları üzerinde yaptığı araştırmada yorulma dayanımını 630 MPa bulmuştur. Çalışmada numuneler nitrülleme işlemine de tabi tutulmuştur. Nitrülleme süresindeki farklılık numunelerin sertlik değerlerini etkilemiştir. Farklı sertlik değerlerindeki numunelerin yorulma dayanımlarının değiştiği görülmüştür. Bu çalışmada da farklı sertlik değerlerinde farklı yorulma dayanımları elde edilmiştir.

Choo ve arkadaşlarının (13), otomobil krank mili için kullanılmış AISI 4140 çeliginde hızlı elektron isini yaymanın yorulma özellikleri ve yüzey sertliğindeki

etkileri isimli çalışmalarında elde ettikleri sonuçlara göre islem grmemis AISI 4140 eliginin yorulma dayanımı 418 MPa, isinim uygulanmış deney numunesinin yorulma dayanımı 540 MPa, yüksek enerjili elektron isini ile isinlanmış deney numunesinin yorulma dayanımı 563 MPa, indüksiyonla sertlestirilmış deney numunesinin yorulma dayanımı 529 MPa bulunmuştur. Bu çalışmada da sadece tornalanmış numunenin yorulma dayanımı 463 MPa, 40 HRC sertlestirilmış numunenin yorulma dayanımı 783 MPa, 45 HRC sertlestirilmış numunenin yorulma dayanımı 792 MPa, 50 HRC sertlestirilmış numunenin yorulma dayanımı 739 MPa, bulunmuştur. Yapılan alışmalar karsılaştırıldığında, sertleştirme değerindeki farklılıkların ve sertleştirme isleminin farklılığının yorulma dayanımını etkilediği sonucuna varılmıştır.

Aken, D. V., (14), eligin yorulma dayanımı sınırı isimli çalışmalarında Rockwell C sertlik değeri ile yorulma sınırı arasındaki bağlantıyı incelemiştir. Aken, D., V.’nin, yüzeydeki sertliğe göre yorulma grafiği tahmin tablosunda, AISI 4140 eligi 45 HRC sertlikte maksimum yorulma dayanımına ulasmaktadır. 45 HRC’ den sonra yorulma dayanımında azalma görülmektedir. Her malzeme için optimum bir sertlik değerinin olduğu bu sertliğin altında ve üstünde yorulma değerinin düştüğü Aken, D., V.’nin çalışmalarında görülmektedir. Bizim yaptığımız çalışmada 45 HRC sertlikten sonra yorulma dayanımı azalma göstermiştir. Bunun sonucunda yaptığımız çalışmanın tutarlı olduğu kanısına varılmıştır. Yapılan çalışmalardaki sertlik değerine göre elde edilen yorulma dayanımları karsılaştırıldığında farklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklarında sertleştirme isleminde kullanılan yöntemden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Çünkü Choo, ve arkadaşlarının yaptıkları (13), araştırmada da yüzey sertleştirme islemindeki farklılıkların yorulma dayanımını etkilediği anlaşılmıştır.

Çalışma sonucunda, farklı sertliklerdeki yorulma dayanımının farklı olduğu, sertlik arttıkça yorulma dayanımının arttığı grlmştş. Yapılan araştırma sonucunda deneyde kullanılan malzeme yapısının, deneyin yapılış seğlinin, numunelere uygulanan kalıcı gerilme metotlarının, sertlik toleransı gibi etmenlerin sonuçları etkilediği ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı elde edilen sonuçlar ile diğer yapılan

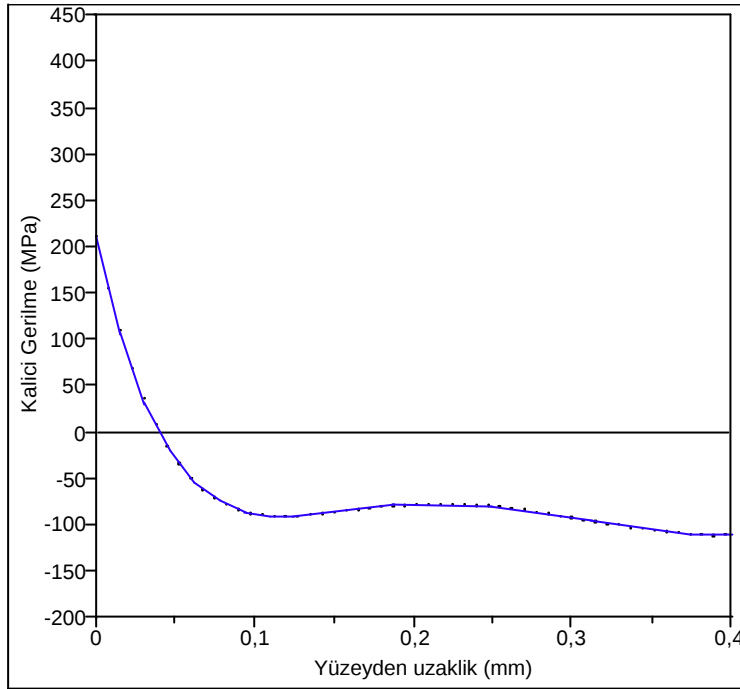
alısmalar arasında olusan farkın bunlardan kaynaklandığı sonucuna varılarak elde edilen sonuçların tutarlı olduğu kanısına varılmıştır.

6.3. Kalıcı Gerilme Deney Sonuçları

alısmada numunelerin S-N grafikleri çıkarıldıktan sonra numuneler sadece tornalanmış, 40, 45, 50 HRC şeklinde gruplandırılarak yüzeylerindeki kalıcı gerilmeler ölçülmüştür. Elde edilen yorulma dayanımı değerlerinin %10, %20, %30 üst değerlerinde numuneler kopmayacak şekilde yorulma testine tabi tutulmuştur. Numunelerin bu seviyelerdeki kalıcı gerilmeleri ölçülmüştür. Yorulmuş ve yorulmamış farklı sertlik değerlerinde sertleştirilmiş numunelerdeki kalıcı gerilme değerleri, katman kaldırma tekniğini esas alan cihazda ölçülmüştür. Elde edilen bu veriler, değerlendirilerek grafikler çizilmiştir.

6.3.1. Tornalanmış numuneler

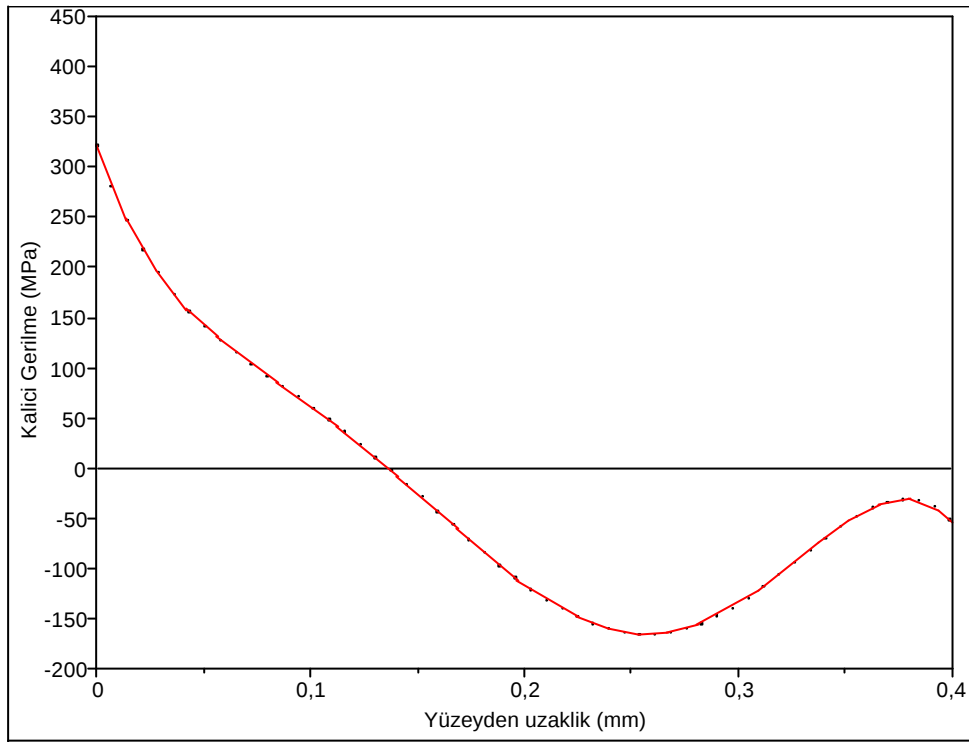
Sekil 6.6’da sadece tornalanmış yorulma işlemi uygulanmamış AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde ölçülen kalıcı çekme gerilmesi 211 MPa’dır. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,03 mm dir. 0,03 mm derinlikten sonra numunemizde kalıcı basma gerilmeleri ölçülmüştür. Numunede ölçülen maksimum kalıcı basma gerilmesi ise - 90 MPa’ dir. Numunemizin 0,1 ila 0,4 mm derinlikleri arasında kalıcı basma gerilmesinde bir dalgalanma görülmüştür. Yapılan literatür araştırmasın da Fatemi ve arkadaşlarına göre (30) parçaların imalatı sırasında yüzeyde kalıcı çekme gerilmesi oluştuğunu belirtmektedir. Bu alısmadaki numunenin yüzeyinde de tornalamadan dolayı çekme gerilmesi çıkmıştır.



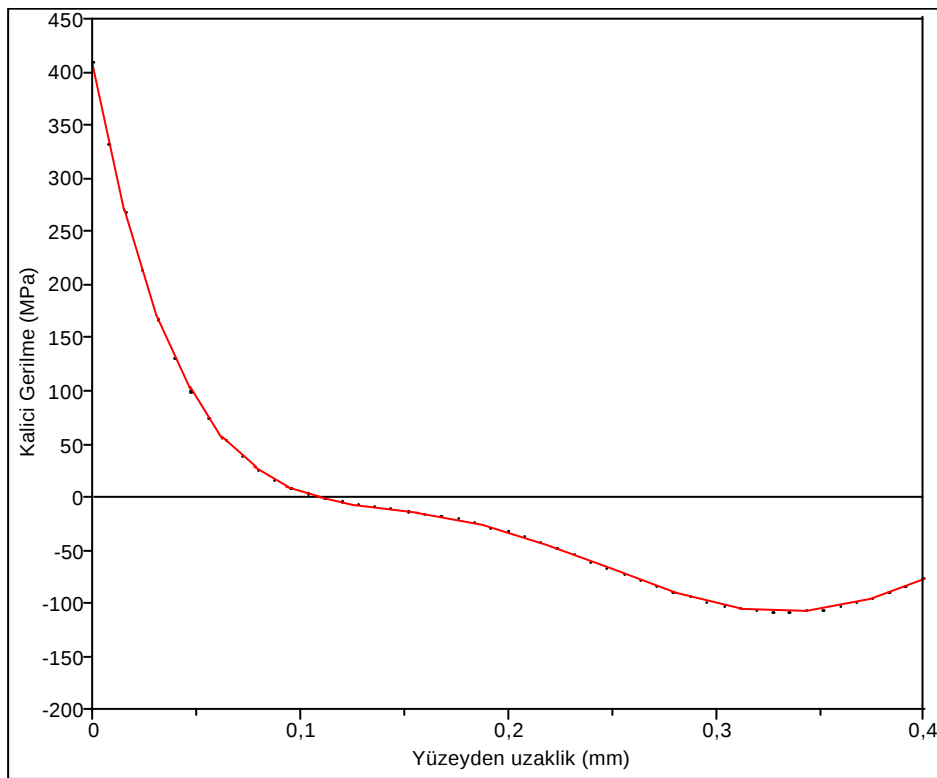
Sekil 6.6. AISI 4140 sadece tornalanmış numunenin kalıcı gerilmesi

Sekil 6.7’de sadece tornalanmış ve %10 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunemizin yüzeyinde 322 MPa değerinde kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,13 mm’dir. Bu derinlikten sonra numunemizde ki maksimum kalıcı basma gerilmesi –165 MPa ‘dır. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,26 mm’ dir. Numunemizin 0,26 ila 0,39 mm derinlikleri arasında basma gerilmesinde bir dalgalanma görülmüştür.

Sekil 6.8’de sadece tornalanmış ve %20 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde 409 MPa değerinde kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,1 mm’dir. Bu derinlikten sonra numunemizde kalıcı basma gerilmesi ölçülmüştür. Numunedeki maksimum kalıcı basma gerilmesi –107 MPa ‘dır. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,32 mm’ dir.

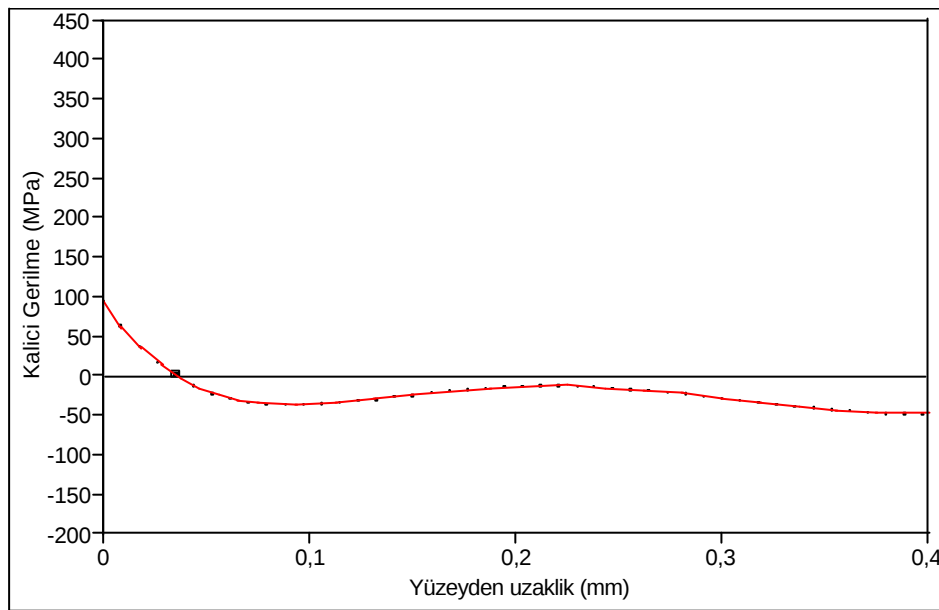


Sekil 6.7. AISI 4140 tornalanmış ve %10 yorulmuş numunenin kalıcı gerilmesi



Sekil 6.8. AISI 4140 tornalanmış ve %20 yorulmuş numunenin kalıcı gerilmesi

Sekil 6.9'da sadece tornalanmış ve %30 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde 95 MPa değerinde kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,03 mm'dir. Bu derinlikten sonra numunede kalıcı basma gerilmesi ölçülmüştür. Numunedeki maksimum kalıcı basma gerilmesi -37 MPa'dır. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,08 mm'dir. Bu derinlikten sonra kalıcı basma gerilmesinde dalgalanmalar görülmüştür.

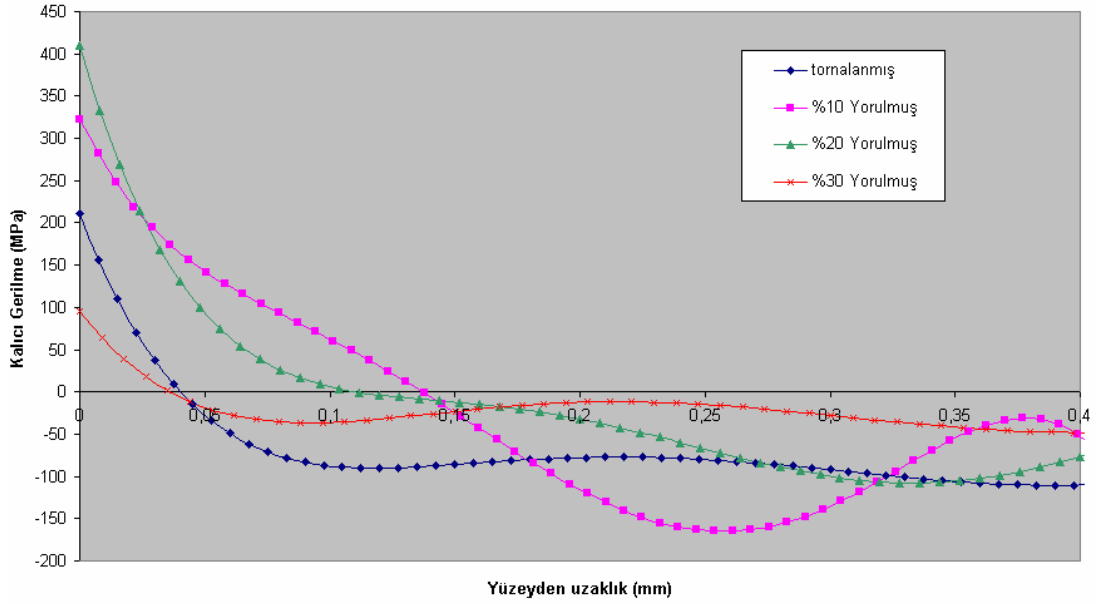


Sekil 6.9. AISI 4140 tornalanmış ve %30 yorulmuş numunenin kalıcı gerilmesi

Sekil 6.10'da sadece tornalanmış ve farklı seviyelerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilme dağılımlarının hepsi bir arada görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi %20 yorulmuş numunenin yüzeyinde kalıcı çekme gerilmesi 409 MPa ile en yüksek seviyededir. Numuneler içinde maksimum basma gerilmesi ise %10 yorulmuş numunede olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.2 ve Sekil 6.11'de görüldüğü gibi deney sonucunda elde edilen verilere göre yorulma seviyesi arttıkça yüzeydeki kalıcı çekme gerilmeleri azalma göstermiştir. Russell A. Chernenkoff (4), bilyalı dövülmüş toz metalurjisi çeliklerinde kalıcı gerilmenin yorulmaya etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda yüzeydeki kalıcı basma gerilmelerin belirli seviyedeki yorulma testinden sonra

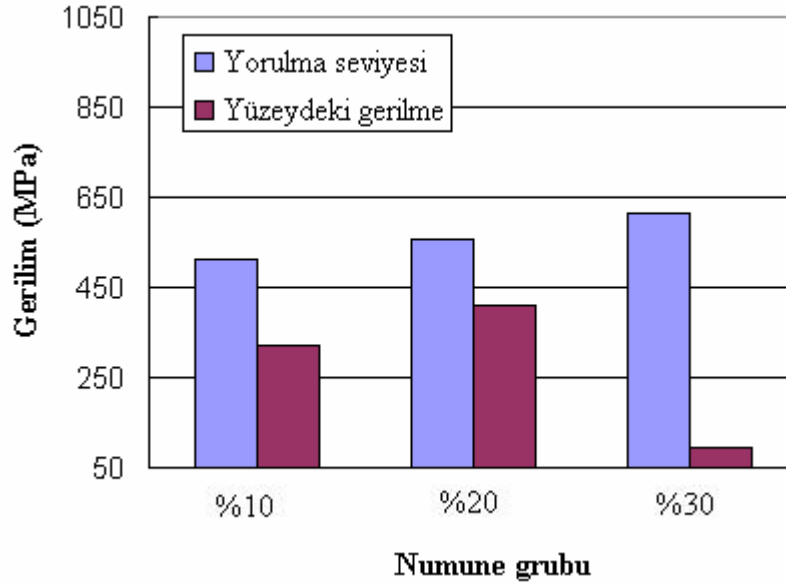
azalmaya başladığını görmüştür. Bu çalışmada da numuneye uygulanan yük arttıkça yüzeydeki kalıcı çekme gerilmelerinin azaldığı görülmüştür.



Sekil 6.10. Tornalanmış ve farklı seviyelerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilmeleri

Çizelge 6.2. Tornalanmış AISI 4140 çeliginin farklı seviyelerdeki kalıcı gerilmeleri

Numune grupları	Yorulma Seviyesi (MPa)	Yüzeydeki kalıcı gerilme (MPa)	Yüzeydeki kalıcı gerilme karşılaştırması
	Yorulmamış	211	-
%10	511	322	+%53
%20	557	409	+%94
%30	613	95	-%55

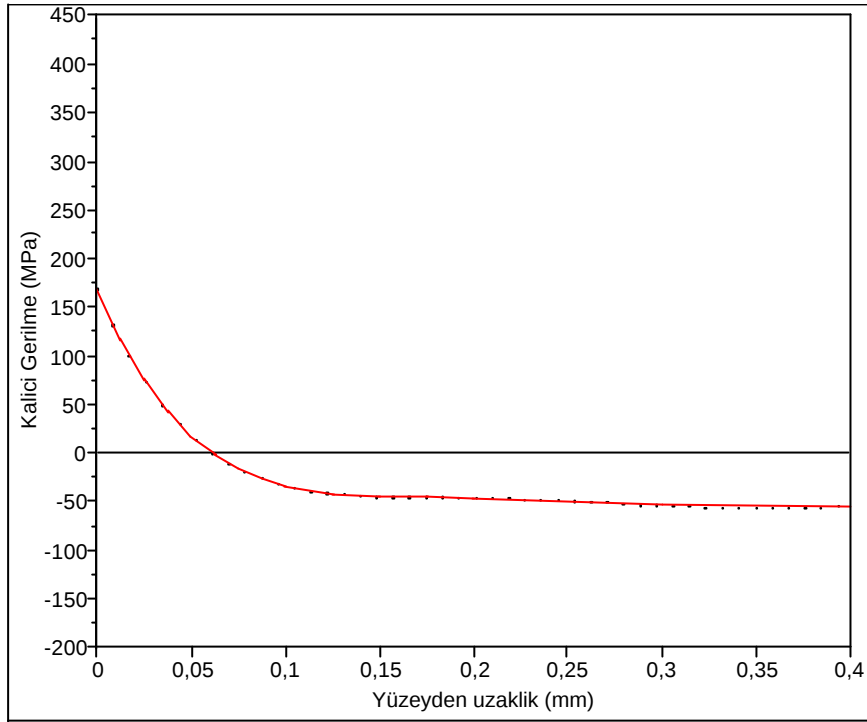


Sekil 6.11. Tornalanmış AISI 4140 çeliginde seviye-gerilme ilişkisi

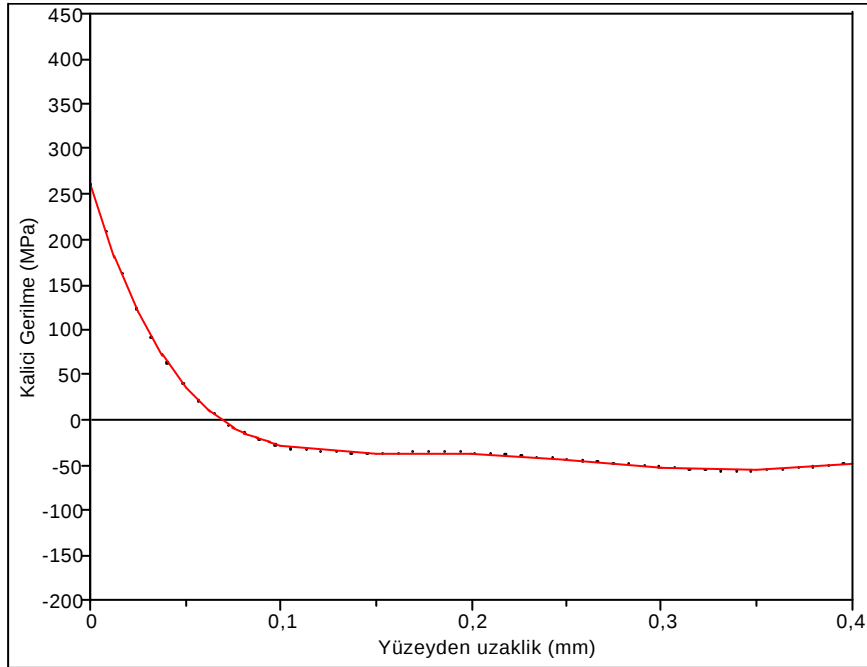
6.3.2. 40 HRC sertleştirilmiş numuneler

Sekil 6.12’de 40 HRC sertleştirilmiş yorulma işlemi uygulanmamış AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde ölçülen kalıcı çekme gerilmesi 169 MPa’dır. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,06 mm dir. 0,06 mm derinlikten sonra numunede ölçülen maksimum kalıcı basma gerilmesi ise -56 MPa’ dir. Numunede ölçülen kalıcı basma gerilmeleri 0,06 mm ‘den sonra dogrusal olarak artis göstermistir.

Sekil 6.13’de 40 HRC sertleştirilmiş ve %10 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde 262 MPa degerinde kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,06 mm’dir. Bu derinlikten sonra numunede kalıcı basma gerilmesi ölçülmüştür. Numunedeki maksimum kalıcı basma gerilmesi –55 MPa ‘dir. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,35 mm’ dir. Numunede 0,1 mm derinlikten sonra kalıcı basma gerilmesinde hafif dalgalanma görülmüştür.



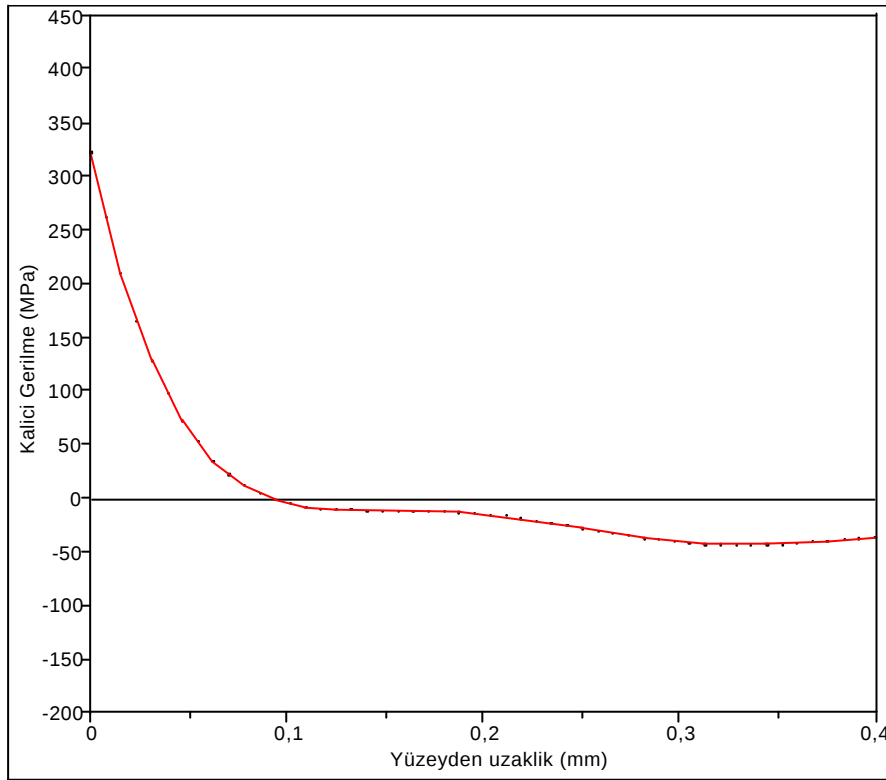
Sekil 6.12. 40 HRC sertliğindeki numunelerin kalıcı gerilmeleri



Sekil 6.13. 40 HRC sertliğinde ve %10 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri

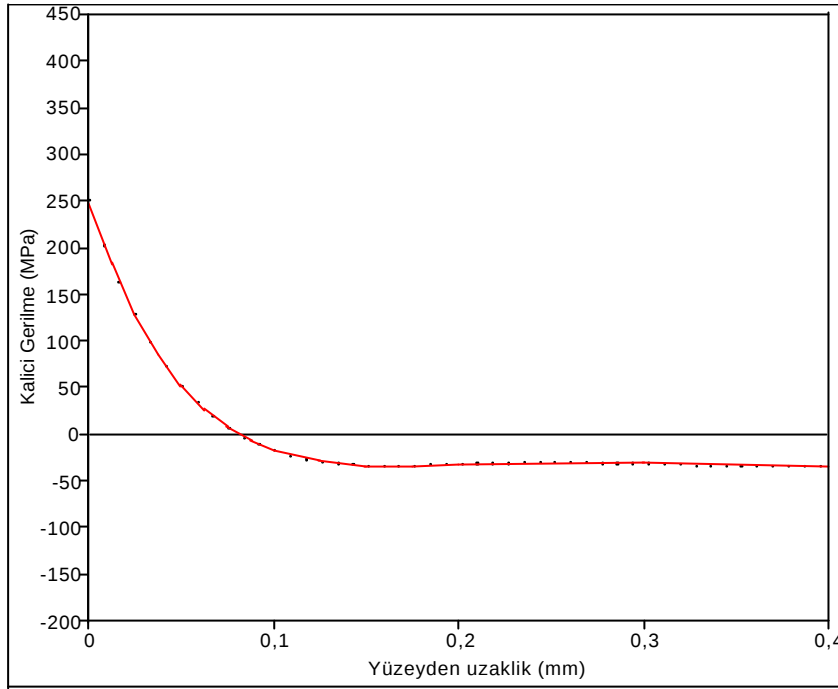
Sekil 6.14'de 40 HRC sertleştirilmiş ve %20 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde 323 MPa değerinde kalıcı

çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,08 mm'dir. Bu derinlikten sonra numunede kalıcı basma gerilmesi ölçülmüştür. Numunedeki maksimum kalıcı basma gerilmesi -44 MPa 'dır. Maksimum kalıcı basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,32 mm' dir. Numunede 0,2 mm derinlikten sonra kalıcı basma gerilmesinde artış görülmüştür.



Sekil 6.14. 40 HRC sertliğinde ve %20 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri

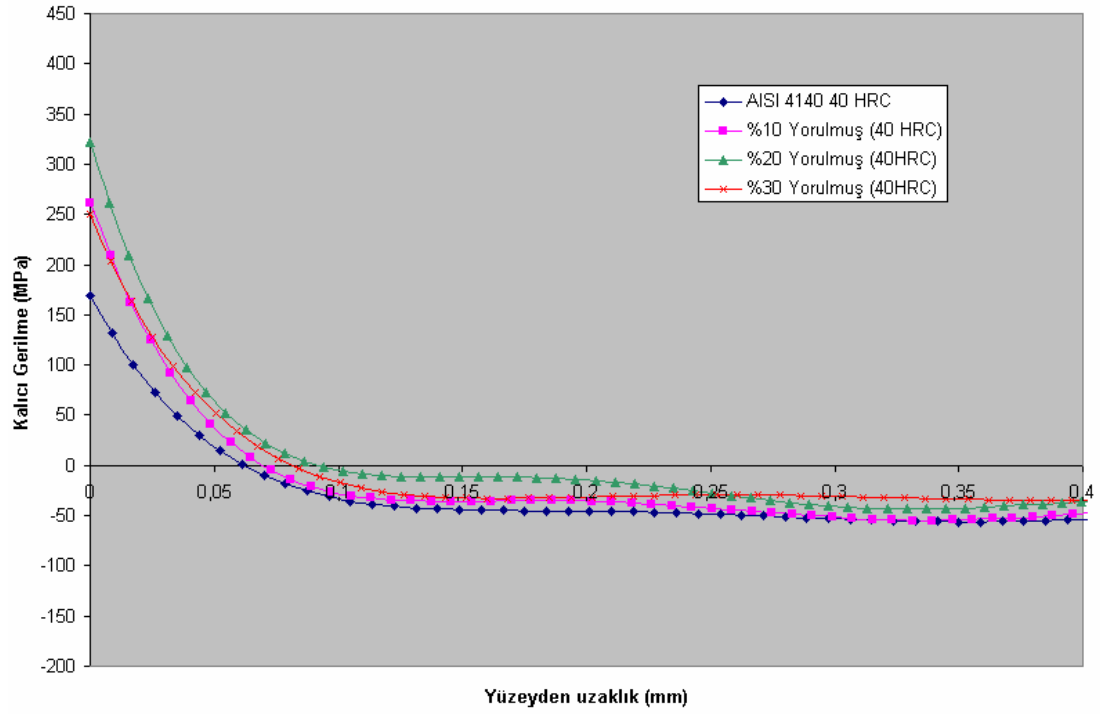
Sekil 6.15'de 40 HRC sertleştirilmiş ve %30 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde 250 MPa değerinde kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,07 mm'dir. Bu derinlikten sonra numunede ölçülen maksimum kalıcı basma gerilmesi -33 MPa 'dır. Maksimum kalıcı basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,16 mm' dir. Numunede 0,16 mm derinlikten sonra kalıcı basma gerilmesinde ciddi bir artış görülmemiştir.



Sekil 6.15. 40 HRC sertliğinde ve %30 yorulmuş numunelerin kalici gerilmeleri

Sekil 6.16'da 40 HRC sertleştirilmiş ve farklı seviyelerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalici gerilme dağılımlarının hepsi bir arada görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi %20 yorulmuş numunenin yüzeyinde kalici çekme gerilmesi 323 MPa ile en yüksek seviyededir. Numuneler içinde maksimum kalici basma gerilmesi ise sadece 40 HRC sertleştirilmiş numunede olduğu görülmektedir.

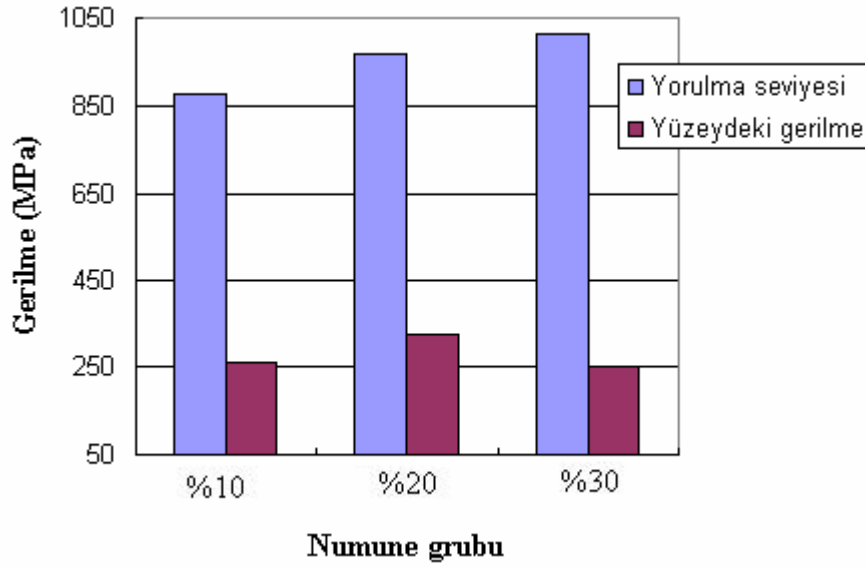
Yapılan deneyler sonucunda Çizelge 6.3 ve Sekil 6.17'deki sonuçlar elde edilmiştir. Parça yüzeyinde termal yöntem ile kalici gerilme oluşturma yöntemlerinden biri olan sertleştirme numunede basma yada çekme özelliğine sahip kalici gerilme oluşmasına sebep olur (30). Bu çalışmada uygulanan termal metot numunelerde kalici çekme gerilmelerin oluşmasına neden olmuştur. Çizelge 6.3 ve Sekil 6.17'de görüldüğü gibi deney sonucunda elde edilen verilere göre yorulma seviyesi arttıkça yüzeydeki kalici çekme gerilmeleri azalma göstermiştir.



Sekil 6.16. 40 HRC sertliğinde ve farklı değerlerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilmeleri

Çizelge 6.3. 40 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginin farklı seviyelerdeki kalıcı gerilmeleri

Numune grupları	Yorulma Seviyesi (MPa)	Yüzeydeki kalıcı gerilme (MPa)	Yüzeydeki kalıcı gerilme karşılaştırması
	Yorulmamış	169	-
%10	877	262	+%55
%20	969	323	+%91
%30	1014	250	+%48

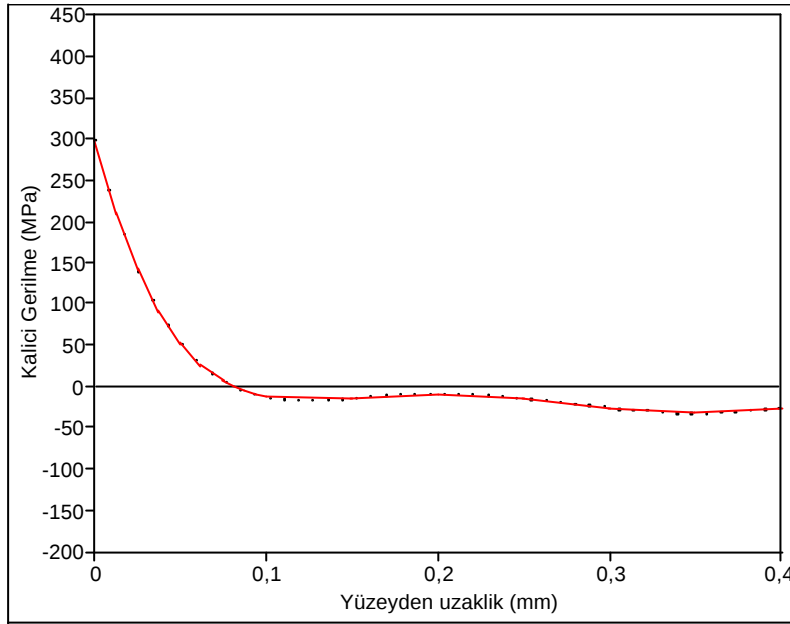


Sekil 6.17. 40 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginde seviye-gerilme ilişkisi

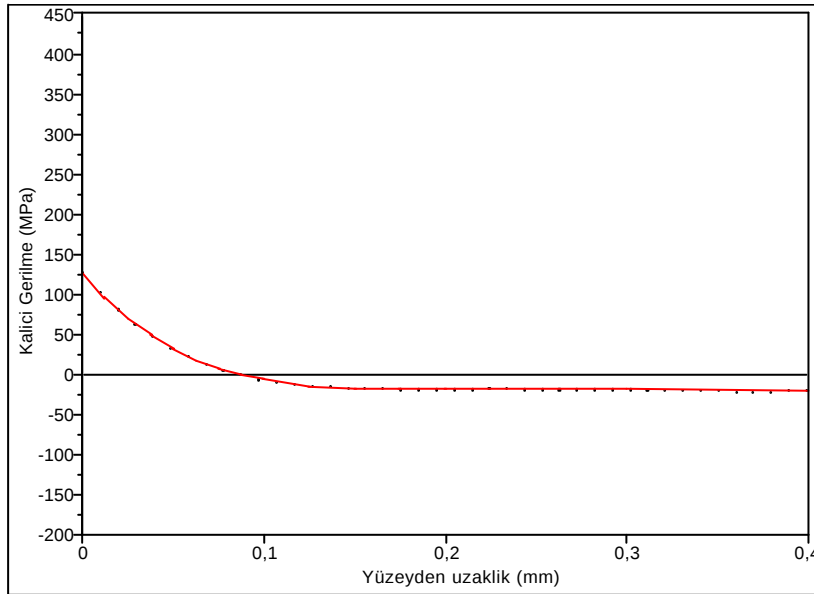
6.3.3. 45 HRC sertleştirilmiş numuneler

Sekil 6.18’de 45 HRC sertleştirilmiş yorulma işlemi uygulanmamış AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesi 299 MPa’dır. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,07 mm dir. 0,07 mm derinlikten sonra numunede kalıcı basma gerilmeleri tespit edilmistir. Numunede ölçülen maksimum kalıcı basma gerilmesi ise -16 MPa’ dir. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,12 mm’ dir. 0,12 mm den sonra ölçülen kalıcı basma gerilmelerinde dalgalanmalar olduğu gözlemlenmiştir.

Sekil 6.19’da 45 HRC sertleştirilmiş ve %10 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde ölçülen kalıcı çekme gerilmesi 128 MPa’dır. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,07 mm dir. 0,07 mm derinlikten sonra numunede ölçülen maksimum kalıcı basma gerilmesi ise -21 MPa’ dir. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,18 mm’ dir. Numunede ölçülen kalıcı basma gerilmeleri 0,18 mm ‘den sonra doğrusal olarak artış göstermiştir.



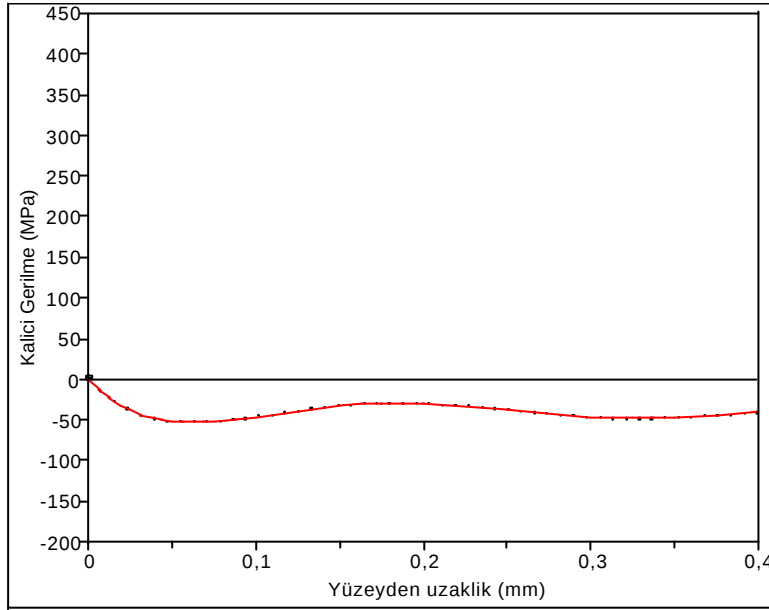
Sekil 6.18. 45 HRC sertliğindeki numunelerin kalıcı gerilmeleri



Sekil 6.19. 45 HRC sertliğinde ve %10 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri

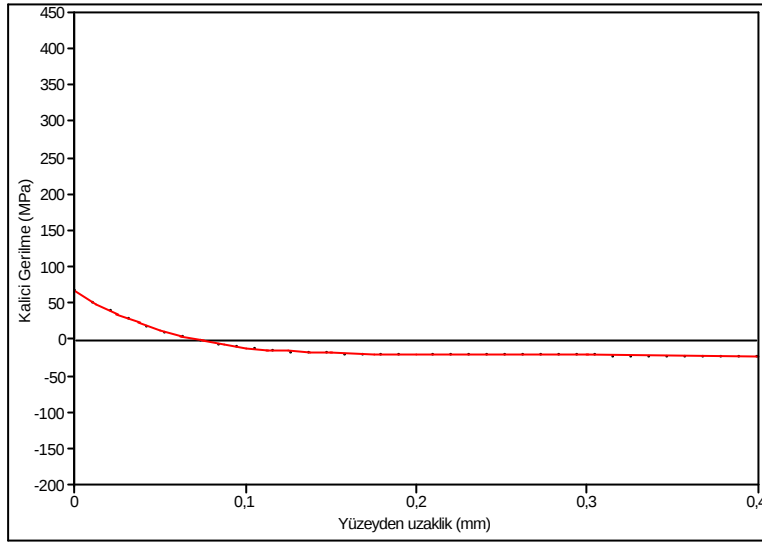
Sekil 6.20’de 45 HRC sertleştirilmiş ve %20 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesi 0,3 MPa’dır. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,003 mm dir. 0,003 mm derinlikten sonra

numunemizde kalici basma gerilmeleri ölçülmüştür. Numunede ölçülen maksimum kalici basma gerilmesi ise -52 MPa' dir. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,06 mm' dir. Yapılan ölçümler sonucunda numunedeki kalici basma gerilmesin de yüksek oranda dalgalanma olduğu gözlemlenmiştir



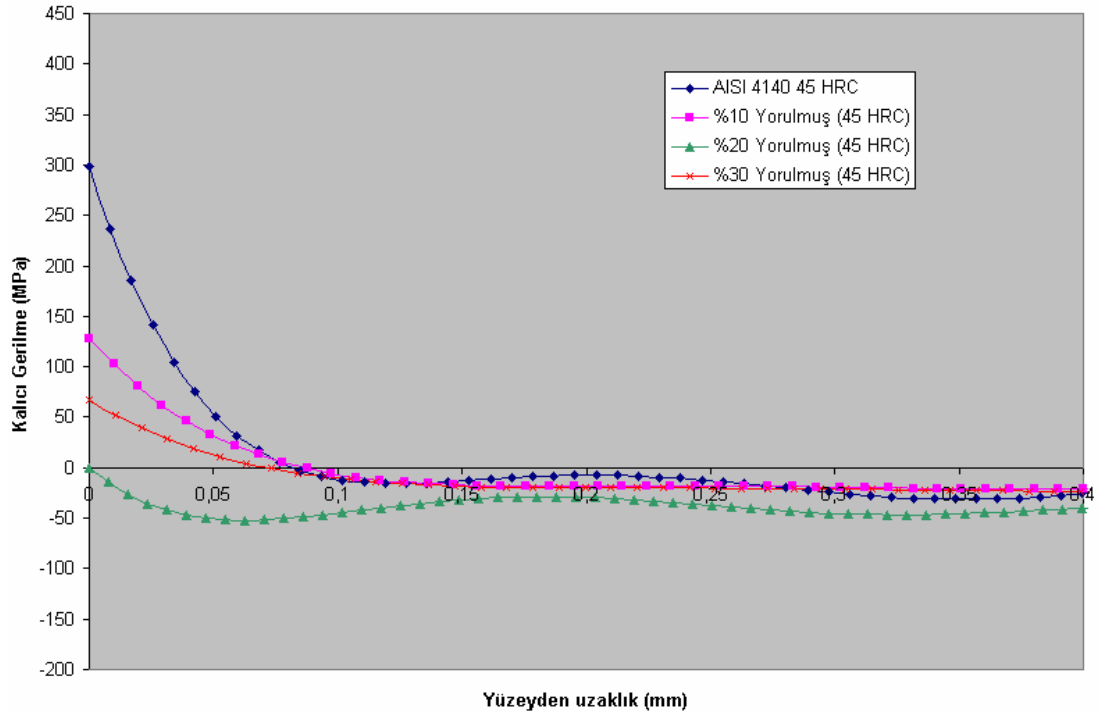
Sekil 6.20. 45 HRC sertliğinde ve %20 yorulmuş numunelerin kalici gerilmeleri

Sekil 6.21'de 45 HRC sertleştirilmiş ve %30 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalici gerilme dagilimi görülmektedir. Numunenin yüzeyinde kalici çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalici çekme gerilmesi 68 MPa'dır. Yüzeyde ölçülen kalici çekme gerilmesinin derinligi 0,06 mm dir. 0,06 mm derinlikten sonra numunede ölçülen maksimum kalici basma gerilmesi ise -19 MPa' dir. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,16 mm' dir. Numunede ölçülen kalici basma gerilmeleri 0,16 mm 'den sonra dogrusal olarak artis göstermistir.



Sekil 6.21. 45 HRC sertliğinde ve %30 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri

Sekil 6.22’de 45 HRC sertleştirilmiş ve farklı seviyelerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilme dağılımlarının hepsi bir arada görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi 45 HRC sertleştirilmiş ve yorulmamış numunenin yüzeyinde kalıcı çekme gerilmesi 299 MPa ile en yüksek seviyededir. Numuneler içinde maksimum kalıcı basma gerilmesi ise %20 yorulmuş numunede olduğu görülmektedir.

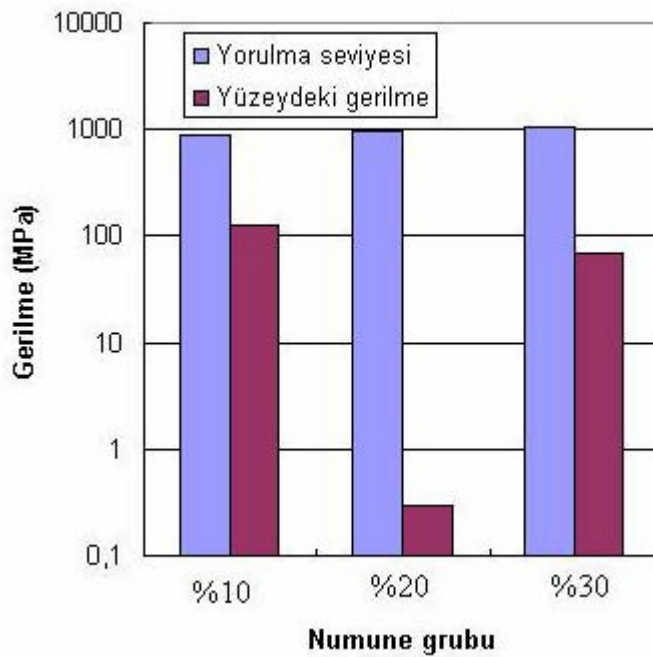


Sekil 6.22. 45 HRC sertliğinde ve farklı değerlerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilmeleri

Yapılan deneyler sonucunda Çizelge 6.4 ve Sekil 6.23 deki sonuçlar elde edilmiştir. Numunelere uyguladığımız kalıcı gerilme oluşturma metotlarından birisi olan termal metottan dolayı numunelerin yüzeylerinde kalıcı çekme gerilmeleri ölçülmüştür. Deneyler sonucunda 45 HRC sertleştirilmiş, yorulma işlemi uygulanmamış numunenin yüzeyindeki 299 MPa kalıcı çekme gerilmesinin belirlenen seviyelerde yorulma işlemi uygulanmış numunelerin yüzeyindeki kalıcı çekme gerilmelerine göre yüksek çıktığı gözlenmiştir. Ayrıca farklı seviyelerde yorulmuş numunelerin yüzeylerinde ölçülen kalıcı çekme gerilmelerindeki dalgalanmanın numunenin sertlik yapısından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 6.4. 45 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginin farklı seviyelerdeki kalıcı gerilmeleri

Numune grupları	Yorulma Seviyesi (MPa)	Yüzeydeki kalıcı gerilme (MPa)	Yüzeydeki kalıcı gerilme karşılaştırması
	Yorulmamış	299	-
%10	877	128	-%58
%20	969	0,3	-%10 ⁵
%30	1060	68	-%77

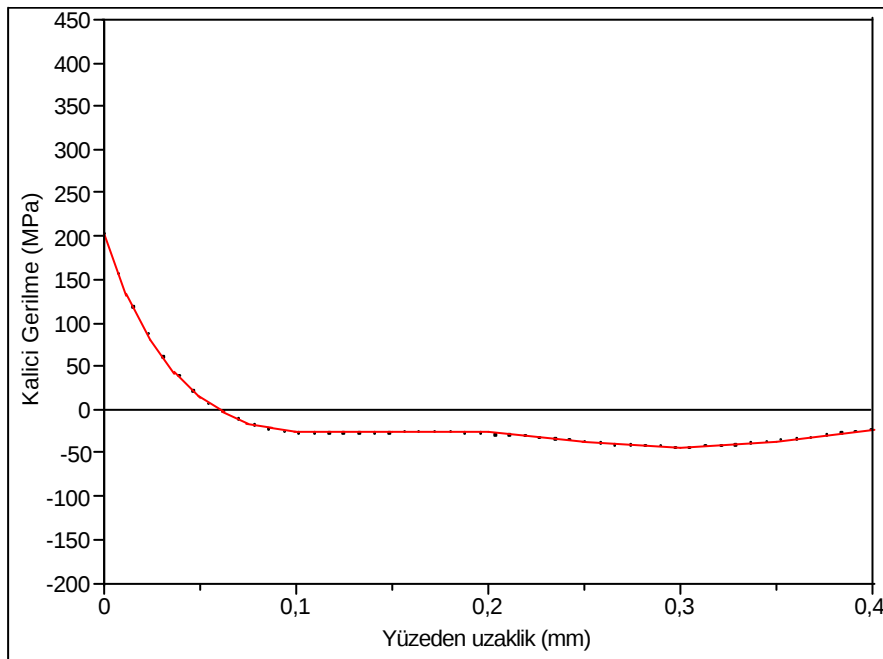


Sekil 6.23. 45 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginde seviye-gerilme ilişkisi

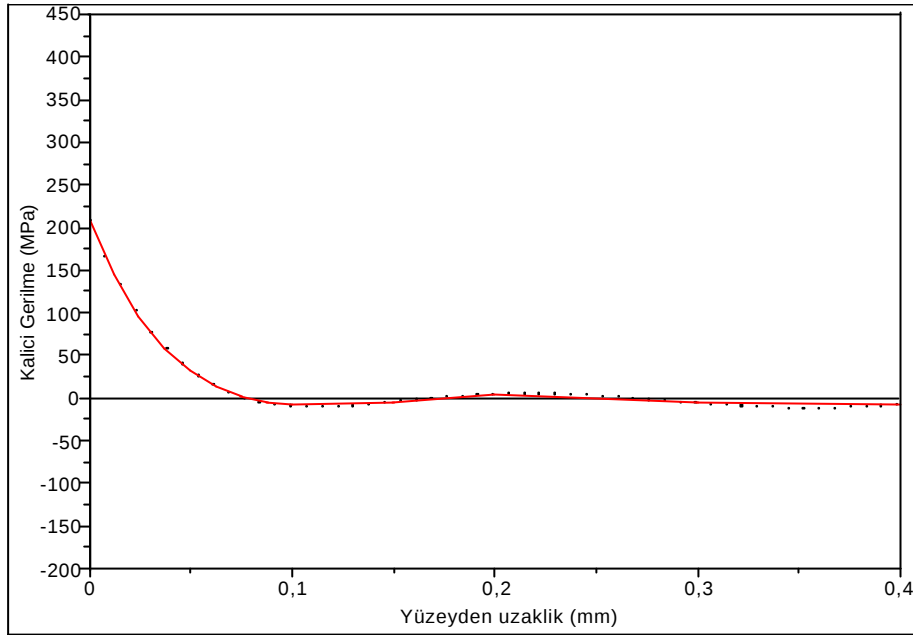
6.3.4. 50 HRC sertleştirilmiş numuneler

Sekil 6.24’de 50 HRC sertleştirilmiş yorulma işlemi uygulanmamış AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde ölçülen kalıcı çekme gerilmesi 203 MPa’dır. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,05 mm dir. 0,07 mm derinlikten sonra numunede ölçülen maksimum kalıcı basma gerilmesi ise -26 MPa’ dir. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,1 mm’ dir. 0,1 mm den sonra ölçülen kalıcı basma gerilmelerinde dalgalanmalar olduğu gözlemlenmiştir.

Sekil 6.25’de 50 HRC sertleştirilmiş ve %10 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde ölçülen kalıcı çekme gerilmesi 209 MPa’dır. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,07 mm dir. 0,07 mm derinlikten sonra numunemizde kalıcı basma gerilmeleri ölçülmüştür. Numunede ölçülen maksimum kalıcı basma gerilmesi ise -10 MPa’ dir. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,1 mm’ dir. Numunede ölçülen kalıcı basma gerilmeleri 0,1 mm ‘den sonra büyük oranda dalgalanma göstermiştir.

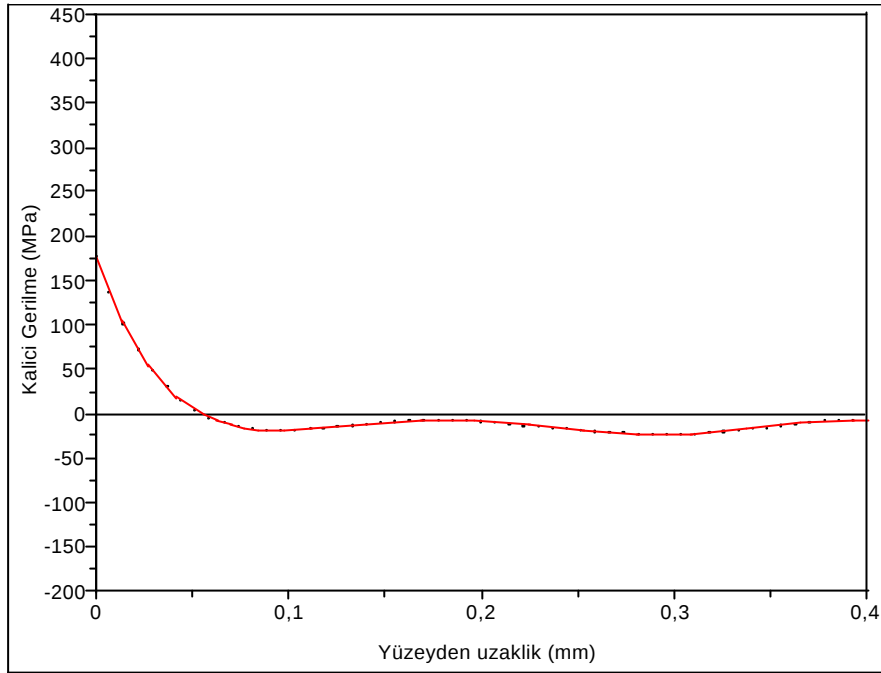


Sekil 6.24. 50 HRC sertliğindeki numunelerin kalıcı gerilmeleri



Sekil 6.25. 50 HRC sertliğinde ve %10 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri

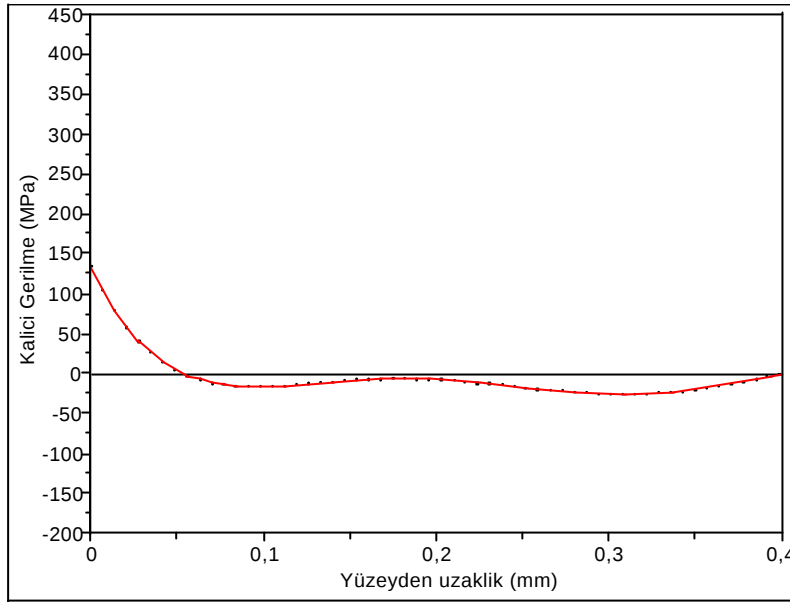
Sekil 6.26’da 50 HRC sertleştirilmiş ve %20 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesi 179 MPa’dır. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,05 mm dir. 0,05 mm derinlikten sonra numunede ölçülen maksimum kalıcı basma gerilmesi ise -18 MPa’ dir. Maksimum basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik 0,09 mm’ dir. Numunede ölçülen kalıcı basma gerilmeleri 0,09 mm ‘den sonra büyük oranda dalgalanma göstermiştir.



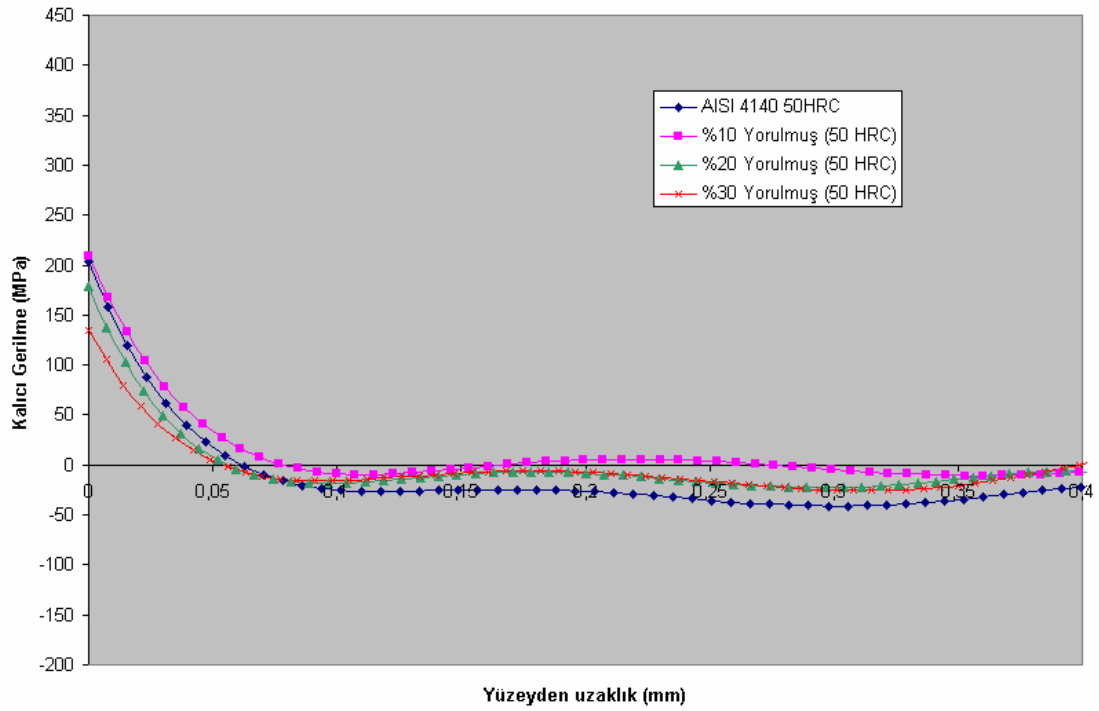
Sekil 6.26. 50 HRC sertliğinde ve %20 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri

Sekil 6.27’de 50 HRC sertleştirilmiş ve %30 yorulmuş AISI 4140 numunesinin kalıcı gerilme dağılımı görülmektedir. Numunenin yüzeyinde ölçülen kalıcı çekme gerilmesi 135 MPa’dır. Yüzeyde ölçülen kalıcı çekme gerilmesinin derinliği 0,04 mm dir. 0,04 mm derinlikten sonra numunede kalıcı basma gerilmeleri ölçülmüştür. Numunede ölçülen maksimum kalıcı basma gerilmesi ise -16 MPa’ dir. Maksimum kalıcı basma gerilmesinin ölçüldüğü derinlik olan 0,09 mm’ den sonra kalıcı basma gerilmelerinde büyük oranda dalgalanma görülmüştür.

Sekil 6.28’de 50 HRC sertleştirilmiş ve farklı seviyelerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilme dağılımlarının hepsi bir arada görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi %10 yorulmuş numunenin yüzeyinde kalıcı çekme gerilmesi 209 MPa ile en yüksek seviyededir. Numuneler içinde maksimum kalıcı basma gerilmesi ise sadece 50 HRC sertleştirilmiş numunede olduğu görülmektedir.



Sekil 6.27. 50 HRC sertliğinde ve %30 yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri



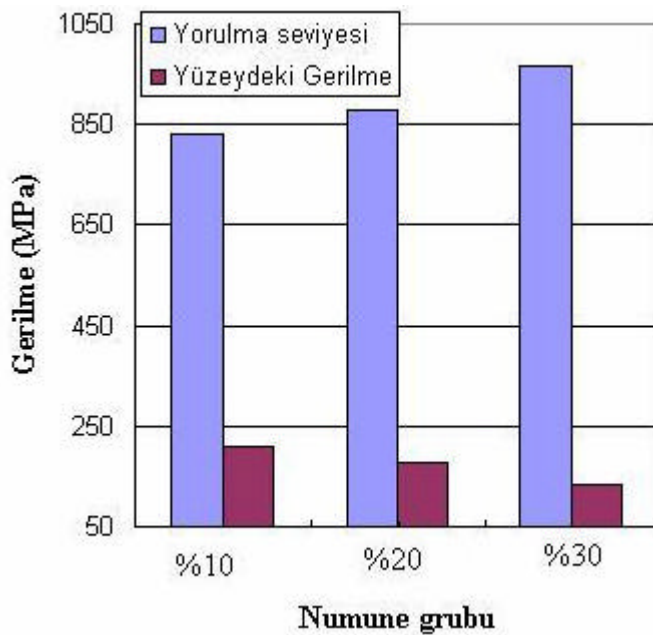
Sekil 6.28. 50 HRC sertliğinde ve farklı değerlerde yorulmuş AISI 4140 numunelerin kalıcı gerilmeleri

Yapılan deneyler sonucunda Çizelge 6.5 ve Sekil 6.29 daki sonuçlar elde edilmiştir.

50 HRC sertleştirilmiş numunede uygulanan yük artıkça kalıcı çekme gerilmesinin yumusadığı görülmüştür. Zhuang Z.W ve Halford R.G., (10) araştırmalarında periyodik yükleme altında kalıcı gerilmenin azalmasını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre test sırasında uygulanan yük ve çevrim sayısının gerilmeleri yumusattığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada da 50 HRC sertleştirilmiş numunede uygulanan yük artıkça kalıcı çekme gerilmelerinde azalma olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.5. 50 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginin farklı seviyelerdeki kalıcı gerilmeleri

Numune grupları	Yorulma Seviyesi (MPa)	Yüzeydeki kalıcı gerilme (MPa)	Yüzeydeki kalıcı gerilme karşılaştırması
	Yorulmamış	203	-
%10	831	209	+%3
%20	877	179	-%12
%30	969	135	-%34



Sekil 6.29. 50 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliginde seviye-gerilme ilişkisi

Kristoffersen, H., Vomacka, P., (16) silindirik parçalarda indüksiyon sertleştirme ile oluşan sert katmanlardaki kalıcı gerilmeleri araştırdıkları çalışmada da parçaların

yüzeylerinde kalıcı çekme gerilmeleri olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüzeyden aşağıya doğru inildikçe de kalıcı çekme gerilmelerinin azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Çalışmalarında indüksiyon sertleştirme işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinde kalıcı basma gerilmeleri olduğu görülmüştür. Fakat numunelerin yüzeyinden aşağıya doğru inildikçe kalıcı basma gerilmeleri kalıcı çekme gerilmelerine dönüşmektedir. Bu çalışmada ise yüzey sertleştirme işlemi olmadığı için yüzeyde kalıcı çekme gerilmeleri oluşmuştur. Ama yüzeyden aşağıya doğru inildikçe kalıcı çekme gerilmeleri kalıcı basma gerilmelerine dönüşmektedir. Bunun nedeni bu çalışmada uygulanan metottur, numunelerin iç yapısını farklılaştırmasıdır. Sonuçlar karşılaştırıldığında uygulanan metottan dolayı elde edilen sonuçların tutarlı olduğu kanısına varılmıştır.

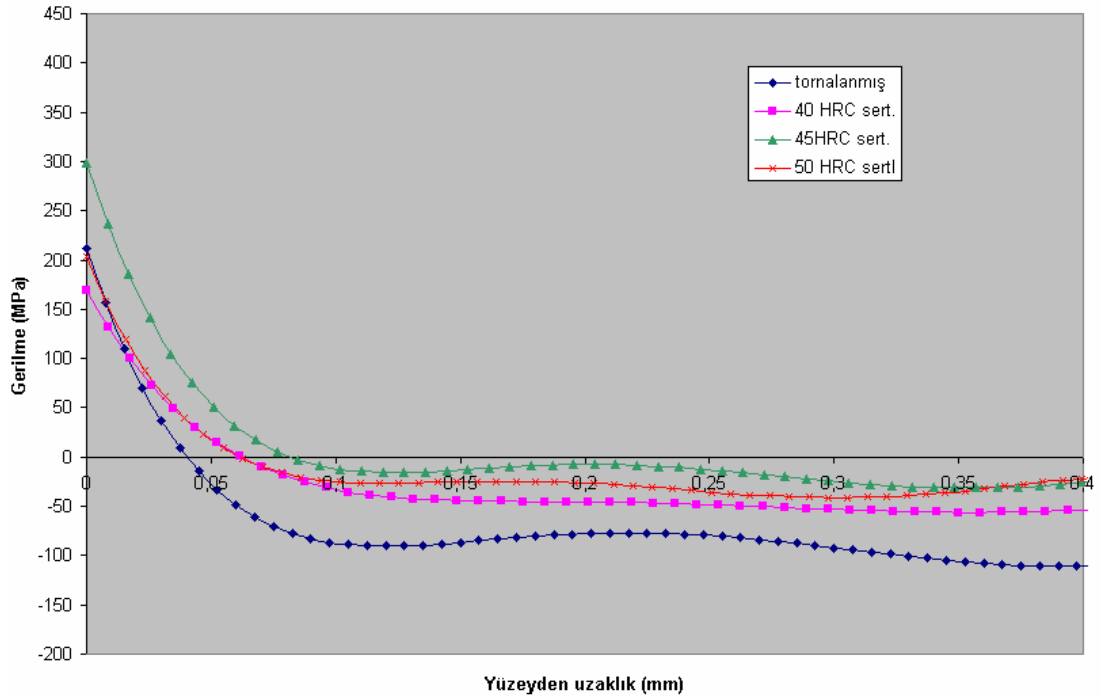
Ishigami, H., Matsui, K., Jin, Y., Ando, K., (17) sertleştirilmiş, temperlenmiş ve indüksiyonla ısıtılmış orta karbonlu çeliğin kalıcı basma gerilme dağılımını incelemişlerdir.. Ishigami ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada yüzeyin yaklaşık 0,03 mm altına kadar kalıcı basma gerilmesi olduğu görülmüştür. Daha derinlerde ise çekme gerilmesi olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ise yüzeyde kalıcı çekme gerilmesi görülmektedir. Bu farkın ise çelik yapısından ve işlem farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.3.5. Yorulma işlemi uygulanmamış ve belirlenen seviyelerde yorulmuş numunelerin kalıcı gerilmeleri

Yapılan deneyler sonucunda Çizelge 6.6 ve Şekil 6.30'da görüldüğü gibi parça yüzeyinde kalıcı çekme gerilmeleri olduğu saptanmıştır. Tornalanmış, 40 HRC sertleştirilmiş ve yorulma işlemi uygulanmamış numunelerin yüzeylerinde sırası ile 210 MPa, 169 MPa kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. 45 ve 50 HRC sertleştirilmiş ve yorulma işlemi uygulanmamış numunelerin yüzeylerinde sırası ile 299 MPa, 203 MPa kalıcı çekme gerilmesi ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda yüzeydeki en yüksek kalıcı çekme gerilmesinin 45 HRC sertleştirilmiş numunede olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.6. Farkli sertliklerdeki yorulma islemi uygulanmamis AISI 4140 çeliginin yüzeyindeki kalici çekme gerilme degerleri

Sertlik Degeri (HRC)	Yüzeydeki kalici çekme gerilme (MPa)	Yüzeydeki kalici gerilme karsilastirmasi
Tornalanmis (12 HRC)	210 MPa	-
40	169 MPa	-%20
45	299 MPa	+%43
50	203 MPa	-%3



Sekil 6.30. Yorulmamis numunelerin yüzeyindeki kalici gerilme dagilimi

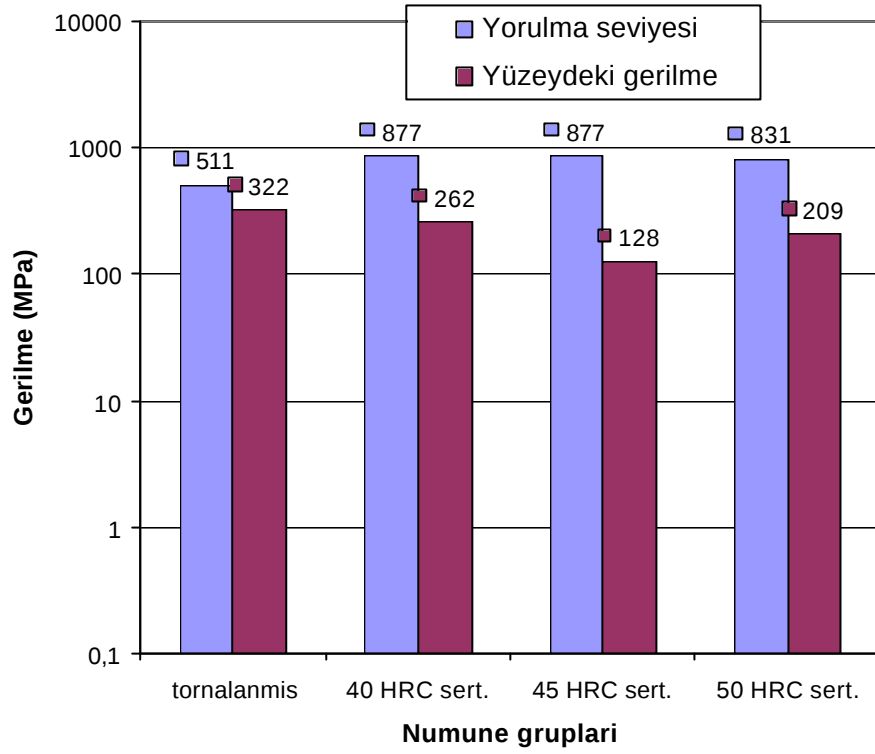
Ochi ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada (15), bilyeli dövülmüş ve bilyeli dövülmemiş numunelerin kalici gerilmeleri ölçülmüştür. Sonuçta mekanik kalici gerilme oluşturma metodlarından biri olan bilyeleme, numunelerin yüzeyinde daha yüksek kalici gerilme oluşmasına sebep olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada da kullanılan termal metotlardan birisi olan sertleştirme, numunelerin yüzeyinde daha

yüksek kalıcı gerilme oluşmasını sağlamıştır. Bu da sonuçlarımızın tutarlı olduğunu göstermektedir.

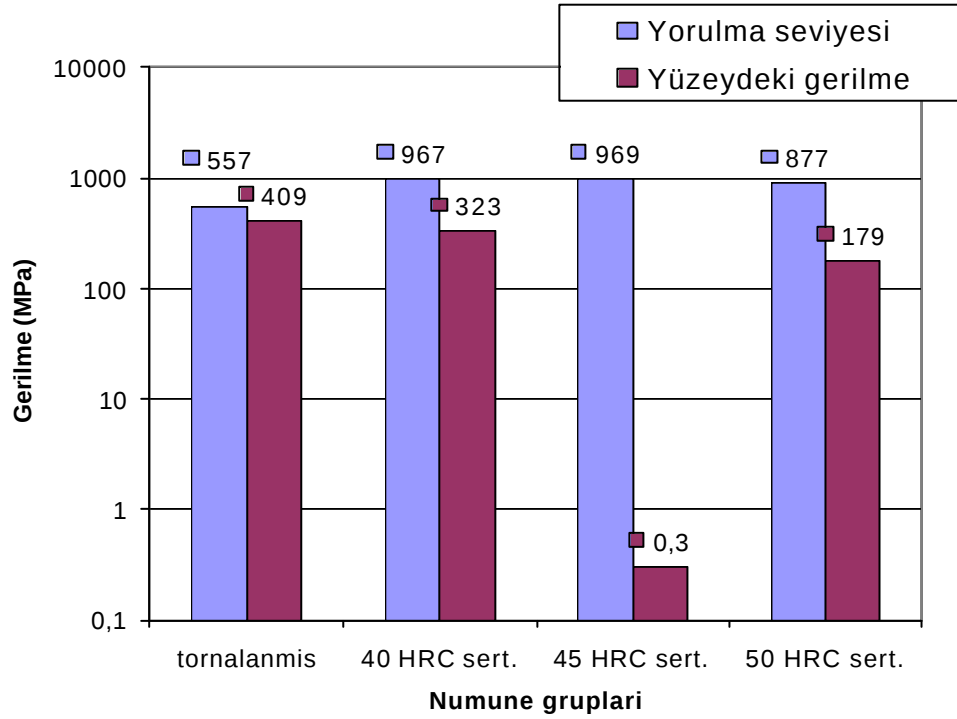
Elde edilen yorulma dayanımı değerlerinin %10, %20, %30 üst değerlerinde numuneler kopmayacak şekilde yorulma testine tabi tutulduktan sonra ölçülen yüzeydeki kalıcı gerilmelerin uygulanan yük arttıkça azalmaya başladığı gözlenmiştir.

Sekil 6.31’de yorulma dayanımının %10 üzerinde gerilme uygulanmış numunelerin yüzeylerindeki kalıcı gerilmelerin dağılımı görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi tornalanmış ve yorulma işlemi uygulanmış numunenin yüzeyinde en yüksek çekme gerilmesi ölçülmüştür. Bu değer 322 MPa dir. Fakat tornalanmış numunenin yorulma dayanımı sertleştirilmiş numunelere göre daha düşük olduğu için uygulanan gerilmede diğer numunelere göre daha azdır. 40, 45 HRC sertleştirilmiş numunelerin yüzeylerindeki kalıcı çekme gerilmeleri karşılaştırıldığında, 40 HRC sertleştirilmiş numunede 262 MPa iken 45 HRC de 128 MPa olduğu görülmektedir. 50 HRC sertleştirilmiş numunenin yüzeyindeki çekme gerilmesi 45 HRC sertleştirilmiş numunenin çekme gerilmesinden daha yüksektir.

Sekil 6.32’de yorulma dayanımının %20 üzerinde gerilme uygulanmış numunelerin yüzeylerindeki kalıcı gerilmelerin dağılımı görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi tornalanmış ve yorulma işlemi uygulanmış numunenin yüzeyinde en yüksek çekme gerilmesi ölçülmüştür. Bu değer 409 MPa dir. Fakat yorulma dayanımı tornalanmış numunenin sertleştirilmiş numunelere göre daha düşük olduğu için uygulanan gerilmede diğer numunelere göre daha azdır. 40, 45 HRC sertleştirilmiş numunelerin yüzeylerindeki kalıcı çekme gerilmeleri karşılaştırıldığında, 40 HRC sertleştirilmiş numunede 323 MPa iken 45 HRC de 0,3 MPa olduğu görülmektedir. 50 HRC sertleştirilmiş numunenin yüzeyindeki çekme gerilmesi 40 HRC sertleştirilmiş numunenin çekme gerilmesinden daha yüksektir.

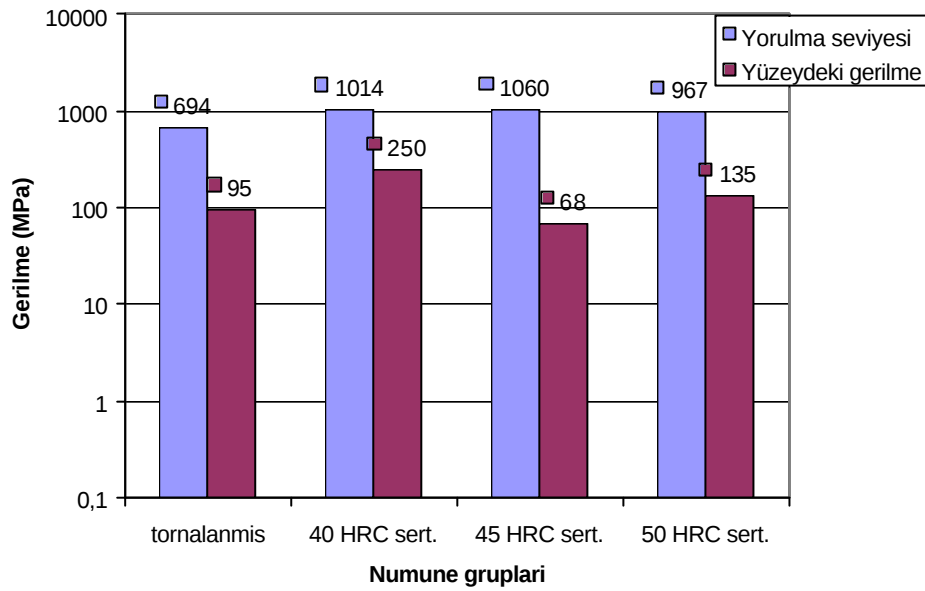


Sekil 6.31. %10 seviyede yorulmuş numune grubu



Sekil 6.32. %20 seviyede yorulmuş numuneler

Sekil 6.33’de yorulma dayaniminin %30 üzerinde gerilme uygulanmış numunelerin yüzeylerindeki kalıcı gerilmelerin dağılımı görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi 40 HRC sertleştirilmiş ve yorulma işlemi uygulanmış numunenin yüzeyinde en yüksek çekme gerilmesi ölçülmüştür. Bu değer 250 MPa’dir. 40, 45 HRC sertleştirilmiş numunelerin yüzeylerindeki kalıcı çekme gerilmeleri karşılaştırıldığında, 40 HRC sertleştirilmiş numunede 250 MPa’ye iken 45 HRC’de 68 MPa olduğu görülmektedir. 50 HRC sertleştirilmiş numunenin yüzeyindeki çekme gerilmesi 45 HRC sertleştirilmiş numunenin çekme gerilmesinden daha yüksektir.



Sekil 6.33. %30 seviyede yorulmuş numuneler

Deneyler sonucunda tornalanmış ve 40 HRC sertleştirilmiş numuneler yorulma dayanımlarının üzerinde yüklemeye tabi tutulduklarında yüzeydeki kalıcı çekme gerilmelerin arttığı gözlemlenmiştir. 45 ve 50 HRC sertleştirilmiş numunelerde ise yükleme yaptıkça yüzeydeki kalıcı çekme gerilmelerinin yumasadığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak parça sertleştikçe gevrekliğinin artmasının sebep olduğu ve numunelerin özüne kadar sertleşmesinin de bu sonuçların oluşmasına sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Yorulma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre de en yüksek yorulma dayanımı 792 MPa ile 45 HRC sertleştirilmiş numunede olduğu görülmüştür. Fakat sertlik arttıkça yorulma dayanımı azalma göstermiştir. Buna paralel olarak da yüzeydeki kalıcı gerilmelerde azaldığı görülmüştür.

6.3.6. Yorulma kalıcı gerilme ilişkisi

Mekanik, termal, kaplama ve imalat yöntemleri ile parçaları imal ederken kalıcı gerilmeler oluşabilir. Bütün bu metotların yararlı ya da zararlı yorulma dayanımına etkisi olur. Bilyeleme ve haddelemenin ikisi de yüzeyde kalıcı basma gerilmelerin oluşmasını sağlar. Indüksiyon sertleştirme, karbürasyon ve nitrürasyon gibi termal metotlarda yüzeyde kalıcı basma gerilmesi oluşturur. Bunlarda yorulma dayanımını arttırıcı metotlardır. Sertleştirme, sert kaplama krom ya da nikel kaplama gibi metotlar yüzeyde kalıcı çekme gerilmesi oluştururlar. Bu yöntemler ile üretilen parçaların yorulma dayanımları diğer yöntemler ile üretilenlere göre daha azdır. Kadmiyum ve çinko gibi yumuşak kaplamalar küçük kalıcı gerilmeler oluşturdıklarından yorulma dayanımına etkileri azdır. Imalat yöntemleri ile üretilip hiçbir işlem görmemiş parçaların yüzeylerinde sıklıkla kalıcı çekme gerilmesi oluşur. Bu da yorulma dayanımlarının azalmasına sebep olur (30).

Çizelge 6.7’de de görülen sonuçlar ışığında termal kalıcı gerilme oluşturma yöntemi olan sertleştirme işleminde sertlik değeri ile kalıcı gerilme arasında bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat sertlik değerinin çok yüksek olması kalıcı gerilmelerin artmasına sebep olmadığı görülmüştür.

Torres ve Voorwald (9), çalışmalarında AISI 4340 çeliline farklı bilyeleme prosedürleri uygulayarak yorulma dayanımını ve kalıcı gerilmeleri incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuca göre farklı bilyeleme prosedürlerinde, farklı kalıcı gerilmeler elde etmişlerdir. Bizim yaptığımız çalışmada da farklı sertlik değerlerinde farklı kalıcı gerilmeler elde edilmiştir. Burada çeliklerde kalıcı gerilme oluşturma yöntemlerindeki farklılık parça üzerindeki kalıcı gerilmeleri etkilediği sonucuna varılmıştır.

Dikkat edilmesi gereken husus sertlestirilecek numunenin kimyasal bilesimi, akma ve çekme gerilmesini dikkate alarak uygun sertlik degerinin tayin edilmesidir. Malzeme yüzeyinde sertlestirme islemi ile olusturulan çekme gerilmesi degerinin, sertlik degerinin arttirilmasi ile artacaginin düşünülmesi yanlis bir düşüncedir. Ayrica bir malzeme için yüzeyde en iyi çekme gerilmesi sonucunu veren sertlik degeri, farkli bir malzeme için ayni olumlu sonucu vermeyebilir. Bunun için kritik parçalarda en etkili sertlik sonucunun belirlenmesi için parçanın farkli sertliklerde sertlestirilip gerilme analizinin incelenmesi gerekmektedir.

Çizelge 6.7. Deneylerde elde edilen sonuçlar

Deney gruplari	Yorulma Dayanımı		Yüzeydeki Kalıcı Gerilme		%10 Seviyede Yorulmuş Numuneler			%20 Seviyede Yorulmuş Numuneler			%30 Seviyede Yorulmuş Numuneler		
	Mpa	%	Mpa	%	Y.D*	Y.K.G*	Ka.*	Y.D	Y.K.G	Ka.	Y.D	Y.K.G	Ka.
					Mpa	Mpa	%	Mpa	Mpa	%	Mpa	Mpa	%
Tornalanmış (12 HRC)	463	-	210	-	511	322	+53	557	409	+94	613	95	-55
40 HRC sertleştirilmiş	783	+69	169	-20	877	262	+55	969	323	+91	1014	250	+48
45 HRC sertleştirilmiş	792	+71	299	+43	877	128	+58	969	0,3	-10 ⁵	1060	68	-77
50 HRC sertleştirilmiş	739	+60	203	-3	831	209	+3	877	179	-12	969	135	-34

Y.D.* = Yorulma Dayanımı

Y.KG.* = Yüzeydeki Kalıcı Gerilme

Ka.*= Karsılastırm

6.4.Sonuç

Bu çalışmanın sonunda aşağıdaki belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

1. Malzemeyi sertleştirme, yorulma dayanımı ve kalıcı gerilme dağılımını etkilemektedir. AISI 4140 malzemesinin sertleştirilmesi ile de yorulma dayanımı ve kalıcı gerilmelerin değiştiği görülmüştür.
2. Sertlik artışı ile yorulma dayanımı artmamaktadır. AISI 4140 malzemede de sertlik değerlerinin artması ile yorulma dayanımının artmadığı görülmüştür.
3. Malzemelerde oluşturulan sertliğe göre yorulma dayanımında farklılıklar oluşmakta, en yüksek yorulma dayanımı için optimum bir nokta bulunmaktadır. AISI 4140 için de bu sertlik değerinin 45 HRC olduğu görülmüştür.
4. Termal metot olan sertleştirme işlemi malzemenin yüzeyinde kalıcı çekme gerilmesi oluşturmaktadır. AISI 4140 çeliginde de sertleştirme sonrasında yüzeyde kalıcı çekme gerilmesi olduğu görülmüştür.
5. Mekaniksel metot olan tornalama işlemi malzemenin yüzeyinde kalıcı çekme gerilmesi oluşturmaktadır. AISI 4140 çeliginde de tornalama işlemi sonrasında yüzeyde kalıcı çekme gerilmesi olduğu görülmüştür.
6. Malzeme yüzeyinde sertleştirme işleminden sonra oluşan kalıcı çekme gerilmesi, sertlik artışına göre paralel ve ya zıt hareket etmediği kararsız artış ve azalışlar gösterdiği görülmüştür.
7. AISI 4140 malzemesinin yüzeyindeki en yüksek kalıcı çekme gerilmesi, 45 HRC sertlikte olduğu görülmüştür.

8. AISI 4140 malzemesinin sertleştirme işleminden sonra malzemenin yüzeyinde çekme, yüzeyden daha derin bölgelerde kalıcı basma gerilmeleri olustugu görülmüştür.

6.5. Öneriler

Yapılan çalışmanın iyileştirilmesi hakkındaki öneriler aşağıda özetlenmiştir.

1. Bilyelenmiş AISI 4140 malzemesinde yorulma dayanımı kalıcı gerilme ilişkisi,
2. Kaplanmış AISI 4140 malzemesinde yorulma dayanımı kalıcı gerilme ilişkisi,
3. Yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış AISI 4140 malzemesinde yorulma dayanımı kalıcı gerilme ilişkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Imrak, E. C. ve Fetvacı, C., “Makine Parçalarının Yorulma Dayanımını Artık Gerilmeler Yardımıyla Arttırma”, **Mühendis ve Makine**, 34 (403): 26-31 (1993).
2. Dülek, E., “Ç 1020 Malzemedede Bilyalı Dövme ile Olusturulan Yüzeydeki Kalıcı Gerilmelerin Katman Kaldırma (Elektro Kimyasal) Yöntemiyle İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 55-68 (2002).
3. Kafkas, F., “Katman Kaldırma Teknigine Dayalı Olarak Kalıcı Gerilmelerin Ölçülmesini Sağlayan Bilgisayarlı Ölçme Cihazının Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 40-56 (2001).
4. Chernenkoff, R. A., “The Effect Of Cyclic Loading On The Residual Stresses Of a Shot Peened Powder-Forged Steel”, **1998 PM World Congress Post Sintering**, USA, 396-402 (1998).
5. Radhakrishnan, M. V. ve Prasad, R. C., “Relaxation of residual stress with fatigue loading”, **Engineering Fracture Mechanics**, 8: 593-597 (1976).
6. Wang, S., Li, Yongjun., Yao, M., Wang, R., “Compressive residual stress introduced by shot peening”, **Journal of Materials Processing Technology**, 73: 64-73 (1998).
7. Reynier, B., Chappuis, G., Sprauel, J.M., “X-Ray diffraction study of the fatigue behavior of a shot peened aluminum-lithium alloy”, **Experimental Mechanics**, 8: 112-118 (1995).
8. Li, J. B., Guang, Qiao, J.S., “Effects of brush electroplating and shot peening on the fatigue strength of a medium strength steel”, **Fatigue & Fracture of Engineering, Materials & Structures**, 15 (5): 431-439 (1992).
9. Torres, M. A. S. ve Voorwald, H. J. C., “An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel”, **International Journal of Fatigue**, 15 (4): 331-339 (2001).
10. Zhuang, Z. W. ve Halford, R. G., “Investigation of residual stress relaxation under cyclic load”, **International Journal of Fatigue**, 9: 31-37 (2001).
11. Teodosio, J. R., Cindra, F. M., Pedrosa, P. D., “Relaxation of residual stresses during fatigue cycles in steels”, **Materials Science Forum**, 6: 426-432 (2003).
12. Lee, Kwang-Soo, Song, Ji-Ho, “Estimation method for strain-life fatigue properties from hardness”, **International Journal of Fatigue**, 27: 1-15 (2005).

13. Choo, S-H., Lee, S., Golkovski, M., G., “Effect of accelerated electron beam irradiation on surface hardening and fatigue properties in an AISI 4140 steel used for automotive crankshaft”, *Materials Science & Engineering*, 293: 56-70 (2000).
14. Aken, V. D., “Fatigue endurance limit of steel”, *Industrial heating*, 68 (12): 14 (2001).
15. Ochi, Y., Masaki, K., Matsumura, T., Sekino, T., “Effect of shot-peening treatment on high cycle fatigue property of ductile cast iron”, *International Journal of Fatigue*, 23, 441-448 (2001).
16. Kristoffersen, H., Vomacka, P., “Influence of process parameters for induction hardening on residual stresses”, *Materials & Design*, 22: 637-644 (2001).
17. Ishigami, H., Matsui, K., Jin, Y., Ando, K., “ A study on stress, reflection and double shot peening to increase compressive residual stress”, *Fatigue Fracturing Engineering Materials*, 23: 959-963 (2000).
18. Genel, K., “İyon nitrülenmiş AISI 4140 çeliginin yorulma ve korozyonlu yorulma davranışı”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 50-80, (2000).
19. Çarboga, C., “Ç1010 Yapı Çeliginde Soguk Çekme İle Sağlanan Deformasyonun Malzemenin Yorulma Davranışına Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 80-100 (2002).
20. Anonim, “Malzeme teknolojisinde deneysel verilerin değerlendirilmesi seminer notları”, *Bogaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, Bölüm 5, 19 (1984).
21. Güleş, S. ve Aran, A., “Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı”, *MBEAE Matbaası*, Gebze, 7-33 (1983).
22. Kayali, E.S., Ensari, C. Ve Dikeç, F., “Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri”, *İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi*, İstanbul, 143-170 (1990).
23. Ewalds, H.L. ve Wanhill, R.J.H, “Fracture Mechanics”, *Edward Arnold Publisher Ltd*, USA, 170 (1985).
24. Savaskan, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, *Derya Yayınevi*, Trabzon, 267-272 (1999).

25. Basuslu, O., “1.2080 (X210Cr12),1.7225 (42CrMo4) ve Ck Çeliklerinin Yorulma Dayanımı Açısından Optimum Isil İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, 15-27 (1999).
26. Saka, F., “Yorulma Deney Cihazı Projesi ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 30-50 (1993).
27. Timings L. R., “Malzeme Teknolojisi”, Çeviren: Rıza GÜRBÜ, **Longman London**, New York, 100-140 (1985).
28. Askeland, D.R., “The Science and Engineering of Materials”, **PWS Pub. Co.**, London, 114-117 (1994).
29. Varol, R. ve Bedir, F., “Artık Gerilmelerin Önemi ve Yorulma Limiti Üzerine Etkisi”, **Mühendis ve Makine**, 34 (406): 38-41 (1993).
30. Stephens, I., R., Fatemi A., Stephens, R.,R., Fuchs, O., H., “Metal Fatigue in Engineering”, **John Wiley & Sons**, New York, 243-266, (2000).
31. Smith, F., W., “Mühendislik Alasimlarini Yapi ve Özellikleri I.Cilt”, Çeviren, Mehmet ERDOĞAN, **McGraw-Hill**, London and New York, 146-151, (1993).
32. ASTM, “Contuction Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, Philadelphia”, ASTM E 466-82 (1982).
33. ASTM, “Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Result For Metallic Materials, Philadelphia”, ASTM E 468-82 (1982).

ÖZGEÇMİS

Mehmet SUBASI, 10.09.1979 tarihinde İzmir’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmir’de bitirdikten sonra lise öğrenimini Çınarlı Teknik Lisesi’nde tamamladı. 1997 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Kalıpcılık Öğretmenliğini Programını kazandı ve 2001 yılında mezun oldu. Aynı yılın Eylül ayında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.