

**Ç1010 YAPI ÇELİĞİNDE SOĞUK ÇEKME İLE SAĞLANAN
DEFORMASYONUN MALZEMENİN YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

CEMAL ÇARBOĞA

726070

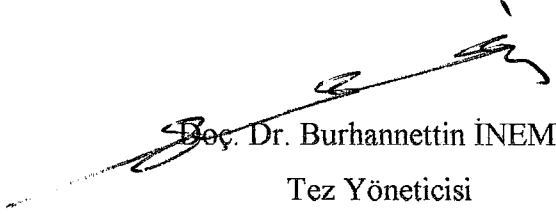
**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2002
ANKARA**

Cemal ÇARBOĞA tarafından hazırlanan “ Ç1010 YAPI ÇELİĞİNDE SOĞUK ÇEKME İLE SAĞLANAN DEFORMASYONUN MALZEMENİN YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Doç. Dr. Burhannettin İNEM

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

: Doç. Dr. Ali Kalkanlı

Üye

: Doç. Dr. A. Tamer ÖZDEMİR

Üye

: Doç. Dr. Burhannettin İNEM

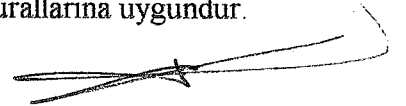
Üye

:

Üye

:

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



İÇİNDEKİLER

	Savfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. SOĞUK ÇEKME İŞLEMİ VE TEKNOLOJİSİ.....	4
2.1. Soğuk Çekme.....	4
2.2. Çubuk ve Tel Çekme.....	5
2.3. Yüzey Hazırlama.....	8
2.3.1. Mekanik yöntem.....	9
2.3.2. Kimyasal yöntem.....	10
2.3.3. Yüzey kaplama.....	11
2.3.4. Kurutma.....	11
2.4. Tavlama.....	12
2.5. Yağlayıcı.....	12
2.6. Soğuk Çekme Makineleri.....	13
2.7. Soğuk Çekme Kalıpları.....	16
2.8. Soğuk Çekme İşlemine etkileyen Faktörler.....	17
2.9. Tel ve Çubuk Çekme Kuvvetinin Hesaplanması.....	19
2.10. Soğuk Çekme Hataları.....	20
3. SOĞUK DEFORMASYONUN ETKİLERİ VE SOĞUK ÇEKİLMİŞ TEL VE ÇUBUKLARDA KALINTI GERİLMELER.....	22
3.1. Soğuk Şekillendirilmiş Malzemenin Yapı ve Özellikleri.....	22
3.2. Pekleşme.....	23
3.3. Tercihli Yönlenme.....	26
3.4. Soğuk Çekilen Tel ve Çubuklarda Kalıntı Gerilmeler.....	27

4. YORULMA VE YORULMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER.....	36
4.1. Yorulma	36
4.2. Yorulma Deneyleri.....	37
4.3. Yorulma Sonucunda Kırılan Malzeme.....	42
4.4. Yorulmayı Etkileyen Faktörler.....	45
4.4.1. Malzeme cinsi ve bileşimi.....	46
4.4.2. Kalıntılar ve mikro yapı hataları.....	47
4.4.3. Parça boyutu.....	49
4.4.4. Çentik (Gerilme Yığılması) etkisi.....	49
4.4.5. Yüzey etmeni.....	50
4.4.6. Yüzey mikroyapısı.....	51
4.4.7. Isıl işlemler ve mikroyapının etkisi.....	52
4.4.8. Kalıcı gerilme ve soğuk çekmenin yorulma ömrü üzerine etkisi.....	53
4.4.9. Yükleme durumu.....	56
4.4.10. Değişken zorlama.....	56
4.4.11. Ortalama gerilme etkisi.....	58
4.5. Çalışma Ortam.....	59
4.5.1. Sıcaklık ve radyasyon etkisi.....	59
4.5.2. Korozyon etkisi.....	61
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	62
5.1. Malzeme ve Deneysel Çalışma Sistematiği.....	62
5.2. Soğuk Çekme Numunelerinin Hazırlanması.....	63
5.3 Sertlik Deneyi.....	65
5.4 Çekme Deneyi.....	65
5.5 Mikroyapı İncelemesi.....	66
5.6 Yorulma Numunelerinin Hazırlanması ve Deneyi.....	67
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	69
6.1. Mikroyapı Sonuçları ve Tartışma.....	69
6.2. Sertlik Deney Sonuçları ve Tartışma.....	72
6.3. Çekme Testinin Sonuçları ve Tartışma.....	73

6.4. Yorulma Deneyinin Sonuçları ve Tartışma.....	76
6.5. Sonuçlar.....	80
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	83



**Ç1010 YAPI ÇELİĞİNDE SOĞUK ÇEKME İLE SAĞLANAN
DEFORMASYONUN MALZEMENİN YORULMA DAVRANIŞINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

CEMAL ÇARBOĞA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
EYLÜL 2002**

ÖZET

Bu çalışmada, % 15 soğuk deformasyon uygulanarak Ø 7mm'lik başlangıç çubuk malzemeden, Ø 6mm çapa düşürülen Ç1010 bir malzemenin, yorulma davranışı ve soğuk deformasyonun yorulmaya etkileri incelenmiştir. Ç1010 çeliğinde, soğuk deformasyon ile çekme dayanımı ve sertlik artmış; süneklik azalmıştır. Mikroyapıda ise, filmaşında eş eksenli tane yapısı mevcutken, soğuk çekilmiş malzemede soğuk çekme işlemi ile tanelerin çekme yönünde uzadığı gözlenmiştir. Soğuk çekme sonucu sağlanan % 15'lik deformasyonla malzemenin yorulma ömründe yaklaşık % 22'lik bir artış gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 626. 19. 00
Anahtar Kelimeler : Soğuk Çekme, Tel ve Çubuk Çekme, Yorulma
Sayfa Adeti : 83
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Burhannetin İNEM

**AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE COLD DEFORMATION
ON THE FATIGUE BEHAVIOR OF Ç1010 STRUCTURAL STEEL
(M.Sc. Thesis)**

CEMAL ÇARBOĞA

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
SEPTEMBER 2002**

ABSTRACT

In this study, the fatigue behavior and effects of the cold deformation on the fatigue life of Ç1010 structural steels were investigated. Initially, the annealed steel bars with Ø 7 mm diameter were cold drawn to the diameter of Ø 6 mm. Thus, the amount of cold deformation applied to the material was 15 %. The deformation increased the tensile strength and the hardness but it decreased the toughness and elongation. Microstructure of annealed material consist of equiaxed grain structure where in the deformed materials, the grains elongated to the rolling direction. As a result of cold drawing leading to 15 % deformation, approximately 22 % increase in fatigue life was observed.

Science Code : 626.19.00
Key Words : Cold drawing, Wire And Rod Drawing, Fatigue.
Page Number : 83
Adviser : Doç. Dr. Burhannettin İNEM

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Burhannettin İNEM'e, MİTAŞ'ın Bölüm Şefi Y. Müh. Serdar İSKENDER'e, malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen SAKA Demir Çeliğe, Deneylerin yapılşında katkılarından dolayı ODTÜ Metalurji Mühendisliğı Bölümü Mekanik Laboratuvarı teknisyeni Yaşar KAZANÇ'a, arkadaşlarımdan H. İbrahim ÖNDER'e, Yüksek lisans süresince desteklerini esirgemeyen Gümüşhacıköy İlçe Milli Eğitim Müdürü Sayın Arslan GÖKALP'a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşlarım Kadir ve Nermin TOPÇUOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Ç 1010 çeliğinin % olarak kimyasal analizi.....	62
Çizelge 6.1. Sertlik sonuçları.....	73
Çizelge 6.2. Çekme test sonuçları.....	74



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çekme.....	5
Şekil 2.2. Soğuk çekme ile elde edilen kesit örnekleri.....	5
Şekil 2.3. Çubuk çekme işleminin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.4. Tel çekme işleminin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.5. Sürekli tel çekme.....	8
Şekil 2.6. Soğuk çekmede, malzemenin matris içinde şekil değiştirdiği bölgede σ ve ϵ değerlerinin değişimi.....	8
Şekil 2.7. Tel çekme tezgahının şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.8. Beş kalıplı sürekli bir tel çekme işlemi.....	14
Şekil 2.9. Tek bir elektrik motoruna bağlı kademeli sarma makinesi ile dört kalıplı sürekli tel çekme işlemi.....	15
Şekil 2.10. Soğuk çekme.....	15
Şekil 2.11. Soğuk çekme kalıbının şematik kesiti.....	17
Şekil 2.12. Tel çekme kuvvetinin tel çekme açısı (α) ile değişimi.....	18
Şekil 2.13. Kalıp açısına bağlı olarak temas alanı boyutunun değişimi.....	19
Şekil 2.14. Kalıp açısına bağlı olarak malzeme akışının değişimi.....	19
Şekil 2.15. Soğuk çekme işleminde kalıp açısı ve h/L oranının büyük olması halinde deformasyonun homojen olmaması durumunda ok ucu şeklindeki iç çatlakların oluşumu.....	21
Şekil 3.1. Gerilim – gerinim diyagramından pekleşmenin oluşması.....	24
Şekil 3.2. Soğuk deformasyonun çekme özellikleri üzerine etkisi.....	24
Şekil 3.3. Metaller için büyük ve küçük pekleşme katsayılı gerçek gerilim gerinim eğrisi. n katsayısı büyük olan bir metal için daha büyük dayanım değerleri geri elde edilir.....	25
Şekil 3.4. SAE 1045 çeliğinde soğuk çekme sonucunda oluşan kalıntı gerilmeler.....	29

Şekil 3.5. Boyuna kalıntı gerilmeler (Soğuk çekilmiş pirinçte).....	29
Şekil 3.6. Kalıcı gerilme modeli.....	30
Şekil 3.7. Kalıcı basma gerilmesinin olumlu etkisi.....	30
Şekil 3.8. Soğuk çekilmiş çubuklarda kalıntı gerilmelere bağlı olarak meydana gelen distorsiyon.....	31
Şekil 3.9. Kalıcı gerilmelerin yorulma ömrüne etkisi.....	32
Şekil 3.10. % 11 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi.....	33
Şekil 3.11. % 21 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi.....	33
Şekil 3.12. % 29 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi.....	34
Şekil 3.13. % 36 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi.....	34
Şekil 3.14. % 42 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi.....	35
Şekil 4.1. Yorulma deneylerinde kullanılan Wöhler makinelerinin prensip şeması.....	37
Şekil 4.2. Wöhler makineleri “ Serbest Uçlu Kiriş” test düzeneği.....	38
Şekil 4.3. Yorulma gerilim periyotları.....	39
Şekil 4.4. Çelik ve demir olmayan malzemelerin tipik Wöhler diyagramı.....	40
Şekil 4.5. Takım çeliği ve alüminyum alaşımının kopma eğrisi için “Gerilim Devir Sayısı”.....	41
Şekil 4.6. Dönel eğmeli yorulma deney makinesinin Şematik resmi.....	42
Şekil 4.7. Yorulma sonucunda kırılan parçanın yüzeyinin şematik resmi.....	43
Şekil 4.8. Yorulma sonucunda kırılan bir parçanın yüzeyinin fotoğrafı.....	44
Şekil 4.9. Yorulma dayanımını etkileyen faktörler.....	45
Şekil 4.10. Tane sınırlarının kayma düzlemleri.....	48
Şekil 4.11. Kayma bantlarının girinti ve çıkıntı meydana getirme mekanizması.....	48
Şekil 4.12. Metalin yorulma özellikleri üzerine çentiğin etkisi.....	50

Şekil 4.13. Yüzey durumunun yorulma dayanımına etkisi.....	51
Şekil 4.14. Çeliğin iç yapısının yorulma oranına etkisi.....	52
Şekil 4.15. % 0,4 C içeren çelikte matenzit oranının dayanıma etkisi.....	53
Şekil 4.16. Kalıcı gerilme modeli.....	54
Şekil 4.17. Kalıcı basma gerilmesinin olumlu etkisi.....	54
Şekil 4.18. Kalıcı gerilmelerin yorulma ömrü üzerine etkisi.....	55
Şekil 4.19. Malzeme üzerine gelen yükleme durumu.....	56
Şekil 4.20. Yorulma deneyinde kullanılan büyüklükler.....	57
Şekil 4.21. Yorulma hasarını meydana getiren gerilme türleri.....	58
Şekil 4.22. Değişik ortalama gerilmeler için S-N eğrileri.....	59
Şekil 4.23. Çevrim sayısı ile maksimum gerilme.....	60
Şekil 4.24. Hasar çevrim sayısı ile toplam şekil değişimi.....	61
Şekil 5.1. Deneysel çalışmalar.....	62
Şekil 5.2. Ç1010 çeliği ilk kademe soğuk çekimi.....	64
Şekil 5.3. Ç1010 çeliği ikinci kademe soğuk çekimi.....	64
Şekil 5.4. Sertlik alınış yerleri.....	65
Şekil 5.5. Soğuk çekilmiş malzemenin çekme numunesi.....	66
Şekil 5.6. Filmaşın malzemenin çekme numunesi.....	66
Şekil 5.7. Değişik tip mikroyapı numuneleri.....	67
Şekil 5.8. Soğuk çekilmiş malzemenin yorulma deney numunesi.....	68
Şekil 5.9. Filmaşın malzemenin yorulma deney numunesi.....	68
Şekil 6.1. Ç1010 filmaşın çekme yönüne dik mikroyapısı x100.....	69
Şekil 6.2. Ç1010 soğuk çekilmiş malzemenin çekme yönüne dik mikroyapısı x100.....	69

Şekil 6.3. Ç1010 filmaşın çekme yönüne paralel mikroyapısı x100.....	70
Şekil 6.4. Ç1010 soğuk çekilmiş malzemenin çekme yönüne dik mikroyapısı x100.....	70
Şekil 6.5. Yüzey ve merkez arasında sertlik farkı.....	73
Şekil 6.6. Soğuk çekilmiş Ç1010 malzemesinin çekme testi sonucu.....	74
Şekil 6.7. Filmaşın Ç1010 malzemesinin çekme testi sonucu.....	75
Şekil 6. 8. Filmaşın ve soğuk çekilmiş malzemenin çekme testi sonucu.....	75
Şekil 6.9. Filmaşın malzemenin S – N grafiği.....	77
Şekil 6.10. Soğuk çekilmiş malzemenin S – N grafiği.....	77
Şekil 6.11. Filmaşın ve soğuk çekilmiş malzemenin S – N grafiği.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
σ_0	Ortalama Gerilme
σ_{φ}	Maksimum Çekme Gerilimi
σ_y	Yorulma Sınır Gerilimi
P_1	Çekme Kuvveti
σ_a	Akma Gerilimi
A_s	Malzemenin Çekme Sonrası Kesit Alanı
A_0	Malzemenin Çekme Öncesi Kesit Alanı
μ	Sürtünme Katsayısı
$P_{t\varphi}$	Soğuk Çekme Kuvveti
T_m	Oluşacak Sıcaklık
α	Kalıp Açısı
$Q_{t\varphi}$	Soğuk Çekmede Gerilme Çarpım Faktörü
h	Ortalama Çap
L	Malzemenin Matristeki Temas Boyu
F	Kuvvet
G	Kayma Modülü
b	Burger Vektörü
p	Dislokasyon Yoğunluğu

σ_i	Kafes Sürtünme Gerilimi
k	Malzeme Sabitesi
n	Deformasyon Pekleşme Üssü
ε	Gerilme Miktarı
d	Çap
N	Tane Sayısı

Kısaltmalar**Açıklama**

HMK	Hacim Merkezli Kübik
HSP	Hegzagonal Sıkı Paket
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
BSD	Brinell Sertlik Testi
SAE	Amerikan Çelik Standardı
YDS	Yorulma Dayanım Sınırı
mm	Milimetre
R	Redüksiyon Miktarı

1. GİRİŞ

Metal esaslı malzemelerin insan hayatı içerisindeki yeri ve önemi, tarihin her döneminde kendini hissettirmiştir. Günümüzde bir ülkenin kalkınmışlığının ölçülendirilmesinde ana kriterlerden biri olarak ağır sanayi ve buna bağlı olarak endüstriyel malzemelerin üretimi ve kullanımı gelmektedir. Çağın gereği olarak, gelişen teknoloji ve insan ihtiyaçlarına cevap verecek sistemlerin karmaşıklığı, metalik malzemelerin servis ortamı içerisinde hasara uğrama sebepleri çeşitlilik kazanmış ve özellikle metal yorgunluğu malzemelerdeki hasar nedenlerinin ilk sırasında yer almaktadır.

Bu gelişmeler, metal yorgunluğunun çeşitli işlemlerle minimize edilmesi hatta yok edilmesi için çalışmaları artmıştır. Soğuk çekme işlemi, malzemenin önemli bazı mekanik özelliklerini iyileştirdiği gibi, metalik malzemelerin yorulma dirençlerini de arttırmaktadır.

Soğuk çekme işleminin yorulma dayanımı üzerine etkilerini ülkemizde ilk olarak, Tarakçılar, A. R. [1] yaptığı farklı oranlarda soğuk deformasyonlarla soğuk çekmenin yorulma üzerine etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada Ç1020 malzemesine beş farklı soğuk çekme uygulayarak, bu kalıntı gerilimlerin yorulmaya etkileri incelemiştir. Aynı zamanda sertlik ve çekme dayanımını soğuk çekme işleminin sertlik ve çekme dayanımının arttırdığını gözlemlemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda soğuk çekmenin, soğuk deformasyon miktarı arttıkça yorulma dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar litaritürle karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın dışında, soğuk deformasyonla oluşturulmuş kalıntı gerilimler üzerine yapılan bir çok çalışma bulunmaktadır. Fakat bu kalıntı gerilimler soğuk çekme ile oluşturulmamıştır. Genellikle bu kalıntı gerilimler Bilyalı dövme, Isıl işlemler, Fırçalama yöntemiyle, Ezme yöntemiyle, v.s. gibi yöntemlerle oluşturulmuştur.

Tekkaya, A. E. [2] kalıntı gerilimler üzerine geniş bir çalışma yaparak; boru, tel ve çubuk gibi ürünlerdeki kalıntı gerilimleri analiz etmiştir. Boru, tel ve çubuk üzerinde oluşturduğu kalıntı gerilimleri inceleyerek hesaplamış ve litaritürde bulunan diğer sonuçlarla karşılaştırmalar yapmıştır.

Can, A. Ç., Kandemir, K., ve Ası, O. [3] üretim aşamasında makine parçalarının yorulma dayanımını artırıcı önlemler üzerine çalışmalar yapmıştır. Soğuk şekillendirme sertleştirmelerinin yorulma dayanımı üzerine etkilerini incelemiştir. Makine parçalarının işlenmesi ve ısı işlemleri esnasında oluşan artık gerilmelerin parçalara dıştan uygulanan gerilmelerle birleşerek etkilediğini gözlemlemiştir. Ayrıca bilyalı bombardımanın ısı işlemleriyle birlikte yapılmasıyla yorulma dayanımındaki iyileşme % 100'e kadar, bilya bombardımanın fırçalama ile birlikte yapılmasıyla da % 79'a kadar arttığını deneylerle gözlemlemiştir.

Aktaş, B. ve Demir, H. [4] 7075 Alüminyum alaşımının bilyalı dövme davranışlarını incelemiştir. Bilyalı dövme metodu ile oluşturdukları kalıntı gerilmelerin yorulma ömrünü olumlu yönde etkilediğini gözlemiştir.

Pıhtılı, H. ve Özler, L. [5] Yay tellerinde yorulma ve yorulma deneylerinde izlenecek temel esaslar hakkında araştırmalar yapmışlardır. Yayların yorulmaları hakkında bilgi vererek, yayların yorulma deney esaslarını açıklamışlardır. Yayların yorulma deneylerinin dışında, Tek yönlü burulma deneyi, Çift yönlü burulma deneyi, Sarma deneyi ve Bükme deneyini de uygulamışlardır.

Hacıfazlıoğlu, S. [6] Kaymalı yataklarda yüzey yorulması ve nedenleri hakkında araştırma yapmıştır. Araştırmaları sonucunda, kaymalı yataklarda yüzey yorulmasına yol açabilecek başlıca gerilme kaynaklarını, mekanik ve ısı etkili olarak iki grupta toplamıştır.

Varol, R. ve Bedir, F. [7] Artık gerilmelerin önemi ve yorulma limiti üzerine etkisini incelemiştir. Artık gerilmelerin yorulma üzerine etkilerini faydalı ve zararlı olarak sınıflandırmışlardır. Basma gerilmelerinin yüzeyde oluşması ile yorulma dayanımının arttığı fakat, çekme gerilmesinin yüzeyde oluşmasında ise yorulma dayanımının azaldığını gözlemlemiştir. Malzemeyi farklı bor kalınlıklarında kaplayarak aşınmaya karşı etkilerini incelemiştir.

İmrak, C. E. ve Fetvacı, C. [8] Makine parçalarının yorulma dayanımını artık gerilmeler yardımıyla artırma ile ilgili çalışma yapmışlardır. Dinamik zorlamaya

maruz makine parçalarının daha yüksek bir yorulma dayanımı ve ömrüne sahip olması istendiği hallerde, parçalarda artık gerilmeler oluşturulması gerektiğini gözlemlemiştir. En uygun yöntemin ise, parçaların çalışma şartlarına ve malzemelerin yapısına göre seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bilyalı dövme yöntemi ile artık gerilme oluşturma yönteminin en iyisi olduğunu da bahsetmişlerdir.

Yapılan bu çalışmada amaç, endüstride soğuk çekme işleminde çok kullanılan Ç1010 çeliğinin ve kullanım yerleri bakımından sürekli yorulmaya maruz kalıp servis dışı kalma ihtimalinden dolayı böyle bir çalışma ile, bu malzemeden üretilen makine ve yapı elemanlarının yorulma ömürlerinin uzatılmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, Ø 7 mm çapındaki Ç1010 çeliği, iki kademede soğuk çekme yapılarak Ø 6 mm çapa düşürülmüştür. Soğuk çekme işleminde % 15'lik soğuk deformasyon sağlanmıştır. Yapılan çalışmada sıcak üretilmiş (filmaşın) malzeme ile, aynı malzemenin soğuk çekilmişinde mikroyapısal özellikler, çekme dayanımları, sertlik değerleri ve yorulma dirençleri karşılaştırılmıştır. Sertlik değerlerindeki ve çekme dayanımlarındaki sonuçlardan yola çıkılarak, yorulma deney sonuçları ile yorulma yaklaşımları karşılaştırılmıştır. Sertlik değerinde ve çekme dayanımdaki oluşan farklar, mikroyapı ile de ilişkilendirilmiştir..

İçerik olarak: Bölüm 2 de soğuk çekme işlemi tanıtılmış, Bölüm 3 de soğuk çekme işlemi ile oluşan, soğuk deformasyon ve kalıntı gerilmeler hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 4 de yorulma ve yorulmaya etkileyen faktörler kısaca tanıtılmıştır. Deneysel çalışmalar hakkında bilgiler Bölüm 5 de verilirken, Bölüm 6 da deney sonuçları ve bu sonuçlarının tartışılması yapılmıştır.

2. SOĞUK ÇEKME İŞLEMİ VE TEKNOLOJİSİ

Soğuk çekme işlemi genellikle oda sıcaklığında yapılan bir soğuk deformasyon işlemidir. İşlem sonrasında malzemenin akma ve çekme dayanımları artarken süneklik azalır. Çekme eksenine paralel yönde mekanik ve kristalografik yönlenmenin bir sonucu olarak malzeme anizotropik davranış gösterir[9, 10, 12].

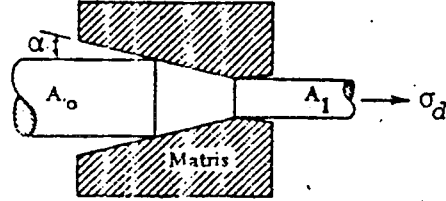
Soğuk çekme işleminin tarihçesi 11. yüzyıla kadar dayanmaktadır. Soğuk çekilen bir malzeme yüzey kalitesi ve hassas kesit toleranslarından dolayı ek bir işlem yapılmaksızın kullanılabilir. Soğuk çekilen malzemeler piston, şaft, cıvata, somun, gibi parçaların yapılmasında kullanılır[10].

Soğuk çekme işlemi ile tellerin ve çubukların hassas boyut ve toleranslarda üretimi sağlanır. Soğuk çekme (tel ve çubuk malzemeler için); metalik malzemelerin soğuk çekme kalıbından matris geçirilerek kesitinin küçültülüp boyunun uzatılması işlemine denir. Soğuk çekme işleminde plastik şekil değişimi; kalıbın malzemeye uyguladığı basma kuvveti ile sağlanır. İsteğe göre, tel veya çubuk bir veya daha fazla soğuk çekme işlemine tabi tutulabilir. Endüstriyel manada deformasyon miktarı çubuklar için %10 – 30 ve tel çekmede % 20-50 arasındadır. Redüksiyon miktarı ve malzeme cinsine bağlı olarak ara ısıtma işlemi gerekebilir[14, 17].

Soğuk çekme işlemi genellikle oda sıcaklığında yapılır, fakat işlemde uygulanan deformasyon miktarı ve sürtünmeye bağlı olarak malzemede birkaç yüz derecelik ısınma meydana gelebilir. Yarımamül elde edilen ürünün çapına göre tel çekme ($\emptyset 0,1 < \emptyset 5\text{mm}$) veya çubuk çekmede ($\emptyset 5 < 80\text{ mm}$) olarak tanımlanır[10].

2.1. Soğuk Çekme

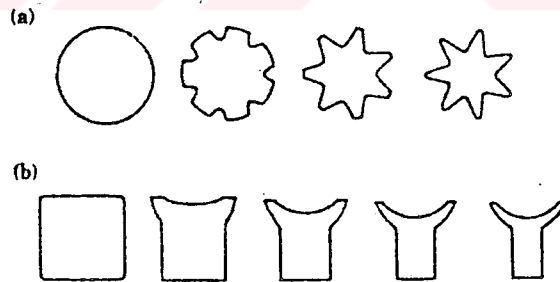
Metal bir malzemenin matris veya hadde olarak adlandırılan üzerinde bir (veya daha fazla) delik bulunan bir takımdan çekilerek uzatılmasına çekme denir. Çekme kuvveti matrisin çıkış tarafından uygulanır(Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Çekme[11]

Metalin kesiti genellikle dairesel ise de daha başka kesitlerde (kare, altıgen, v.s) çekilmektedir.(Şekil 2.2.) Artarda yapılan soğuk çekme işlemleriyle malzemenin kesit yüzeyi sürekli olarak düşürülmekte, elde edilen çıkış değerine göre de işlem çubuk veya tel çekme olarak adlandırılmaktadır(Şekil 2.1.).

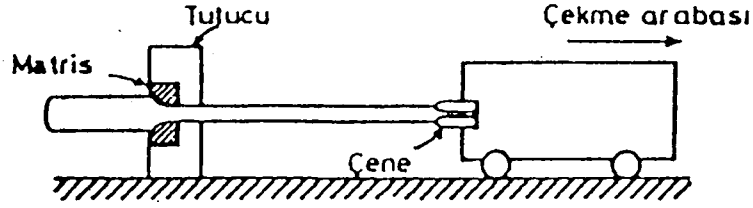
Soğuk çekme işlemi genellikle oda sıcaklığında yapılır. Dairesel kesitli çubuklar örneğin cıvata, saplama gibi bağlama elemanları, teller ise; kablo, yay, vs üretiminde kullanılır[11].



Şekil 2.2. Soğuk çekme ile elde edilen kesit örnekleri[11]

2.2. Çubuk ve Tel Çekme

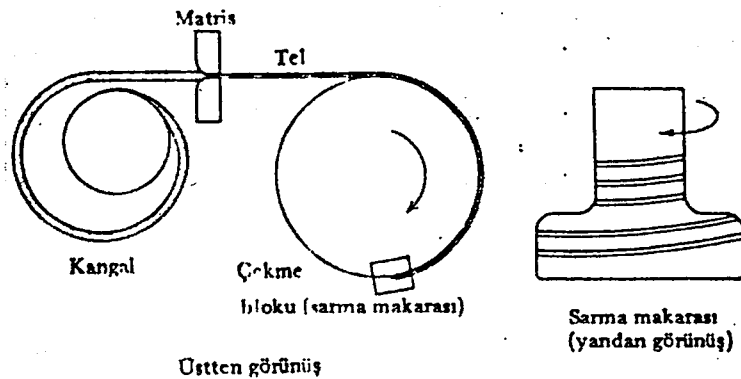
Soğuk çekme işlemi tel ve çubuk olarak ikiye ayrılmakla birlikte, çubuk ve tel çekme prensip olarak birbirinin aynı olan işlemlerdir. Sadece kullanılan makinelerde farklılık gösterirler. Teller kangal ve bobin halinde sıralanabilmelerine karşın, çubuklar düz olarak çekilebilir(Şekil 2.3.) [10].



Şekil 2.3. Çubuk çekme işleminin şematik gösterimi[10]

Çubuk çekiminde kullanılan sıcak çekilmiş malzeme; cinsine ve kesitine bağlı olarak (deformasyon kabiliyetine bağlı olarak) kangal veya çubuk olabilir, fakat işlem sonrasında malzeme çubuk olarak üretilir. Tel çekme işleminde ise; kullanılan yarımamül malzeme, sıcak haddeleme ile üretilmiş filmaşın adı verilen düzgün sarımlı kangallardır. Genellikle teller soğuk çekimden sonra tekrar kangal halinde sarılır (Şekil 2.4.)[9].

Demir dışı malzemelerde soğuk çekme işleminin yarımamülü olan çubuklar genellikle ekstrüzyon ile üretilir[1]. Tel çekme işleminde, çubuk çekme işleminde olduğu gibi telin ucu sivriltilerek kalıptan geçirilir ve çekme bloğuna bağlanarak çekilerek kalıptan geçmesi sağlanır. (Şekil 2.4.) Bu işlemde büyük miktarlarda deformasyon miktarlarının uygulanabilmesi için malzeme sünek olmalıdır. Örneğin $\varnothing 5\text{mm}$ 'lik yumuşak bir çelik sürekli bir soğuk çekme ile $\varnothing 0,1\text{mm}$ 'ye kadar düşürülebilir. Sürekli soğuk çekme ile ince tel üretimi için filmaşın artarda birkaç kalıptan geçirilir. Buradaki bir kademe uygulanan redüksiyon miktarı %15-25 kadardır. Kalın tellerde ise bu değer %20-50 arasında olabilir. Tel çekme işleminde üretim yüksek olup modern tesislerde 150 m/dk'dır.



Şekil 2.4. Tel çekme işleminin şematik gösterimi[10]

Malzeme yüzeyinde hataların oluşmaması, çekme kalıbının aşınmaması ve deforme olmaması için sürtünme kuvvetlerinin azaltılması gereklidir. Bunun sağlayabilmek için işlem öncesi malzeme yüzeyinin temizlenmesi kalıp açısının uygun seçilmesi ve uygun kayganlaştırıcı madde kullanılması çok önemlidir[10, 12, 17].

Çubuk ve tel çekme işlemlerinde malzemenin kalıptan kolay geçmesi için kuru ve yağ (sıvı) olarak kayganlaştırıcı maddeler kullanılmaktadır. Buna göre de çekme işlemi kuru veya yağ çekme olarak ifade edilir. Kuru çekmede gres ve sabun tozu kullanılırken yağ çekmede sıvı halde değişik madeni ve bitkisel yağlar kullanılabilir. Yağ çekmede matris sıvı bir yağlayıcı (örneğin alkali sabun çözeltisi) içine daldırılmış durumdadır[14].

Her soğuk çekme kademesinde kesit yüzeyi % 10...45 oranında küçültülür. Küçük kesit yüzeyleri için bu oran genellikle alt sınıra daha yakın değerlerde alınır. Bir kademedeki kesit küçülmesi % 45'ten büyük olduğu takdirde yağlama sorunları doğabilir ve ürünün yüzey kalitesi bozulabilir. Boyutsal doğruluk ve yüzey düzgünlüğü sağlamak amacıyla kademe (paso) başına % 10'dan düşük kesit küçültmeleri de uygulanabilir.

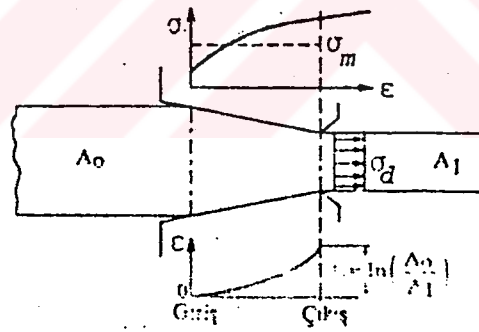
Bir sarma makinesinin hızı, tele, matris çıkışında çekme gerilmesi, sonraki daha küçük kesitli matrise girişinde ise geri çekme uygulayacak şekilde ayarlanmalıdır. Geri çekme gerilmesi matris ömrünü artırır. Kesit daralmaları, tüm kademeler için gerekli gücün eşit olacağı şekilde ayarlanmalıdır.

Çekme hızı malzemeye ve kesit yüzeyine bağlıdır. Büyük kesitler 10 m/dk gibi küçük hızlarda çekilirken çok ince tellerde çekme hızı 3000 m/dk gibi yüksek değerler olabilir[11].

Şekil 2.5'de görülen sürekli tel ve çubuk çekme işlemi ile seri halde bir üretim oluşur. Şekil 2.6'da ise çekmenin σ ve ϵ bağıntısı görülmektedir.



Şekil 2.5. Sürekli tel çekme[11]



Şekil 2.6. Çekmede, malzemenin matris içinde şekil değiştirdiği bölgede σ ve ϵ ve değerlerinin değişimi[11]

2.3. Yüzey Hazırlama

Sıcak haddelenmiş çelik çubuklarda filmaşinlere soğuk çekmeden önce yüzey hazırlama işlemleri uygulanır. Yüzey hazırlamada ilk adım oksit gidermedir. Sıcak haddelenmiş çelik çubuklarla filmaşinlerin yüzeyi bir oksit tabakasıyla kaplıdır. Bu oksit tabakası aşırı matris aşınmasına ve çekilen üründe yüzey kusurlarına yol açacağından soğuk çekme işleminden önce temizlenmelidir. Bu yüzey temizleme işlemi kimyasal ve mekanik olmak üzere ikiye ayrılır[11].

Günümüzün modern tel ve çubuk çekme işlemlerinde kimyasal bir yöntem olan asitle temizleme yerine mekanik bir yöntem olan kumlama tercih edilmekte ve asitle yüzey temizleme yöntemini kullananların sayısı gün geçtikçe azalmaktadır. Bunu en önemli sebepleri, insan ve çevre sağlığı açısından asidin zararlı olması ve ekonomik olmamasıdır. Aynı zamanda asitleme sırasında üretim kontrolü oldukça zordur. Kumlama makinesi, çekme makinesi ile kangal arasında yer alır. Malzeme kumlama makinesine girmeden önce doğrultma diskleri arasından geçerek doğrulur, kumlama makinesinin içinden geçerek kumlanır ve çekme kalıbından geçerek soğuk çekilir. Dolayısıyla bütün işlemler artarda olup, ayrıca bir zaman ve işçilik gerektirmediği içinde üretim hızı artar[10].

2.3.1. Mekanik yöntem

a) Tel fırça kullanarak

b) Kumlama (çelik granül püskürterek temizleme)

a) Tel Fırça Kullanarak Yüzey Hazırlama

Bu işlemde malzeme çelik tel ve çubuk, makaralar arasından geçirilerek yüzeydeki oksit tabakası kırılmak suretiyle yüzey temizlenir[9, 10].

b) Kumlama ile Yüzey Hazırlama

Kumlama günümüzün en popüler yüzey hazırlama yöntemidir. En önemli özellikleri, kimyasal yöntemle kıyaslandığında uygun filtrasyon şartları sağlandığında çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından daha az zararlı ve ekonomik olmasıdır.

Bu yöntemde; serbest halde türbinlere alınan kum (martenzitik veya beynitik çelik bilyalar $\varnothing$ 0,42 – 2,4 mm arasındaki boyutlarda olabilir) yüksek devirle dönen (3000-5000 dev/dk) türbinler sayesinde çok yüksek hızlarda malzeme yüzeyine savrulur. Savrulmanın etkisi ile yüksek hızda malzeme yüzeyine çarpan kum, oksit tabakasının kırılmak suretiyle dökülmesini sağlar. Ayrıca çarpma sırasında malzeme yüzeyinde oluşan izler sayesinde çekme yağının malzeme yüzeyinde tutunmasını

sağlayarak soğuk çekme işlemini kolaylaştırır. Yalnız, oluşan izlerin çekme ve sonrasında yapılan doğrultma ve parlatma işleminde kaybedilebilmesi için uygun kum tane boyutunun belirlenmesi gerekir[9,10].

2.3.2. Kimyasal yöntem

Bu yöntemde soğuk çekilecek malzemeler sülfürik asit içeren sulu çözeltilerin içerisine daldırılır. Bu çözelti yüzeydeki oksit tabakasının kırılarak dökülmesini sağlar. İşlem sırasında, asidin homojen olarak malzemeye etkimesi için çözelti sürekli olarak sirküle edilir. Asit, oksit tabakasının altına da etki edebilir. Orada demirle reaksiyona girerek FeSO_4 'den ibaret nötr tuz ile hidrojene dönüştür. Kırılarak, çözelti tankının dibine çöken oksit parçacıkları sık sık temizlenir. Kimyasal temizleme sırasında malzeme yüzeyinde oyukların açılmasını önlemek için inhibitör adı verilen azotlu hidrokarbonlar kullanılır. Siyah oksit tabakasından farklı olan kırmızı pas ($\text{FeO}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ veya $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{Fe}(\text{OH})_3$) asitte eriyerek FeSO_4 oluşturduğu için asit, işlem süresince nötrleşir. Böylelikle asit konsantrasyonu azaldığı için dengeli konsantrasyon oluşturacak şekilde asit ilave edilir[9].

Kimyasal temizlemede asit konsantrasyonu, banyo sıcaklığı ve işlem süresi çok önemlidir. Asit konsantrasyonu çeliğin kimyasal bileşimine göre değişir. Az karbonlu çeliklerde oksit tabakası daha sıkı yapıda olduğundan kimyasal temizleme daha yüksek asit konsantrasyonu gereklidir. Yüksek karbonlu çeliklerde bulunan tersi bir durum söz konusu olduğu için daha düşük bir asit konsantrasyonu gereklidir.

Banyo sıcaklığı reaksiyonu etkilediği için önemlidir. Yüksek sıcaklık, asidin malzemeyi aşındırma tehlikesinden dolayı sakıncalı olabilir.

Temizleme süresi çeliğin bileşimine, yüzeydeki oksit tabakasının kalınlığına ve banyo sıcaklığına bağlıdır. Patentlinmiş (soğuk çekilen çeliklere uygulanan özel ısıtıl işlem) ve yüksek karbonlu çeliklerde oksit tabakası sıkı olmadığı için temizleme süresi 10 dk'dır. Az karbonlu çeliklerde ise bu süre 30- 35 dk'ya kadar çıkabilir[10].

2.3.3. Yüzey kaplama

Temizlenen tel ve çubukların yüzeylerinin tekrar oksitlenmemesi için kaplanması gereklidir. Yüzey kaplama soğuk çekme tipine göre değişir. Kuru çekmede kuru sönmüş kireç, boraks veya fosfat kaplama yapılır[9].

Kireç kaplamada tel veya çubuk yaklaşık 90 °C sıcaklıktaki kireç sıvısı banyosuna daldırılır. Kaplamanın sağlıklı olabilmesi için malzeme sıcaklığı banyo sıcaklığına ulaşmaya kadar işlem devam etmelidir. Kireç banyosunun sirkülasyonu kaplamanın daha homojen olmasını sağlar. Kaplamanın kalınlığı soğuk çekme işlemindeki redüksiyon miktarı ve sayısına göre belirlenir.

Boraks, kireç ile kıyaslandığında daha çabuk kuruması, nemlenmemesi ve çekme işlemi sırasında yüzeyden tabaka halinde ayrılmaması açısından çok daha iyi bir kaplama maddesidir. Fakat pahalı olması bir dezavantajdır.

Fosfat kaplamada, çinko, fosfat veya demir fosfat kullanılır. Her ikisinde de banyo sıcaklığı 80 °C civarındadır. İşlem süresi istenilen kaplama kalınlığına göre 2-10 dk arasında değişir. İşlem sırasında malzeme soğuk veya sıcak su ile durulanır. Bundan sonrada fosfat kaplama kireç veya boraks kaplama nötrleştirilir.

Çok ince kesitli tel üretiminde filmaşine yağ çekme uygulanır. Bu durumda malzeme yüzeyi bakır veya kalay (metalik kaplama) ile kaplanır[9, 10].

2.3.4. Kurutma

Yüzeyi temizlenip kaplanan filmaşin, çekme işleminden önce iyice kurutulur. Asitle temizleme sırasında hidrojen çelik içerisine yayınması ile hidrojen gevrekliği olarak bilinen kırılabilirlik meydana gelebilir. Kaplamayı kurutarak hidrojen gevrekliğini gidermek için sürekli tünel tipi fırınlarda 200 –250 °C'de 1-2 saatlik kurutma işlemi yapılır[11].

2.4. Tavlama

Soğuk çekme işlemindeki deformasyon miktarına ve malzeme cinsine göre, işlemi kolaylaştırmak ve istenilen deformasyon miktarını sağlamak için ön bir ısıtma işlemi gerekebilir. Düşük ve orta karbonlu çeliklerde uygulanan ısıtma işlemi; yumuşatma veya normalleştirme tavlama işlemidir. % 0,4'den daha yüksek karbon ihtiva eden yüksek karbonlu çeliklerde ise patentleme adı verilen ısıtma işlemi uygulanır[14].

Patentleme ısıtma işlemi yalnızca tel endüstrisinde kullanılan ve özellikle çok kademeli soğuk çekme işlerinde mutlaka uygulanması gereken bir ısıtma işlemidir. Yüksek karbonlu çelik filmaşın (düşük kesitli malzemenin kangal halinde sarılmış hali) bir fırında A₃ sıcaklığının üstünde (920 °C) tavlama daha sonra 490 - 510 °C de sıcaklıktaki kurşun banyosuna daldırılır. Böylelikle beynitik bir yapı elde edilerek malzemenin yüksek mukavemet ve sünekliğe sahip olması sağlanır. Çok kademeli çekme işlemlerinde malzemenin pekleşmesinden dolayı ara tavlama yapmak gerekebilir. Ara tavlama, atmosfer kontrollü bir ortamda ve yeniden kristalleşme sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda yapılır. Patentlenmiş çeliklerde % 75 - 80 kadar kesit küçülmesi sağlanabilir. Bu orandan daha fazla miktarlarda istenen kesit küçülmesi ancak ikinci patentleme ısıtma işlemi ile yapılır[18].

2.5. Yağlayıcı

Kuru çekmede, matrisin önünde, içine katı ve kuru bir yağlayıcı (örneğin toz sabun) doldurulmuş bir kap bulunur. Dolayısıyla çekilen tel veya çubuk matrise girmeden önce bu kaptan geçer ve yağlanmış olur. Yüzey hazırlama da, yıkamadan sonra kireç banyosuna daldırılan çelik telleri kaplayan kireç dekapajdan ileri gelen asit kalıntılarını nötralize ettiği gibi yağlayıcı, olarak kullanılan organik sabunları emme ve taşıma rolü de oynar. Bu arada, kuru çekmede çelik çubuk veya tellerin kireç yerine boraksla da kaplanabileceği belirtilmelidir. Boraksın kapladığı yüzeyden ayrılmamak ve yüzey kalitesini artırmak gibi üstünlükleri vardır. Yüksek dayanımlı malzemelerin (çeşitli çelikler ve ısıya dayanıklı alaşımlar gibi) kuru çekilmesinde çubuk ve teller çinko fosfat veya oksalat kaplanır. Bu tür kaplama yüksek hızlarda ve

büyük şekil değişimlerinde özellikle faydalıdır. Yüksek karbonlu çelikler çinko fosfat, paslanmaz çelikler ise oksalat kaplanır.

Islak çekme için çelik malzeme çok ince bir bakır tabakası ile kaplanır. Bakır tabakası sürtünmeyi düşürerek çekme işlemini kolaylaştırdığı gibi çekmeden sonra herhangi bir polisaj işlemine gerek kalmadan teller elde edilmesini de sağlar. Bakır yerine kalay kaplama da yapılabilir. Genel olarak ıslak çekme sonucunda parlak çelik tel ve çubukların elde edildiği söylenebilir. Renk tonu bakır tabakasının kaplanma şekline bağlıdır ve nikeli andıran bir görünümünden gerçek bakır rengine kadar geniş bir aralıkta değişebilir.

Aşağıda çeşitli malzemelerin soğuk çekilmesinde kullanılan bazı yağlayıcılar örnek olarak verilmiştir[16].

Alüminyum :Mineral yağ, emülsiyon, mum, yağ asidi+mineral yağ.

Bakır :Organik yağ + emülsiyon + sabun, mineral yağ, mum.

Kurşun : Organik yağ.

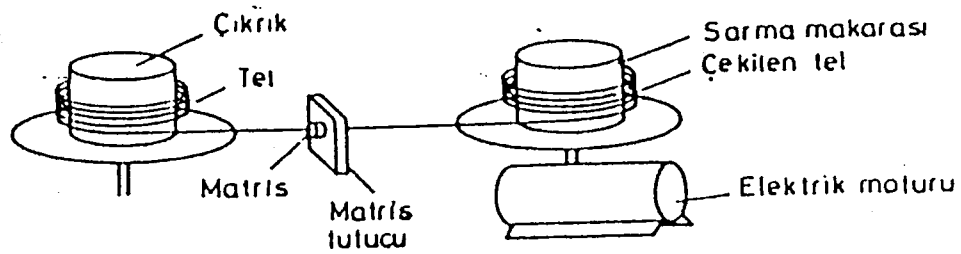
Çelik (karbonlu ve az alaşımlı): sabun, çinko fosfat kaplama + sabun.

Paslanmaz çelikler: Oksalat kaplama + sabun, klorine parafin + mineral yağ.

2.6. Soğuk Çekme Makineleri

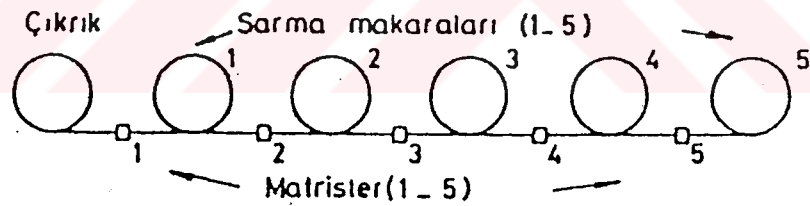
Soğuk çekme, genellikle kombine makinelerde yapılır. Soğuk çekme kademelerinin tümünü (doğrultma, kumlama, parlatma, yağlama ve soğuk çekme) ihtiva eden makinelerde yaklaşık Ø 40 mm'ye kadar kangal olarak bulunabilen malzemeler seri olarak soğuk çekilebilir. İşlem sonrasında malzeme çapına ve isteğe bağlı olarak kangal olarak sarılabilir veya çubuk olarak üretilir[13, 14, 19].

Tel çekme tezgahında kalıp dışında çıkırık, kısıkaç, sarma makarası ve mekanik kumanda tertibatı gibi kısımlar vardır. (Şekil 2.7.) Kısıkaç ucu sivriltilip kalıptan geçirilen teli tutmaya yarar. Sarma makarası ise telin çekilerek sarılmasını sağlar.



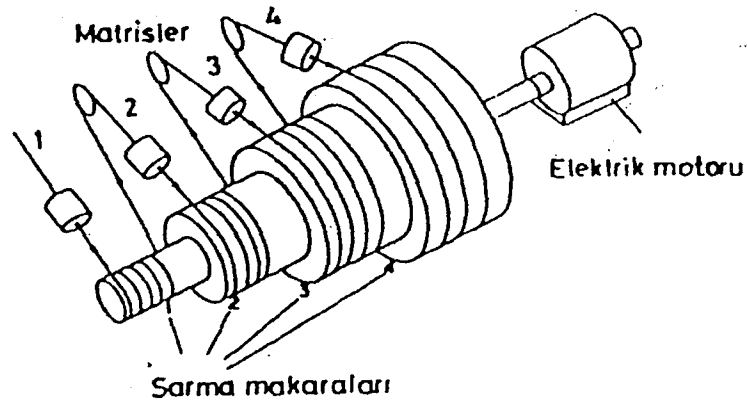
Şekil 2.7. Tel çekme tezgahının şematik gösterimi[10]

Sürekli tel çekme işlemlerinde çekilecek tel bir kalıptan sonra sarma makarasına sarılır, sonra daha küçük kesitli bir kalıba girer. Böylece artarda birkaç kalıptan geçirilerek istenen çapta tel üretilir. (Şekil 2.8.)



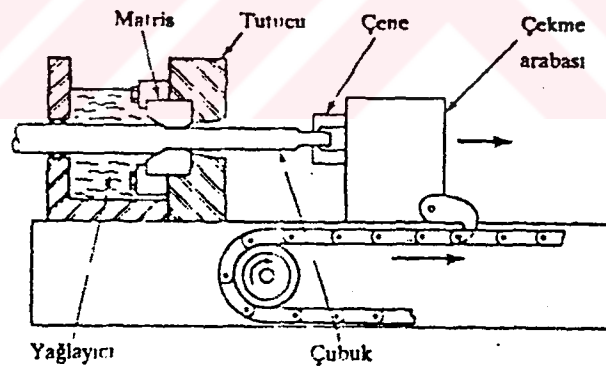
Şekil 2.8. Beş kalıplı sürekli bir tel çekme işlemi[10]

Artarda yapılan tel çekme işlemlerinde her kalıptan geçişte telin çapı küçülerek boyu ve hızı orantılı bir şekilde artar. Sarma makaralarının çevresel hızlarının tel hızına uyumları, her sarma makarasının ayrı bir elektrik motoruna bağlanması (Şekil 2.8.) veya (Şekil 2.9.)'da görüldüğü gibi tek bir elektrik motoruna bağlı olan sarma makarasının değişik çaplarda kademeli yapılması ile sağlanır.



Şekil 2.9. Tek bir elektrik motoruna bağlı kademeli sarma makinesi ile dört tel çekme işlemi[10]

Çubuk çekme tezgahları hidrolik basma, kalıp ve çekme arabası gibi kısımlardan oluşur. (Şekil 2.10.)



Şekil 2.10. Çekme[11]

Yüzeyi temizlenerek işlem için hazırlanan çubuğun ucu hidrolik ile basılarak kalıptan geçirilir. Sonrasında bu uç çekme arabasının çeneleri ile tutularak çekilmek suretiyle çubuğun kalıptan geçirilmesi sağlanır. Çekme işlemi sonrasında malzemede arzu edilen yüzey kalitesi ve doğrusalılığı sağlamak için malzeme doğrultma-parlatma makinelerinden geçirilir.

2.7. Soğuk Çekme Kalıpları

Kalıplar; alaşımlı çelik, sinterlenmiş sert metaller ve elmas olabilir. Kalıp malzemesi olarak kullanılan alaşımlı çelikler, yüksek karbon (% 1,5 – 2) ve Cr (% 10 – 13) içeren çeliklerdir ve kullanımından önce karbonlu ve büyük kesite sahip çeliklerin çekilmesinde kullanılırlar[27].

Sert metal kalıplar alaşımlı kalıplara göre daha uzun ömürlü olduklarından yoğun çekme işleminde tercih edilirler. Arzu edilen sert metaller yaklaşık olarak % 5 C, % 8 Co ve % 87 W içerirler. Bu kalıplar toz metalürjisi ile sinterlenerek üretilirler ve çeşitli sert karbürler içerir. Aşınma dayanımlarının iyi olmasına karşın darbe dirençleri düşüktür[18].

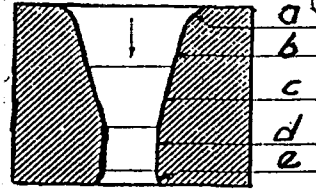
Elmas kalıplar yüksek sertlikleri yanında ısı iletim katsayılarının büyük olmasından ve kızıl hale gelinceye kadar ısıtılabilme özelliklerinden dolayı yüksek karbonlu ve alaşımlı çelik çubuk ve tellerin çekilmesinde kullanılırlar.

Soğuk çekme kalıpları genellikle imalat çeliklerinden (orta karbonlu) imal edilen bir zarfın içine yerleştirilerek makineye takılırlar. Kalıp şekli soğuk çekilecek malzeme cinsine göre değişir.

Şekil 2.11. de görülebileceği gibi soğuk çekme kalıbında beş ayrı bölge vardır. Bunlar;

- a. Radüs
- b. Giriş Açısı
- c. Karşılama Açısı
- d. Silindirik Bölge
- e. Çıkış

Giriş bölgesinin çapı, giren malzemenin çapından büyüktür ve malzemenin üzerindeki yağlayıcı madde ile birlikte kolayca giriş açılı bölgeye girişini sağlar. Giriş açılı bölgenin uzunluğu, kalıbın yarım açısına (α), telin çıkış çapına ve uygulanan redüksiyona bağlıdır.(Şekil 2.11.)



Şekil 2.11 Soğuk çekme kalıbının şematik kesiti[21]

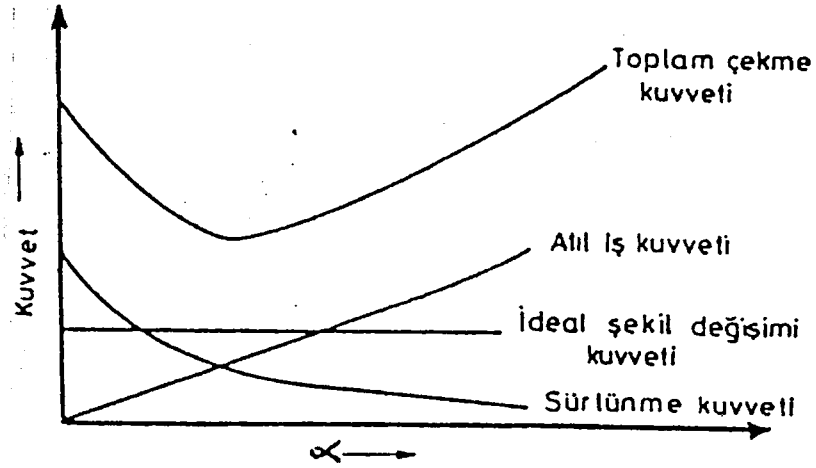
Silindirik bölge malzemenin kalıptan homojen ve düzgün bir şekilde çıkmasını sağlar. Çekme sırasında zamanla aşınarak kesit şekli bozulan kalıbın ömrü üzerinde silindirik bölgenin büyük etkisi vardır. Silindirik bölgenin boyu kalıp ömrünün artmasına karşın, artan sürtünme yüzeyi çekme işlemi için gerekli kuvvetin artmasına sebep olur. Tel çekme kuvvetinin çok artması da çubuğun kopma ihtimalini artırır. Pratik olarak da sürtünme kuvvetlerinin artması özellikle sert metal ve elmas kalıplarda patlamaya, çelik kalıplarda deformasyona sebep olabilir. Uygulamada kalıbın silindirik bölgesinin optimum uzunluğu, telin çıkış çapının üçte ikisi olarak seçilir. Çıkış bölgesi ise malzemenin kalıptan rahatça çıkmasını sağlar[20].

Kalıp şeklini ve çekme kuvvetini belirleyen en önemli faktör kalıp açısı olarak isimlendirilen konik bölgenin yarım açısıdır(α).

2.8. Soğuk Çekme İşlemini Etkileyen Faktörler

Soğuk çekme işleminde uygulanan kesit daralmasına bağlı olarak çekme kuvvetleri değişir. Toplam çekme kuvveti, üç kuvvetin toplamı olarak ele alınabilir. Bunlar; malzemeyi homojen ve ideal şartlarda şekillendirmek için gerekli kuvvet, kalıpla malzeme arasındaki sürtünmeyi yenmek için gerekli kuvvet ve malzemede iç şekil değişimi için gerekli olup bu kuvvetlerin matris açısı ile değişimi Şekil 2.12.'de görülmektedir[19].

Malzeme ideal ve homojen olarak deformasyonunu sağlamak için gerekli çekme kuvveti (P_1) kalıp açısından bağımsız olup;



Şekil 2.12. Tel çekme kuvvetinin tel çekme açısı (α) ile değişimi[19]

$$P_1 = \sigma_a \cdot T_1 \cdot \ln R \quad (2.1)$$

Bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada;

σ_a : Akma Gerilmesi

A_s : Malzemenin çekme sonrası kesit alanı.

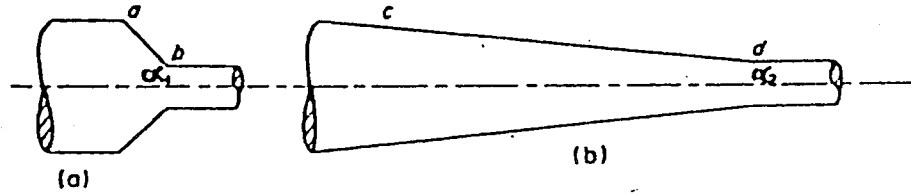
A_0 : Malzemenin çekme önceki kesit alanı.

R : A_0 / A_s

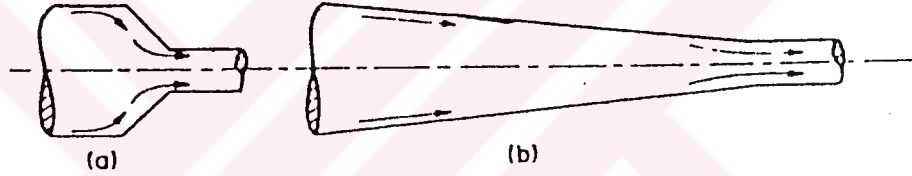
Tel ile kalıp arasındaki temas alanına, sürtünme katsayısına ve kalıbın malzemeye uyguladığı basma kuvvetlerine bağlı olarak değişen sürtünme kuvveti, kalıp açısına (α) bağlı olup kalıp açısı artınca azalmaktadır. Kalıp açısı artınca malzeme ile kalıp arasındaki temas alanı azalmaktadır.

Kalıp açısı büyük bir (α) değerinde ise, temas alanı Şekil 2.13. (a) da görülen ab boyundadır. Bunun tersi olarak kalıp açısı küçük bir (α) değerinde ise aynı oranda bir kesit daralması sağlamak için temas alanı büyümekte ve Şekil 2.13. (b) de görülen cd boyunda olmaktadır. İç şekil değişimi (atıl iş) için gerekli kuvvet ise artan kalıp açısı ile artmaktadır. Atıl iş fazladan sarf edilen iş olup çekme işleminde malzemenin çekme yönünde akması için kat ettiği yola bağımlı olup iç şekil değişimi olarak düşünülebilir. Kalıp açısı büyükse (Şekil 2.14. a) malzemenin deformasyon

yönünde akışı için gerekli olan enerji, kalıp açısının küçük olması (Şekil 2.14. b) durumuna göre fazladır. Bundan dolayı iç şekil değişimi için gerekli kuvvet Şekil 2.12. 'den de görüleceği gibi artmaktadır[24].



Şekil 2.13. Kalıp açısına bağlı olarak temas alanı boyutunun değişimi[24]



Şekil 2.14. Kalıp açısına bağlı olarak malzeme akışının değişimi[10]

Çekilen malzemenin sertliği azaldıkça minimum çubuk çekme kuvvetini sağlayan (α)'nın artırılması gereklidir. Minimum kuvvetini sağlayan (α) çelik için 6° , bakır için 12° ve alüminyum için 24° olarak bulunmuştur[9,10,11,21].

2.9. Tel ve Çubuk Çekme Kuvvetinin Hesaplanması

Çekme işlemleri genellikle soğuk olarak yapıldığı için işlem sırasında pekleşmeden dolayı malzeme sertliği artar. Çekme kuvveti; malzemenin deformasyon şartlarında ortalama gerilmesi (σ), sürtünme katsayısı (μ) ve kalıp açısı (α) gibi çeşitli faktörlere bağlıdır[17].

Soğuk çekme işleminde sağlanabilecek maksimum kesit daralması malzemenin kalıptan çıkış mukavemeti ile sınırlıdır. Malzemenin akma gerilmesi (σ_a) ve kesit alanından (F) hesaplanan kuvvet, malzemeye uygulanan çekme kuvvetinden büyük olmalıdır. Soğuk çekme kuvveti ($P_{t\phi}$) yaklaşık olarak;

$$P_{t\phi} = F \cdot \sigma_{\text{çıkış}} = A_1 \cdot Q_{t\phi} \cdot \sigma \quad (2.2)$$

Bağıntısı ile hesaplanabilir.

Burada;

$Q_{t\phi}$: Soğuk çekmede gerilme çarpım faktörü olup;

$$Q_{t\phi} : (1 + \mu \cot \alpha) \Phi \ln A_0 / A_1 \quad (2.3)$$

Bağıntısı ile bulunabilir.

Burada:

μ : Kalıp – malzeme temas yüzeyindeki sürtünme katsayısı,

α : Kalıp açısı veya koniklik yarım açısı,

A_0 : Malzemenin girişteki kesit alanı,

Φ : Deformasyonun homojen olup olmaması ile ilgili h/L arasına bağlı faktördür. Yuvarlak malzeme için h ortalama çap, L ise malzemenin matristeki temas boyudur.

$$\Phi = 0,88 + 0,12 h / L \quad (2.4)$$

$$\text{Düzlem malzeme çekiminde } \Phi = 0,8 + 0,2 h / L \quad (2.5)$$

Bağıntısı ile hesaplanır.

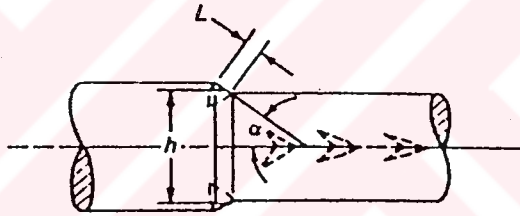
Soğuk ekstrüzyonda olduğu gibi malzeme pekleşmeye uğradığından ortalama plastik gerilme (σ) kullanılmalıdır.

2.10. Soğuk Çekme Hataları

Soğuk çekme kuvvetinin malzemenin çıkışındaki akma dayanımından düşük olması gerekliliği bir kademede sağlanabilen kesit daralmasının % 50 civarında kalmasına sebep olur. Genellikle işlemin sürekliliği açısından % 30 kesit daralması tercih

edilir. Tel çekme kuvvetinin hesaplandığı (1.3) bağıntısından görüldüğü gibi sürtünme katsayısının artması çekme kuvvetini artırır. Dolayısıyla % kesit daralmasını sınırlar. Sürtünme katsayısını azaltmak için çekme sırasında uygulanan yağlama işlemi çok önemlidir[9,10,16].

Çekme işlemi sırasında plastik şekil değişiminin homojen olmaması çekme hatalarına sebep olur. Kalıptan geçişte malzemenin deformasyona uğradığı bölgenin boyutları (h / L) homojen deformasyonu her zaman sağlayamaz. Özellikle $h/L > 2$ olduğu durumlarda çekilen malzemenin iç kısmında oluşan ikincil çekme kuvvetleri, sünekliği az olan malzemelerde merkezde ok ucu tipindeki çatlakların oluşmasına sebep olur (Şekil 2.15.)[21].



Şekil 2.15. Soğuk çekme işleminde kalıp açısı ve h/L oranının büyük olması halinde deformasyonun homojen olmaması durumunda ok ucu şeklindeki iç çatlakların oluşumu[10]

3. SOĞUK DEFORMASYONUN ETKİLERİ VE SOĞUK ÇEKİLMİŞ TEL VE ÇUBUKLARDA KALINTI GERİLMELER

Soğuk deformasyon, malzemeye plastik şekil verme yöntemleri ile uygulanır. İşlem sonucunda malzemenin iç yapısı, dolayısıyla mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri değişir. Soğuk deformasyon miktarı işlem sırasındaki % kesit daralması (Redüksiyon Miktarı, R) ile ifade edilir. Soğuk deformasyon sırasında oluşan pekleşmenin bir sonucu olarak; Çekme, akma dayanımı ve sertlik artarken, süneklik azalır. Mikroyapı da ise, homojen tane yapısına sahip olan tel ve çubuklar, soğuk çekme işleminden sonra, çekme yönüne doğru tanelerde uzama olur. Deformasyonun devamında malzemede kırılmalar gerçekleşebilir. Soğuk deformasyonun malzeme özelliklerine olan etkisi yeniden kristalleşme tavlama ile değiştirilebilir[23].

3. 1. Soğuk Şekillendirilmiş Malzemenin Yapı ve Özellikleri

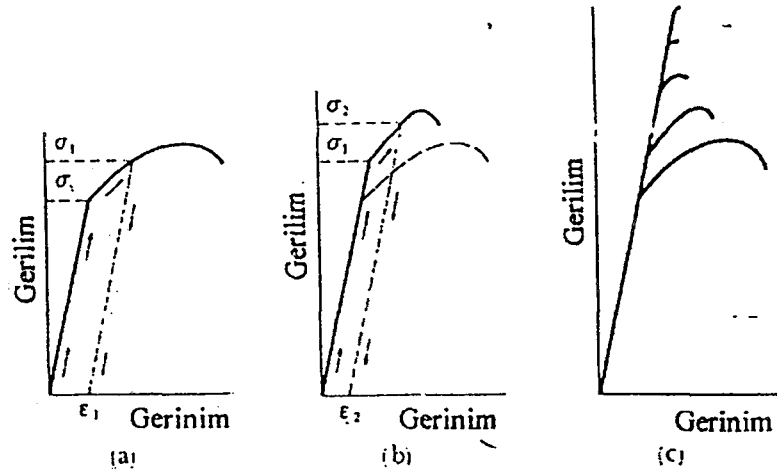
Soğuk şekillendirme sırasında pekleşme meydana gelir. Pekleşme dislokasyon hareketinin; dislokasyonların kesişmesi veya bu hareketi engelleyecek diğer etmenler (tane sınırları, inklizyonlar, ikinci fazlar vb.) tarafından engellenmesi sonucunda dislokasyonların yığılması ile gerçekleşir. Kayma tek bir paralel düzlemde olursa pekleşme miktarı düşük olur. Soğuk deformasyon dislokasyon miktarını artırır. Dislokasyonların yığılması yüksek miktarlarda gerilmelerin oluşmasına sebep olur. Tavllanmış malzemelerin yaklaşık olarak $10^{-2} - 10^{-6} \text{ mm}^{-2}$ dislokasyon içerirken soğuk deforme edilen malzemeler 10^{12} mm^{-2} dislokasyon içerir[9,10,23].

Soğuk deforme edilmiş yapıda yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip bölgeler oluşur. Böylelikle soğuk deforme edilen yapının karakteristiği olan hücre duvarları formundaki yüksek dislokasyon duvarlarından oluşan hücresel altyapı oluşur. Hücre yapısı, % 10 deformasyon oranlarında çok iyi gelişir. Küçük şekil değişimlerinde hücre boyutu azalır. Fakat deformasyon devamlı sabit bir boyuta ulaşır. Şekil değişimi dislokasyonları tane sınırlarında hücreler yardımı ile birleştirir. Soğuk deforme edilen yapının esas tabiatı malzeme cinsine, şekil değiştirme miktarına, deformasyon hızı ve sıcaklığına bağlıdır.

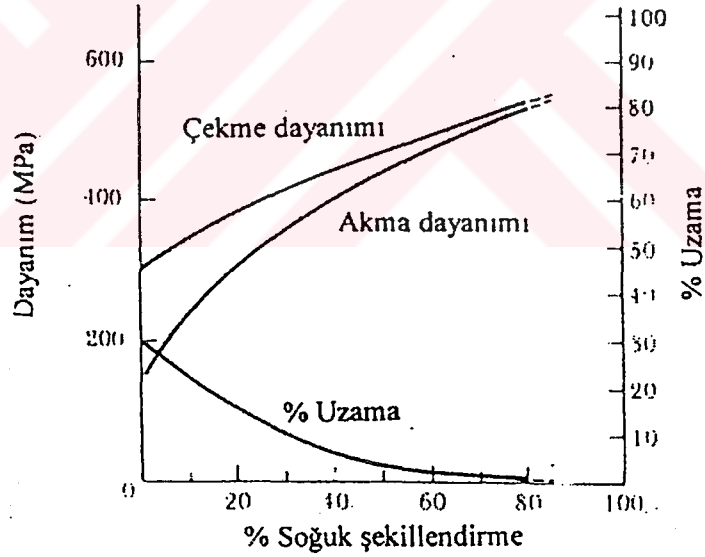
Soğuk deformasyon sırasında oluşan enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşür. Bununla birlikte artan enerjinin yaklaşık % 10'u kristal kafeste muhafaza edilir. Rapor edilen değerler yaklaşık % 0,04 – 4k J kg⁻¹ arasındadır. Muhafaza edilen enerji malzemenin ergime sıcaklığını azaltır. Bu enerji şekil değişimleri ile birlikte limit değerlerin üzerinde artış gösterir. Bu artış deformasyon miktarının azalması ile artmaktadır. İç enerjinin büyük bir kısmı soğuk deformasyon sonucunda oluşmaktadır. Çok düşük sıcaklıklarda deforme edilen malzemelerde boşluklar hesaba katılır. İstif ve ikiz hataları depolanan enerjinin bir sonucu olarak gösterilmektedir. Katı eriyikler, deformasyon sırasındaki kısa mesafeli dizilişlerdeki depolanan enerjiyi kontrol eder. Elastik deformasyon enerjisi, depolanan enerjinin küçük bir miktarını oluşturmaktadır[11].

3. 2. Pekleşme

Soğuk deformasyon sonucu oluşan pekleşme alaşımlı metallerde saf metallere oranla genellikle daha yüksek miktarlarda gerçekleşir. Şekil 3.1. de Gerilim – gerinim diyagramından pekleşmenin oluşması görülmektedir. Genellikle soğuk deformasyon işlemlerinde metalin bir veya iki boyutunda azalma olurken diğer boyutunda artma gerçekleşir. Bu şekilde taneler deformasyon yönünde uzar. Şiddetli deformasyon, tanelerin tercihli yönde tekrar yönlenmesine sebep olur. Soğuk deformasyon sonucunda Şekil 3.2. de görüldüğü çekme özelliklerinde değişme gerçekleşir. Soğuk deformasyon diğer fiziksel özelliklerde de değişimlere sebep olur. Genellikle çubukta ve elektrik iletkenliğinde bir miktar azalma olurken, termal genleşme sabitinde artma olur. İç enerjinin artmasından dolayı da kimyasal reaktifliğinde artma olur. Bu durum korozyon direncinin azalmasına ve alaşımlarda korozyon çatlaklarının oluşmasına sebep olur[10].



Şekil 3.1. Gerilim – gerinim diyagramından pekleşmenin oluşması. a) Bir numune akma dayanımının ötesine gerdirilmiştir, b) Şimdi numune daha yüksek akma ve çekme dayanımına, fakat düşük sünekliliğe sahiptir, c) İşlem tekrarlanırsa dayanım sürekli artmaya, süneklilik ise malzeme çok kırılana kadar sürekli azalmaya devam eder[22]



Şekil 3.2. Soğuk deformasyonun çekme özellikleri üzerine etkisi[11]

Yüksek miktarlarda pekleşme; dislokasyonların ara bölgelerde kesişmesi sonucunda engellemesini ifade eder. Böylelikle dislokasyon duvarı oluşur.

Akış gerilimi açıklamak için basit bir eşitlik kullanılır.

$$\sigma_0 = \sigma_i + \alpha \cdot G \cdot b \cdot p^{1/2} \quad (3.1)$$

Burada; σ_0 = Akma dayanımı

σ_i = Kafes sürtünme gerilimi

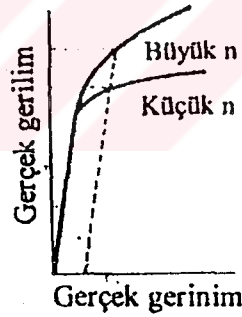
α = Sabit

G = Kayma modülü

b = Burger vektörü

p = Dislokasyon yoğunluğu

Soğuk şekillendirmenin metale etkisi pekleşme katsayısı (n) ile ifade edilir. Bir log ölçeği kullanıldığında Şekil 3.3. 'deki gerçek gerilim – gerinim eğrisinin homojen plastik deformasyon kısmının eğimidir[11].



Şekil 3.3. Metaller için büyük ve küçük pekleşme katsayılı gerçek gerilim – gerinim eğrisi. n katsayısı büyük olan bir metal için daha büyük dayanım değerleri elde edilir[11]

Ludwig eşitliği ile n hesap edilebilir.

$$\sigma_{ak} = K \cdot \epsilon_t^n \quad (3.2)$$

$$\text{veya } \log \sigma_{ak} = \log K + n \cdot \log \epsilon_t$$

K : Malzeme sabitesi,

n : Deformasyon pekleşme üssü, ϵ : Gerilme miktarı

$n = 1$ olduğunda k sabiti gerilime eşittir. n HSP metaller için nispeten düşüktür, ancak HMK ve YMK metaller için yüksektir. Soğuk çekme sırasında oluşan pekleşme uzamayı kontrol eder. n_d (soğuk çekme pekleşme sabiti)'nin hesap edilmesi oldukça zor olduğu için çekme sırasında oluşan ve Ludwig eşitliği içerisinde yer alan metalin pekleşme indeksine göre hesap edilebileceği önerilmektedir[22].

3. 3. Tercihli Yönlenme

Bir miktar deforme edilen bir metalde; kristalografik düzlemlerin şekil değiştirme yönüne bağlı olarak kendi kendilerine yönelme eğilimi içinde oldukları bir tercihli yönelme gelişecektir. Çok kristalli malzemelerde kayma, kayma sistemlerinin etkileşimi sebebi ile çok karmaşıktır.

Tercihli yönelme X ışını metodu ile tespit edilebilir. Aralıklı yönelmiş metalin (ince taneli) X ışını tarzi; Brag Kanunu'na uygun yansıması farklı düzlemlerde döngüler gösterecektir. Taneler aralıklı yönelmiş ise yansıma döngülerin yoğunluğu bütün açılarda üniform olacaktır. Fakat tercihli bir yönelme varsa yansıma döngüler kısa aralıklarla bozunumu gerçekleştirebilir.

% 20 – 30 redüksiyon oranlarında oluşan tercihli yönelme X ışını ile tespit edilebilir. Bu aşamada kristallerin yalnız başlarına oriyantasyonları ideal oriyantasyona yakındır. Dağılım, redüksiyonun artmasıyla azalır. % 80 – 90 redüksiyonlarda tercihli yönelme tamamen sonuçlanır. Tercihli yönelme yada deformasyon mikroyapı tipi, tercih edilen kayma sistem tipleri ile şekil değiştirme tiplerine öncelikle bağlıdır. Diğer faktörler ise deformasyon sıcaklığı ve deformasyon öncesi var olan mikroyapıdır[9].

En basit deformasyon dokusu hadde ve soğuk çekme sonucu üretilir. Bu yapı tabii fiberli malzemelerin aranjmanına benzediği için fiberli yapı olarak isimlendirilir[14]. Deformasyon sonucunda oluşan kristalografik fiberleşme ile inklizyonların, boşlukların ve ikinci fazın mekanik fiberleşmesini birbirinden ayırt etmek gerekir. Mekanik ve kristalografik fiberleşme, çubuk ve sac metallerin mekanik özelliklerini yöne bağımlı olmasında önemli rol oynar. İdeal mikroyapı, çubuk eksenine paralel yöndedir ve çubuk eksenini çevresinde simetriktir. HMK metaller çubuk eksenine paralel yönünde $\langle 110 \rangle$ ve YMK metaller çubuk eksenine paralel çift yönde ($\langle 111 \rangle$)

ve $\langle 100 \rangle$ fiber dokulu yapıya sahiptir. Gümüş ve pirinç gibi düşük istif hatası enerjisine sahip metallerde $\langle 100 \rangle$ dokuya hakimdir. HSP metallerde temel düzlem çubuk eksenine ile örtüşmesi için döndürülür[11].

Tercihli yönlenme kayma ve ikizleme sonucunda gerçekleşir. Fakat kalıp açısı, hadde çapı, hadde hızı ve her aşamadaki redüksiyon miktarları gibi metot değişikliklerinden genellikle etkilenmez. En önemli mekanik değişkenler akış geometrisi ve deformasyon miktarıdır. Böylelikle hadde ve soğuk çekmedeki doku aynı olur. Soğuk deforme edilen metallerin yeniden kristalleşmesi genellikle soğuk çekme dokularından daha kuvvetli ve farklı bir doku üretir. Bu durum yeniden kristalleşme dokusu olarak ifade edilir. Yalnız, farklı bir durum bakırda oluşur. Hadde yönüne paralel yönleri boyunca $\langle 110 \rangle$ düzlemleri uzanır. Yeniden kristalleşme sırasında, tanelerin tercihli yönlerde tekrar çekirdeklenmesi üzerine bağımlı olan yeniden kristalleşme dokusunun varlığından dolayı sonuç dokusu deformasyon sonucu üretilen dokuya çok kuvvetli bir şekilde bağımlıdır. Tavlama dokusunu etkileyen diğer faktörler başlangıç tane boyu, alaşım tane boyu, alaşım tane oriyantasyonu, tavlama sıcaklığı ve zamandır. Genellikle ince taneli oluşumunu sağlayan yeniden kristalleşmeyi destekleyen faktörler yeniden kristalleşmiş tanelerin aralıklı yerleşmesinin esasını da desteklemektedir[9,10,11].

3.4. Soğuk Çekilen Tel Ve Çubuklarda Kalıntı Gerilmeler

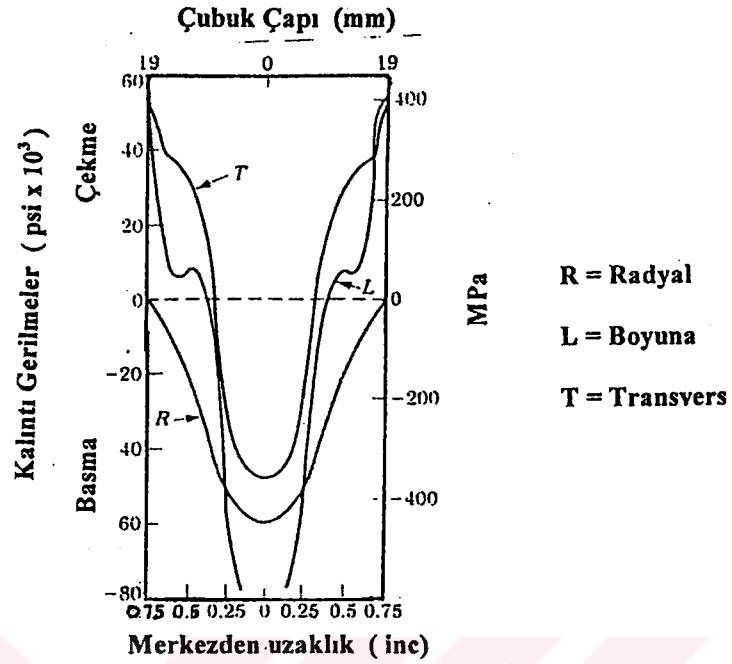
Bir iş parçasına herhangi bir dış yük etki etmediği halde, o iş parçasında veya malzemede bulunan gerilmeler sistemine kalıcı gerilmeler denir. Kalıcı gerilmeler pratikte hemen her makine elemanında bulunur. Bir döküm parçada kendini çekmeden ve ısıtıl işlemlerde kesintilerdeki sıcaklık gradyanının büyük olmasından kalıcı gerilmeler kaynaklandığı gibi talaşlı veya talaşsız imalat sonucunda da kalıcı gerilmeler meydana gelir. Kalıcı gerilmeler sadece elastik gerilmeler olarak düşünülürler. Kalıcı gerilmelerin alabileceği en büyük değer malzemenin akma gerilmesi değeridir. Gerilme bu değeri geçtiği anda, ters yönlü bir dış kuvvet yoksa, akma gerilmesi değerine ininceye kadar malzeme kendini boşaltır[26].

Bir malzeme uniform olmayan bir deformasyona uğradığında malzeme içerisinde kalıcı gerilmeler meydana gelir. Soğuk çekilmiş çubuklarda redüksiyon miktarına bağlı olarak iki ayrı tip kalıntı gerilme tespit edilmiştir[11].

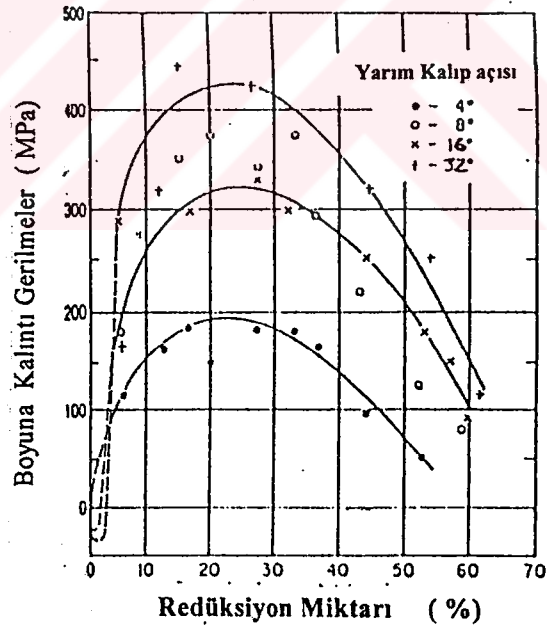
Yaklaşık olarak %1'den az soğuk çekme redüksiyonlarında boyuna kalıntı gerilmeler vardır. Bu gerilmeler yüzeyde basma ve ekseninde çekme gerilmeleri şeklindedir. Radyal gerilmeler ise, ekseninde çekme gerilmeleri şeklinde iken, yüzeye yaklaştıkça azalarak sifıra kadar düşer. Çevresel gerilmeler boyuna gerilmeler ile aynı trendi takip eder. Birinci tip gerilmeler yüzeyde konuşlanan deformasyon yöntemlerinin karakteristik bir özelliğidir.

Ticari soğuk çekilmiş çeliklerde çapta azalma miktarları genellikle %10-30 arasındadır. Buradaki gerilmeler küçük redüksiyon miktarlarında karşılaşılan kalıntı gerilmelerden farklı bir durum arz eder. Bu gerilmeler boyuna bakıldığında yüzeyde basma ve ekseninde çekme şeklindedir. Radyal gerilmeler ekseninde basma ve çevresel gerilmeler boyuna gerilmelerde olduğu gibi yüzeyde basma ve ekseninde çekme şeklindedir. Şekil 3.4.'de SAE 1045 çeliğinde soğuk çekme sonucu oluşan kalıntı gerilmeler görülmektedir[13].

Soğuk çekme kademelerinde redüksiyon miktarı ve kalıp açısının kalıntı gerilmelere etkisi Şekil 3.4. 'de görülmektedir. Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi boyuna kalıntı gerilmeler yarım kalıp açısı ile doğrusal olarak artmaktadır. En fazla kalıntı gerilme değeri % 15 - 35'lik redüksiyon aralığında elde edilmiştir.



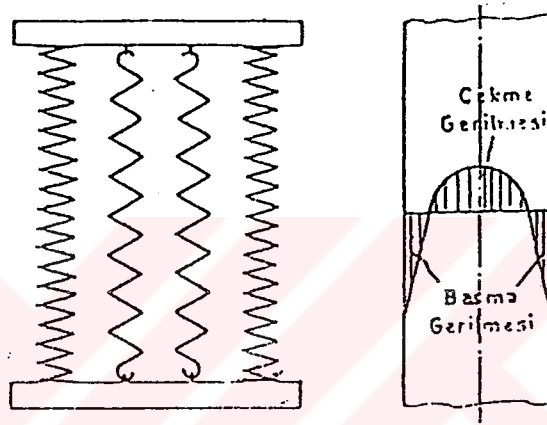
Şekil 3.4. SAE 1045 çeliğinde soğuk çekme sonucunda oluşan kalıntı gerilmeler[10]



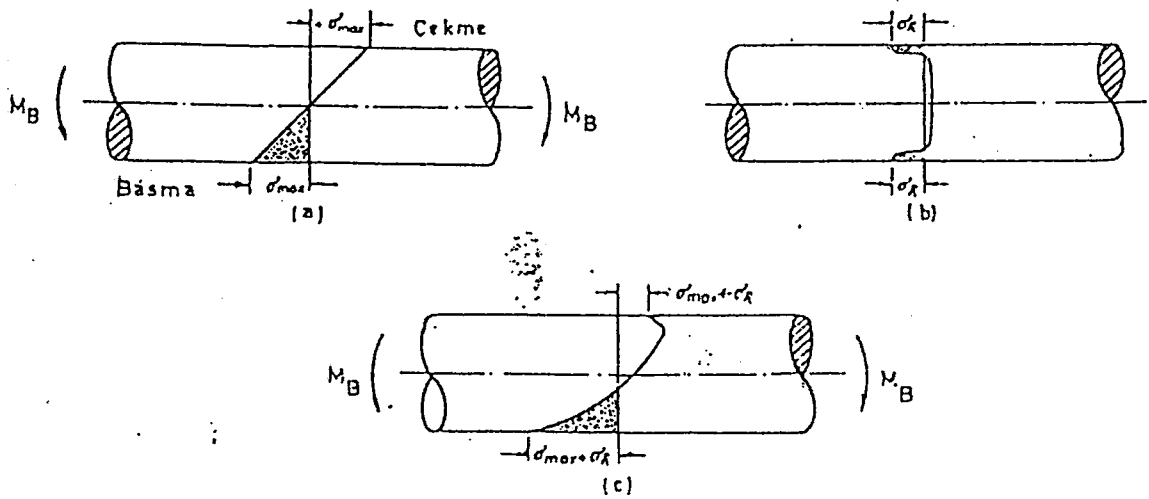
Şekil 3.5. Boyuna kalıntı gerilmeler (Soğuk çekilmiş pirinçte)[9]

Kalıcı gerilmelerin karakteristiği ve sonucu, basit bir model kullanarak Sigwart tarafından gösterilmiştir. Şekil 3.6. kalıcı gerilmelerin modelini göstermektedir. Rijit iki çubuk dört adet yay ile birleştirilmiştir. Dış yaylar basmaya, iç yaylar ise çekmeye karşı çalışan yaylardır. Bu durumda denge halinde, elastik kuvvetlerin bulunduğu bir yük sistemi elde edilir. Dış ve iç yayların dayanımı farklıdır. Sistem kendi içinde

statik dengede olmalıdır. Bu nedenle baskı kuvvetlerinin toplamı, çekme kuvvetlerinin toplamına eşit olmalıdır. Benzer düşünce tarzı ile kalıcı gerilmelerin dağılımı Şekil 3.6'da gösterildiği tarzda olur. Oldukça dar bir dış yüzey tabaksında büyük bir baskı gerilmesi mevcut iken, iç kısımlarda küçük çekme gerilmesi söz konusu olur[7, 8].



Şekil 3.6. Kalıcı gerilme modeli[8]



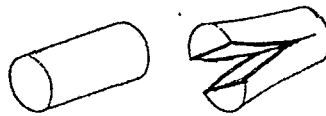
Şekil 3.7. Kalıcı basma gerilmesinin olumlu etkisi[7]

Malzeme yüzeyinde kalıcı basma gerilmeli tabaka meydana getirmek, yorulma performansını artırıcı en etkili yöntemdir. Yüzeydeki bir noktada bulunan kalıcı basma gerilmesi ile ayrıca uygulanan dış kuvvetin meydana getirdiği çekme gerilmesi toplandığında, yüzey bölgesindeki çekme gerilmesi değeri düşecektir. Böylece yorulmanın üç şartından birisi yerine getirilmemiş veya yorulma ömrü üzerindeki etkisi daha az olacaktır. Şekil 3.7. de bu etki gösterilmektedir.

Şekil 3.7. (a) kalıcı gerilme içermeyen bir kirişteki elastik gerilme dağılımını göstermektedir. Tipik bir kalıcı gerilme dağılımı Şekil 3.7. (b) de gösterilmektedir. Şekil 3.7. (c) de ise kalıcı gerilmeler ile dışarıdan uygulanan eğme gerilmelerinin cebirsel toplamı sonucu gerilme dağılımı gösterilmektedir.

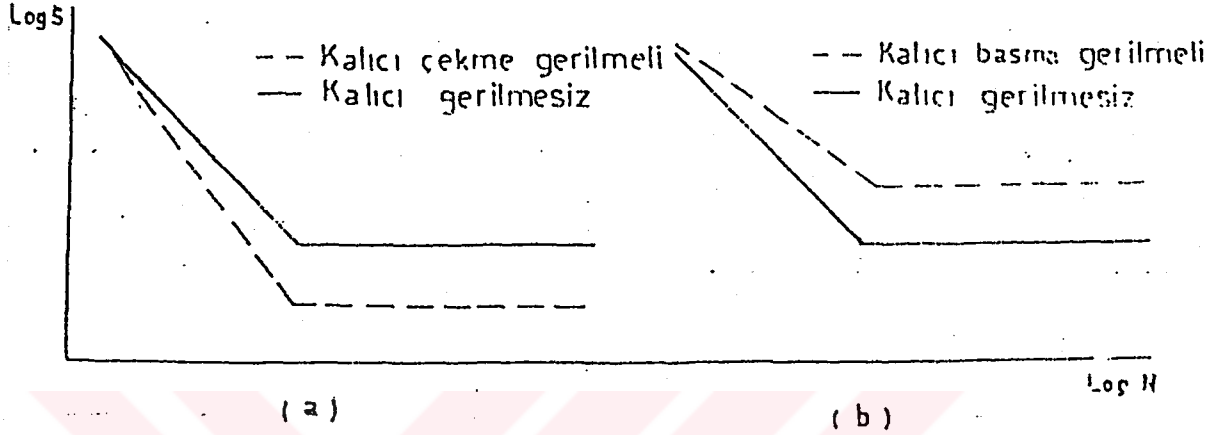
Kirişin yüzeyinde etkili olan çekme gerilmesi değeri, maksimum çekme gerilmesinden yüzeydeki basma gerilmesi değerinin çıkarılmasıyla ortaya çıkan miktar kadardır. En büyük çekme gerilmesi değeri kirişin iç bölgesinde meydana gelmektedir. Bu gerilmenin değeri, dışarıdan uygulanan yükten kaynaklanan gerilmeler ile kalıcı gerilmelerin dağılımına bağlıdır[8].

Malzeme yüzeyinde oluşan çekme kalıntı gerilmeleri yorulma ömrünü ve kırılma dayanımını azalttığı için arzu edilmez[7]. Bu durum harici çekme kuvvetlerine kalıntı çekme kuvvetlerinin yardım etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu duruma özellikle gevrek malzemelerde rastlanır. Çünkü gevrek malzemelerde çok az veya hiç deformasyon olmadan kırılma gerçekleşebilir. Ürünlerin servis kullanımları sırasında çekme kalıntı gerilmeleri gerilim çatlaklarına sebep olabilir[1,9]. Soğuk çekme sonucunda meydana gelen kalıntı gerilmelerin malzemeye olabilecek zararlı etkilerinden bir tanesi Şekil 3.8.'de görülmektedir[7].



Şekil 3.8. Soğuk çekilmiş çubuklarda kalıntı gerilmelere bağlı olarak meydana gelen distorsiyon[15]

Bir makine parçasında bulunan kalıcı gerilmelerin ve kalıcı gerilmeler cinsinin yorulma etkisi Şekil 3.11. de gösterilmektedir.

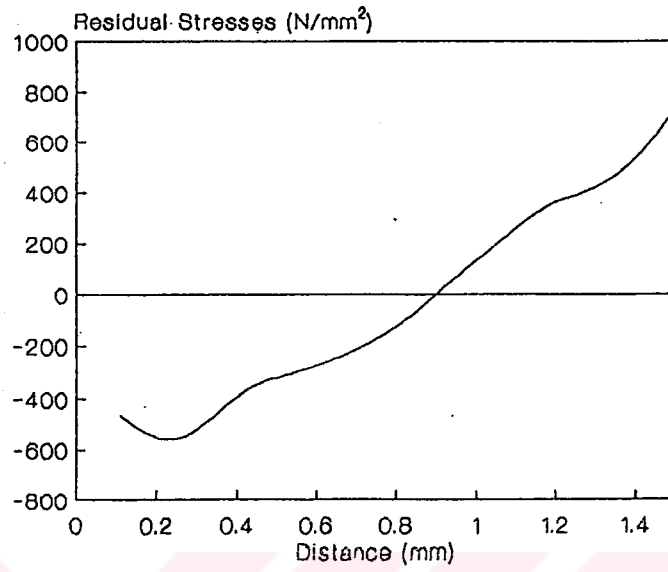


Şekil 3.9. Kalıcı gerilmelerin yorulma ömrüne etkisi[8]

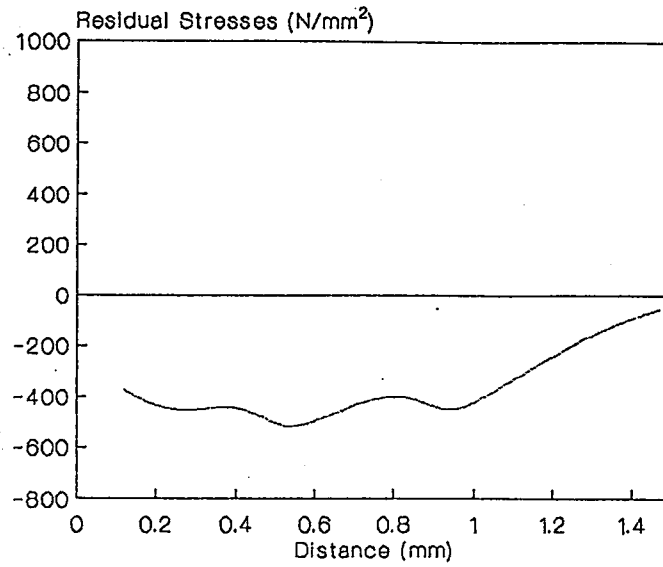
Şekil 3.9. (a) da kalıcı çekme gerilmesi ve dışarıdan uygulanan yükün meydana getirdiği çekme gerilmesinin yorulma ömrüne etkisini ve şekil 3.9. (b) de ise kalıcı basma gerilmesi ile dışarıdan uygulanan yükün meydana getirdiği çekme gerilmesinin yorulma ömrüne etkisi gösterilmektedir[9].

Yüzeyde oluşabilecek basma kalıntı gerilmeleri genellikle arzu edilir. Bu tip gerilmeler malzemelerin yorulma dayanımlarının artmasını sağlar. Bu gerilmeler yüzey haddelme , kabuk soyma, yüzey bilyalama gibi işlemler sonucunda oluşur[9,11].

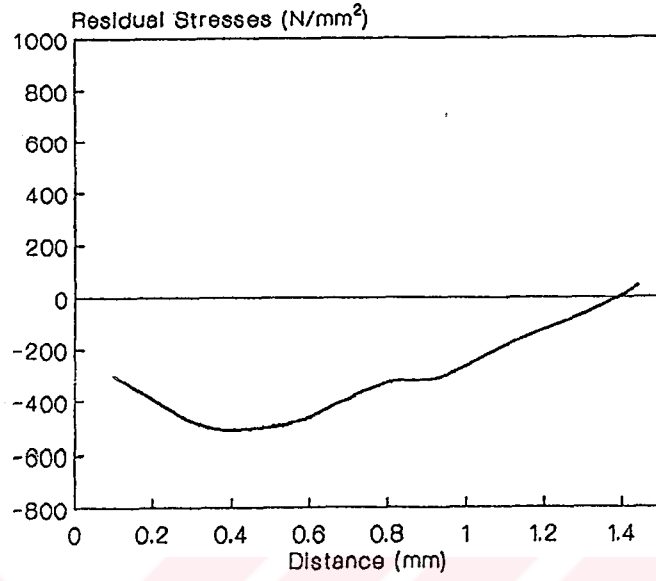
Daha önceden Tarakçılar, A. R. tarafından yapılan Ç1020 çeliğinin farklı soğuk çekme işlemlerinde kalıntı gerilmeler aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Burada Şekil 3.10 da % 11 bir soğuk deformasyonda çekme ve basma gerilmelerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.11. de ise % 21 deformasyonda tamamen basma gerilmeleri görülmektedir. Diğer Şekil 3.12, 3. 13 ve 3.14 de de durum aynıdır. Buradan deformasyon miktarının artmasıyla kalıntı basma gerilmelerinin de arttığı görülmektedir[1].



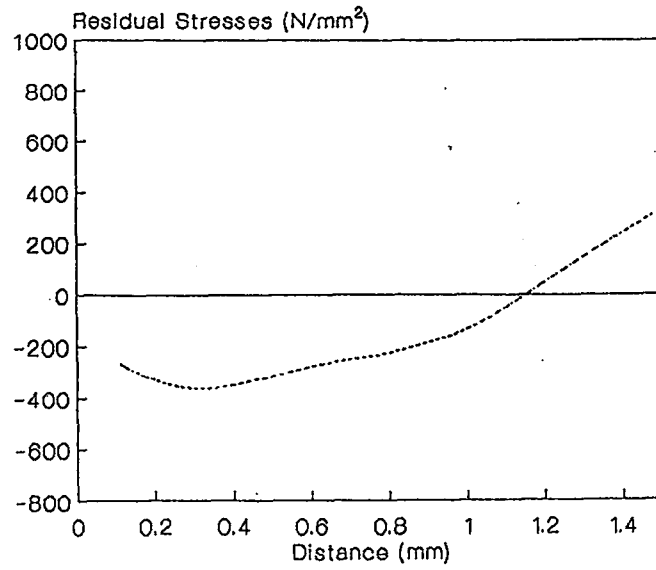
Şekil 3.10. % 11 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi[1]



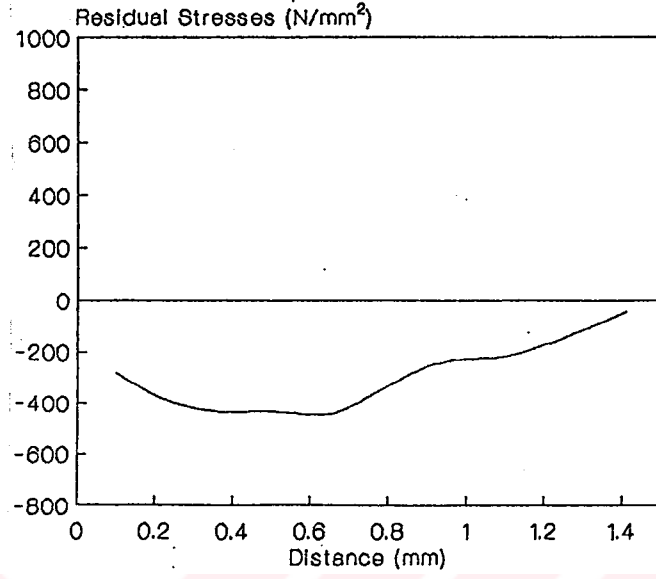
Şekil 3.11. % 21 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi[1]



Şekil 3.12. % 29 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi[1]



Şekil 3.13. % 36 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi[1]



Şekil 3.14. % 42 deformasyonda Ç1020 çeliğinin kalıntı gerilimi[1]

Kalıntı gerilmeler gerilim giderme tavlaması veya daha fazla deformasyonla yok edilebilir veya azaltılabilir. Yeterli zaman sağlanırsa oda sıcaklığında gerilmelerin rahatlama sonucu kalıntı gerilmeler azaltılabilir. Rahatlama için gerekli zaman parçanın çalışma sıcaklığı ile doğru orantılı olarak artar veya azalır[10].

4. YORULMA VE YORULMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

4.1. Yorulma

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

Bu durumun doğal bir sonucu olarak bir yapı elamanlarının herhangi bir kesitine ait bir noktasının akma dayanımının altında, $\sigma_{\min}$ ile $\sigma_{\max}$ arasında devamlı olarak değişken bir gerilme etkisi altında kalmasına yorulma denir[17].

Yorulma olayına neden olan tekrarlı gerilmeler; eksenel, dönme, kayma, eğilme, burulma hatta titreşim sonucu olabilir. Bu yüklerden bir veya birkaçının etkimesi ile oluşur[18].

Yorulma, mühendislik işlerinde sık sık karşımıza çıkmaktadır. Köprüler, özellikle çelik köprü elamanları; Raylar; her türlü nakil vasıta dingilleri; uçak kanatları, gövdesi ve diğer elemanları yorulmaya maruz kalmaktadır. Hatta, uçak motorlarındaki piston kolu yaklaşık 200 saatlik uçuş süresi içinde 25 milyon kez tekrarlı gerilme etkisi altında kalır.

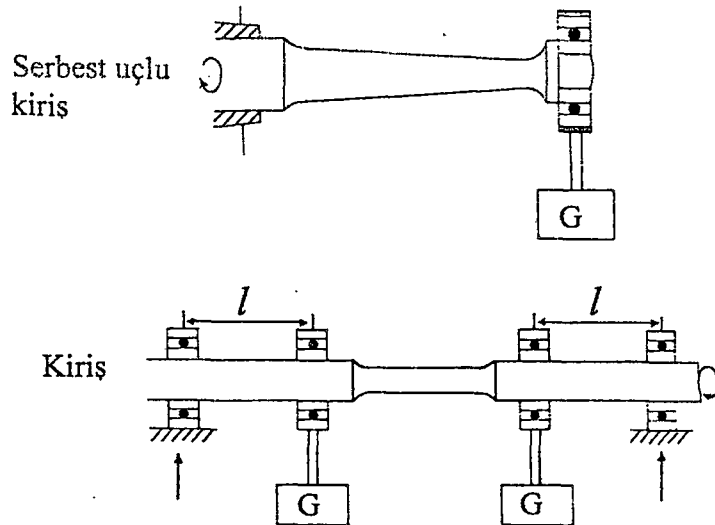
Genellikle miller, yataklar, civatalar, yaylar, dişliler, türbin kanatları, motor parçaları ve raylı sistem tekerleri tekrarlı gerilmeler altında çalışırlar. Nitekim makine elemanlarında meydana gelen hasarların % 90'ı yorulmadan kaynaklanmaktadır.

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 örneklerle basit laboratuvar deneyleri yapılarak malzemelerin yorulma davranışları hakkında temel bilgiler edinebilir.

4.2. Yorulma Deneyleri

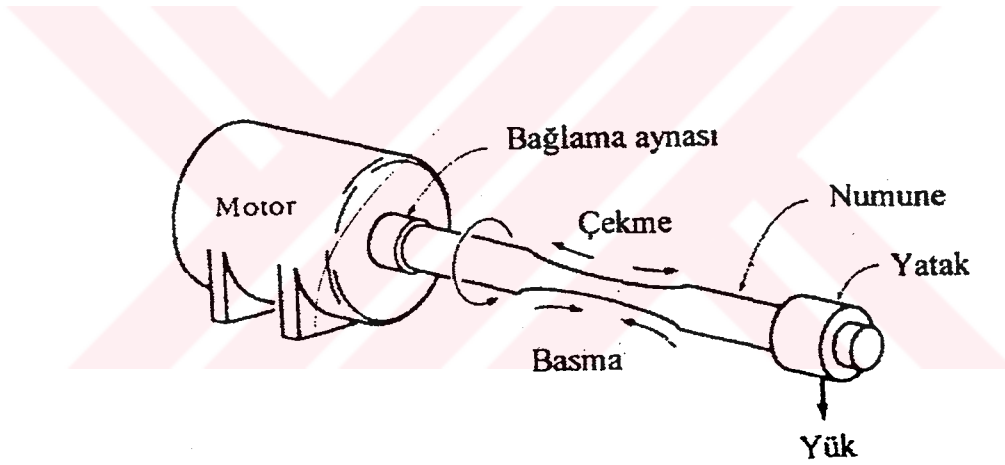
Yorulma deneyleri için en çok kullanılan cihazların başında Wöhler Cihazı gelir. Bu cihazda, deney örneği bir ucu destekli kol biçiminde olup, bir elektrik motoru ile döndürülen milin ucu yerleştirilir. Bir bilyalı rulman vasıtası ile örneğe statik yük uygulanır. Numune döndükçe sinüzoidal olarak değişen gerilme yüzeyde en büyük değerine ulaşırken, merkezde sıfır olur. Kullanılan numunenin boyutları yorulma mekanizmasının yapım biçimine göre değişir. Çapı gittikçe azalan numuneler kullanıldığı gibi, silindirik numunelerde kullanılır. Silindirik numunelerin yüzeyleri boyunca düzenli gerilme elde edebilmek için bir noktadan yükleme yapılabilir.

Wöhler cihazının şematik resimleri Şekil 4.1.'de verilmektedir. Bu makineler içinde en çok dönel-eğmeli yorulma deney düzeneği kullanılır. Bu düzeneğin ayrıntılı şematik resimde Şekil 3.6.'da verilmektedir. Yorulma makinelerinin çekme-basma, çarpma, burma, eğme ve eğme-burma gerilimleri uygulanan çeşitleri de vardır[25].



Şekil 4.1. Yorulma deneylerinde kullanılan Wöhler cihazlarının prensip şeması[25]

Yorulma deneylerinde kullanılan örneklere farklı büyüklükte tekrarlı gerilmeler uygulanır ve her örneğin kırılması için gerekli çevrim sayısı ölçülür. Şekil 4.2. de görüldüğü gibi silindirik numunenin işlenmiş bir ucu motor tarafından bağlama aparatına (ayna veya pense) bağlanır. Diğer uçtan ağırlık asılır. Başlangıçta numune üst yüzeyine çekme gerilmesi etki ederken alt yüzey basma gerilimine maruz kalır. Numune 90° döndükten sonra normal olarak çekme ve basmada bulunan bölgelerin üzerine gerilim etki etmez. Toplam 180° döndükten sonra, normal olarak çekme etkisi altındaki bölge şimdi basma etkisi altındadır. Bu nedenle her hangi bir noktadaki gerilim sıfır noktasındaki gerilimden maksimum çekme gerilimine ve sıfır geriliminden maksimum basma gerilimine bir devir tamamlar. Numune üzerine etkiyen maksimum gerilim aşağıdaki ifade ile verilir[22].



Şekil 4.2. Wöhler makineleri “ Serbest Uçlu Kiriş” test düzeneği[22]

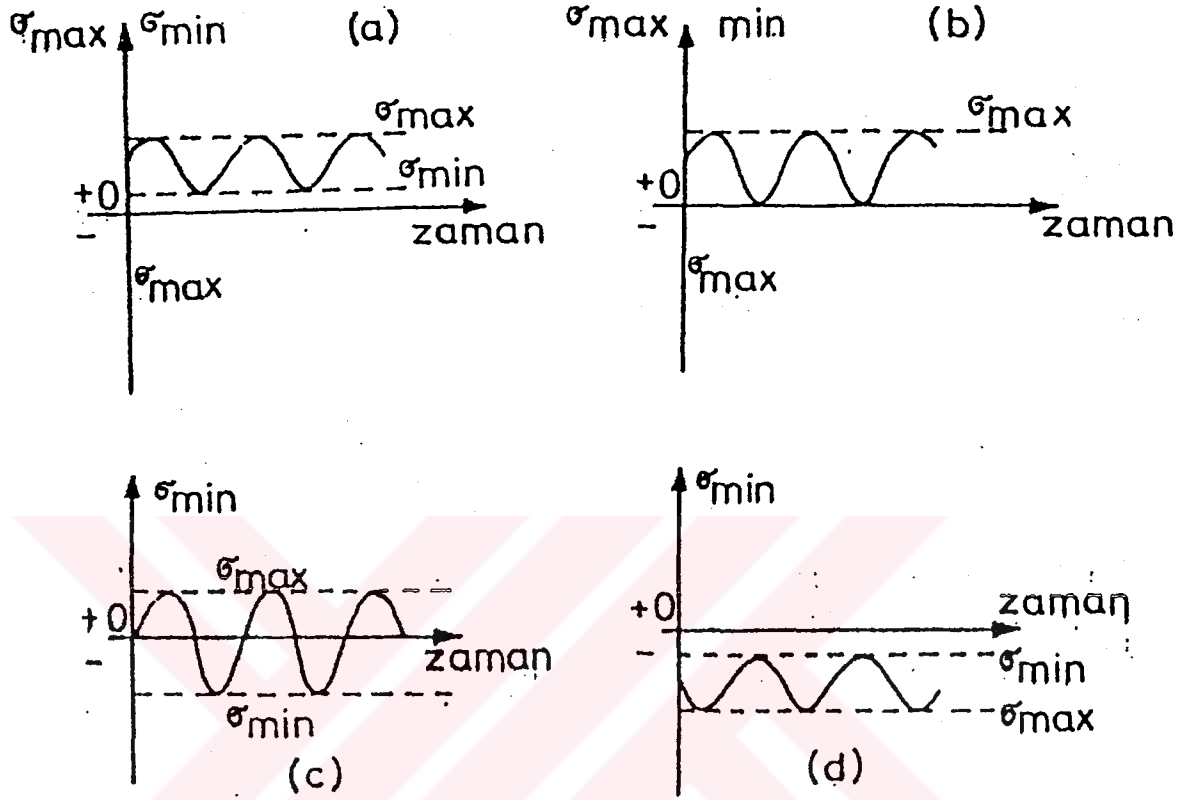
$$\sigma = 10,18 \text{ L.F} / d^3$$

Burada;

L : Çubuğun Boyu

F :Yük

d : Çapıdır.

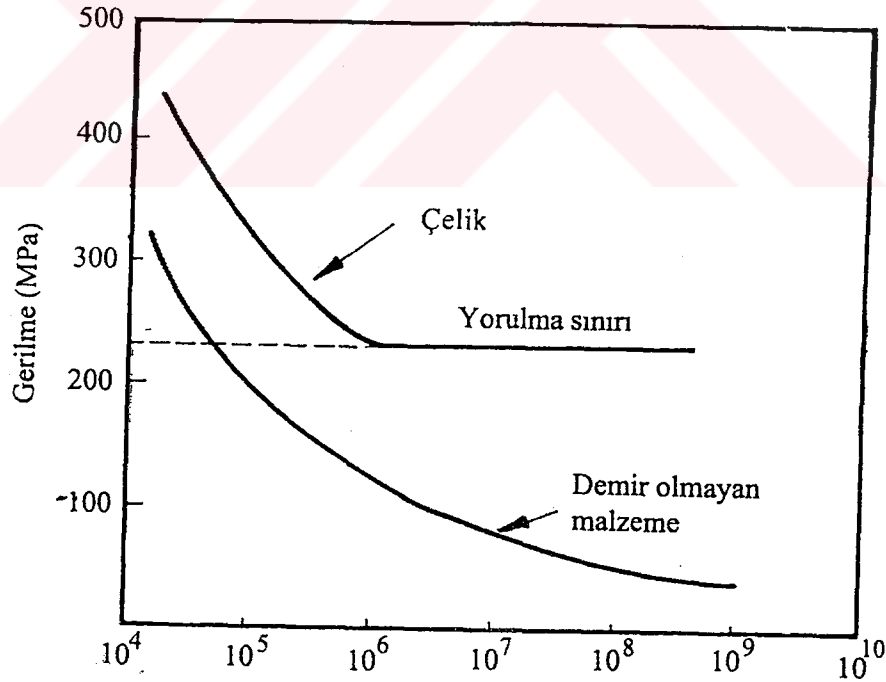


Şekil 4.3. Yorulma gerilim periyotları[24]

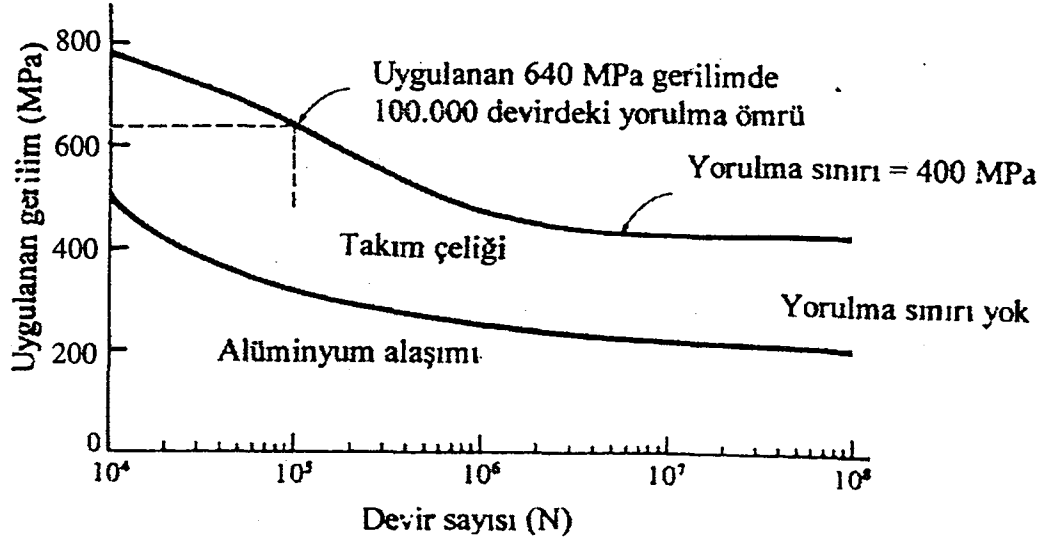
Yorulma cihazlarında bulunan tertibat sayesinde cisme uygulanan gerilmeler iki sınır arasında zamanın sinüzoidal bir fonksiyonu olarak, devamlı olarak değiştiğini söylemiştik. Şekil 4.3. de $\sigma_{\min}$ ve $\sigma_{\max}$ 'un muhtelif durumlarına göre gerilme zaman eğrisinin şekilleri görülmektedir. Çekme gerilmeleri (+) olarak alındığına göre, (a) da malzeme yalnız değişken çekme kuvvetlerinin etkisi altındadır. (b) de yine malzemeye yalnız çekme gerilmeleri etkiliyorsa da burada ($\sigma_{\min}$) sıfıra eşittir. (c) halinde ise $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$ olup bu durumda cisme aynı değerde maksimum çekme ve maksimum basma gerilmesi arasında değişen gerilmeler etkilemektedir. Yorulmada bu sonuncu durum özel bir haldir, buna alternatif gerilme hali denilmektedir. (d) de ise malzeme yalnız değişken basınç gerilmelerinin etkisi altındadır.

Gerilmenin $\sigma_{\max} + \sigma_{\min} / 2$ 'den itibaren artarak $\sigma_{\max}$ 'a eşit 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 koşulu aşmamak koşulu ile kabil olduğu kadar yüksek olmalıdır. Zira ancak bu taktirde yorulma deneylerinin süresi kısalabilir. Yüksek frekanslı özel yorulma aletlerinde, bugün ki durumda dakikada frekans 6000-8000 arasında bir değere kolaylıkla ulaşabilmektedir[25].

Belirli bir devir sayısından sonra numune kopabilir. Genellikle seri numuneler farklı gerilimlerde test edilir ve gerilim (S) kopma için gerekli devir sayısına (N) karşılık gelir[22].



Şekil 4.4. Çelik ve demir olmayan malzemelerin tipik Wöhler diyagramı[25]



Şekil 4.5. Takım çeliği ve alüminyum alaşımının kopma eğrisi için "Gerilim-Devir Sayısı"[22]

Demir, çelik ve demir dışı malzemelerin Wöhler eğrileri Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'de verilmiştir. Demir çelik grubuna giren malzemelerin yorulma eğrileri, oda sıcaklığında belli bir gerilme değerinde, belli bir çevrim sayısından sonra yatay hale gelir. Yorulma diyagramında eğrinin yatay duruma geldiği gerilmeye, yorulma sınırı denir. Bu gerilmenin altındaki tekrarlı gerilmelerde malzemenin sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir. Ancak demir dışı malzemeler 100 milyon çevrim sayısından sonra bile belirgin bir yorulma sınırı göstermez.

Yorulma eğrilerinden iki önemli büyüklük belirlenir. Bunlardan birisi yorulma ömrü, diğeri yorulma dayanımıdır. Yorulma ömrü; belirli büyüklükte tekrarlı gerilime etkileyen bir malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısını gösterir. Yorulma dayanımı ise; bir malzemenin belirli bir çevrim sayısı sonunda kırılmasına neden olan gerilme değeri olarak tanımlanır.

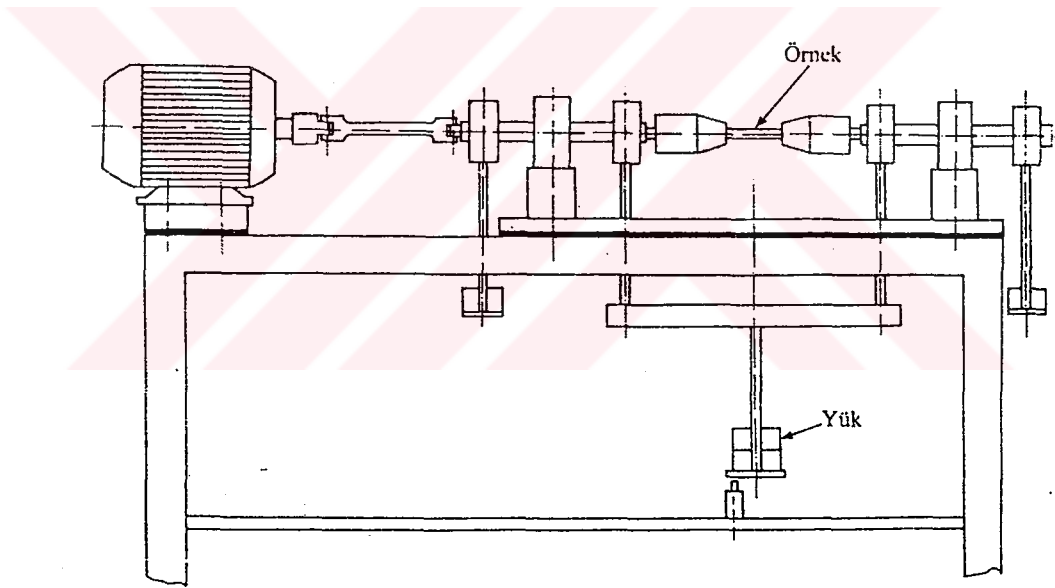
Demir – çelik grubu malzemelerde yorulma sınırı, demir dışı malzemelerde ise, dayanım sınırı söz konusudur. Dayanım sınırı, gerilme altındaki malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı demektir. Demir ve çelik gibi malzemelerde

yorulma sınırı (σ_y) ile çekme dayanımı (σ_φ) ve Brinell sertliği (BSD) arasında verilen bağıntı vardır.

$$\text{Yorulma Sınırı } (\sigma_y) \approx \pm 0,5. \sigma_\varphi \approx \pm 0,18.BSD$$

Demir dışı malzemelerde ise belirli bir yorulma sınırı yoktur. Ancak yorulma dayanım sınırı olarak aşağıdaki bağıntının geçerli olduğu varsayılır[25].

$$\text{Yorulma Dayanım Sınırı (YDS)} \approx 1 / 3 \sigma_\varphi$$

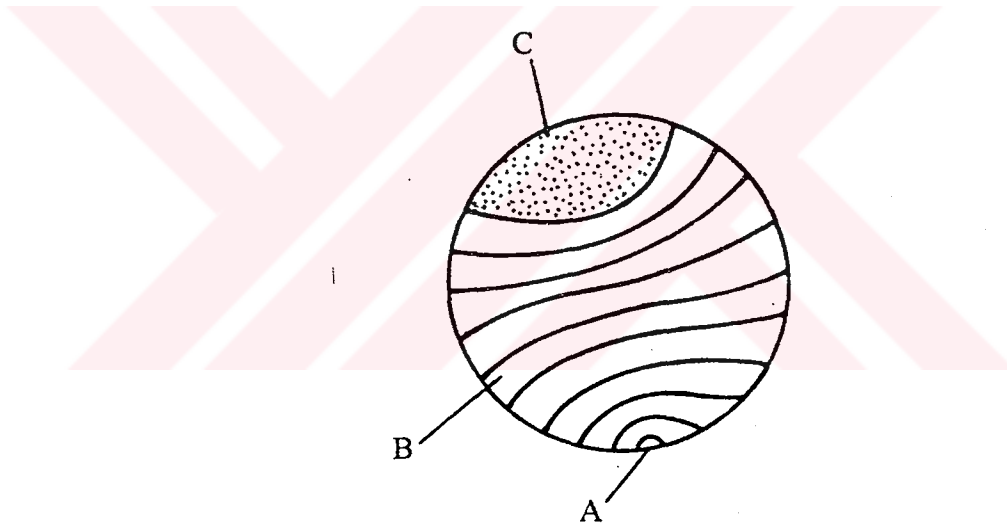


Şekil 4.6. Dönel eğmeli yorulma deney makinesinin Şematik resmi[25]

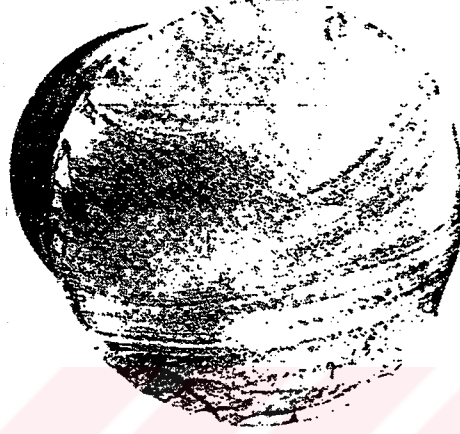
4.3. Yorulma Sonucunda Kırılan Malzeme

Yorulma sonucunda kırılan malzemenin kırılma yüzeyi genelde iki farklı bölge içerir. Bu bölgelerden biri, midye kabuğunda olduğu gibi aynı merkezli dalga izlerini içeren renksiz ve düzgün bir görünüme sahip olup, çatlakın bir yada daha fazla merkezden başlayarak yavaş ilerlediğini gösterir. Diğer bölge ise, en son yırtılmayı gösteren lifli bir görünüme sahiptir. Yorulma sonucunda kırılan bir malzemenin

kırılma yüzeyinin şematik resmi Şekil 4.7. de, fotoğrafı ise Şekil 4.8. de görülmektedir. Yorulma hasarı, çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile oluşur ve yorulma kırılması ilerleyen kırılma olarak tanımlanır. Yorulma çatlağı, keskin köşe, çizik, çentik, korozyon çukurcuğu gibi gerilme yığılmasına neden olan noktalarda oluşur ve belirli hızlarda ilerleyerek malzemenin kırılmasına neden olur. Bu nedenle, dinamik yük altında çalışan parçaların tasarımında, gerilme yığılmasına yol açan keskin köşe, çentik ve ani kesit değişiminden kaçınmak gerekir. Ayrıca tekrarlı gerilmeye maruz kalan parçaların yüzeyleri parlatılarak yorulma ömürleri uzatabilir.

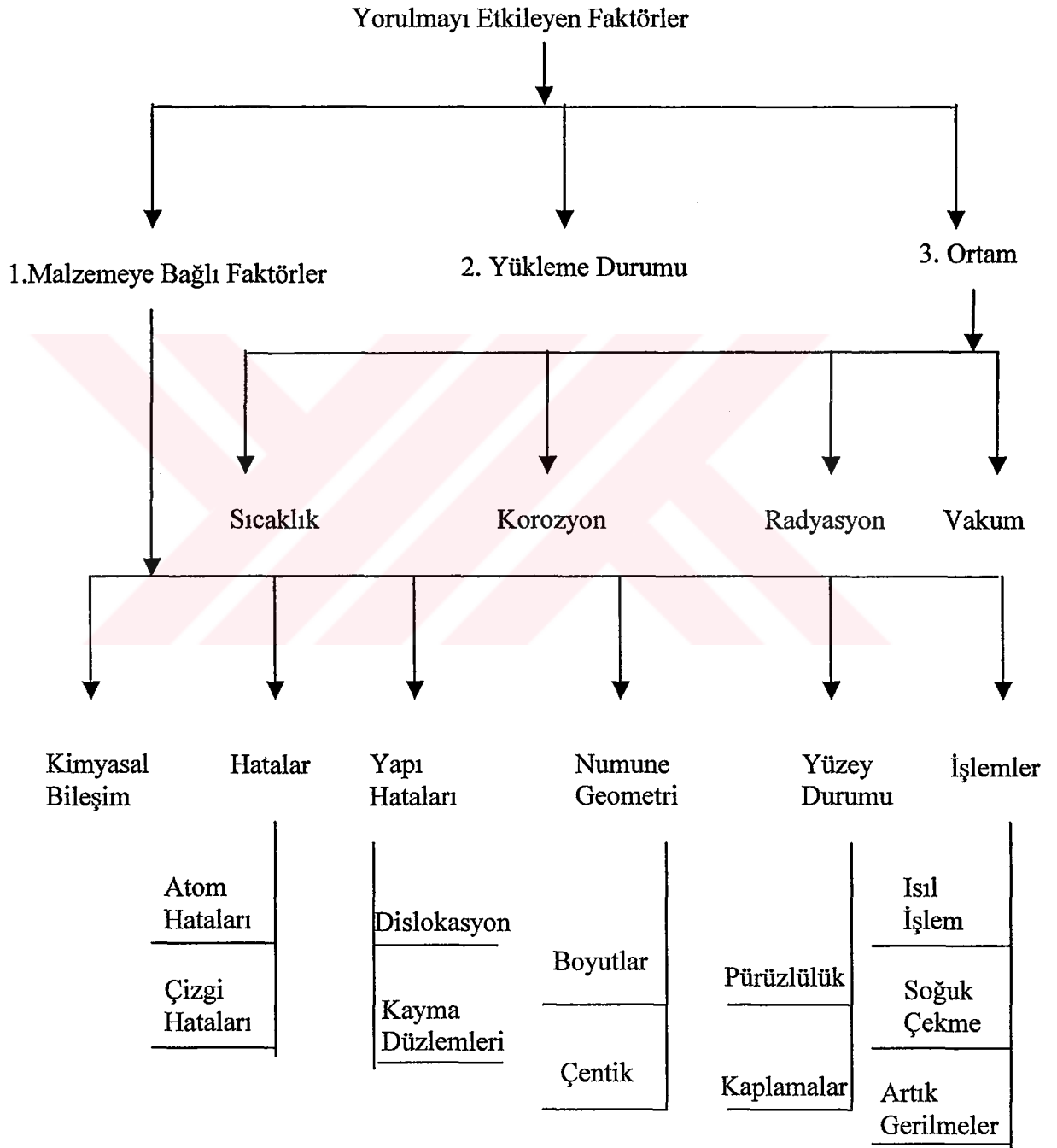


Şekil 4.7. Yorulma sonucunda kırılan parçanın yüzeyinin şematik resmi. (a). Çatlak başlangıcı, (b). Çatlak ilerleme bölgesi, (c). kırılma veya yırtılma bölgesi[25]



Şekil 4.8. Yorulma sonucunda kırılan bir parçanın yüzeyinin fotoğrafı[25]

4.4.Yorulmayı Etkileyen Faktörler



Şekil 4.9. Yorulma dayanımını etkileyen faktörler

4.4.1. Malzeme cinsi ve bileşimi

Çeliğin kimyasal bileşiminin yorulma karakteristikleri üzerine belirli bir etkisi bulunmaktadır. Çekme mukavemetini artıran büyük faktörler yorulma mukavemetinin daha büyük değerler almasına yol açar. Özellikle çelikteki karbon miktarını artırmakla daha büyük bir yorulma mukavemeti elde edilebilir. Çelikteki fosfor miktarının arttırılması, yorulma mukavemeti üzerinde olumlu yönde etki yapar.

Kükürt (S) bulunması ise; metal olmayan inklüzyonlar meydana getirdiği için yorulma sınırı düşürülür. Bununla beraber kükürdün en fazla % 0,1 oranında yumuşak çelikte bulunmasının yorulma karakteristikleri bakımından bir zararı yoktur. Yüksek nikelli ve kromlu çelik alaşımlarının önemli şu özellikleri vardır.

- a) Bu alaşımlar korozyonlu ortamlarda yüksek yorulma mukavemetine sahiptir.
- b) Çentik etkisi ile bunların yorulma mukavemetlerinde, diğer çelik alaşımlarına göre daha az miktarda azalma olur. Başka bir deyişle, bunların çentiğe karşı daha düşük duyarlılığı vardır:

Alaşım elementleri malzemenin statik çekme dayanımını arttırırken yorulma ömrünü de arttırmaktadır. Isıl işlem uygulanacak çelik parçalarda alaşım elementlerinin en önemli rolü çeliklerin su alma derinliklerini arttırarak, sertliğin yüzeyden itibaren daha derin kısımlara kadar artmasını sağlamak ve dolayısı ile yorulma dayanımını arttırmaktır.

Çelik malzemelerde genellikle $10^6 - 10^7$ civarında yorulma dayanım sınırına varılmaktadır. Demir dışı malzemelerde ise belirli bir yorulma dayanımı sınırı yoktur[27].

4.4.2. Kalıntılar ve mikroyapı hataları

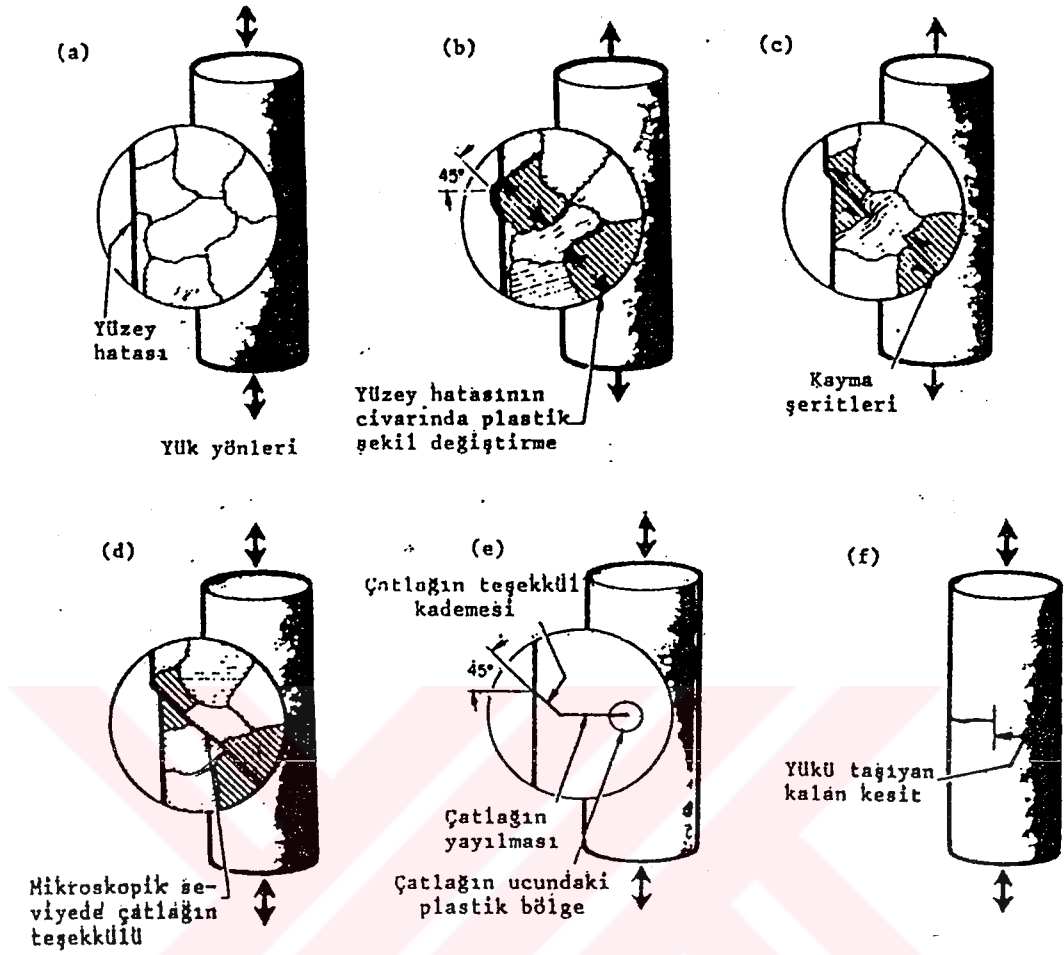
Normal şartlarda yorulma çatlakları metallerin yüzeylerinin hemen altında gevrekleşen tane sınırları, kayma bantları veya imalattan kaynaklanan yüzey pürüzlülüğü, kaynak bölgesi gibi gerilme yükseltici bölgelerden başlar.

Yüzey çok pürüzsüz olsa bile yorulma esnasında kayma bantlarının tersine çevrilemeyen hareketi nedeniyle yüzeyde oluşan girinti ve çıkıntılar yorulma çatlağını başlatabilir(Şekil 4.10. ve 4.11). Tek kristalli malzemelerde yorulmanın oluşması yüzeye kadar ulaşan kalıcı kayma bantlarından başlar[28].

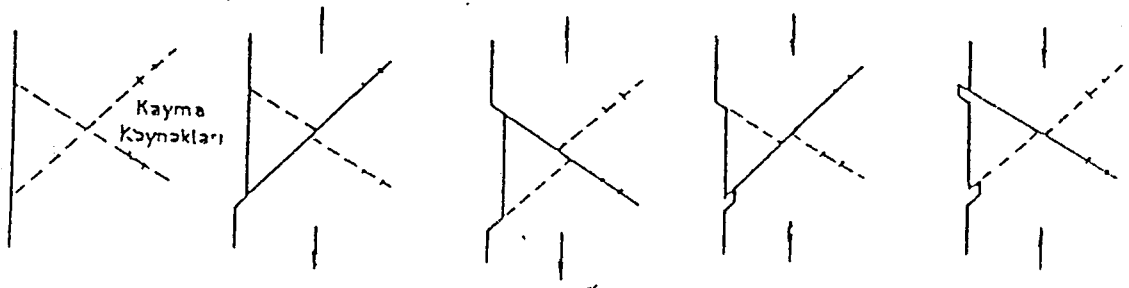
Ancak malzemelerin gerçek kopma mukavemetleri, σ_t (malzemelerin teorik kopma mukavemeti)'nin çok altındadır. Buna sebep de; malzemelerin iç yapılarının muntazam olmamalarından, kristal yapısında, tane sınırında, yüzeyde dislokasyon doğrusu civarında mevcut atom boşluklarından ve hatalarından dolayı meydana gelir.

Boşluklar, gözenekler ve hatalar atomların yayılma durumuna ve dislokasyonlara bağlı olarak büyürler. Neticede çatlak haline gelirler. Malzemelerin $\sigma_t = E / 10$ bağıntısının ifade ettiği gerilmeden daha küçük bir değerde kopmaları, bu boşluklara bağlıdır.

Küçük çatlaklar oluşumları sonrası hızlı bir şekilde büyüyebilir, ancak artan çatlak uzunluğu ile çatlak ucu daha çok tane tarafından çevrelenir. Ayrıca çatlak ucu ikizler, tane sınırları ve ikinci faz partikülleri ile karşılaştığında çatlak büyümesi gecikebilir veya tamamen önlenir.



Şekil 4.10. Tane sınırlarının kayma düzlemleri[27]



Şekil 4.11. Kayma bantlarının girinti ve çıkıntı meydana getirme mekanizması

- Atom mertebesinde herhangi bir hata bölgesi,
- Hatanın civarında meydana gelen plastik şekil değiştirmeler,
- Plastik şekil değiştirmelerin kayma şeritleri oluşturmaları,
- Mikroskopik seviyede oluşan çatlak[30]

4.4.3. Parça boyutu

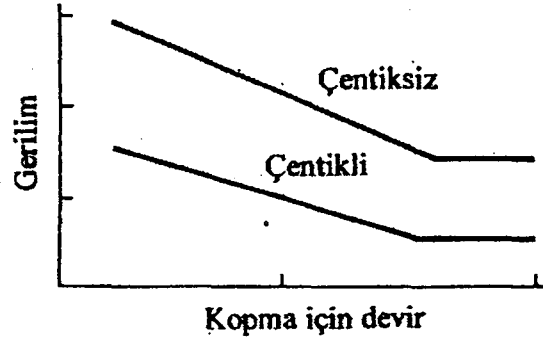
Genellikle çelik parçaların büyüklüğü arttıkça yorulma mukavemeti düşer. Yorulma deneylerinde deney çubuğunun çapı 6 mm'yi aştığında, küçük çaplılara oranla yorulma mukavemetinde % 20'ye dek bir azalma görülür.

Büyüklüğün yorulma özelliğini olumsuz yönde etkilemesinin iki temel nedeni vardır. Birincisi yüzey alanı arttığından yüzey kusurlarının bulunma olasılığı artmaktadır. İkincisi ise, bükme ve burma yüklemelerinde çapı arttıkça gerilme eğimi de artmakta ve bu nedenle çelikte gerilimli bölgelerin sayısı artabilmektedir. Boyut faktörü, çelik parça çentik içerdiği zaman çok önemli boyutlara çıkabilmektedir. Aşağıdaki diyagramda yorulma dayanımında etkili olan boyut faktörünün çeşitli malzeme tipleri için etkisi görülmektedir[3].

4.4.4 Çentik (Gerilme yığılması) etkisi

Parça kesitinde çentik, delik ve ani kesit değişimlerin bulunması yorulma ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Kama yuvaları, vida dişlileri, pres geçmeler ve delikler gibi geometrik süreksizlikler nedeniyle oluşan gerilme yığılmaları sonucunda makine parçalarında yorulma çatlaklarının bulunması kaçınılmazdır[30].

Gerilime maruz malzemede yorulma çatlakları, gerilimin maksimum olduğu yüzeyde başlar. Yüzeydeki herhangi bir tasarım veya üretim hatası gerilimleri yoğunlaştırır ve yorulma çatlaklarının oluşmasını teşvik eder. Bu hassasiyet bir çentik yorulma numunesi kullanılarak ölçülebilir(Şekil 4.12.). Yorulmadan dolayı kopma ihtimalini en aza indirmek için, bazen oldukça iyi parlatılmış yüzeyler hazırlanır[22].



Şekil 4.12. Metalin yorulma özellikleri üzerine çentiğin etkisi[22]

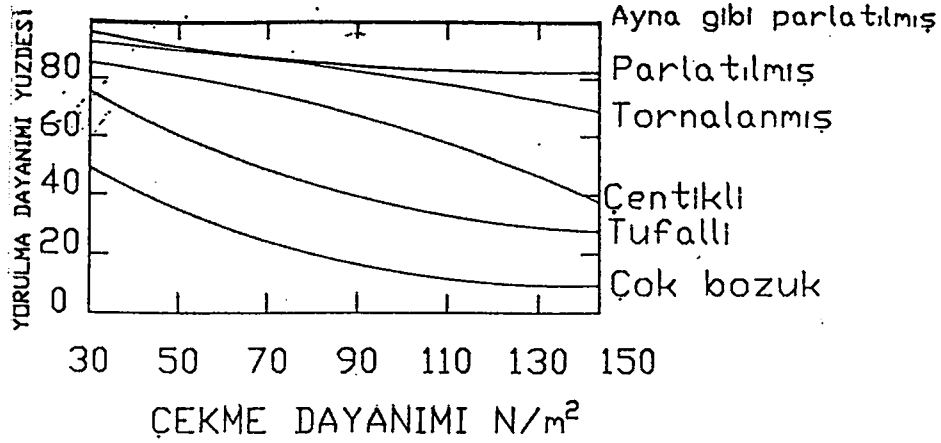
4.4.5. Yüzey etmeni

Bu etmenden söz edilirken yalnız yüzey durumu olarak değil, aynı zamanda tasarım etmeni gibi de düşünülmelidir. Çeliklerde görülen yorulma kırılmalarının bir çoğu yüzey düzgünsüzlüklerinden başlamaktadır. Bu nedenle, yorulma özelliği yüzeydeki çentik, girinti, çıkıntı, keskin köşe ve gibi tasarımdan yada yüzey işlemlerinden kaynaklanan kusurlara karşı çok duyarlıdır[30].

Bu genellikle, talaşlı işlemlerden kalan yüzey düzgünlüğünü yansıtır. Yüzey ne denli düzgün olursa yorulma dayanımı o denli yüksek olur. Parlatılmış yüzeyler, pürüzlülere göre yorulma kırılmalarına karşı daha yüksek yorulma dayanımı gösterir.

<u>Yüzey Durumu</u>	<u>Yorulma kırılmasına yol açan çevrim sayısı</u>
Tornada işlenmiş	24.10^3
Elde parlatılmış	137.10^3
Taşlanmış	217.10^3
Taşlanmış ve parlatılmış	234.10^3

Aşağıdaki diyagramda bir SAE 3130 çeliği için bu durum verilmiştir.



Şekil 4.13. Yüzey durumunun yorulma dayanımına etkisi[30]

Genellikle, taşlanmış ve parlatılmış çelik yüzeylerde koşut parlatma çizgileri ana çekme gerilimi yönünde ise yorulma dayancı en yüksek değerine ulaşır. Yüzeylerdeki çentik ve keskin köşelerin yorulma özelliklerini olumsuz yönde etkilemesinin nedeni, bunların yüksek çekme gerilmesi yoğunluklu bölgeler oluşturmasıdır. Yorulma kırılmasının çoğunun bu tür yerlerden başlaması hep bu nedenden dolayıdır[28].

Cıvatalar, dişliler, vb çelik parçalarda diş açılması zorunludur. Bunların diş tasarımı, yorulma dayancı ve parçanın ömrü açısından son derece önemlidir. Keskin köşelerden hep kaçınılmalıdır. mekanik açılmış dişler soğuk haddelenmişlerden daha düşük yorulma dayanımı gösterirler.

4.4.6. Yüzey mikroyapısı

Tüm özelliklerde olduğu gibi, yorulma dayanımı da iç yapının eş dağılımlığını bozan her etmenden etkilenir. Bu bakımdan yüzeyin kimyasal bileşimini ve iç yapısını değiştirerek yorulma dayanımını düşüren her durumdan kaçınılması gerekir. Örneğin karbonsuzlaşma, çeliklerin çekme gerilimini düşüreceğinden, yorulma dayanımını düşürür.

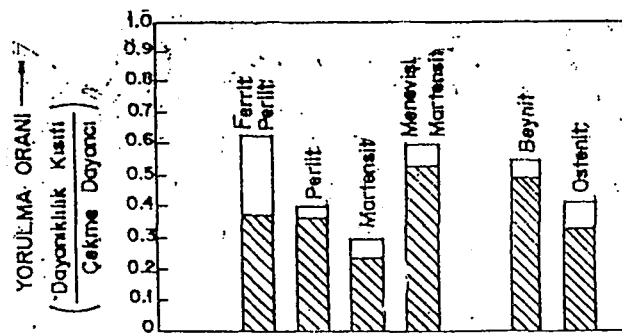
Buna karşın, yüzeyde basma gerilimi yaratabilen her etmen yorulma dayanımını artırır. Gerek karbonlaşma ve özellikle de nitrürleme bu nedenle çeliklerin yorulma dayanımını artırır[30]

Kaplama yöntemleri genellikle yorulma dayanımını artırıcı yönde etki yaratmazlar. Nikel ve krom kaplamalar olumsuz etki yaratır. Kadmiyum gibi kaplamalar ise yorulma özelliğini pek değiştirmez. Kaplamaların uygulanma ve kullanılma nedeni, korozyonlu ortamlarda korozyon direncini artırıcı özellik taşımalarından ileri gelir[2].

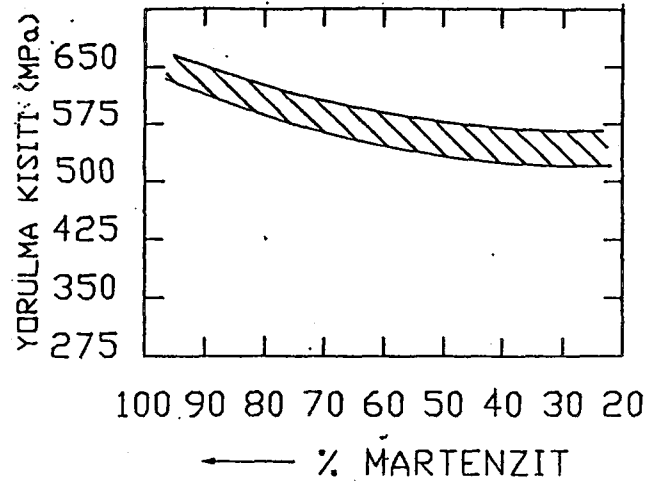
4.4.7. Isıl işlemler ve mikroyapının etkisi

Genel olarak mukavemeti artıran ısı işlemler yorulma mukavemetlerini artırsa da bu konuda mikroyapının şu önemli özellikleri vardır; Çelik gibi karmaşık bir iç yapıya sahip olan cisimlerin yorulma mukavemetinin düşük değerler alması metalürjik çentiklerden ileri gelebilir. Bu metalürjik çentikler iri perlit, serbest ferrit, inklüzyonlar, alaşım elamanlarının çözülmesi, su verme esnasında bir miktar artık östenitin kalması olabilir(Şekil 4.14.).

Çeliğin iç yapısında martenzit fazının azalması, yorulma limitinin düşmesine yol açar(Şekil 4.15). Yorulma mukavemeti yüksek olan çelikler genellikle su verilerek sertleştirilmiş olan çeliklerdir. Ayrıca tane boyutunda yorulma mukavemetine çok az bir etkisi bulunmaktadır. Tane boyutunun küçülmesi yorulma mukavemetinde az miktarda bir artış meydana getirir. Aşağıdaki şekillerde mikroyapıda meydana gelen fazların yorulma dayanımına etkisi görülmektedir.



Şekil 4.14. Çeliğin mikroyapısının yorulma oranına etkisi (tavlanmış bölgeler değer aralığını göstermektedir)[30]



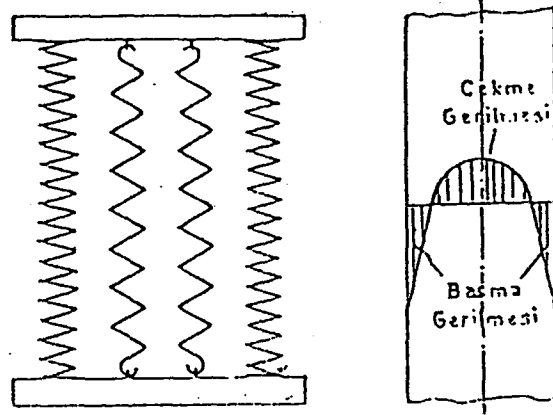
Şekil 4.15. % 0,4 C içeren çelikte martenzit oranının dayanıma etkisi[30]

4.4.8. Kalıcı gerilme ve soğuk çekmenin yorulma ömrü üzerine etkisi

Bir iş parçasına herhangi bir dış yük etki etmediği halde, o iş parçasından veya malzemede bulunan gerilmeler sistemine kalıcı gerilmeler denir. Kalıcı gerilmeler pratikte hemen her makine elemanında bulunur. Bir döküm parçada kendini çekmeden ve ısıtma işlemlerinde kesitlerdeki sıcaklık gradyanının büyük olmasından kalıcı gerilmeler kaynaklandığı gibi, talaşlı veya talaşsız imalat sonucunda da kalıcı gerilmeler meydana gelir. Kalıcı gerilmeler sadece elastik gerilmeler olarak düşünülürler. Kalıcı gerilmelerin alabileceği en büyük değer malzemenin akma gerilmesi değeridir.

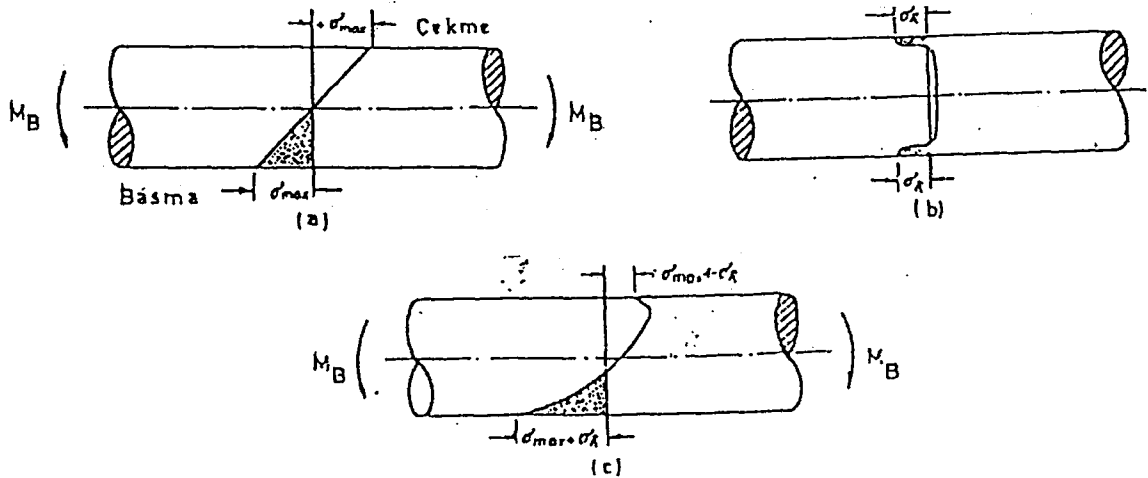
Kalıcı gerilmelerin karakteristikliği ve sonucu basit bir model kullanarak Sigwart tarafından gösterilmektedir. Şekil 4.16. de kalıcı gerilmelerin modelini göstermektedir. Rijit iki çubuk dört adet yay ile birleştirmiştir. Dış yaylar basmaya, iç yaylar ise çekmeye karşı çalışan yaylardır. Bu durumda denge halinde, elastik kuvvetlerin bulunduğu bir yük sistemi elde edilir. Dış ve iç yayların dayanımı farklıdır. Sistem kendi içinde statik dengede olmalıdır. Bu nedenle baskı kuvvetlerinin toplamı, çekme kuvvetlerinin toplamına eşit olmalıdır. Benzer düşünce tarzı ile kalıcı gerilmelerin dağılımı Şekil 4.16. de gösterildiği tarzda olur. Oldukça dar bir dış yüzey tabakasında

büyük bir baskı gerilmesi mevcut iken iç kısımlarda küçük çekme gerilmesi söz konusu olur.



Şekil 4.16. Kalıcı gerilme modeli[7]

Malzeme yüzeyinde kalıcı baskı gerilmeli tabaka meydana getirmek, yorulma performansını artırıcı en etkili yöntemdir. Yüzeydeki bir noktada bulunan kalıcı basma gerilmesi ile ayrıca uygulanan dış kuvvetin meydana getirdiği çekme gerilmesi toplandığında, yüzey bölgesindeki çekme gerilmesi değeri düşecektir. Böylece yorulmanın üç şartından birisi yerine getirilmemiş veya yorulma ömrü üzerindeki etkisi daha az olacaktır. Şekil 4.17. da bu etki gösterilmektedir[30].

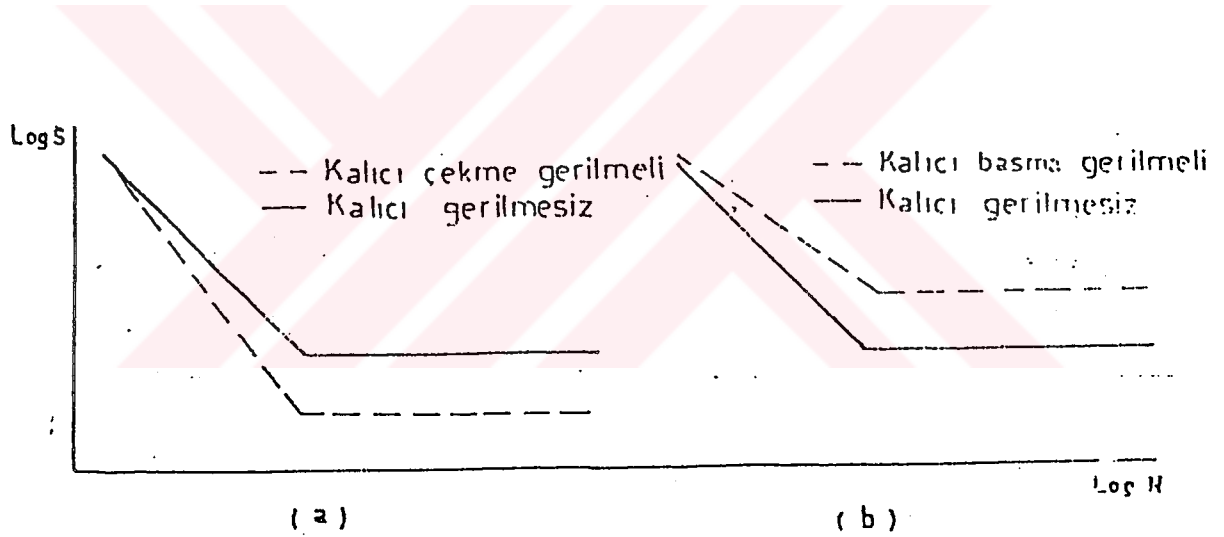


Şekil 4.17. Kalıcı basma gerilmesinin olumlu etkisi,

- Kalıcı gerilme içermeyen bir kirişteki elastik gerilme dağılımı,
- Tipik bir kalıcı gerilme dağılımı,
- Kalıcı gerilmeler ile dışarıdan uygulanan eğme gerilmelerinin cebirsel toplam sonucu gerilme dağılımı[8]

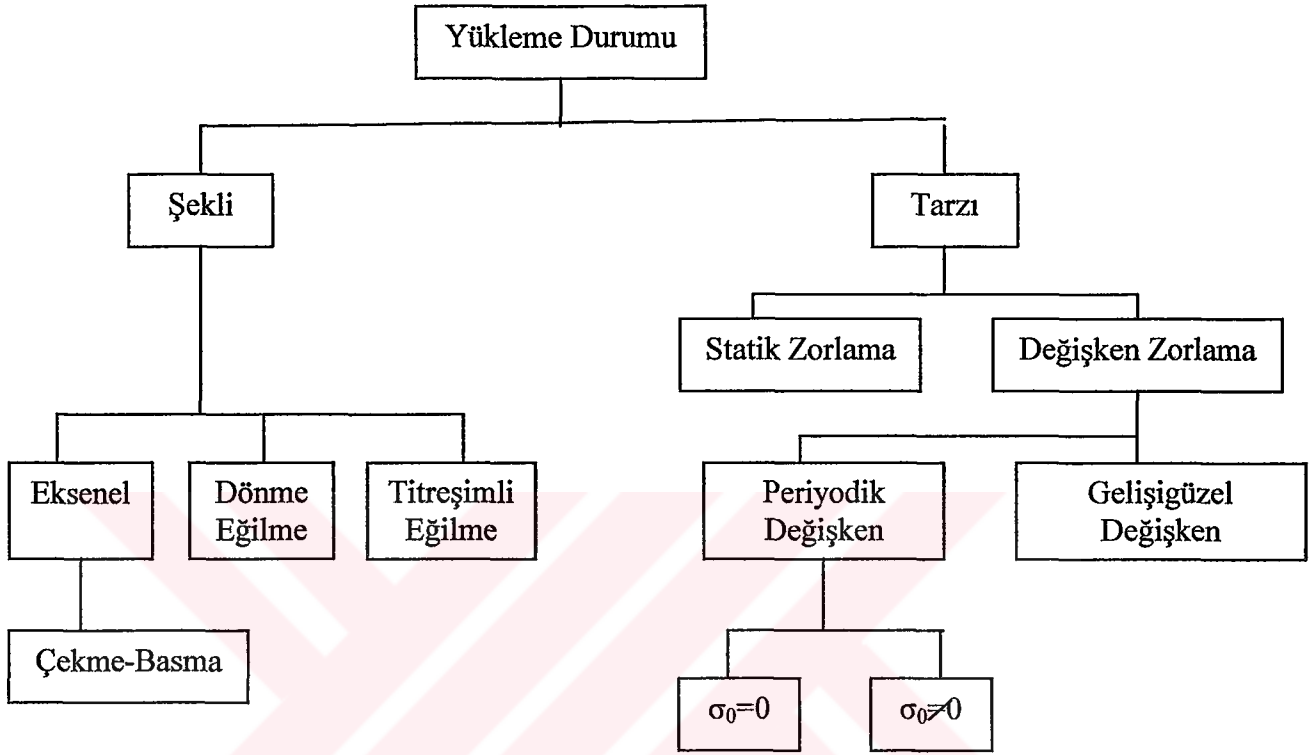
Kirişin yüzeyinde etkili olan çekme gerilmesi değeri, maksimum çekme gerilmesinden yüzeydeki basma gerilmesi değerinin çıkarılmasıyla ortaya çıkan miktar kadardır. En büyük çekme gerilmesi değeri kirişin iç bölgesinde meydana gelmektedir. Bu gerilmelerin değeri, dışardan uygulanan yükten kaynaklanan gerilmeler ile kalıcı gerilmelerin dağılımına bağlıdır.

Bu makine parçasında bulunan kalıcı gerilmelerin ve kalıcı gerilmeler cinsinin yorulma etkisi Şekil 4.18. de gösterilmektedir.



Şekil 4.18. (a) da kalıcı çekme gerilmesi ve dışarıdan uygulanan yükün meydana getirdiği çekme gerilmesinin yorulma ömrüne etkisine ve Şekil 4.18. (b) de ise kalıcı basma gerilmesi ile dışarıdan uygulanan yükün meydana getirdiği çekme gerilmesinin yorulma ömrüne etkisi gösterilmektedir.

4.4.9. Yükleme durumu



Şekil 4.19. Malzeme üzerine gelen yükleme durumu.

Elemanı zorlayan kuvvet ve momentin veya elemanın kesitinde meydana gelen gerilmelerin zamana göre sabit kaldığı, yani hiç değişmediği zorlanma şeklidir[20].

4.4.10. Değişken zorlama

Elemanı zorlayan kuvvet ve momentin veya elemanın kesitinde meydana gelen gerilmelerin zamana göre maksimum ($F_{\max}$, $M_{\max}$, $\sigma_{\max}$) değerler arasında değiştiği zorlama şeklidir. Değişken zorlamaların değişimi herhangi bir tarzda olabilir.

Misal olmak üzere değişken zorlamada gerilmelerin değişimi göz önüne alınırsa, burada maksimum ($\sigma_{\max}$) ve minimum ($\sigma_{\min}$) değerlerden başka ortalama gerilme;

$$\sigma_0 = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$$

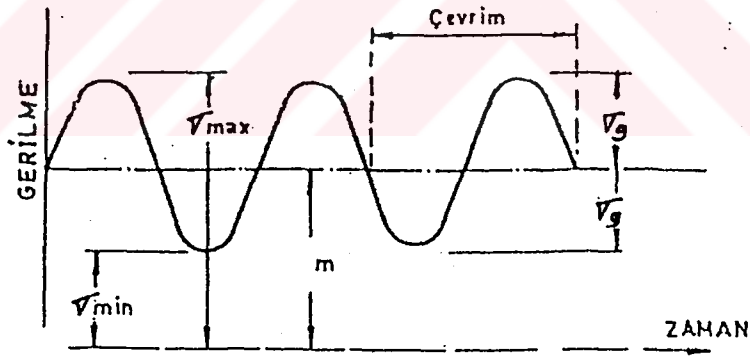
ve gerilme genliği

$$\sigma_g = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$$

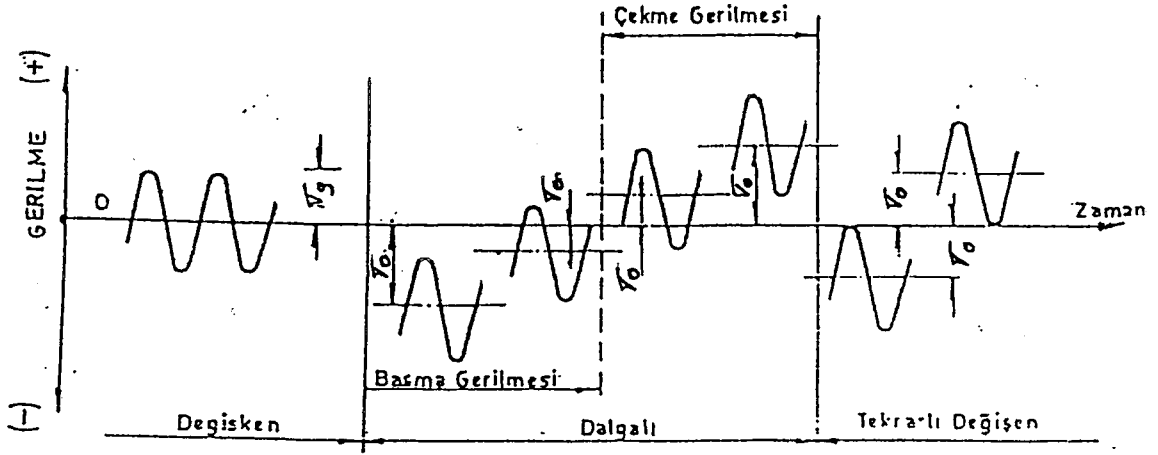
gibi büyüklükler kullanılmaktadır. Bu ifadelere göre maksimum ve minimum gerilmeler

$$\sigma_{\max} = \sigma_0 + \sigma_g \quad \sigma_{\min} = \sigma_0 - \sigma_g \quad \text{şeklinde yazılır.}$$

Şekil 4.20. ve 4.21. de yorulma olayını ifade etmek için gerekli değerler ve yorulma olayı meydana getiren gerilmeler gösterilmiştir[27].



Şekil 4.20. Yorulma deneyinde kullanılan büyüklükler[24]



Şekil 4.21. Yorulma hasarını meydana getiren gerilme türleri[27]

4.4.11. Ortalama gerilme etkisi

Bir üstteki ifade şekli değişken gerilmelerin, sabit bir σ_0 değerinin üzerine değişken bir σ_g değeri eklenerek meydana geldiğini göstermektedir. (σ_0) ortalama gerilmeleri pozitif veya negatif bir değer alabilir. (σ_0) ortalama gerilmeleri statik gerilmeler ile karıştırılmamalıdır. Civatalar, yaylar gibi birçok makine elemanları, belirli bir ön gerilme ile takılırlar. Bu ön gerilme statik bir gerilmedir.

Elemanlar dış kuvvetlerin etkisi ile değişken zorlamalara maruz kaldığı takdirde, zorlamayı karakterize eden ortalama gerilme, ön gerilmeden farklıdır.

Sabit genlikte değişken gerilmeler, sabit kısmı olan σ_0 değerine göre (Şekil 4.22.) genel değişken ve tam değişken olmak üzere iki gruba ayrılır[27].

---- Genel değişken zorlama

$$\sigma_{\max} = (\sigma_0 + \sigma_g) / 2$$

$$\sigma_{\min} = (\sigma_0 - \sigma_g) / 2$$

---- Tam değişken zorlama

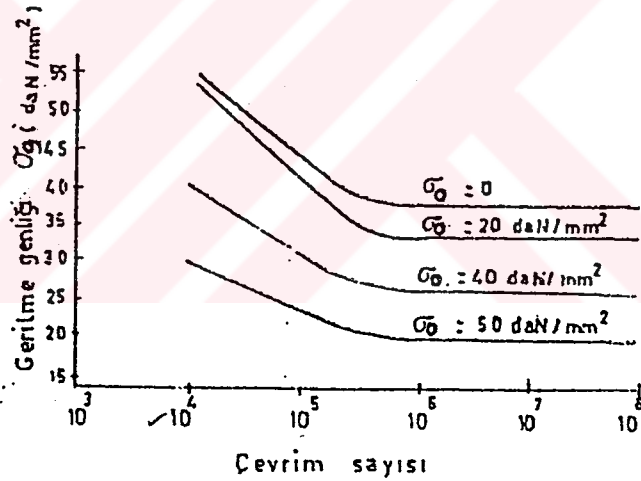
$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} \quad \sigma_0 = 0 \quad \sigma_g = \sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$$

Gerilmelerin değişimi, gerilme oranı $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ ile ifade edilir.

Buna göre statik zorlamada $R = +1$

Genel değişken zorlamada $+1 < R < -1$

Tam değişken zorlamada $R = -1$ değerlerini alır[25].



Şekil 4.22. Değişik ortalama gerilmeler için S-N eğrileri[30]

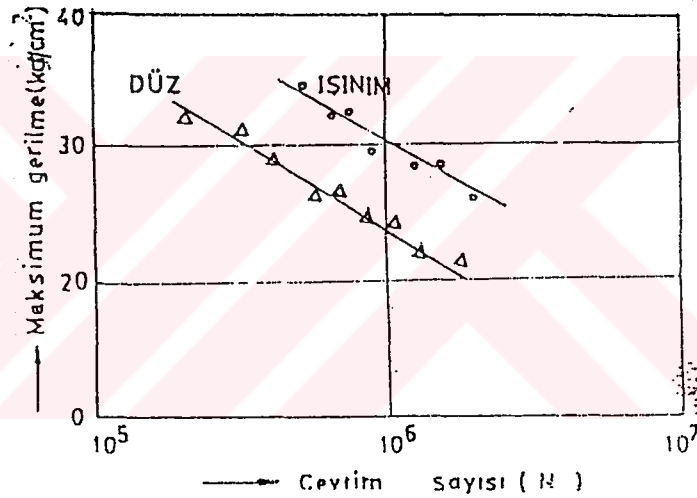
4.5. Çalışma Ortamı

4.5.1. Sıcaklık ve radyasyonun etkisi

Yüksek sıcaklık altında çalışan malzemelerin çoğunda, yorulma çatlağının başlaması için az sayıda çevrim yeterli olmaktadır. Karbon çeliklerinde 400 °C'ye artan sıcaklıklarda yorulma belirtileri görüldüğü, bunun altındaki sıcaklıklarda ise yorulma mukavemetinde bir iyileşme görüldüğü bilinmektedir. Bazı malzemelerde, optimum

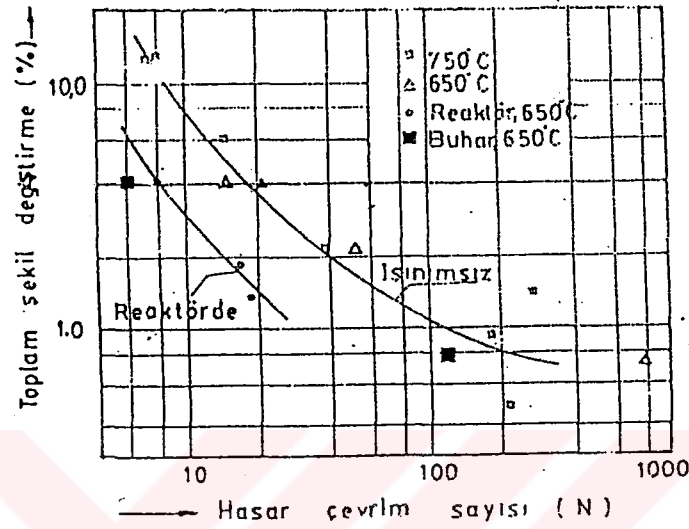
sıcaklık ve frekansta, zorlanma yaşlanması meydana gelmekte olup, plastik deformasyonların oluşması sonucu, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti artmaktadır[27].

Pek çok yapı alaşımına radyasyon etkisi, alaşımın mukavemetini artırıcı olmakla beraber sünekliğini azaltıcı yöndedir. Radyasyon etkisinde, alüminyum bir malzeme için, çevrim sayısı ile maksimum gerilme değişimi Şekil 4.22. de ve radyasyonun etkisinde, paslanmaz çelik tüp için, hasar çevrim sayısı ile toplam şekil değişimi de şekil 4.23. de verilmiştir.



Şekil 4.23. Çevrim sayısı ile maksimum gerilme[30]

Şekil 4.23.' deki grafikte 2×10^{18} hızlı nötron / cm^2 büyüklüğünde ışınlımlı ve düz (ışınlımlı) ortamdaki çevrim sayısına bağlı, gerilme değerleri değişmektedir. Burada; radyasyon belirli bir çevrim sayısına bağlı olarak mukavemeti arttırmaktadır. 10^6 çevrim sayısına karşılık gelen maksimum gerilme değeri radyasyonsuz ortam için $23 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ iken, bu değer radyasyonlu ortam için yaklaşık % 30'luk bir artışla $30 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ 'ye kadar yükselebilmektedir.



Şekil 4.24. Hasar çevrim sayısı ile toplam şekil değişimi[30]

Şekil 4.24. de ise, değişik sıcaklık aralarında, ısınmsız ortamda çevrim sayısına bağlı, toplam şekil değişimi, radyasyonlu ortama göre daha büyük olmalıdır. Özellikle paslanmaz çelik türleri için radyasyonun etkisi ile malzemenin mukavemeti yükselirken, buna karşılık sünekliğin azaldığı görülmektedir.

4.5.2. Korozyon etkisi

Yorulma, korozyonlu ortamlarda olursa korozyonlu yorulma adını alır. Korozyonlu ortamlar çelik yüzeylerde, çevrimli gerilim uygulaması olmasa bile, karıncalanma olgusu ile kovukçuklar ve gözenekçikler oluşturabilir. Bunlar çentik etkisi yaratır. Hem korozyon hem yorulma birlikte olursa çeliğin yorulma özellikleri, önce korozyona uğramış sonra da çevrimli yük uygulanmış durumdan daha da kötü biçimde etkilenir. Korozyonlu ortamlarda kimyasal tepkimeler yorulmayı çok hızlandırır[26].

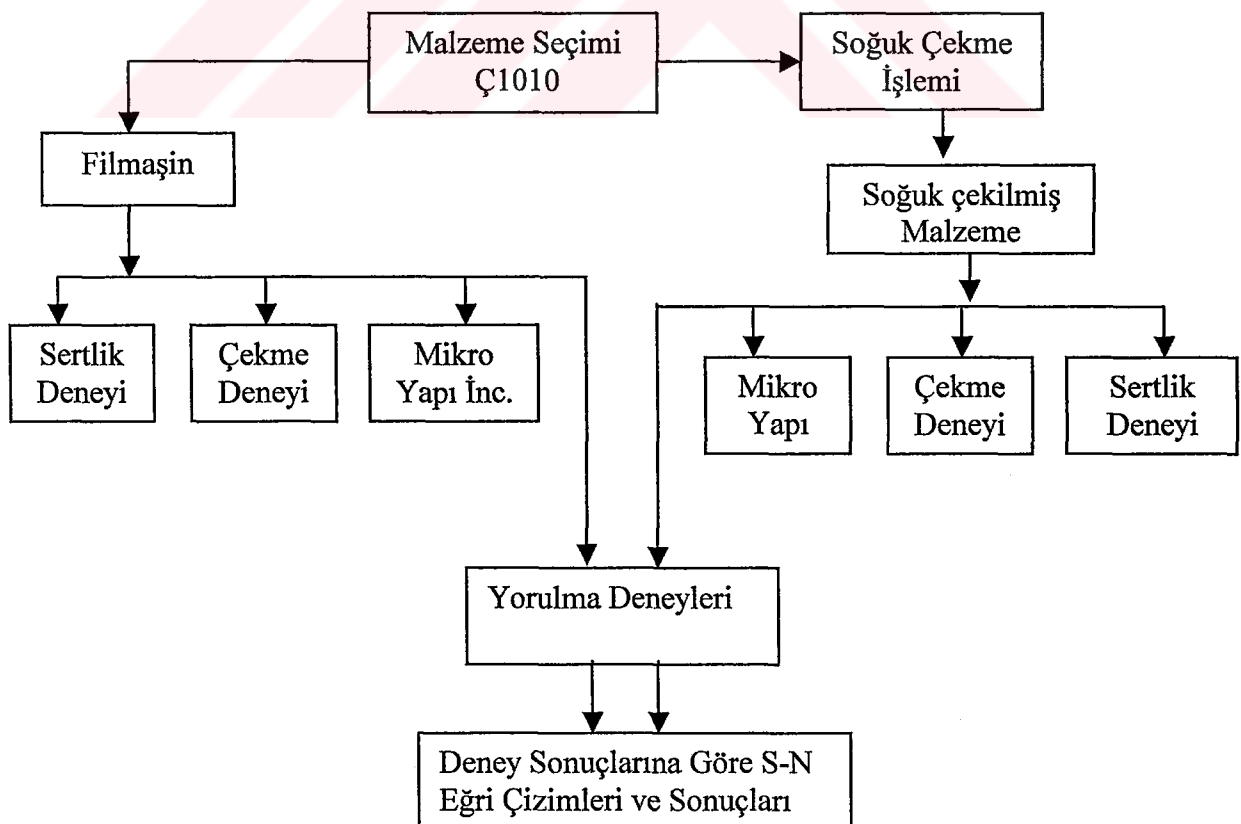
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme ve Deneysel Çalışma Sistematiği

Deneysel çalışmalar için seçilen Ç1010 çelik malzeme, soğuk çekme işleminden sonra birçok endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılan bir malzemedir. Soğuk çekilmiş malzeme endüstride, silinmiş malzeme; sıcak üretilmiş malzemede filmaşın olarak adlandırılmaktadır. Ç1010 çeliğinin kimyasal analizi Çizelge 5.1. de verilmektedir.

Çizelge 5.1. Ç1010 çeliğinin % olarak kimyasal analizi

C	Mn	Si	P(max)	S(max)
0,7 - 0,14	0,40 - 0,65	0,05 - 0,15	0,026	0,045



Şekil 5.1 Deneysel çalışmalar

Tez süresince yapılan deneysel çalışmalar Şekil 5.1. verilmektedir.

5.2. Soğuk Çekme Numunelerinin Hazırlanması

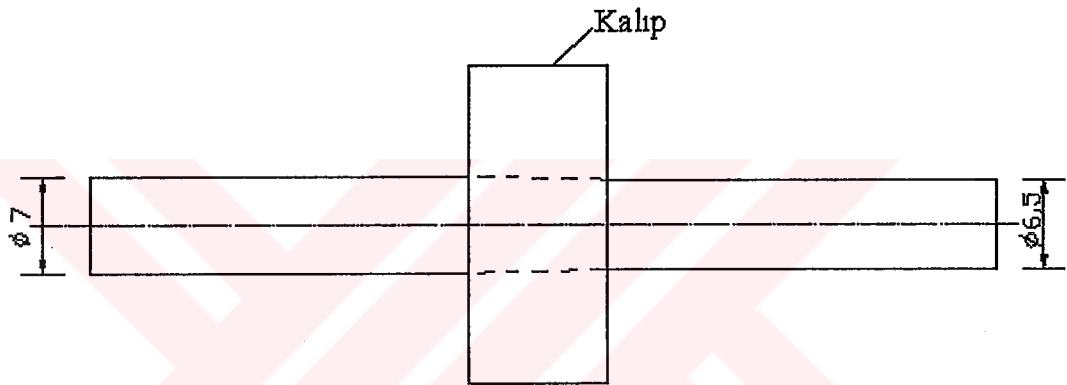
Soğuk çekme numunelerinin hazırlık aşamaları; oksit giderme, yüzey temizleme ve yağlayıcı olmak üzere üç aşamada yapılmıştır.

Soğuk çekme numuneleri hazırlıklarının ilk aşaması oksit giderme işlemidir, Ø 7 mm'lik sıcak çekme ile üretilmiş Ç1010 çeliği, ilk olarak kumlama ile yapılan oksit giderme işlemi; S 230 (Düşük karbonlu çelik bilyalar, beyitlik yapıdadır.) bilyaları ile olup, 3000 dev / dak. da yüksek devirle dönen türbinler sayesinde, çok yüksek hızlarda malzeme yüzeyine savrulur. Savrulmanın etkisi ile yüksek hızda malzeme yüzeyine çarpan kum, oksit tabakasının kırılmasına ve de dökülmesine neden olmuştur. Bilya izleri aynı zamanda çekme yağının yüzeyde tutunmasını sağlamıştır.

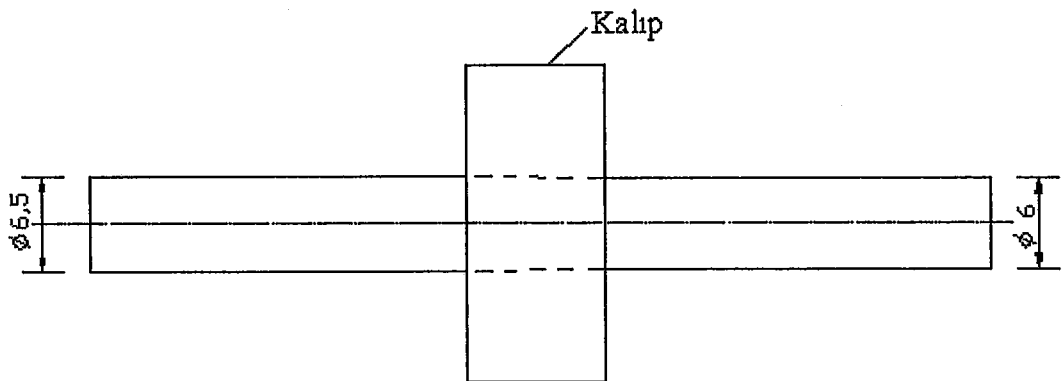
Soğuk çekme numunelerinin hazırlık aşamalarından ikincisi de yüzey temizleme işlemidir. Malzemenin cinsine göre ve soğuk çekme işlemine göre kaplama yapılmaktadır. Kumlama ile yüzeyi temizlenen filmaşın tekrar oksitlenmemesi için kireç kaplama yapılmıştır. Kireç kaplamada filmaşın 90 °C kireç suyu banyosuna daldırılmıştır. Kaplamanın sağlıklı olabilmesi için malzeme sıcaklığı banyo sıcaklığına ulaşıncaya kadar işlem devam etmiştir. Kireç banyosunun sirkülasyonu, kaplamanın daha homojen olmasını sağlamaktadır.

Soğuk çekme numunelerinin hazırlanışında, son aşamada ise, yağlayıcı kullanılmaktadır. Yağlayıcı malzemeye göre değişim göstermektedir. Ç1010 çeliğinde soğuk çekme öncesi yağlayıcı olarak mineral yağ kullanılarak, soğuk çekme işlemi sırasında sürtünme en aza indirilerek daha kolay ve hassas yüzey oluşturularak soğuk çekme yapılmıştır. Soğuk çekme işleminden sonra yüzey her hangi bir temizleme işlemine tabii tutulmaya gerek görülmemiştir. Çünkü, yüzeyde kalan yağlı tabaka tekrar oksitlenmesini önlemektedir.

Ç1010 çeliği, Ø 7 mm çapında sıcak çekme ile üretilmiştir. Bu malzemeye soğuk çekme işlemi kademeli olarak yapılmıştır. İlk kademedede 6,5 mm (Şekil 5.2) ve ikinci kademedede ise 6 mm (Şekil 5.3) çapa düşürülmüştür. İlk kademedede soğuk çekmeye hazırlık aşamaları uygulanırken, ikinci kademedede sadece yağlama yapılmaktadır. Ø 7 mm'den 6mm çapa düşürülen Ç1010 çeliğinde, toplam % 15'lik bir soğuk deformasyon gerçekleşmiş olmaktadır.



Şekil 5.2. Ç1010 çeliği ilk kademe soğuk çekimi



Şekil 5.3. Ç1010 çeliği ikinci kademe soğuk çekimi

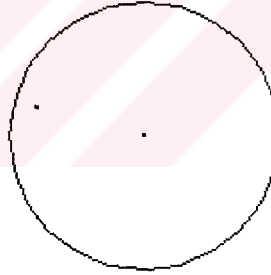
Şekil 5.2. de görüldüğü gibi Ç1010 filmaşını, Ø 7 mm çaptan, yüzey hazırlama işlemleri yapılarak Ø 6,5 mm'ye düşürülmüştür. Aynı malzeme Şekil 5.3. de

görüldüğü gibi $\varnothing$ 6,5 mm çaptan $\varnothing$ 6 mm'ye düşürülmüştür. İkinci kademedeki kalıp gerekli görüldüğü takdirde yağlanmıştır.

5.3. Sertlik Deneyi

Sertlik deneyi için kullanılan numuneler, önce numuneler uygun boyutlarda kesilerek bakalitle gömülmüştür. Bunu takiben zımparalama işlemine geçilmiş ve sırası ile 180, 220, 320, 500, 800, ve 1200 numaralı zımparalar ile numunelerin yüzeyleri zımparalanmıştır. Sertlik ölçümleri Instron Wolpart marka deney cihazında, Vickers yöntemi ile 1 kg yük uygulanarak yapılmıştır.

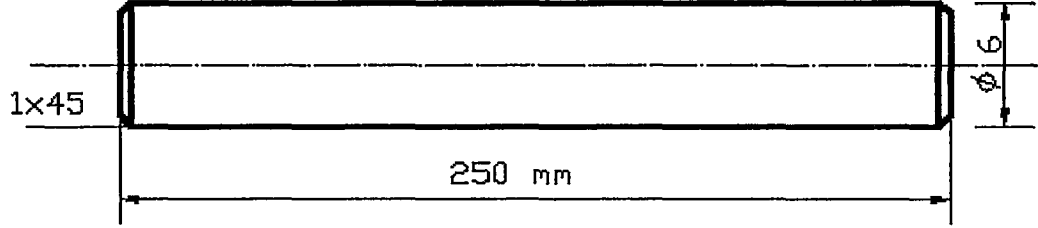
Filmaşın ve soğuk çekilmiş malzemelerden 6 şar adet numune hazırlanarak, yüzey ve merkezden ölçmeler yapılmıştır. Daha sonra değerlerin ortalaması alınmıştır. Şekil 5.4 de sertliklerin alınış bölgeleri görülmektedir.



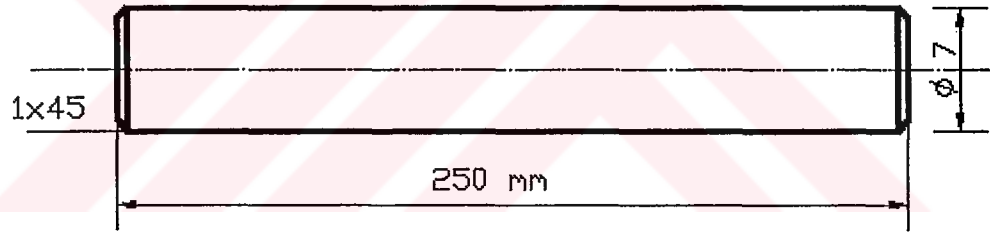
Şekil 5.4. Sertlik ölçüm bölgeleri

5.4. Çekme Deneyi

Yapılan çalışmada soğuk çekilmiş numunelerin yüzeyindeki kalıntı gerilmelerin yok olmaması için herhangi bir işlem uygulanamamaktadır. Filmaşın malzeme ve soğuk çekilmiş numuneler uygun standartlarda hazırlanmamıştır. Şekil 5.5 ve 5.6'da görüldüğü gibi numune boyutları belirlenerek hazırlanmıştır. Her numuneden 6 şar adet hazırlanarak çekme deneyi yapılmıştır.



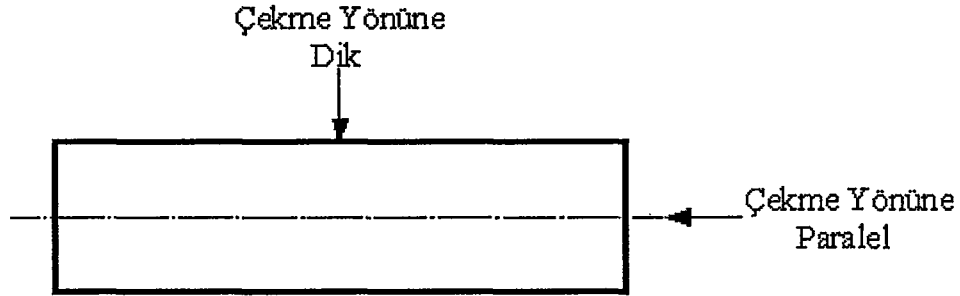
Şekil 5.5. Soğuk çekilmiş malzemenin çekme numunesi



Şekil 5.6 Filmaşın malzemenin çekme numunesi

5.5. Mikroyapı İncelemesi

Mikroyapı incelemelesi amacıyla, filmaşın ve soğuk çekilmiş malzemeye göre iki değişik yönde deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelerin alındığı yönler şekil 5.7 görülmektedir.

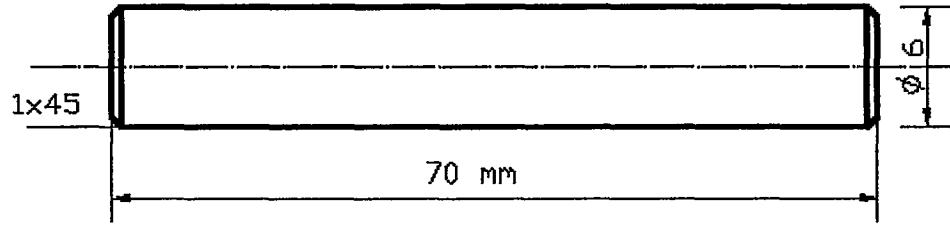


Şekil 5.7. Değişik tip mikroyapı numuneleri

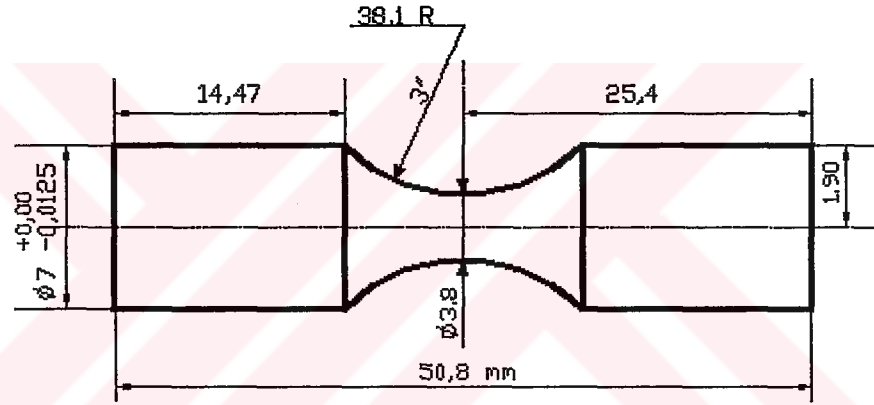
Şekil 5.7. de görülen ok yönlerinde, filmaşın ve soğuk çekilmiş çubuklardan çekme yönünde ve çekme yönüne dik olarak kesilmek suretiyle numuneler bakalitle gömülmüştür. Bunu takiben zımparalama işlemine geçilmiş ve sırası ile 180, 220, 320, 500, 800 ve 1200 numaralı zımparalar ile numunelerin yüzeyleri parlatılmaya hazırlanmıştır. Parlatma işlemi, sırasıyla 6 ve 1 mikronluk elmas pasta ile yağlayıcı sıvı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra, Ç1010 numuneler % 2'lik nital çözeltisi (2 ml HNO_3 + 98 ml etanol) ile, dağlanarak mikroyapılar elde edilmiştir. Olympus marka optik mikroskopla mikroyapı resimleri çekilmiştir.

5.6. Yorulma Numunelerinin Hazırlanışı ve Deneyi

Çekme numunelerinin hazırlanışında bahsedildiği gibi, soğuk çekilmiş malzemelerden numune hazırlamada, standart numune yerine çekme işlemi sonrası numuneler doğrudan test edilmiştir. Yüzeyde işlem yapılmamasına özellikle dikkat edilerek yüzeyde bulunan basma kalıntı gerilmeleri korunmuştur. Filmaşın malzemedde ise, uygun standartta numuneler hazırlanmıştır. Yorulma numuneleri Şekil 5.8. ve Şekil 5.9 da şematik olarak verildiği gibi hazırlanmıştır. Burada numune boyutları farklı olmasına karşın yorulma deneyleri sırasında kesitteki gerilme değerleri her iki numune içinde sabit tutulmuştur.



Şekil 5.8. Soğuk çekilmiş malzemenin yorulma deney numunesi

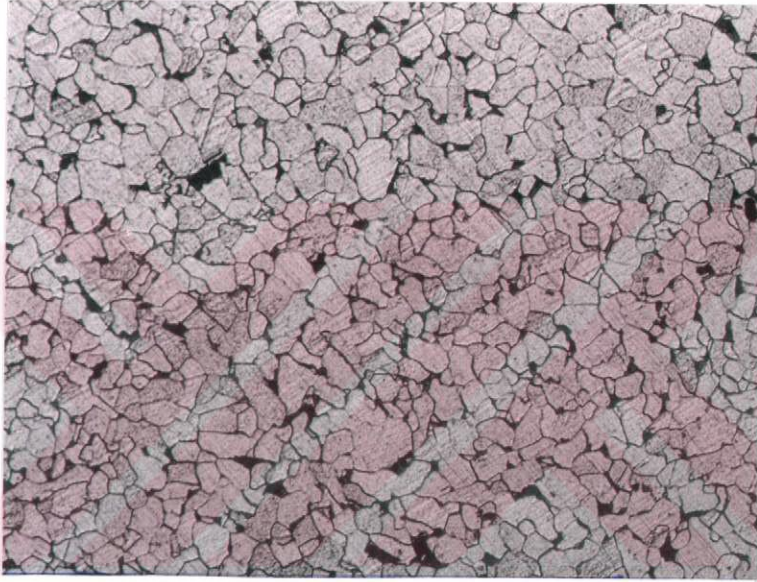


Şekil 5.9. Filmaşın malzemenin yorulma deney numunesi

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. Mikroyapı Sonuçları ve Tartışma

Ç1010 çeliğinin çekme yönüne dik kesitten alınan mikroyapı Şekil 6.1. de verilmektedir. Soğuk çekilmiş Ç1010 çeliğinin çekme yönüne dik mikroyapısı ise, Şekil 6.2 de görülmektedir.

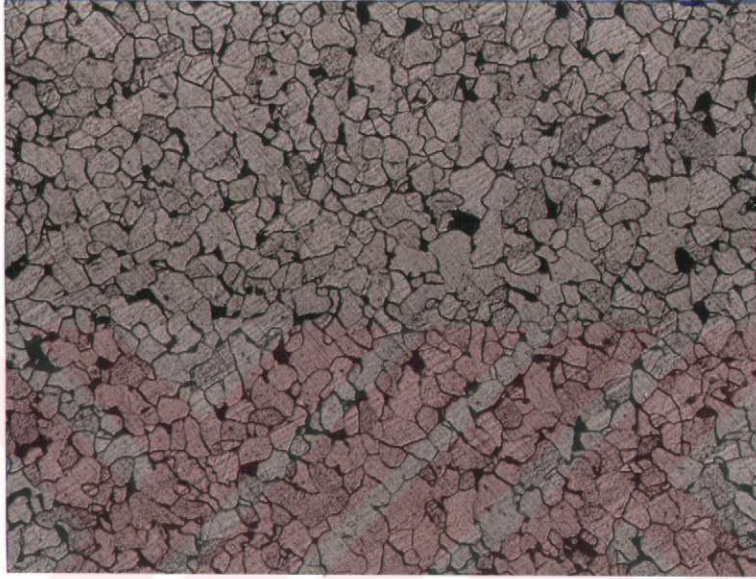


Şekil 6.1. Ç1010 filmaşının çekme yönüne dik mikroyapısı $\times 100$

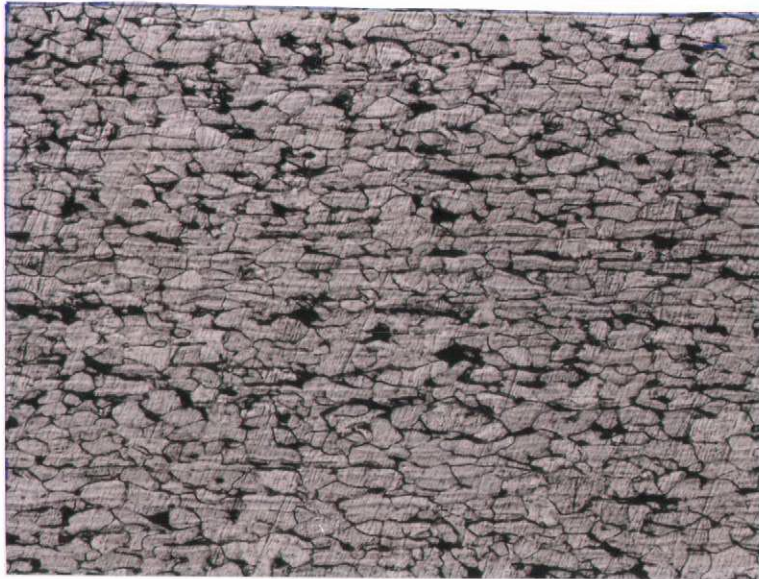


Şekil 6.2. Ç1010 soğuk çekilmiş malzemenin çekme yönüne dik mikroyapısı $\times 100$

Ç 1010 filmaşının çekme yönüne paralel mikroyapısı Şekil 6.3 de verilmiştir. Ç1010 soğuk çekilmiş malzemenin çekme yönüne paralel yönde mikroyapısı ise, Şekil 6.4. de verilmektedir.



Şekil 6.3. Ç1010 filmaşının çekme yönüne paralel mikroyapısı $\times 100$



Şekil 6.4. Ç1010 soğuk çekilmiş çekme yönüne paralel mikroyapısı $\times 100$

Filmaşın malzemede çekmeye paralel yönde eş eksenli ve homojen, çekme yönüne dik yönde de nispeten küçük ama yine eş eksenli ve homojen bir mikroyapı görülmektedir.

Soğuk çekilmiş malzemenin mikroyapısında ise, uzamış taneler görülmektedir. Çekme yönüne paralel soğuk çekilmiş numunelerde soğuk çekmenin etkisi ile taneleri çekme yönünde uzadığı görülmektedir. Ç1010 çeliğinde oluşan soğuk deformasyon nedeniyle tanelerdeki homojenlik bozulmuş ve taneler çekme yönünde uzamıştır. Soğuk çekilmiş numunelerin çekme yönüne dik mikroyapı fotoğrafında ise, eş eksenli ve çekilmemiş numune tane yapısına göre nispeten küçük taneler görülmektedir. Bunun nedeni, soğuk deformasyonla malzemelerin taneleri çekme yönünde uzamış olmasından dolayı tanelerin çekme yönüne dik mikroyapısında (Şekil 6.2.) görülen, boyut küçülmesi nedenidir.

Filmaşın ve soğuk çekilmiş malzemenin fotoğrafları karşılaştırıldığında soğuk çekilmiş malzemede çekme yönüne paralel yönde uzamış taneler görülürken (Şekil6.4) ,filmaşın malzemede çekme yönüne paralel yönde eş eksenli ve homojen bir tane yapısı görülmektedir(Şekil 6.3). Soğuk çekilmiş malzemede; soğuk çekme yönüne dik yönde küçük ama eş eksenli mikroyapı gözlenirken (Şekil 6.2), filmaşın malzemede çekme yönüne dik yönde mikroyapıda iri ve homojen bir tane yapısı görülmektedir (Şekil 6.1). Buradan soğuk çekmenin yönünde tanelerin uzadığı ve aynı malzemeye dik bakıldığında ise tanelerin uzamalardan dolayı tane kesitlerinde bir daralma, bunun sonucu olarak bir küçülme olduğu gözlenmiştir.

a) Tane boyutu

Filmaşın malzemenin mikroyapısı üzerinde $\times 100$ büyütmede, tane boyutu ve ASTM numarası hesaplanmıştır. ASTM numarası (6.1)'deki formülden hesaplanmıştır.

$$N = 2^{n+3} \quad (6.1)$$

N : Tane Sayısı

n : ASTM Numarası

Bir kenarı 10 cm olacak şekilde $\times 100$ büyütme ile çekilmiş fotoğraf üzerine kare bir saydam çerçeve yerleştirilerek taneler sayılmıştır. Karenin kenarına gelip kesilen taneler 0,5 tane olarak hesaplanmıştır. Beş ayrı bölgeden sayılan tanelerin ortalaması 526'dır. Buna göre malzeme tane boyutu ASTM numarası 6 olarak bulunmuştur.

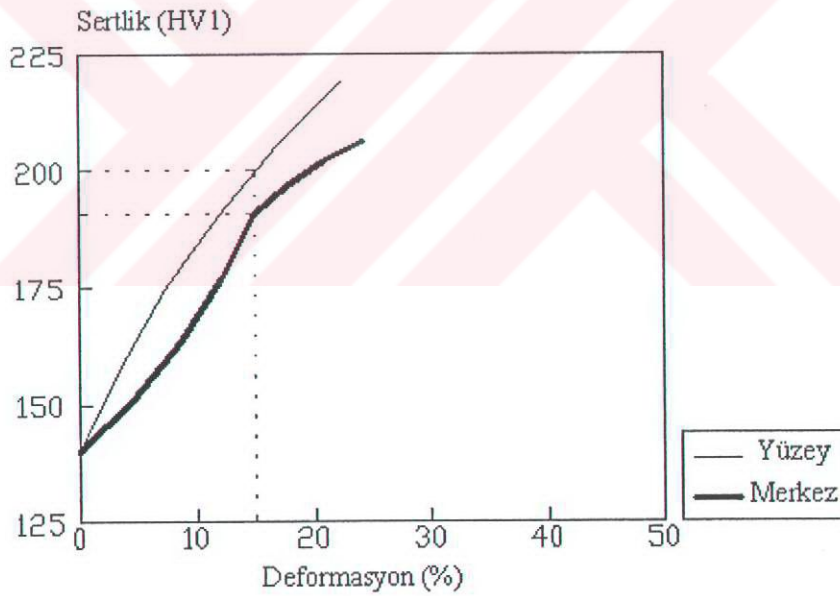
6.2. Sertlik Deney Sonuçları ve Tartışma

Sertlik numunelerinde, filmaşın ve soğuk çekilmiş malzemelerden çekme yönüne dik olarak, yüzey ve merkez olmak üzere Vickers sertlik değerleri alınmıştır. Filmaşın malzemenin sertlik değerleri her tarafında yaklaşık 140 HV civarındadır. Soğuk çekilmiş malzemenin ise, yüzeye yakın yerlerdeki sertlik değerleri 202 HV iken, merkezde 192 HV sertlik değerinde olduğu ölçülmüştür.

Yapılan Vickers sertlik deneylerinde 1 kg yük kullanılmış ve yüzey merkeze göre daha fazla sert olduğu ortaya çıkmıştır(Şekil 6.5.). Bunun nedeni ise, yüzeyde meydana gelen soğuk deformasyonun merkeze göre daha fazla olmasındandır. Filmaşın ve soğuk çekilmiş malzemenin Vickers sertlik sonuçları ve diğer sertliklere çevrimi Çizelge 6.1 de verilmiştir. Ç1010 çeliğinde % 15 deformasyon ile yüzeyde % 45 ve merkezde % 37 oranında bir sertleşme gözlenmiştir(Şekil 4.6.5.). Soğuk çekme işleminde kalıbın malzemeye uyguladığı basma gerilmesi ile oluşan soğuk deformasyon Ç1010 çeliğinin sertliğini arttırmıştır.

Çizelge 6.1. Sertlik sonuçları

Malzeme	Vickers Sertlik Değeri (1 kg)		Brinell Sertlik Değeri (3000 kg)		Rocwell Sertlik Değeri HR _B (100 kg)	
	Yüzey	Merkez	Yüzey	Merkez	Yüzey	Merkez
Filmaşın	140	140	140	140	76	76
Soğuk Çekilmiş Malzeme	202	192	202	192	93	90



Şekil 6.5. Yüzey ve merkez arasında sertlik farkı

6.3. Çekme Testlerinin Sonuçları ve Tartışma

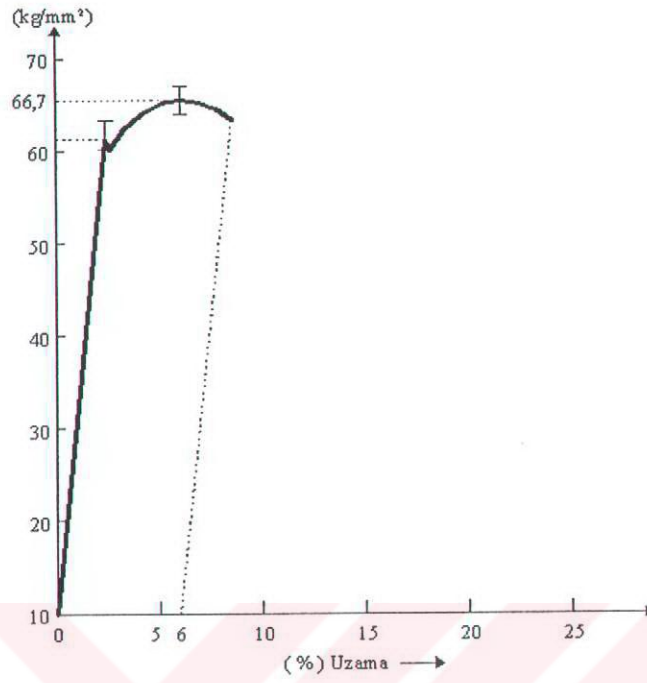
Çekme sonuçlarında, filmaşın ile soğuk çekilmiş malzeme arasında çok belirgin fark oluşmuştur. Akma dayanımı filmaşında $33,56 \text{ kg/mm}^2$ iken, soğuk çekme sonucunda $61,1 \text{ kg/mm}^2$ olmuştur. Maksimum çekme dayanımı $44,95 \text{ kg/mm}^2$ iken, soğuk çekme sonucunda dayanım $65,1 \text{ kg/mm}^2$ çıkmıştır. Ancak, çizelge 6.2. den de

görülebileceği gibi, filmaşın malzemenin sünekliği % 19,1 olmasına karşın soğuk çekilen malzemede bu % 6'ya düşmüştür.

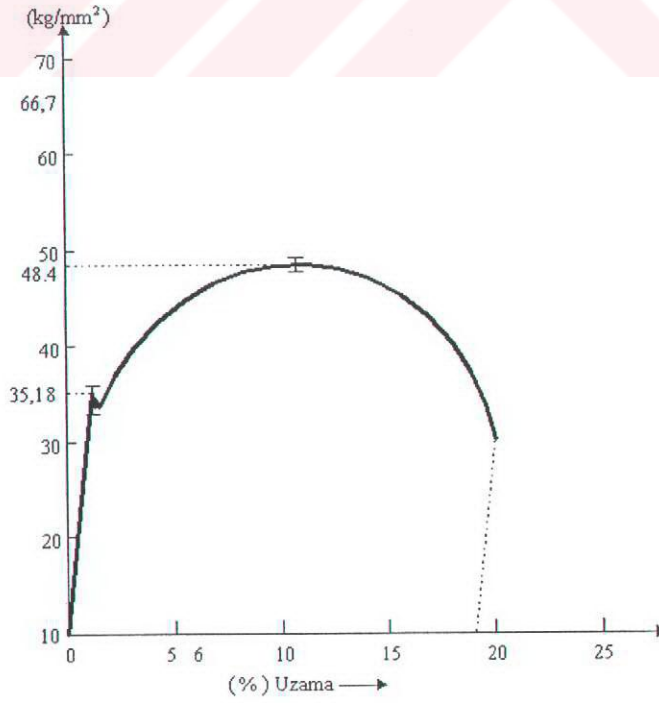
Çizelge 6.2. Çekme test sonuçları

Malzeme	Akma Dayanımı (kg/mm ²)	Çekme Dayanımı (kg/mm ²)	Kopma Dayanımı (kg/mm ²)	% Uzama
Filmaşın	33,56	44,95	30,1	19,1
Soğuk Çekilmiş Malzeme	61,1	65,1	63	6

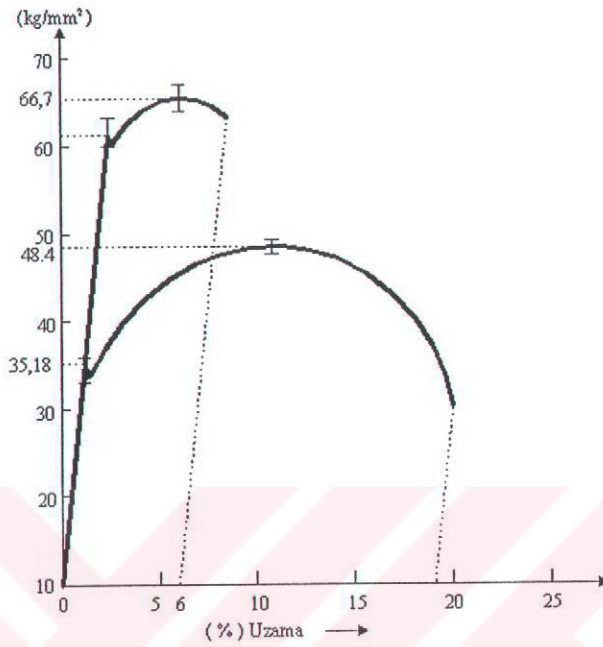
Yapılan soğuk çekme işleminde, malzemenin çekme testleri sonucunda tokluğunun çok düşük olduğu gözlenmiştir(Şekil 6.6). Filmaşın malzemede ise, tokluk daha fazladır(Şekil 6.7). Bunun nedeni, sıcak olarak çekilen Ç1010 filmaşının tokluğunun iyi olması, soğuk çekme işleminde pekleşme neticesinde tokluğun çok belirgin bir şekilde azalmasına neden olmuştur.



Şekil 6.6. Soğuk çekilmiş Ç1010 malzemesinin çekme testi sonucu



Şekil 6.7. Filmaşın Ç1010 malzemesinin çekme testi sonucu



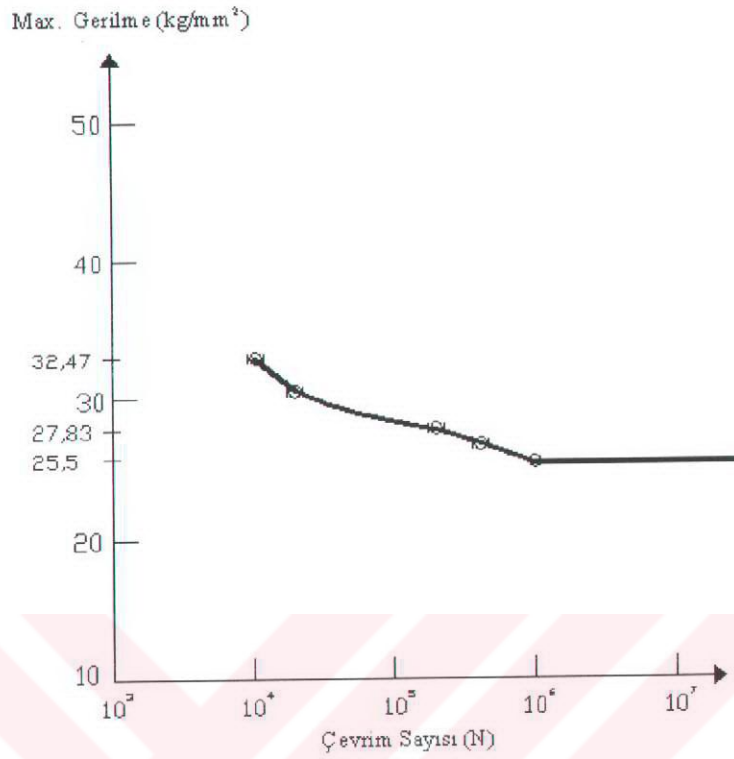
Şekil 6.8. Filmaşın ve soğuk çekilmiş malzemenin çekme testi sonucu

Şekil 6.8.'de de görüldüğü gibi soğuk deformasyonla akma ve çekme dayanımı artarken, süneklik ve tokluk azalmıştır.

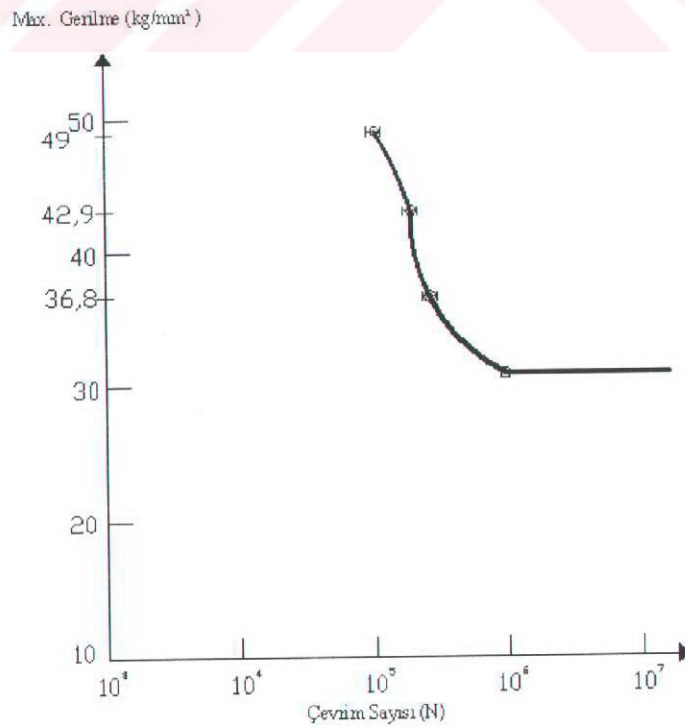
6.4. Yorulma Deneyi ve Tartışma

Yorulma deneyleri Serbest Uçlu Kiriş test düzeneği ile, oda sıcaklığında yapılmıştır. Deneylerde her nokta için 6'şar adet numune kullanılmış ve elektrik kesintisi gibi durumlarda numune bir daha kullanılmamıştır.

Yapılan deneylerde soğuk çekilmiş malzemede yorulma sınırı filmaşın malzemeye göre 5 kg/mm^2 artmıştır. Filmaşın malzemede 32 kg/mm^2 gerilimde yaklaşık 2.10^4 döngüde kırılırken (Şekil 6.9), soğuk çekilmiş malzemede aynı gerilimde 10^5 döngü (Şekil 6.10) civarındadır.

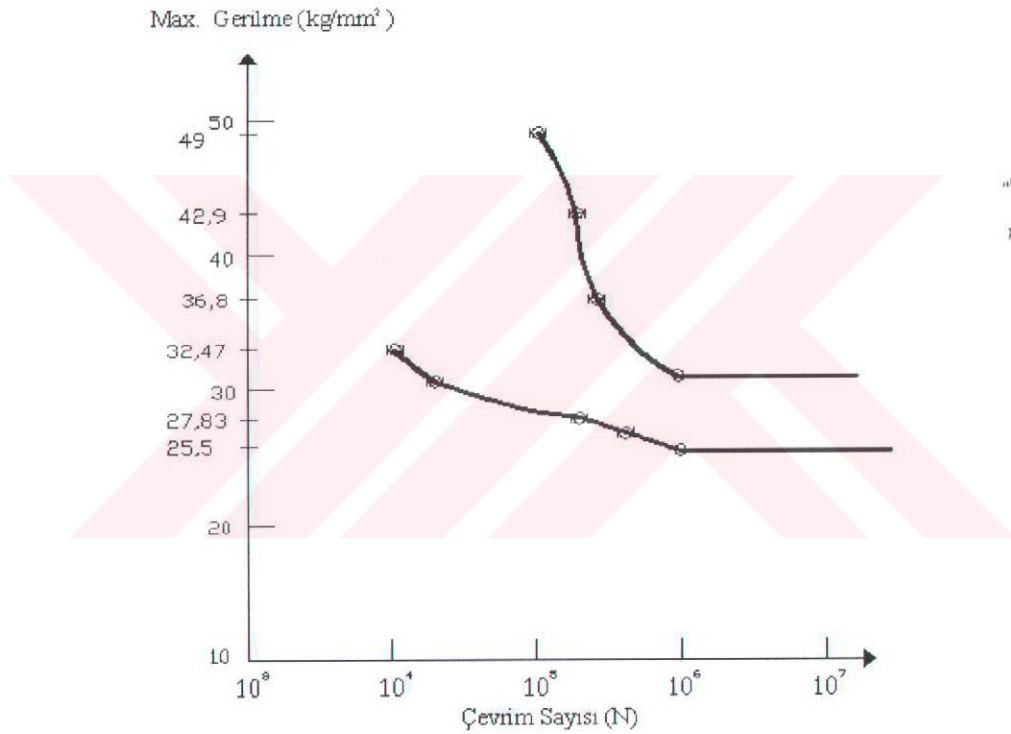


Şekil 6.9. Filmaşım malzemenin S – N grafiği



Şekil 6.10. Soğuk çekilmiş malzemenin S – N grafiği

Soğuk çekme işlemi ile oluşan Ç1010 çeliğinin yüzeyindeki kalıcı basma gerilimleri, yorulma dayanımını arttırmaktadır. Yüzeyde oluşan kalıcı basma gerilmesi, yorulma esnasında oluşan tekrarlı çekme gerilimine karşılık gelerek, yorulma döngü sayısını arttırmış yada yorulma sınırını yukarı çekmiştir. Burada kalıcı basma geriliminin yorulma dayanımına olumlu etkisi de görülmektedir.



Şekil 6.11. Filmaşın ve soğuk çekilmiş malzemenin S – N grafiği

Filmaşın malzemenin yorulma sınırı 25,5 kg / mm² iken (Şekil 6.9), Soğuk çekilmiş malzemede 30,1 kg / mm² 'dir (Şekil 6.10). Yaklaşık olarak 5 kg / mm² soğuk çekilmiş malzemede yorulma sınırının yükseldiğini gözlemlenmiştir. Aynı zamanda filmaşın malzemede 32 kg / mm² de 10⁴ döngüde kırılırken, soğuk çekilmiş malzemede ise Şekil 6.11 de görüldüğü gibi, 9. 10⁵ döngüde kırılmıştır. Yapılan çekme ve sertlik testlerindeki artışların yorulmada da paralel olarak arttığı gözlenmiştir.

Her iki malzemedede de 10^6 çevrimden sonra yorulma kırılması olmamıştır. Şekil 6.11 de görüldüğü gibi soğuk çekme işleminde meydana gelen kalıntı basma gerilmeleri sebebiyle soğuk çekme işleminin olumlu katkısı olmaktadır.



6.5. Sonuçlar

Saft, cıvata, makine elemanı, v.s. gibi kısımlarda soğuk çekilmiş malzeme kullanılır. Çünkü, soğuk çekilmiş malzeme kullanıma hazır olarak üretilir. Soğuk çekilmiş malzemeye ek bir işlem yapılmamaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda şu sonuçlar elde edilmiştir;

- 1) Soğuk ekme işlemi ile malzemenin çekme dayanımı % 45 artarken, akma dayanımı % 72 oranında artmıştır.
- 2) Soğuk ekme işlemi ile malzemenin sertliği yüzeyde % 45 artarken, merkezde % 37 oranında arttığı gözlenmiştir.
- 3) Mikroyapıda ise, soğuk çekme işlemiyle hemen hemen tüm kesit boyunca taneler çekme yönünde uzarken ters yönde tane kesiti nispeten küçülmüştür.
- 4) Soğuk ekme işlemi, 1010 çeliğinin yorulma dayanımını % 22 oranında artırmıştır.
- 5) Soğuk ekme işlemi ile süneklik % 68 azalırken, toklukta yaklaşık aynı oranda azalmıştır.

KAYNAKLAR

1. Tarakçılar, A. R., 1992, The Effect of Cold Drawing on The Steel, **Dok. Eyl. Üniv.**, İzmir, 4 – 74.
2. Tekkaya, A. E., Gerhardt, J., 1985, Residual Stresses in Cold-Formed Workpieces, **Annals of the CIRP**, Vol. 34, No.1, 225 – 230.
3. Kandemir, K., Çetin, A., ve Ası, O., 2000, Üretim aşamasında makine parçalarının yorulma dayanımını artırıcı önlemlerin alınması, **MMO**, Temmuz, Sayı.486, 23 – 30.
4. Aktaş, a., Demir, H., 2002, 7075 Alüminyum alaşımının bilyalı dövme davranışı, **G.Ü. Fen Bil. Ens. Derg.**, Ocak, Cilt:15, No:1, 163 – 175.
5. Pıhtılı, H., Özler, L., 1997, Yay tellerinde yorulma ve yorulma deneylerinde izlenecek temel prensipler, **MMO**, Sayı.447, 31 – 38.
6. Hacıfazlıoğlu, Ş., 1994, Kaymalı yataklarda hasar türleri, **MMO**, Nisan, Sayı.411, 17-22
7. Varol, R., Bedir, F., 1993, Artık gerilmelerin önemi ve yorulma limiti üzerine etkisi, **MMO**, Kasım, Sayı.406, 38 – 44.
8. İmrak, C. E., Fetvacı, C., 1993, Makine parçalarının yorulma dayanımını artık gerilmeler yardımıyla artırma, **MMO**, Ağustos, Sayı.403, 26 – 32.
9. Dieter, G.E., 1998, Mechanical Metallurgy, **McGraw-Hill Inc**, 25 – 115.
10. Kayalı, S., Ensari C., 1985, Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamalar **İTÜ**,
11. Çapan, L., 1999, Metallere Plastik Şekil Verme, **Çağlayan Kitabevi**, 291 – 309
12. **Metals Handbook**, 1992, Ninth Edition, Forming and Forging, V. 14, 330 – 380. **ASM Handbook**, 1992, Textured Structure, Metallurgy and Microstructure, V.9, 599–706.
13. Kalpakjian, S., 1991, Manufacturing Proses for Engineerings Materials, **Addision - Wesley Puplishing**, 376 –388.
14. Mielnik, E. M., 1991, Metal Working Science and Engineering, **M.C. Graw-Hill Inc.**, Newyork, 396 – 417.
15. Langford, G., 1970, A Study of the Deformation of Patended Steel Wire, **Metallurgical Transactions**, Vol:1, 465 – 470.

16. Webster, P. J. and Mills G., 1998, Residual stress in steel strand, 4 Physical B., 241-1273.
19. **ASM Handbook**, 1992, Friction, Lubrication and Wear Tecnology, Metal Working Labrications, V.18, 132 – 150.
18. **Metals Handbook**, 1992, Failure Analysis and Prevantion, V. 11, 314 – 450.
19. Sarafianos, N., 1989, Environmentally Assisted Crackingof High Strength Carbon Steel Patented Wire, **Journal of Met. Sci. Letters**, 1486 – 2488.
20. Porter, D. A., Easterlig K. E. and Smith G: D. W., 1978, Dinamic studies of the tensile deformation, **Acta Met.**, Vol. 26, 1405 – 1422.
21. Cnikalov, V. Y., Poltaratski L. M., Prigov V. A., Gromov V. E. and Zakirov, 1996, Effect of the structure of low carbon steels deformability on cold drawing, **Steel in Translation**, Vol.26, No:2, 65 – 68.
22. Askeland, D.R., 1998, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Çeviren: Erdoğan M., **Nobel Yayınevi**, 114 – 117.
23. Vlack, L. H. V., 1993, Malzeme Bilimine Giriş, Çeviren: Safaoğlu, R. A., **Birsen Yayınevi**, 4. Baskı, 23 – 121.
24. Postacıoğlu, B., 1990, Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, **İTÜ**, 492 – 558.
25. Şavaşkan, T., 1999, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, **Derya Yayınevi**, Trabzon, 237-278.
26. Topbaş, M. A., 1992, Çeliğin Isıl İşlemi, **Yıl. Üniv. Yay.**, İstanbul.
27. Akkurt, M., 1975, Makine Elemanları, **İTÜ Yayını**, Cilt 1, İstanbul, 34 – 240.
28. Bayraktar, N., 1993, Bilyalı dövme teori ve uygulaması, **MMO**, Ekim, Sayı.405, 15 – 25.
29. Aydın, M., Küçükömeroğlu, T., ve Savaşkan, T., 1997, Çinko aliminyum esaslı alaşımların yorulma özelliklerinin incelenmesi, **MMO**, Ocak, Sayı.444, 40 – 46.
30. Meyers, M. A., Chawla, K. K., 1995, Mechanical Behavior of Materials, 593 – 636.

ÖZGEÇMİŞ

Cemal ÇARBOĞA 1977 yılında Sivas ili Gemerek ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Özel İdare İlkokulu'nda, orta okulu Atatürk Lisesi'nin orta kısmında ve liseyi de Endüstri Meslek Lisesi Metal İşleri Bölümü'nde okudu. 1995 yılında Gazi Üniversitesi Metal Öğretmenliği Bölümü'nü kazandı ve 1999 yılında mezun oldu. 1999 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Aynı yıl Milli Eğitim Bakanlığı tarafından öğretmen olarak atandı. Halen bu görevine devam etmektedir.



TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMAN İŞLERİ MERKEZİ