

**AISI 1020 ÇELİKLERİNDE BORLAMANIN
YORULMA DAYANIMINA ETKİSİ**

Murat SAYGIN

**Yüksek Lisans Tezi
Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı
Kasım 2006**

**THE EFFECT OF BORIDING ON FATIGUE
PROPERTIES OF AISI 1020 STEELS**

Murat SAYGIN

**Master of Science Thesis
Metallurgical Engineering Program
November 2006**

**AISI 1020 ÇELİKLERİNDE BORLAMANIN
YORULMA DAYANIMINA ETKİSİ**

Murat SAYGIN

Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Eskişehir 2006

Murat SAYGIN'ın yüksek lisans tezi olarak hazırladığı “**1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisi**” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK
(Danışman)

Üye : Prof. Dr. Macit YAMAN

Üye : Prof. Dr. Orhan Şerif KOMAÇ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

AISI 1020 ÇELİKLERİNDE BORLAMANIN YORULMA DAYANIMINA ETKİSİ

Murat SAYGIN

ÖZET

Borlama ısıtıl işlemleri çelik malzemelere uygulanan önemli yüzey sertleştirme ısıtıl işlemlerinden birisidir. Bu yöntemle çelik malzemelerin yüzeylerinde aşınmaya ve çalışma koşullarına yüksek dayanım gösterebilen borür tabakası elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada AISI 1020 çeliklerinden imal edilmiş olan yorulma numuneleri 900-950-1000 ve 1050 °C’de 2 – 4 ve 6 saat sürelerle borlanmıştır. Borlanmış numuneler eğilmeli yorulma deneyine tabi tutulmuş ve yorulma ömürleri tespit edilmiştir. Özellikle borlama ısıtıl işlem koşullarının yorulma ömrü üzerine etkisi ortaya çıkarılmıştır.

**THE EFFECT OF BORIDING ON FATIGUE
PROPERTIES OF AISI 1020 STEELS**

Murat SAYGIN

ABSTRACT

Boronizing is a kind of surface hardening heat treatment which is mostly applied to the steel materials. By the help of this method a boron layer form on the surface of the steel and that gain a corrosion and advanced endurance at the working conditions.

In this thesis AISI 1020 type of steels exposed to a boronizing process in 900-950-1000 and 1050 °C at 2-4-6 hours. Boronizing steels subjected to the bending. Fatigue test and then the fatigue lifes are observed. Especially emphasis on, how the condition of the boronizing process effect the fatigue life.

TEŞEKKÜR

Günümüzde ülkemiz için önem taşıyan bor bileşiklerinin değerlendirilmesi konusunda çalışmamı sağlayan, çalışma süresince bilgi ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK hocama; deney ve tez aşamasında tecrübelerinden ve bilgilerinden faydalandığım hocalarım Araş. Gör. Mustafa ULUTAN ve Araş. Gör. Neşe ÖZTÜRK KÖRPE'ye; Yüksek Lisansımı tamamlamada her türlü kolaylığı gösteren SÖRMAŞ Refrakter Malzemeleri A.Ş. yetkililerine ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
2.ALAŞIMSIZ ÖTEKTOİD ALTI ÇELİKLER	1
3. METALİK MALZEMELERİN YORULMA DENEYİ	2
3.1. Yorulma Çatlağı Oluşumu	5
3.2. Yorulma Deneyi Türleri	5
3.3. Yorulma Deneyi İle İlgili Terimler	6
3.4. Yorulma Deneyi Cihazları	10
3.5. Numuneler	12
3.6. Yorulma Deneyinin Yapılışı	14
3.7. Malzemede Yorulma Olayına Etki Eden Faktörler	15
3.7.1. Malzeme Cinsinin, Bileşiminin ve Yapısının Etkisi	15
3.7.2. Yüzey Özelliklerinin Etkisi	16
3.7.3. Çentik Etkisi	17
3.7.4. Gerilmelerin Etkisi	17
3.7.5. Korozyonun Etkisi	18
3.7.6. Sıcaklığın Etkisi	18
3.7.7. Frekansın (Deney Hızının) Etkisi	19
4. BOR HAKKINDA GENEL BİLGİ	20
4.1. Bor Elementi	20
4.2. Dünyada Mevcut Durum	20
4.3. Türkiye'deki Mevcut Durum	21
5. BORLAMA	22
5.1. Borür Tabakası Çeşitleri	25
5.2. Borür Tabakasının Özellikleri	25

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
6.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	27
6.2. Deney Programı	28
6.3. Metalografik Çalışmalar	30
6.4. Deney Sonuçları	39
7. GENEL SONUÇLAR VE İRDELEME	46
KAYNAKLAR DİZİNİ	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Dönen Destekli Kiriş Yorulma Test Düzeneği	4
Şekil 3.2. Yorulma deneyi ile ilgili tipik gerilme – zaman eğrileri	8
Şekil 3.3. Farklı gerilme değişimlerini gösteren örnekler	8
Şekil 3.4. Demir ve Demir Dışı malzemelere ait tipik S – N eğrileri.	9
Şekil 3.5. Numunesinin dört noktasına kuvvet gelen ve dönen eğme gerilmeleri uygulanan “Schenk (Simplex)” modeli yorulma deneyi cihazının çalışma prensibi	11
Şekil 3.6. Eksenel çekme ve basma gerilmeleri uygulayan, sabit gerilme genlikli yorulma deneyi cihazı	11
Şekil 3.7. Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan “Sonntag” modeli yorulma deneyi cihazı	12
Şekil 3.8. ASTM E – 466 ya göre eksenel gerilmeli yorulma deneyi numuneleri	13
Şekil 3.9. Tipik bir sabit yorulma ömrü diyagramı	15
Şekil 5.1. Basit bir paket borlama düzeneği.	23
Şekil 5.2. Borür tabakası çeşitleri.	25
Şekil 6.1. Deneyde kullanılan yorulma numunesi.	27
Şekil 6.2. Katı borlamanın yapıldığı çelik kutu kesiti.	28
Şekil 6.3. Borlama işleminin yapıldığı fırın	29
Şekil 6.4. Deneyde kullanılan Yorulma Cihazı.	30
Şekil 6.5. 1020 çeliği, 900 °C’de 2 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Tabaka kalınlığı ~77.91 µm.	31
Şekil 6.6. 1020 çeliği, 900 °C’de 4 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~118.06 µm.	31
Şekil 6.7. 1020 çeliği, 900 °C’de 6 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~178.13 µm.	31
Şekil 6.8. 1020 çeliği, 950 °C’de 2 saat borlanmış, borlu tabaka,	

matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital.	
Ortalama tabaka kalınlığı ~104.89 μm	32
Şekil 6.9. 1020 çeliği, 950 $^{\circ}\text{C}$ 'de 4 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital.	
Ortalama tabaka kalınlığı ~159.23 μm	32
Şekil 6.10. 1020 çeliği, 950 $^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital.	
Ortalama tabaka kalınlığı ~217.86 μm	32
Şekil 6.11. 1020 çeliği, 1000 $^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital.	
Ortalama tabaka kalınlığı ~134.07 μm	33
Şekil 6.12. 1020 çeliği, 1000 $^{\circ}\text{C}$ 'de 4 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital.	
Ortalama tabaka kalınlığı ~216.68 μm	33
Şekil 6.13. 1020 çeliği, 1000 $^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital.	
Ortalama tabaka kalınlığı ~276.63 μm	33
Şekil 6.14. 1020 çeliği, 1050 $^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital.	
Ortalama tabaka kalınlığı ~186.1 μm	34
Şekil 6.15. 1020 çeliği, 1050 $^{\circ}\text{C}$ 'de 4 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x,%2 Nital.	
Ortalama tabaka kalınlığı ~ 263.17 μm	34
Şekil 6.16. 1020 çeliği, 1050 $^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x,%2 Nital.	
Ortalama tabaka kalınlığı ~366.86 μm	34
Şekil 6.17. Isıl işlem yapılmamış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	35
Şekil 6.18. 900 $^{\circ}\text{C}$ de 2 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	36
Şekil 6.19. 900 $^{\circ}\text{C}$ de 4 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	36

Şekil 6.20. 900 °C de 6 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	36
Şekil 6.21. 950 °C de 2 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	37
Şekil 6.22. 950 °C de 4 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	37
Şekil 6.23. 950 °C de 6 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	38
Şekil 6.24. 1000 °C de 2 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	38
Şekil 6.25. 1000 °C de 4 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	39
Şekil 6.26. 1000 °C de 6 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	39
Şekil 6.27. 1050 °C de 2 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	40
Şekil 6.28. 1050 °C de 4 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	40
Şekil 6.29. 1050 °C de 6 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi	40
Şekil 6.30. 1020 çeliğinin yüzeyden itibaren sertlik (VSD) değerleri	41
Şekil 6.31. Farklı sıcaklık ve sürelerde oluşan tabaka kalınlıkları. (AISI 1020 için)	42

TABLOLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1. Ötektoid altı çeliklerin sınıflandırılması.	2
Tablo 3.1. Yorulma deneyi numunesinde çentik tür ve boyutlarının yorulma dayanımı sınırına etkisi	17
Tablo 4.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri	20
Tablo 4.2. Dünya Bor rezervleri (B ₂ O ₃ bazında)	21
Tablo 4.3. Ticari önemi olan bor mineralleri	21
Tablo 4.4. Türkiye bor tuzu rezervi (* 1000 ton)	22
Tablo 5.1. FeB ve Fe ₂ B fazlarının tipik özellikleri	26
Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi	27
Tablo 6.2. Deney Programı	28
Tablo 6.3. Yorulma deneyi sonuçları	39
Tablo 6.4. İşlem sıcaklığı ve süresinin numunelerdeki tabaka kalınlığına etkisi.....	42

1. GİRİŞ

Çok genel bir tarif olarak, % 2 'den daha az karbon içeren demire çelik adı verilmektedir. % 2 'den fazla karbon içeren alaşım ise Dökme-Demir olarak adlandırılır. (Varol, 2000) Genel tarifte % 2 üst sınırı konulmuş olmakla beraber sade karbonlu takım çeliklerinin dışında kalan çeliklerde karbon % 1,2 değerini pek aşmaz. Çeliklerde; Demir ve Karbonun dışında üretimden gelen Mangan, Silisyum ve az miktarda Fosfor ve Kükürt bulunur. Özellikle P ve S gerek karbon çeliklerinde gerekse alaşımli çeliklerde en düşük miktarda tutulmaya çalışılır. (Varol, 2000)

AISI 1020 çelikleri makine imalat endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Dövmelik parça, soğuk çekilmiş çubuk, tellik çubuk ve dikişsiz boru gibi ürünlerin üretimine uygun yapıdadırlar.

Yorulma dayanımının, borlama ısıl işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliklerinde ısıl işlem parametrelerine bağlı olarak nasıl değiştiği, bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan yorulma numuneleri katı ortamda 900-950-1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda 2 – 4 ve 6 saat sürelerle ısıl işleme tabi tutulmuş ve ardından dönel eğilmeli, uzun ömürlü yorulma deneyi yapılmıştır. Ayrıca deneye tabi tutulan tüm numunelerin metalografik incelemeleri yapılmış ve yüzeyde oluşan Borür tabakasının mikro sertlik değerleri tespit edilmiştir.

2. ALAŞIMSIZ ÖTEKTOİD ALTI ÇELİK MALZEMELER

Ötektoid altı çeliklerin bileşiminde %0,08 – 0,85 kadar karbon ve az miktarda Silisyum, Manganez, Fosfor ve Kükürt bulunur. Bileşimindeki karbon miktarı arttıkça çeliğin plastik özelliği azalır ve kırılganlığı artar. Ancak karbon miktarı arttıkça çeliğin çekme dayanımında, akma sınırında ve sertliğinde önemli artışlar olur. Örneğin % 0,10 karbonlu bir çelikte çekme dayanımı 34 kg/mm² olduğu halde % 0,60 karbonlu çelikte 80 kg/mm² dir. (FİDANER, 1979)

Alaşimsız ötektoid altı çeliklerin sınıflandırılması tablo 1.1. de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere; karbon miktarına bağlı olarak az karbonlu ve orta karbonlu olarak 2 grupta ele alınabilir.

Tablo 1.1. Ötektoid altı çeliklerin sınıflandırılması (TEKİN,1996)

Karbona göre	Sertliğe göre	% Karbon Miktarı	Çekme Dayanımı (kg/mm ²)	Su alma kabiliyeti	Kaynak yapılabilme özelliği
Az karbonlu	Çok yumuşak	0.05 - 0.20	32 - 45	yok	çok iyi
	Yumuşak	0,20 - 0,30	45 - 55	çok az	iyi
Orta karbonlu	Yarı yumuşak	0,30 - 0,40	55 - 60	az	orta
	Yarı sert	0,40 - 0,60	60 - 75	iyi	az

Alaşımız ötektoid altı çelikler genellikle sac sıvama veya levha şeklinde imal edilirler. Soğuk haddeleme ve tavlama işlemi gören bu çeliklere, süreksiz akma olayını önlemek için çoğu kez temper haddesi uygulanır. Düşük oranda karbon içermelerinden dolayı kolayca şekillendirilebilirler. Motorlu taşıtların ağırlığının %50 sini kapsayan bu çeliklerden kolayca çok karışık şekillere getirilebilme ve yüzey düzgünlüğü olmak üzere iki önemli özellik arzu edilir. (TEKİN, 1996)

3. METALİK MALZEMELERİN YORULMA DENEYİ

Birçok makine parçası ve yapı elemanları kullanılmaya esnasında tekrarlanan gerilmeler ve titreşimler altında çalışmaktadır. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takiben kırılma olayına neden olurlar. YORULMA adı verilen bu olay ilk defa 1850 – 1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır. Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin parçalarında görülen mekanik hasarların yaklaşık %90'ı yorulma sonucunda olmaktadır. (GUY, 1972)

Statik yüklere karşı konstrüksiyon hesabı yapılırken akma sınırını esas almak gerekmektedir. Sürekli olarak tatbik olup kaldırılarak tekrarlanan yüklere karşı yapılan hesaplarda farklı bir mukavemet ölçüsüne ihtiyaç vardır. Bu ölçü Yorulma Mukavemetidir. Yorulma mukavemeti (S), parçayı belli bir çevrim sayısı (N) kadar tatbik edildikten sonra kırılacak gerilmedir. S değerinin N değerine bağlı olacağı ortadadır. (GUY, 1972)

Yorulma olayına, parçaya sadece dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısı genleşme ve büzülmeyle doğan ısı gerilmeleri de neden olabilmektedir.

Yorulma olayında çatlama genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Çatlak başlangıcı için genellikle şu üç ana faktör gereklidir; (KAYALI, v.d., 1996)

1. Yeteri derecede yüksek bir çekme gerilmesi
2. Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi ve dalgalanması
3. Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlanma sayısı.

Bu ana faktörlerin yanında çok sayıda yan faktörler de sayılabilir. Örneğin; yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, gerilim konsantrasyonu, frekans, mikro yapı (tane boyutu, faz dağılımı, inklüzyonlar vb.) gibi.

Laboratuarda standart boyut ve belirli yüzey özelliğindeki numuneye, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak deney yapılır. Endüstride kullanılan parçada ise koşulların hepsi değişiklik gösterir. Karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analizi de güçtür. Bu nedenlerle yorulma deneyi sonuçları, mühendislik uygulamalarında çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir şekilde kullanılmazlar. Yorulma deneyi sonuçları belirli koşullar için fikir verir ve benzer koşulların bulunabileceği parça dizaynında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olur.

Yorulma deneyi sonuçlarının bir anlam verebilmesi için aşağıdaki bilgilerin belirtilmesi gerekir; (KAYALI, v.d., 1996)

I. Malzeme özellikleri;

- a) Malzeme cinsi
- b) Malzemenin piyasaya sunulmuş durumu (levha, çubuk vs.)
- c) Ergitme ve döküm koşulları
- d) Son mekanik işlemler ve ısı işlemler
- e) Kimyasal bileşim
- f) Yüzey durumu ve kalitesi (hadde, taşlama, parlatılmış vs.)

II. Deney numunesinin şekil ve boyutları

III. Deney cihazının tipi, çalışma prensibi ve deneyin yapılışı esnasında uygulanan gerilme ve frekans

IV. Deneyin yapıldığı ortamın koşulları ve sıcaklığı

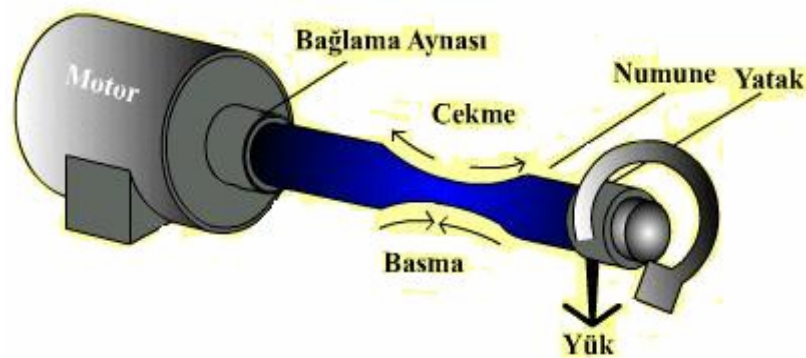
V. Bazı hallerde malzemenin diğer mekanik özellikleri ile metalografik yapısı

Son yıllarda özellikle önemli parçaların yorulma özelliklerini elde edebilmek için, standart bir deney numunesi yerine, parçanın kendisi özel cihazlarda çalışma koşullarına benzer koşullarda deneye tabi tutulmaktadır. Böylece daha güvenilir sonuçlara varılmaktadır.

S – N eğrisi, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı verir. Bu eğrinin çizilmesi için genellikle 8 ila 12 benzer numune kullanılır. Ortalama gerilme (S_m) tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına (veya kırılmasına,) kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Küçük gerilmeler için çatlamının görüleceği çevrim sayısı çok büyük olduğundan, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Deneylerin tümünde gerilme genliği (S_a) deney süresince sabit tutulur. (http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/mekanik_deneyle/yorulma.htm)

Gerilme ekseni olan ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu ekseninde ya en büyük gerilme (S_{max}), ya en küçük gerilme (S_{min}) ya da gerilme genliğinden (S_a) biri kaydedilir. Çevrim sayısı ekseni olan apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır.

S - N eğrileri 10^6 çevrimden sonra genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum gösterirler.



Şekil 3.1 : Dönen Destekli Kiriş Yorulma Test Düzeneği (http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/mekanik_deneyle/yorulma.htm)

3.1. Yorulma Çatlağı Oluşumu

Sabit deformasyon genliği altında, önce yorulma sertleşmesinin meydana geldiğini, sonra ise plâstik şekil değiştirme direncinin azaldığı yani yumuşamanın başladığı anlaşılmıştır. Bu andan itibaren tekrarlanan plâstik deformasyon, hem yüzeyde hem de iç kısımda sadece kalıcı kayma bantları içersinde meydana gelmektedir. Yüzeydeki kalıcı kayma bantları da büyük bir olasılıkla sürekli şekilde girinti ve çıkıntıları oluşturmakta ve bu durum bandın içinde çatlağın başlamasına neden olmaktadır. Yorulma sertleşmesi durduğu sırada kayma bantlarının içinde ise oldukça düzgün arı peteği görünümünde bant düzlemine dik dislokasyon hücrelerinin bulunduğu gözlenmektedir. (AL, 1996)

Kayma bantlarının yumuşak olması, çatlak mekanizmasının bantların kırılmasını sağlayacak yüksek yerel gerilmelerle açıklanmasına imkan vermemektedir.

Yorulma çatlağı hemen hemen her zaman en büyük normal gerilmeye dik yönde oluşur. (AL, 1996)

3.2. Yorulma Deneyi Türleri

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

Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyi türleri şunlardır; (KAYALI,v.d., 1996)

1. *Eksenel gerilmeli yorulma deneyi:*

En basit sistem olan eksenel gerilmeli yorulma deneyinde numuneye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Uygulanan gerilme numune enince de üniform olarak dağılır.

Eksenel gerilmelerin söz konusu olduğu bir örnek; içten yanmalı motorların bağlantı rotlarıdır. Ancak burada eksenel gerilme yanında eğme kuvvetleri de oldukça etkilidir.

2. Eğme gerilmeli yorulma deneyi:

Bu deneyde kendi arasında ikiye ayrılır;

- Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi
- Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi

Birinci deney türünde, numune nötr (tarafsız) bir düzleme göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelerin olduğu en güzel örnek taşıtların yaprak (makas) yaylarıdır.

İkinci deney türünde, numune devamlı dönen bir nötr eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelere örnek olarak, hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir. Aks başlıklarına (yatakları içinde kalan kısım) gelen yükün etkisi ve tekerleklerdeki tepkiden dolayı aksta eğme gerilmeleri oluşur. Ancak aks devamlı döndüğünden, aksın herhangi bir ekseni her turda bir çekme bir basma gerilmesine uğrar. Bu; bir demiryolu mühendisi olan Wöhler'i YORULMA konusunda çalışmaya yöneltti olaydır.

3. Burulma gerilmeli yorulma deneyi:

Burada deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma (dönme) işlemi uygulanmaktadır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme-basma kuvvetlerinin uygulandığı tüm helisel yaylarda bu tür burulma gerilmeleri oluşur.

4. Bileşik gerilmeli yorulma deneyi:

Yukarıda sayılan farklı gerilme türünde ikisinin veya daha fazlasının bir arada bulunabileceği durumlarda bileşik gerilmeler söz konusu olur. Uygulamada en çok rastlanan bileşik gerilme durumu “eğme ve burulma gerilmelerinin” bir arada bulunduğu durum ile “eksenel ve burulma gerilmelerinin” bir arada bulunduğu durumdur. Motorların krank mili başlıklarındaki gerilme, eğme ve burulma gerilmelerinin bir arada bulunduğu gerilme türüne ait en güzel örnektir.

3.3. Yorulma Deneyi İle İlgili Terimler

Çevrim

Gerilme – Zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına denir.

En Büyük Gerilme (S_{max})

Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir. Diğerlerinde olduğu gibi çekme gerilmeleri pozitif (+), basma gerilmeleri negatif (-) işaretlerle gösterilmektedir.

En Küçük Gerilme (S_{min})

Uygulanan gerilmeler arasında en küçük cebirsel değeri olan gerilmedir.

Ortalama Gerilme (S_m)

En büyük ve en küçük gerilmelerin cebirsel ortalamasıdır.

$$S_m = (S_{max} + S_{min}) / 2$$

Gerilme Aralığı (Stress Range)

En büyük gerilme ile en küçük gerilme arasındaki cebirsel farktır.

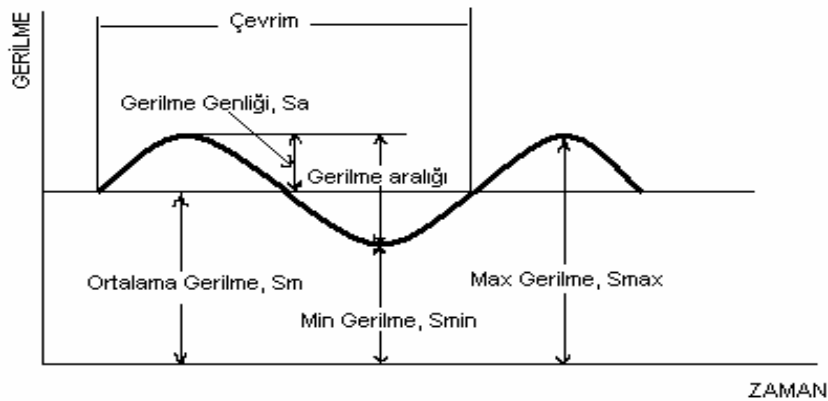
$$S_r = S_{max} - S_{min}$$

Gerilme Genliği (Stress Amplitude)

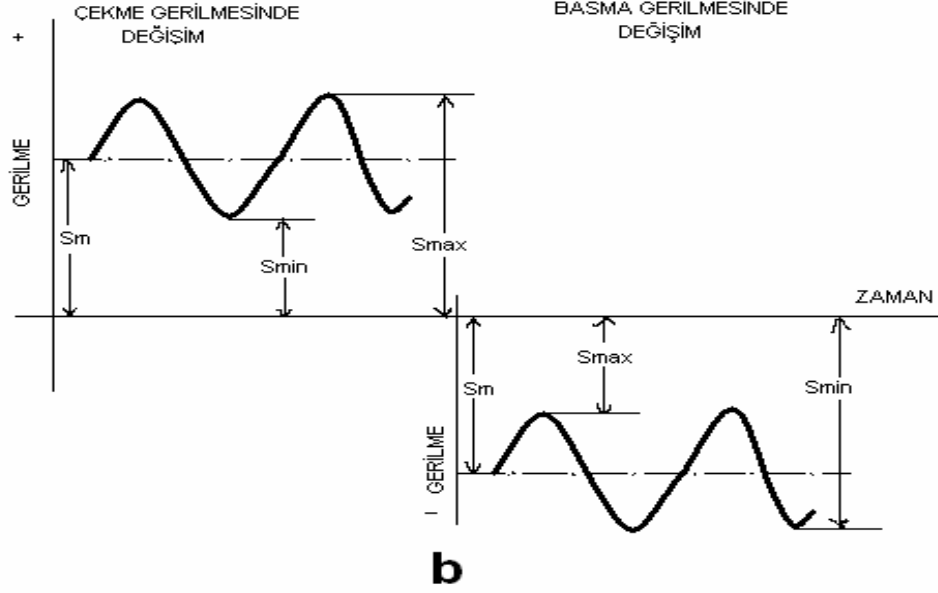
Gerilme aralığının yarısına eşittir. Başka bir deyişle max ve min gerilme ile ortalama gerilme arasındaki farktır.

$$S_a = S_r / 2 = (S_{max} - S_{min}) / 2$$

Yorulma deneyinde, değişen basma ve çekme gerilmeleri halinde gerilmeler simetrik olabileceği gibi asimetrik de olabilir. Farklı gerilme hallerini gösteren örnekler Şekil 3.3 de görülmektedir.



a

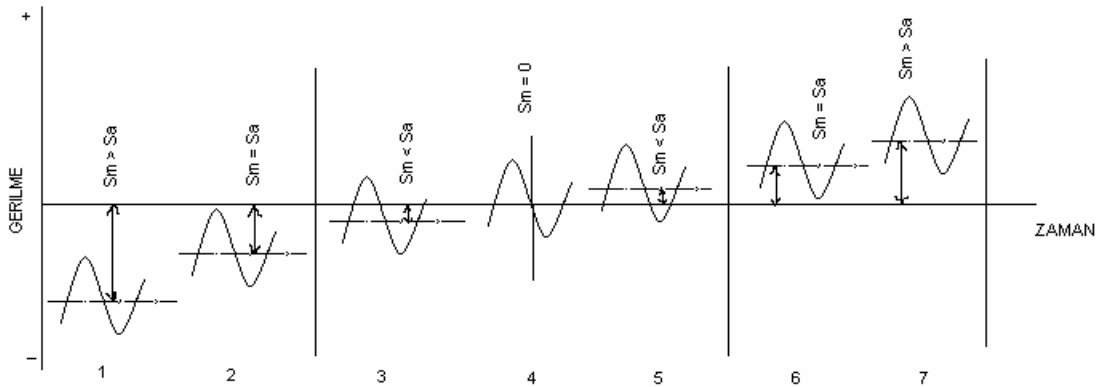


Şekil 3.2 : Yorulma deneyi ile ilgili tipik gerilme – zaman eğrileri (KAYALI, v.d., 1996)

Gerilme Oranı

Genellikle iki türlü gerilme oranı tanımlanır. En çok kullanılanı R ile gösterilip en küçük gerilmenin en büyük gerilmeye oranıdır. ($R = S_{\min} / S_{\max}$).

İkincisi ise A ile gösterilip gerilme genliğinin ortalama gerilmeye bölünmesi ile elde edilir. ($A = S_a / S_m$).



Şekil 3.3 : Farklı gerilme değişimlerini gösteren örnekler (KAYALI, v.d., 1996)

- 1 – 2 : Basma gerilmesi halinde değişim
- 6 – 7 : Çekme gerilmesi halinde değişim
- 4 : Simetrik çekme – basma gerilmesi değişimi
- 3 – 5 : Asimetrik çekme – basma gerilmesi değişimi

S – N Diyagramı (Wöhler Diyagramı)

Bu diyagram, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı verir. S – N eğrisinin çizilmesi için genellikle 8 ile 12 benzer numune kullanılır. Ortalama gerilme (S_m) tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına (veya kırılmasına) kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Deneylerin tümünde gerilme genliği (S_a) deney süresince sabit tutulur.

S – N eğrileri 10^6 çevrimden sonra genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum gösterirler. (Şekil 3.4)

Yorulma Dayanımı (N Çevrim İçin)

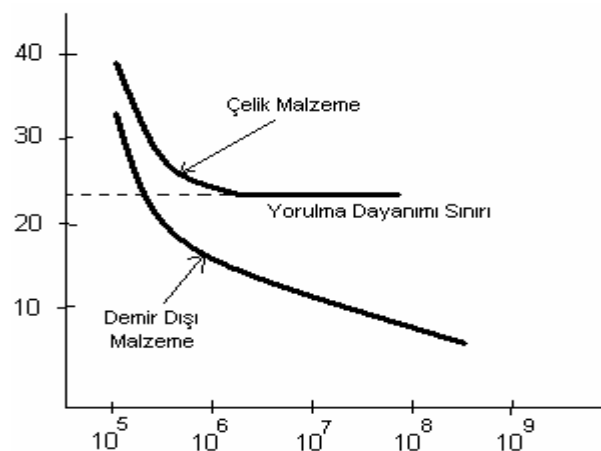
Malzemenin tam N çevrim sonunda çatlama (veya kopma) gösterdiği gerilme olarak tanımlanır.

Yorulma Sınırı (Yorulma Dayanımı Sınırı)

S – N diyagramında, eğrinin asimptotik durum aldığı gerilmeye “yorulma sınırı” veya “yorulma dayanımı sınırı” denir. Bu gerilmenin altındaki periyodik gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir.

Yorulma Ömrü

Benzer numunelerin sabit koşullarda belirli bir gerilme altında çatlama (veya kopma) gösterdikleri (N) çevrim sayılarının medyan ortalaması şeklinde tanımlanır.



Şekil 3.4 : Demir ve Demir Dışı malzemelere ait tipik S – N eğrileri. (http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/mekanik_deneyler/yorulma.htm)

3.4. Yorulma Deneyi Cihazları

Yorulma deneyinde kullanılan cihazlar çok çeşitli olmalarına rağmen, bu cihazları numuneye uyguladıkları gerilme türü açısından 4 ana grupta toplamak mümkündür; (KAYALI,v.d., 1996)

1. Eksenel çekme – basma gerilmeleri uygulayan cihazlar
2. Eğme gerilmeleri uygulayan cihazlar
 - Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayanlar
 - Dönen eğme gerilmesi uygulayanlar
3. Burma gerilmesi uygulayan cihazlar
4. Bileşik gerilme uygulayan cihazlar

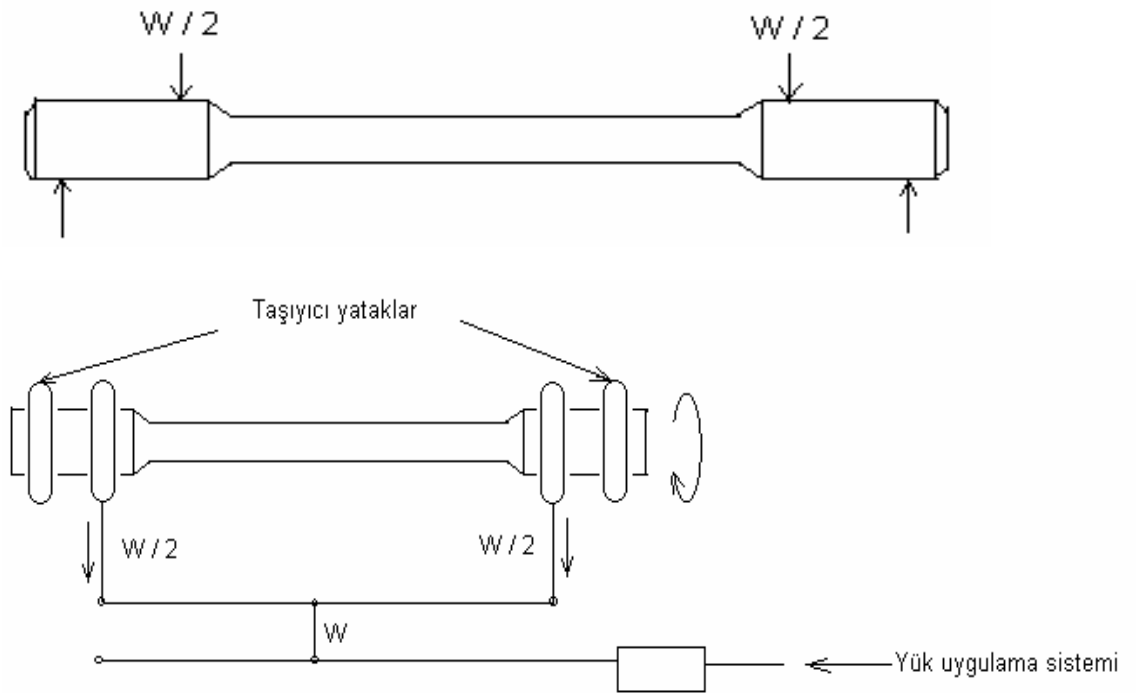
Yukarıda belirtilen her bir grup için değişik firma ve araştırma merkezlerince farklı cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlardan bazılarının çalışma prensipleri Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7 de verilmiştir.

Bu cihaz grupları içinde en çok kullanılanı, çalışma prensibi en basit olan eğme gerilmesi uygulayan cihazlardır.

Malzemesi deneye tabi tutulacak parça çalışma esnasında ne tür gerilmelere uğrayacaksa, o tür gerilmelerin uygulandığı deney cihazının seçilmesi gerekir. Aksi takdirde elde edilen sonuçlar güvenceli olmaz.

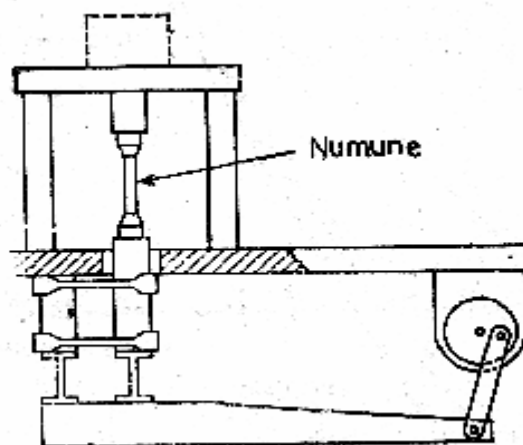
Yorulma deneyi cihazları, çalışma prensiplerine göre de mekanik, elektromekanik, manyetik, hidrolik ve elektrohidrolik cihazlar diye sınıflandırılabilirler.

Yorulma deneyi cihazlarının tümünde en önemli özellik deney süresince istenen türde ve istenen düzeyde gerilmenin sağlanabilmesidir.

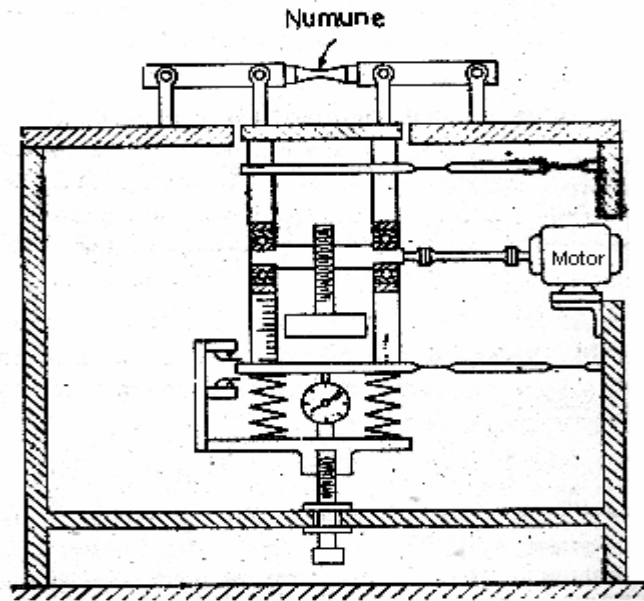


Şekil 3.5 : Numunesinin dört noktasına kuvvet gelen ve dönen eğme gerilmeleri uygulanan “Schenk (Simplex)” modeli yorulma deneyi cihazının çalışma prensibi. (KAYALI, v.d., 1996)

Deney cihazlarında çevrim sayısını kaydeden sayaç bulunmalıdır. Sayaç, numune kırıldığı anda otomatik olarak durabilecek özelliğe sahip olmalıdır.



Şekil 3.6 : Eksenel çekme ve basma gerilmeleri uygulayan, sabit gerilme genlikli yorulma deneyi cihazı. (KAYALI, v.d., 1996)



Şekil 3.7 : Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan “Sonntag” modeli yorulma deneyi cihazı.
(KAYALI, v.d., 1996)

3.5. Numuneler

Kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. Son yıllarda hazırlanan standartlarla numune tipleri için bazı genel kurallar geliştirilmiştir. ASTM E – 466 da aksenal gerilmeli yorulma deneyi için Şekil 3.8 de gösterilen numune şekilleri tavsiye edilmektedir. Numune boyutları için aşağıdaki genel kurallar ön koşulmaktadır:

1. Numune öylesine dizayn edilmelidir ki; çatlama numunenin daraltılmış kesitinde olsun.
2. Numunenin daraltılmış kesiti öylesine seçilmelidir ki; en büyük gerilmenin mutlak değeri deney cihazının çalışma kapasitesinin en az %25’inde, min gerilmenin mutlak değeri ise cihazın çalışma kapasitesinin en az %2,5’inde oluşsun.
3. Numune boyutları öylesine seçilmelidir ki; numunenin doğal frekansı cihazın frekansının en az iki misli olsun.

Dairesel Kesitli Numuneler

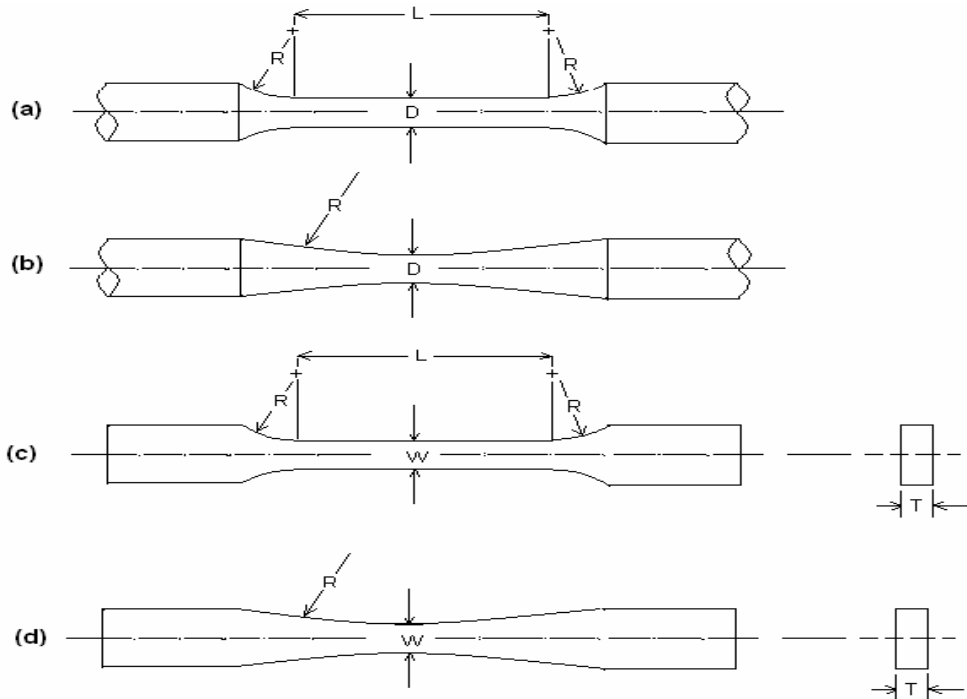
Şekil 3.8 de (a) ve (b) şekilleri ile gösterilen numuneler için daraltılmış kısmın çapı için 5 ile 25 mm arasında bir değer seçilmektedir. Numunenin cihaz çeneleri arasına giren kesitinin, daraltılmış kesite oranı en az 1,5 olmalıdır. Çentik etkisini minimuma indirmek

için daraltılmış kesitin her iki ucundaki kavisli bölgede (R) eğrilik yarıçapı daraltılmış kısmın (D) çapının en az 8 katı olmalıdır.

(b) numunesinde (D) çapına sürekli bir radyus ile geçilmektedir. (a) numunesinde ise belirli bir daraltılmış uzunluk söz konusudur. Daraltılmış kısmın (L) uzunluğu (D) çapının en az 3 katı olmalıdır. Ancak basma gerilmelerinin uygulanacağı durumlarda burkulmaları önlemek amacıyla (L) uzunluğu, (D) çapının 4 katından fazla olmamalıdır.

Dikdörtgen Kesitli Numuneler

Bu numunelerde kesitin daraltılması tek boyutta ve genellikle genişlikte yapılır. Dairesel kesitli numunelerde olduğu gibi, cihazın çeneleri arasında kalan kesitin daraltılmış kesite oranı en az 1,5 olmalıdır. Daraltılmış uzunluğun her iki ucundaki kavisli bölgede (R) eğrilik yarıçapı, daraltılmış kısmın (W) genişliğinin en az 8 katı olmalıdır. Daraltılmış kısımda (W) genişliğinin (T) kalınlığına oranı 2 ile 6 arasında olmalı ve daraltılmış kısmın kesiti tercihen 20 ile 650 mm² arasında seçilmelidir. Daraltılmış kısmın (L) uzunluğundaki daraltılmış kısımdaki (W) genişliğinin en az 3 katı olmalı, basma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda ise 4 katını geçmemelidir. Diğer özellikler dairesel kesitli numunelerle benzer durumdadır.



Şekil 3.8 : ASTM E – 466 ya göre aksel gerilmeli yorulma deneyi numuneleri (KAYALI, v.d., 1996)

Yorulma deneyi numunelerinin hazırlanmasında büyük özen gerekmektedir. Talaş kaldırma işlemi keskin bir kalem ucu ile yapılmalı ve iç gerilmelerin oluşmasını engellemek için aşırı deformasyonlardan (büyük pasolardan) ve aşırı ısınmalardan kaçınılmalıdır. Talaş kaldırma esnasında özellikle enlemesine çizik ve çentiklerin oluşmamasına dikkat edilmelidir. Talaş kaldırma işleminden sonra numuneye hassas bir taşlama işlemi ve daha sonra numune boyunca ince zımpara uygulanmalıdır. Ancak bu işlemler sayesinde temiz ve parlak yüzeyler elde edilir.

Numune uzun zaman saklanacak ise, parlatılmış yüzey korozif olmayan bir yağla kaplanarak korunmalıdır.

Numune hazırlama işleminden sonra yüzey kalitesinin 20x büyütme bir mercekle altında kontrolü tavsiye edilir.

3.6. Yorulma Deneyinin Yapılışı

Yorulma deneylerinde izlenecek en klasik yol malzemenin belirli koşullar altında S – N diyagramının elde edilmesidir. Bu amaç için benzer şekillerde hazırlanmış en az 8 ile 12 numune alınır. Numunelere farklı gerilmeler uygulanarak çatlamanın (veya kırılmanın) görüldüğü (N) çevrim sayısı tespit edilir. Burada numunenin tamamen kopması veya önceden belirtilen belirli boyuttaki çatlak kriter alınır.

S – N eğrisini elde etmek için genellikle aşağıdaki deney sırası tavsiye edilir;

1. Önce bir veya iki numuneye küçük çevrim sayısında çatlama (veya kopma) gösterecek şekilde nispeten yüksek gerilmeler uygulanır.
2. Daha sonra bir numuneye çok büyük çevrim sayısında çatlacak (veya kopacak), bir diğerine “yorulma dayanımı sınırı” içine girecek şekilde gerilme uygulanır.
3. Sonunda arada kalan gerilmeler için deney yapılır.

Bir malzemenin yorulma dayanımı sınırı için çekme dayanımı ve Brinell sertlik değerlerinden faydalanılarak yaklaşık değerler seçilir.

- Demir – Çelik grubu malzemelerde; (KAYALI, v.d., 1996)

Yorulma Dayanımı Sınırı $\sim \pm 0,5$ Çekme Dayanımı

$\sim \pm 0,18$ Brinell Sertlik Değeri

- Demir Dışı metal ve alaşımlarda; (KAYALI, v.d., 1996)

Yorulma Dayanımı Sınırı $\sim \pm 1/3$ Çekme Dayanımı

Nispeten yüksek gerilmelerin uygulandığı ilk deneylerde çekme dayanımının yaklaşık 2/3'ü değerinde bir gerilme seçilir.

Deney öncesi, numunede gerekli ölçmeler yapılır. Kesit hesaplamalarında 5 mm'ye kadar boyutlar $\pm 0,001$ mm duyarlılıkta, 5 mm den büyük boyutlar $\pm 0,03$ mm duyarlılıkla ölçülmelidir.

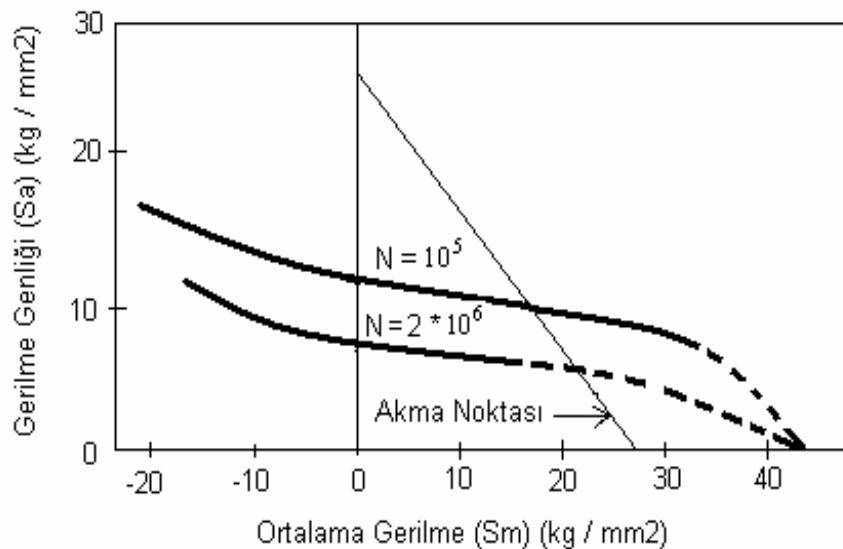
Numune cihaza yerleştirilirken büyük özen gösterilerek aksenal konum sağlanmalı, çalışma esnasında simetri ekseninin sapma yapmamasına dikkat edilmelidir. Gerilme, deneyde öngörülen değerde hassas olarak uygulanmalı, ancak darbe ve başka türde gerilmelerin oluşması önlenmelidir. Gerilme deney süresince sabit tutulmalıdır.

3.7. Malzemede Yorulma Olayına Etki Eden Faktörler

Yorulma olayına etki eden birçok faktör vardır. Bu faktörleri aşağıdaki gruplar altında incelemek mümkündür. (KAYALI, v.d., 1996)

3.7.1. Malzeme Cinsinin, Bileşiminin ve Yapısının Etkisi

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



Şekil 3.9 : Tipik bir sabit yorulma ömrü diyagramı (KAYALI, v.d., 1996)

Çeliklerde alaşım elementleri statik çekme dayanımını arttırarak, yorulma dayanımını da arttırırlar. Örneğin demir alaşımları titanyum alaşımlarında arayer atomu halindeki alaşım elementi miktarı arttıkça malzemelerin statik çekme dayanımı ile birlikte yorulma dayanımı ve yorulma ömrü de artmaktadır. Çekme dayanımını arttırmadan sadece yorulma dayanımını arttıran alaşım elementi yoktur.

Alaşım elementlerinin (karbon hariç) çeliklerin yorulma dayanımını arttırması aynı zamanda çeliklerin iç yapısını da değiştirmelerine bağlıdır. Özellikle uygun su verme ve menevişleme işlemleri ile statik çekme dayanımı ve sertliği arttırılan çeliklerin yorulma dayanımı da artmaktadır. Isıl işlem uygulanacak çelik parçalarda alaşım elementlerinin en önemli rolü çeliklerin su alma derinliğini arttırarak, sertliğin yüzeyden itibaren daha derin kısımlara kadar artmasını sağlamak ve dolayısıyla yorulma dayanımını arttırmaktır.

Sünek malzemelere uygulanan son mekanik işlemlerin de yorulma dayanımına etkisi vardır. Soğuk işlem ile sertliği ve yüzey düzgünlüğü arttırılan malzemenin yorulma dayanımı, sıcak işlem görmüş aynı malzemeye oranla daha yüksektir.

Malzeme yapısındaki inklüzyon ve segregasyonlar yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü azaltmaktadırlar. Örneğin vakum altında ergitilip dökülen çelikler inklüzyonlardan arıtılmış olduklarından yorulma dayanımları da yüksektir.

3.7.2. Yüzey Özelliklerinin Etkisi

Yorulma olaylarında çatlak oluşumu genellikle yüzeyde başlar. Çünkü eğme ve burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda en yüksek gerilme yüzeylerde oluşur.

Yüzeyde başlayan yorulma çatlağının kendisi daha sonra çentik etkisi göstereceğinden gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlağın hızla ilerlemesine yol açacaktır. Bu nedenle malzemenin yorulma dayanımını arttırmak büyük ölçüde yüzey çatlaklarının oluşumunu engellemekle olur. Çatlağa engel olma yüzey özelliklerinin arttırılması ile mümkündür.

Özellikle sert malzemelerde yüzeyin düzgünlüğü yorulma dayanımını büyük ölçüde arttırmaktadır. Örneğin yüzeyi parlatılmış bir numunenin yorulma dayanımı sınırı, tornada kabaca işlenmiş bir numuneye oranla %15 – 40 daha yüksektir. Çünkü yüzeydeki pürüzlülükler çentik etkisi yaratır.

Yüzey düzgünlüğü yanında, yüzey sertliğinin arttırılması da çatlama karşı direnci

arttıracığından, yorulma dayanımının artmasını sağlar. Çeliklerde sementasyon, nitrürasyon ve benzeri yüzey sertleştirme işlemleri yorulma dayanımı açısından oldukça fayda sağlamaktadır. Öte yandan karbon çeliklerinin tavlınması ve sıcak işlenmesi esnasında yüzeyde karbon azalması oluşur. Yüzeydeki 1 mm'lik bir tabakada böyle bir olayın görülmesi yorulma dayanımını düşürür. karbon azalması il yüzeyde yumuşak tabaka elde edileceğinden çatlak, küçük gerilmelerde dahi oluşacaktır.

3.7.3. Çentik Etkisi

Parça kesitinde çentik, delik ve ani değişimlerin bulunması yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü büyük ölçüde azaltmaktadır. Parça kesitinde görülen bu tür süreksizlikler gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlak başlangıcına neden olurlar. Çentik etkisi çentiğin şekil ve boyutlarına bağlıdır. Tablo 1'de çentik tür ve boyutlarının yorulma dayanımı sınırına etkisi görülmektedir.

Tablo 3.1 : Yorulma deneyi numunesinde çentik tür ve boyutlarının yorulma dayanımı sınırına etkisi (KAYALI, v.d., 1996)

Çentik Şekli ve Boyutu	Yorulma Dayanımı Sınırının Azalması (%)
250 mm yarıçaplı yiv	0
25 mm yarıçaplı yiv	5
6 mm yarıçaplı yiv	10
Küçük kavisli çıkıntı	25
90° açılı çıkıntı	50
90° açılı V çentik	65

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

$$K_f = \text{Çentiksiz Yorulma Dayanımı Sınırı} / \text{Çentikli Yorulma Dayanımı Sınırı}$$

3.7.4. Gerilmelerin Etkisi

Yorulma deneylerinde gerilme türünün etkisi önemlidir. Genellikle aksenal gerilme ile düzlemsel eğme gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar birbirine çok yakındır. Burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar çok farklıdır.

Uygulamada parçaya gelen gerilmeler deneylerdeki gibi sabit genlikli ve sabit

periyotlu değillerdir. Böyle bir durum göz önünde bulundurulursa, zaman zaman aşıırı gerilmelerin uygulandığı görülür. Aşıırı gerilmeler de yorulma ömrünü kısaltır. Ancak bu konuda karart verebilmek içi istatıksel hesaplamadan faydalanılır.

Deney öncesinde numunede oluşan kalıcı iç gerilmeler de yorulma olayına etkilerler. Genellikle numune yüzeyinde oluşturulan basma yönünde kalıcı iç gerilmeler Yorulma dayanımı sınırı ve Yorulma ömrünü arttırlar. Yüzeyde kalıcı basma gerilmelerini oluşurmada kullanılan ticari yöntemlerden biri yüzeylerin küçük pasolarla haddelenmesidir. Diğer bir yöntem ise yüzeyin aşıırı hıza sahip çok küçük elik bilyalarla dvlmesidir.

3.7.5. Korozyonun Etkisi

Korozyonun kimyasal etkisi ile yorulmanın mekanik etkisinin aynı anda oluşmasına “Korozyonlu Yorulma” olayı denir.

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

Korozyon ve yorulma olayının beraber oluştuğu durumlarda, yorulma dayanımında çok büyük düşüşler görülür. Korozyonun buradaki etkili rolü çatlak teşekkülü ve çatlağın ilerlemesini hızlandırmasıdır.

Korozyon, yorulma deneyinde uygulanan frekansın etkisini de değiştirmektedir. Normal deneylerde 10.000 çevrim/dk nın altındaki frekanslarda, deney sonuçları frekanstan etkilenmemektedir. Koroziif ortamlarda, frekansın etkisini azaltmak için mümkün olduğu kadar yüksek hızlarda çalışılmalıdır. Küçük hızlarda, deney zamanı uzayacağından korozyon daha etkili olacak ve frekansın etkisini dolaylı olarak etkileyecektir.

3.7.6. Sıcaklığın Etkisi

Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artmaktadır. Ancak sıcaklığın oda sıcaklığının altına inmesi malzemenin çentik hassasiyetini arttırmaktadır.

Oda sıcaklığının üzerine yapılan deneylerde genellikle sıcaklık yükseldikçe, yorulma dayanımı düşmektedir. Sadece düşük karbonlu eliklerde 200 – 300 °C arasında

yorulma dayanımında artış görülür. Bu olay 200 – 300 °C arasında düşük karbonlu çeliklerin deformasyon yaşlanmasına uğrayarak çekme dayanımlarının artmasına bağlıdır.

Deney sıcaklığı belirli bir sıcaklığa çıktığında sürünme olayı daha etkili olur. Kopma, yorulmadan çok sürünme sonucunda gerçekleşir. Bu iki olayı birbirinden ayıran kırılma türüdür. Yorulmada kırılma tane içinde (transgranüler), sürünmede tane sınırında (intergranüler) olmaktadır.

Makine parçalarının kullanılma esnasında sıcaklık değişimlerine uğramaları, ısıl gerilmelere yol açarak yorulmaya neden olabilirler. Sıcaklığın ΔT kadar değişmesiyle malzemede oluşan gerilme;

$$\sigma = \epsilon \cdot E \cdot \Delta T \text{ dir.}$$

ϵ : lineer ısıl genleşme katsayısı

E : elastisite modülü

Şayet bir defalık ani sıcaklık değişimi malzemenin çatlamasına yol açmışsa bu olaya “ Isıl (Termal) Şok” adı verilir. Ama çatlama çok sayıda tekrarlanan ısıl gerilmeler sonucunda oluşmuşsa bu olaya “ Isıl (Termal) Yorulma” adı verilir.

Ostenitik paslanmaz çeliklerde ısı iletim katsayısı küçük, ısıl genleşme katsayısı büyük olduğundan, bu malzeme Termal Yorulma olayına çok hassastır.

3.7.7. Frekansın (Deney Hızının) Etkisi

Frekansın yorulma deney sonuçlarına etkisi kesinlikle saptanamamıştır. Deney cihazlarının çoğunda uygulanan 200 ile 10.000 çevrim/dakika’lık frekansın deney sonuçlarını pek etkilemediği kabul edilmektedir.

Düşük karbonlu çeliklerde, alüminyum alaşımlarında ve bakırda çok yüksek deney hızlarında Yorulma Dayanımı Sınırının da yükseldiği görülmüştür. Çok düşük deney hızlarında da Yorulma Dayanımı Sınırının azaldığı kabul edilmektedir. (KAYALI; 1996)

Öte yandan çok yüksek frekanslarda, malzemede oluşan ısıl gerilmelerin, kısa zamanda yayınamaması, yorulma dayanımı sonuçlarını olumsuz yönde etkileyeceği kabul edilmektedir.

4. BOR HAKKINDA GENEL BİLGİ

4.1. Bor Elementi

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan bor elementi, kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur. Bor elementi yer kabuğunda %0,001 oranında, deniz suyunda ise 3-5 ppm düzeyinde bulunur. Bor elementinin fiziksel özellikleri Tablo 4.1 de verilmiştir. (DPT, 2001)

Bor elementinin kimyasal özellikleri, şekline ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor, kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken; kristalin bor kolay reaksiyon vermez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve bazı diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş ve patlayıcı olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur. (DPT, 2001)

Tablo 4.1 : Bor elementinin fiziksel özellikleri (DPT, 2001)

Özellik	Değeri
Atom ağırlığı	10,811±0,005
Ergime noktası	2190+20°C
Kaynama noktası	3660°C
Isıl genişleme katsayısı (25 -1050 °C arası, 1 °C için)	5*10 ⁶ – 7*10 ⁶
Knoop sertliği	2100 - 2580 HK
Mohs sertliği (elmas - 15)	11
Vickers sertliği	5000 HV

4.2. Dünyada Mevcut Durum

Dünya bor mineralleri rezervleri hakkında güvenilir kesin bir rakam vermek güç olmakla birlikte, dünya rezervinin 1 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir. Bilinen dünya rezervlerinin yaklaşık %80'i Türkiye ve A.B.D.'de bulunmaktadır. Önem sırasına göre diğer rezervler ise B.D.T. (eski S.S.C.B.), Çin Halk Cumhuriyeti, Arjantin, Bolivya, Şili ve Peru'da toplanmıştır. Tablo 4.2'te dünya bor rezervleri verilmiştir. (DPT, 2001) Ticari önemi olan Bor mineralleri Tablo 4.3'de verilmiştir. (DPT, 2001)

Tablo 4.2 : Dünya Bor rezervleri (B₂O₃ bazında) (DPT, 2001)

ÜLKE	REZERV (1000 TON)	% ORANI
Türkiye	803.000	63
A.B.D.	209.000	16,4
B.D.T.*	136.000	10,7
Çin Halk Cumhuriyeti	36.000	2,8
Arjantin	9.000	0,7
Bolivya	19.000	1,5
Şili	41.000	3,2
Peru	22.000	1,7
Toplam	1.275.000	100

*Eski S.S.C.B.

Tablo 4.3 : Ticari önemi olan bor mineralleri (DPT, 2001)

Mineral	Formülü	%B ₂ O ₃	Bulunduğu Yer
Boraks (Tinkal)	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,6	Kırka, Emet, Bigadiç, A.B.D.
Kernit (Razorit)	Na ₂ B ₄ O ₇ .4H ₂ O	51	Kırka,A.B.D., Arjantin
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	43	Kırka, Emet, Bigadiç, Arjantin
Propertit	NaCaB ₅ O ₉ .5H ₂ O	49,6	Kestelek, Emet, A.B.D.
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	50,8	Emet, Bigadiç, Küçükler, A.B.D.
Pandermit (Priseit)	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ .7 H ₂ O	49,8	Sultançayır, Bigadiç
Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2	Almanya
Szaybelit	MgBO ₂ (OH)	41,4	B.D.T
Hidroborasit	CaMgBO ₁₁ .6H ₂ O	50,5	Emet

4.3. Türkiye'deki Mevcut Durum

Türkiye'deki bor minerallerinin işletmeciliği yalnızca Eti Bor A.Ş. tarafından gerçekleştirilmektedir.

Türkiye'deki bilinen borat yatakları özellikle Eskişehir – Kırka, Balıkesir – Bigadiç, Bursa – Kestelek ve Kütahya – Emet'te bulunmaktadır. Türkiye bor tuzu rezervi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.4 : Türkiye bor tuzu rezervi (* 1000 ton) (DPT, 2001)

YERİ		GÖRÜNÜR	MUHTEMEL	MÜMKÜN	TOPLAM	%B ₂ O ₃	CİNSİ
Emet Kütahya	Hisarcık 1	29.107			29.107	27	Kolemanit
	Hisarcık 2	2.795			2.795	16	Kolemanit
	Espey	157.188	53.129		210.917	40	Kolemanit
	Doğanlar İğdeköy Üleksit	77.688	172.312	393.924	643.924	40	Kolemanit
Bigadiç	Üst boratlı	80.012	8.056	7.060	95.128	35	Kolemanit
Balıkesir	Seviye Üleksit						
	Alt boratlı	364.990	316.614	252.990	934.594	35	Kolemanit
	Seviye Üleksit						
Bursa	Kestelek	4.290	920	2.932	8.142	40	Kolemanit
Eskişehir	Kırka	62.341	437.747	18.457	518.535	25	Tinkal
Toplam Rezerv		778.441	989.378	675.353	2.443.142		

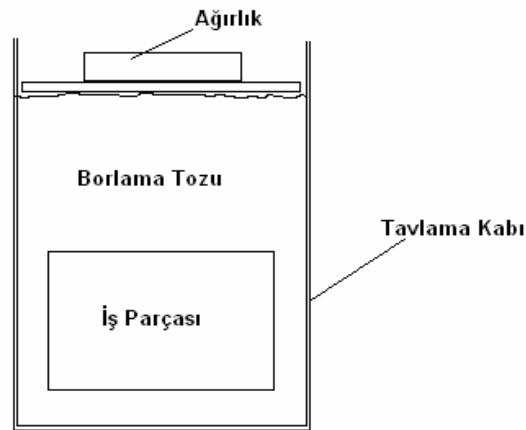
5. BORLAMA

Borlama, bor atomlarının ana metal yüzeyine borür tabakası oluşturmak üzere difüze olduğu termokimyasal yüzey işlemidir. Borlama işlemi, ana malzemeye bağlı olsa da genellikle 800 – 1050 °C sıcaklıklar ve 1 – 8 saat arası değişen sürelerde uygulanır. Borlama, alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlarına, bu alaşımların toz metalurjisi yoluyla üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilir. Bu işlem katı,sıvı,gaz ve plazma ortamlarında yapılabilir. (ER, 2003) İşlem esnasında bor atomları ısı enerjisi yardımıyla iş parçası yüzeyine yayındırılır ve burada esas malzeme atomlarıyla birlikte uygun borürleri oluştururlar. Borlama işlemi, yüksek sıcaklık etkisi altında, bor atomu kaynağı ile malzeme yüzeyi arasında oluşan kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. (ER, 2003) Uygun malzemeye uygulandığında borlama, sinterlenmiş karbürlerle karıştırılabilecek derecede iyi aşınma direnci sağlar. Bor tabakaları yüksek sertlik, korozyon ve aşınma direnci gösterirler. (YAPAR, 2002)

Tüm yüzey modifikasyon işlemlerinde olduğu gibi borlamada da işlem öncesi yapılması gereken bazı ön hazırlıklar söz konusudur. İşlemden önce iş parçasının üzerinde (varsa) bulunan yağ film tabakasının ve kesme sıvılarının tam anlamıyla temizlenmesi gerekmektedir. İşlem yüzeyinde paslanma varsa tel ile fırçalayarak parçanın temizlenmesi zorunludur. Parça yüzeyinin düzgünlüğünün borlama kalitesine etkisi olduğundan mümkün

olduğunca düzgün yüzeye getirilerek parçalar işleme tabi tutulmalıdır. Borlama sonucu, parçaların boyutlarında, elde edilen bor tabakası kalınlığının %20 – 30 ‘u oranında bir büyüme olduğundan, borlanacak işlem parçasının bu durum göz önünde bulundurularak ilk ölçülendirilmesi gerekmektedir. (ER, 2003)

Bor ortamının esas bileşeni bor karbür (B_4C), amorf bor ve ferro bordur. B_4C diğerlerine nazaran ucuz olduğundan tercih edilmektedir. (ER, 2003)



Şekil 5.1 : Basit bir paket borlama düzeneği.

İşlemin oldukça rahat, emniyetli ve toz karışım bileşimini değiştirme imkanının olması, sınırlı ekipman ihtiyacı ve maliyet düşüklüğü sebebiyle en çok kullanılan borlama prosesi Katı Ortamda Borlamadır. (ER, 2003) Proses; 3 – 5 mm kalınlığında, ısıya karşı dirençli bir çelik kutu içerisinde bir borlama toz karışımı ihtiva eden temizlenmiş, perdahlanmış parçaların paketlenmesini içerir. Böylece borlanacak yüzeyler yaklaşık 10 – 20 mm’lik kalınlıkta bir borlama tozu ile kaplanır. (ER, 2003) Proseste silisyum karbür (SiC) ve Alüminyum Oksit (Al_2O_3) dolgu malzemeleri gibi görev yaparlar ve reaksiyona girmezler. Fakat SiC , bor miktarını kontrol eder.

İşlem yapılırken; kabın içerisine uygun parçalar hazırlanır (Şekil 5.1). Kabın içine girebilen, üzerinde ağırlık bulunan bir kapakla sistem kapatılır. Kapak üzerine koyulan ağırlık, borlama tozunun eşit şekilde etkimesini sağlar. Daha sonra kutu, belirli bir süre borlama sıcaklığına kadar ısıtılır. İşlemden kullanılan toz %20 – 50 oranında taze toz ile karıştırılarak 5 veya 6 kez yeniden kullanılabilir.

Borlama işleminde, borun yüzeye yayılması sonucu parçanın en üst yüzeyinde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında yayılma (difüzyon) bölgesi ve en iç

kısımda da çekirdek bölgesi yer alır. (KARAKAN, v.d., 2002)

Borlamanın avantajları; (YAPAR, 2002)

- Çelik alaşımlarında 1600 – 2800 VSD arasında yüksek setlik değerleri elde edilebilir.
- Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda (650 °C) bile sabit kalmaktadır.
- Borlama işlemi demir esaslı malzemelerin seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve erozyon direncini arttırmaktadır. Borlama işlemi ile düşük alaşımlı çeliklerin H₂SO₄, H₃PO₄ ve HCl gibi asitlere karşı direncini arttırmak olanaklıdır.
- Borlanmış çeliklerin yüksek sıcaklıklardaki (850 °C) oksidasyon direnci ve sıcak metal korozyonuna direnci yüksektir.
- Borlanmış parçaların yorulma ömürleri özellikle korozif ortamlarda %25 oranında artırılabilir.
- Bor bileşikleri sürtünme katsayısını düşürerek yağlayıcı kullanımını azaltmakta ve soğuk kaynaklanma eğilimini düşürmektedir.
- Borlama karmaşık şekillere de uniform olarak uygulanabilir.
- Borlama seçici olarak sadece sertleşmesi istenen bölgeye uygulanabilir.

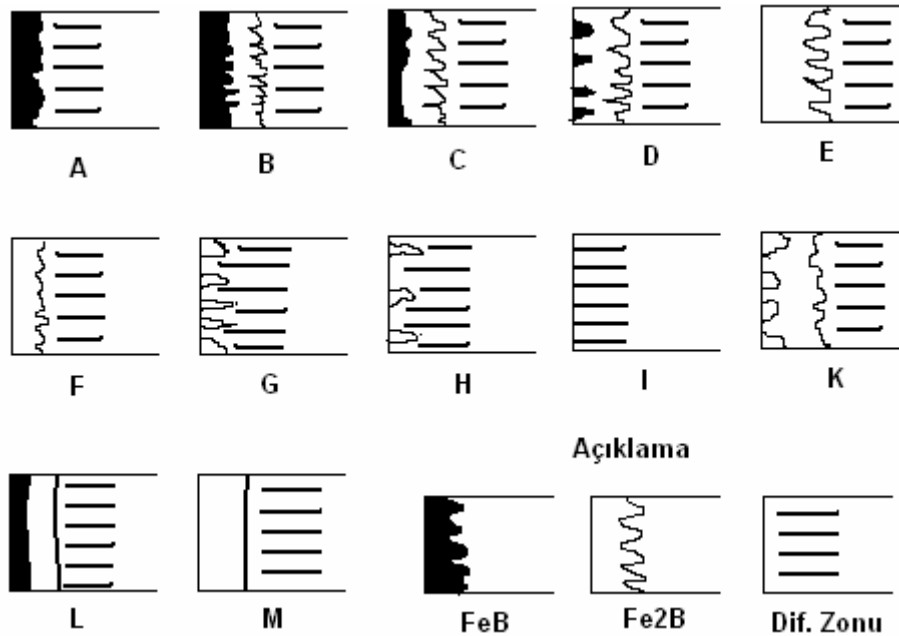
Borlamanın dezavantajları; (YAPAR, 2002)

- Proses esnek olmayıp, daha çok itina ister ve bu da prosesi pahalı yapar.
- Borlama işlemi ile borlanan hacimde hacimce %5 – 25 ‘lik artış olmaktadır.
- Çok düşük tolerans isteklerinde borlanmış yüzey sadece elmas taşlama yoluyla sağlanır. Çünkü geleneksel yöntemler yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bu yüzden kusursuz borlama işlemleri çoğunlukla geniş kesitli parçalara uygulanır.
- Genellikle borlanmış alaşımlı çelik parçaların yorulma özellikleri karbürleşmiş ve nitrürlenmiş çeliklerle karşılaştırıldığında çok zayıftır. Bu nedenle dişli üretiminde sınırlama söz konusudur.

- Borlamadan sonra genellikle parçanın vakum ya da yansız bir ortamda sertleştirilmesine ve temperlenmesine ihtiyaç duyulur. Bu sayede borür tabakasının bütünlüğü, sağlamlığı artırılır.

5.1. Borür Tabakası Çeşitleri

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olmak üzere ya düz bir şekilde (örneğin yüksek alaşımli çeliklerde) ya da parmaksı türde (zig – zag şekilli) olabilir. İşlem süresi arttıkça parmaksı türdeki borür tabakalarında maksimum ve minimum kalınlıklar arasındaki fark artar. (ÖZSOY, 1988)



Şekil 5.2 : Borür tabakası çeşitleri. (YAPAR, 2002)

- A** : Özellikle FeB'nin yoğun olduğu tek fazlı tabaka
B : Fe₂B ve FeB fazlı iki tabaka
C : İki fazlı tabaka, tabaka B'den daha ince FeB tabakası
D : İki fazlı, izole FeB dış şeklindeki tabaka
E : Tek fazlı tabaka, özellikle Fe₂B ağırlıklı
F : Tek fazlı tabaka, özellikle Fe₂B ağırlıklı
G : Fe₂B dış yapısı
H : Çok izole Fe₂B dış yapısı
I : Difüzyon bölgesi
K : Dejenere olmuş tabaka
L : Çift fazlı FeB ve Fe₂B tabakası
M : Tek fazlı FeB ve Fe₂B tabakası.

5.2. Borür Tabakasının Özellikleri

Yayınma yönüne bağlı olarak; kolonsal bir yapı sergileyen tek fazlı Fe₂B fazı, çift

fazlı Fe₂B + FeB fazlarına göre daha çok tercih edilir. Çünkü oluşum sırasında FeB ve Fe₂B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler nedeniyle iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır. (FeB : Çekme gerilmesi, Fe₂B : Basma gerilmesi oluşturmaktadır). (YAPAR, 2002) Dış etkenler, örneğin termal şok ve mekanik zorlamalar, bu yapıların zamanla ayrılmalarına ve yüzeyden kopmalara neden olur. Farklı termal katsayılarından dolayı FeB / Fe₂B çift faz tabakasının ara yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu durum nedeniyle mekanik yüke maruz kaldıklarında pul pul dökülme gerçekleşir. (VİPİN, v.d., 2002) Bu nedenle minimum FeB fazı içeren tabakalar elde edilmeye çalışılmalıdır. Tek Fe₂B fazı çift fazlı yapıdan daha yüksek aşınma direnci ve mekanik özellikler gösterir. En az aşınma Fe₂B fazında, en fazla aşınma ise daha sert (1800 – 2000 VSD) FeB fazında olan tabakada meydana gelmektedir. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen tabakalarda, yani sadece Fe₂B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur. (KARAKAN,v.d., 2002)

Demir esaslı malzemelerde borlama sonucunda, Fe₂B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapı oluşur. Çift fazlı Fe₂B + FeB tabakası, vakum altında 800 ° C’de uzun süreli ısıtılma tabi tutulduğunda tek fazlı Fe₂B fazı elde edilebilmektedir. Bu fazların yanında yüksek karbonlu çeliklerde ve dökme demirlerde Fe₃(B,C) ve Fe₅(B,C) tipi fazlar da oluşabilir. Tablo 7 de FeB ve Fe₂B fazlarının tipik özellikleri verilmektedir. (YAPAR, 2002)

Tablo 5.1 : FeB ve Fe₂B fazlarının tipik özellikleri (YAPAR, 2002)

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim merkezli tetragonal	Ortorombik
Kafes Parametresi (Å)	a = 5,078, c = 4,28	a = 4,053, b = 5,495 c = 2,946
Mikrosertlik (GPa)	18 - 20	19 - 21
Elastisite Modülü (Gpa)	280 - 295	590
Bor içeriği (% ağırlıkça)	8,83	16,23
Yoğunluk (gr / cm ³)	7,43	6,75
Termal genleşme katsayısı Ppm / °C	7,65 (200 - 600 °C) 4,25 (100 - 800 °C)	23 (200 - 600 °C)
Ergime sıcaklığı (°C)	1389 - 1410	1540 - 1657
Termal İletkenlik (W / m.°K)	30,1 (20 °C)	12,0 (20 °C)
Elektriksel Direnç (10 ⁻⁶ cm)	38	80
Curie Noktası (°C)	742	325
Renk	Gri	Gri

Borlama, demir grubu malzemelerin akma ve kopma dayanımlarını %10 – 20, yorulma dayanımını %25 ve korozyonlu yorulma ömrünü %200 artırmaya karşın, plastisite özelliklerini kötü yönde etkiler. (ÖZSOY, 1988)

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

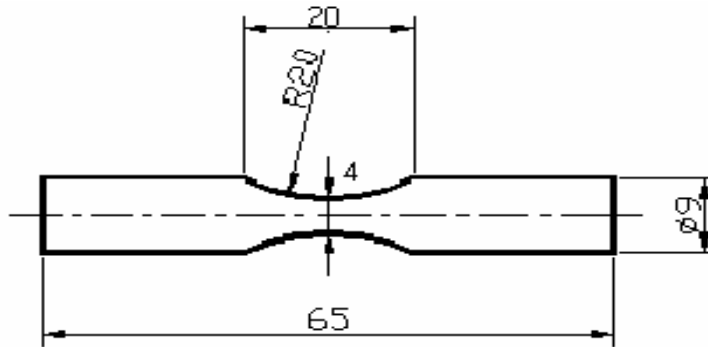
6.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

AISI 1020 malzemelerin kutu ortamda borlama ısıl işlemi sonrasındaki Yorulma Dayanımlarını tespit edebilmek üzere aşağıda verildiği şekilde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında Asil Çelik A.Ş. tarafından üretilmiş AISI 1020 çelik malzeme kullanılmıştır. Malzeme bileşimi Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 : Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi

Malzeme adı	%C	%Si	%Mn	%S	%P
AISI 1020	0.171	0.213	0.735	0.0268	0.0136

Deneysel çalışmalar için hazırlanan yorulma numunelerinin şekli, Şekil 6.1’de verilmiştir. Numuneler ASTM E – 366 standartına göre hazırlanıp kullanılmıştır.



Şekil 6.1 : Deneylerde kullanılan yorulma numunesi teknik resmi

Yapılacak olan yorulma deneyleri için her koşulda 8 numune kullanılacak şekilde Borlama ısıl işlemine yeter sayıda numune hazırlanmıştır. Numuneler işlenirken boyut farklılıklarından oluşabilecek hataları en küçük seviyede tutabilmek için gereken hassasiyet gösterilmiştir.

6.2. Deney Programı

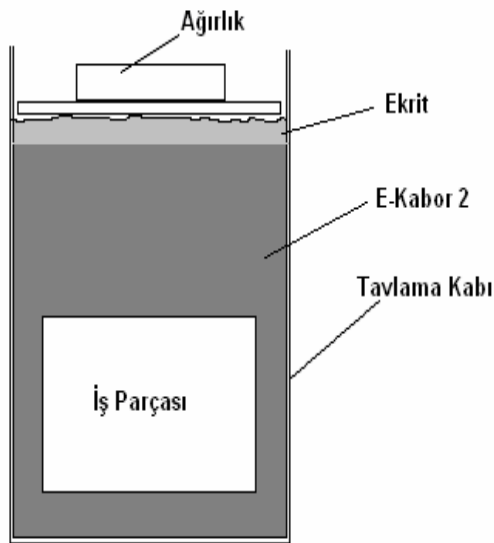
AISI 1020 çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisini belirlemek için 13x8 adet numune hazırlanmıştır. Bu numunelerin 12x8 adeti değişik sıcaklık ve sürelerde

borlama işlemine tabi tutulmuş, kıyaslama açısından 8 adedi de ısıl işlemsiz olarak yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Borlama deney programı Tablo 6.2 de gösterilmektedir.

Tablo 6.2 : Deney Programı

NUMUNE NO	NUMUNE	BORLAMA SICAKLIĞI (°C)	BORLAMA SÜRESİ (Saat)
1	AISI 1020	Isıl İşlemsiz	Isıl İşlemsiz
2		900	2
3		900	4
4		900	6
5		950	2
6		950	4
7		950	6
8		1000	2
9		1000	4
10		1000	6
11		1050	2
12		1050	4
13		1050	6

Borlama işlemi, Tablo 6.2 de verilen koşullarda yapılmıştır. Her ısıl işlem koşulu için 8 adet numune borlanmıştır. Isıl işlemden önce tüm numuneler kodlanmış ve işlem sonrasında bu kodlara göre ayırt edilmiştir.



Şekil 6.2 : Katı borlamanın yapıldığı çelik kutu kesiti.

Borlama ısıl işlemi, katı ortamda yapılmıştır. Paslanmaz çelikten imal edilen kutu

içine her koşul için 8 adet numune konmuş ve kutu fırın içersine yerleştirilerek, fırınla beraber ısıtılmıştır. Deney süresi, fırın ilgili sıcaklığa ulaştığı andan itibaren tutulmuştur. Bor sağlayıcı olarak E-Kabor 2 kullanılmıştır. (75 – 106 µm). E-Kabor 2; B₄C – SiC – KBF₄ içeren bir bor sağlayıcı bileşik olup içeriğindeki bileşenlerin oranları BORTEK firması tarafından açıklanmamaktadır. Paslanmaz çelik kutu tabanına 2 cm yüksekliğinde E-kabor 2 konduktan sonra numuneler yan kısımlardan ve birbirinden en az 1 cm mesafede olacak şekilde kutuya yerleştirilmiştir. Daha sonra numunelerin üzeri 2 cm E-kabor 2 ile doldurulmuş, en üst kısma Ekrit (Deoksidan) tozu konarak kapak kapatılmıştır. Ekrit de; saf demir ve oksit tutucu bileşenlerden oluşmaktadır. Tüm numuneler bu şekilde değişik sıcaklık ve sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 6.3 : Borlama işleminin yapıldığı fırın

Borlama ısıl işleminden sonra kutuda soğutulan numuneler, kutudan çıkarılıp temizlenmiş ve oda sıcaklığında Yorulma Deneyleri yapılmıştır. Yorulma yöntemi olarak Dönen Eğme Gerilmeli Yorulma tercih edilmiştir. Kullanılmış olduğumuz deney cihazı üzerindeki numarator 100 çevrimde 1 numara ilerleyecek şekilde çalışmaktadır. Ayrıca saniyede 1 numara ilerlemektedir. Yorulma deneyindeki en önemli kriter uygulanan gerilme değeridir. Deneye tabi tutulan malzemelere çekme mukavemetlerinin 2/3'ü ile Yorulma Dayanımı Sınırı arasında kalacak şekilde gerilmeler uygulanmıştır. (1020 çeliği için; $\sigma_c = 350 \text{ Mpa (N/mm}^2)$, $\sigma_a = 205 \text{ Mpa (N/mm}^2)$) Söz konusu gerilmeyi yorulma numunesi üzerinde oluşturmak için uygulayacağımız yük değerleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır; (YEŞİLDAL, 2003)

$$\sigma = \frac{16 \cdot W \cdot L}{\pi \cdot D^3} \quad (1)$$

Burada σ : Numunenin en dış noktasındaki gerilme; W: Numuneye uygulanan toplam yük; L : Moment kolu (yük tatbik noktası ile yatak mesnet arasındaki mesafe); D : Numunenin en düşük çapıdır.



Şekil 6.4 : Deneyde kullanılan Yorulma Cihazı.

Çalıştığımız numuneler için bunu uygulayacak olursak;

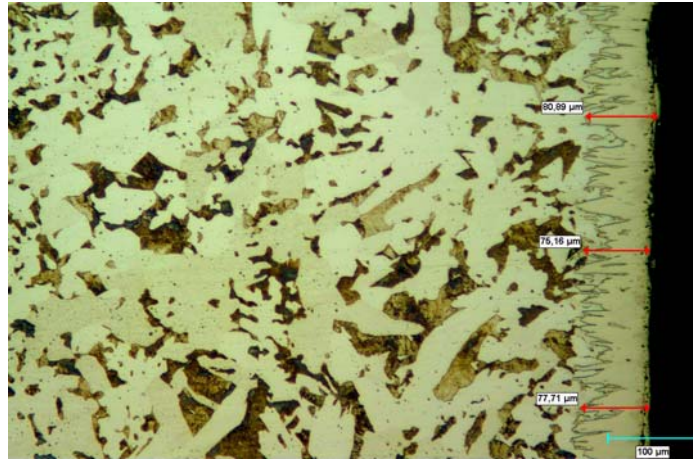
$$350 = 16.W.130 / 3,14.4^3 \rightarrow W = 34 \text{ N (1020 için)}$$

$$\text{Yorulma Dayanımı Sınırı} = \sigma_c / 2 = 175 \text{ MPa} = 17,5 \text{ N (1020 için)}$$

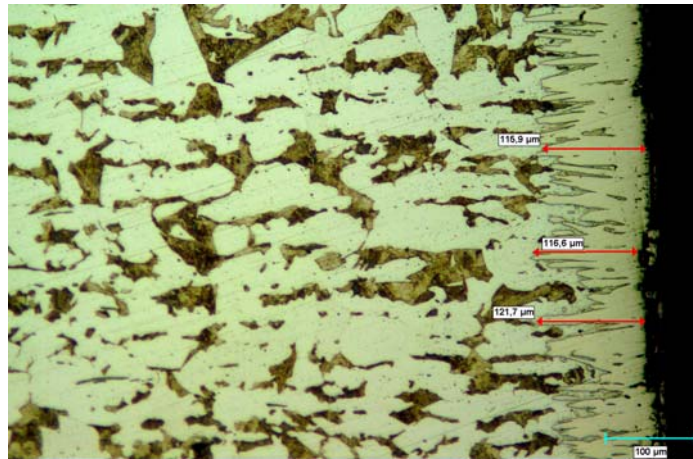
Çekme dayanımının 2/3 üne tekabül edecek gerilme alınacağından; 1020 çeliği için ~23 N sonucu elde edilir. Bu değer ile Yorulma Dayanımı Sınırı arasında yük uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle 23 N – 17,5 N arasında yüklerle deney yapılması gerekmektedir. Yorulma sınırını da gözlemlemek için 6 N – 22 N arasında yükler kullanılarak deneyler yapılmıştır.

6.3. Metalografik Çalışmalar

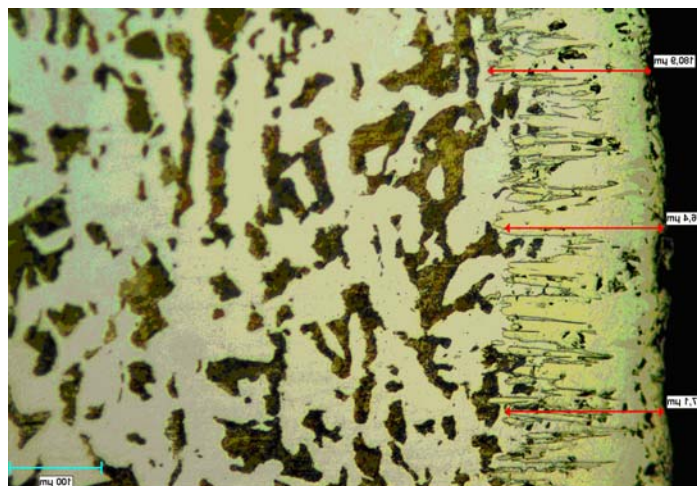
Bu bölümde numunelerin metalografik incelenmesi ile ilgili fotoğraflar verilmiştir. %2 Nital ile dağlama yapılmış olup çekilen fotoğraflarda borür tabakalarının kalınlığı ve şekli görülmektedir. Fotoğraflar 200X büyütme ile çekilmiştir.



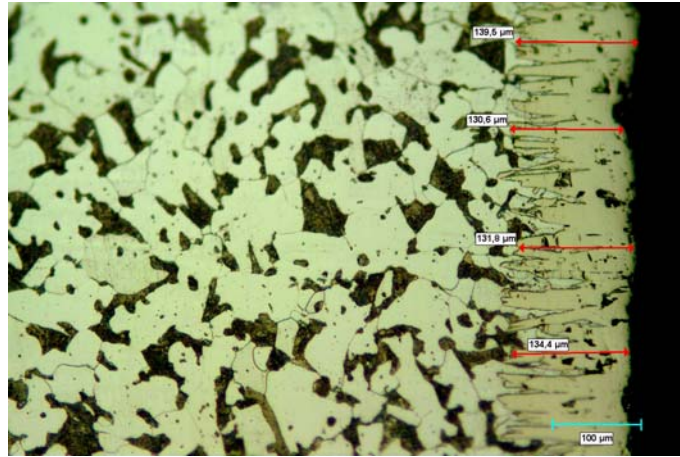
Şekil 6.5 : 1020 çeliği, 900 °C'de 2 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~77.91 μm .



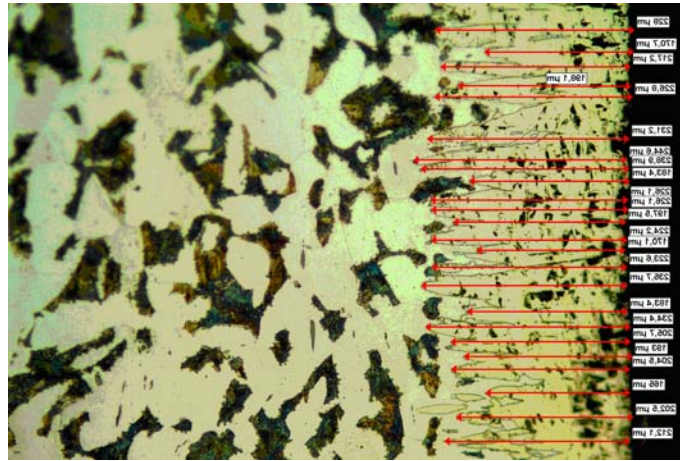
Şekil 6.6 : 1020 çeliği, 900 °C'de 4 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~118.06 μm .



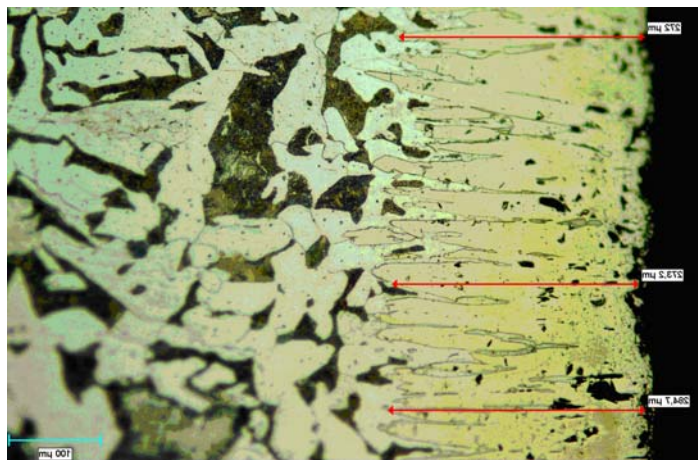
Şekil 6.7 : 1020 çeliği, 900 °C'de 6 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~178.13 μm .



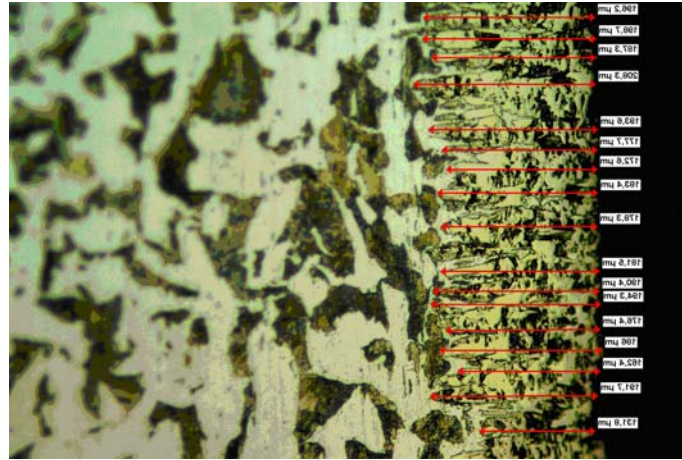
Şekil 6.11 : 1020 çeliği, 1000⁰C'de 2 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~134.07 μm.



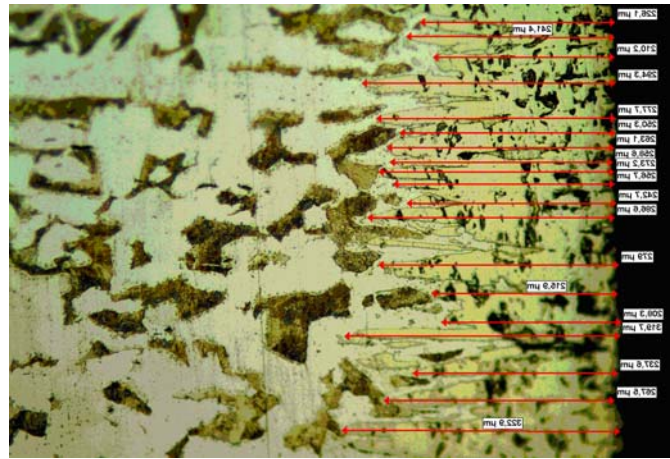
Şekil 6.12 : 1020 çeliği, 1000⁰C'de 4 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~216.68 μm.



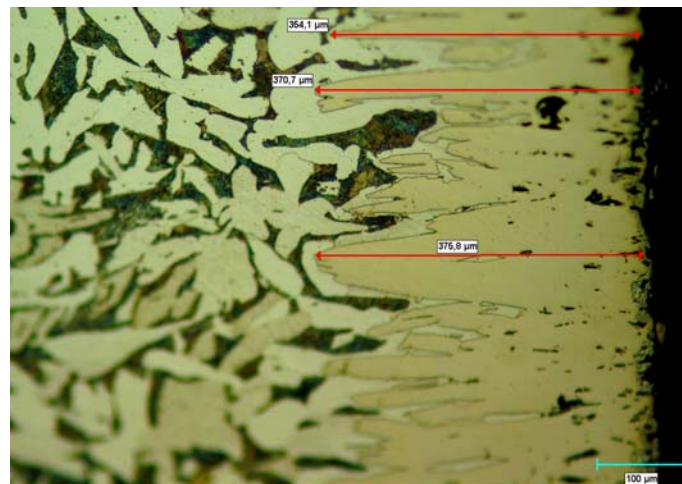
Şekil 6.13 : 1020 çeliği, 1000⁰C'de 6 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~276.63 μm.



Şekil 6.14 : 1020 çeliği, 1050⁰C’de 2 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x, %2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~186.1 μm.



Şekil 6.15 : 1020 çeliği, 1050⁰C’de 4 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x,%2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~ 263.17 μm.



Şekil 6.16 : 1020 çeliği, 1050⁰C’de 6 saat borlanmış, borlu tabaka, matris ferrit ve perlit taneleri görülüyor, 200x,%2 Nital. Ortalama tabaka kalınlığı ~366.86 μm.

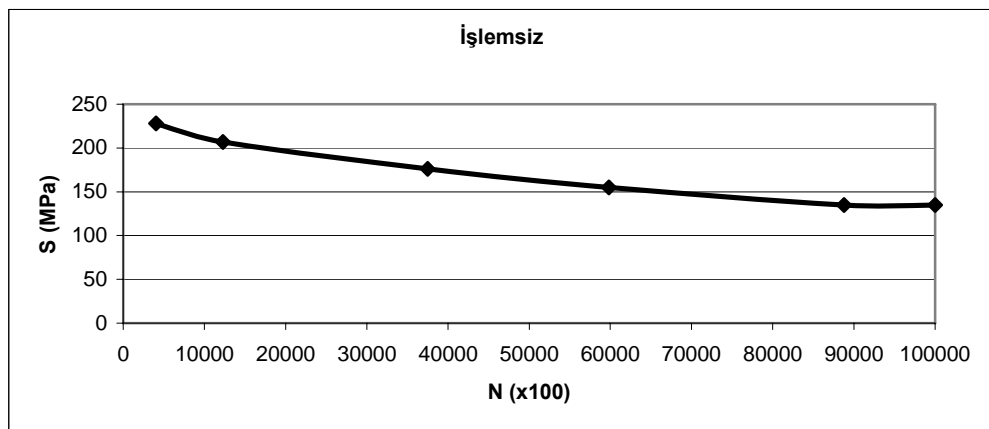
6.4. Deney Sonuçları

Tüm yorulma deneylerinde en az 5 farklı yük değeri için deney yapılmış, ortalama değerler alınıp karakterize edilmiştir. Tablo 6.3’de yorulma deney sonuçları özetlenmiştir.

Tablo 6.3 : Yorulma deneyi sonuçları

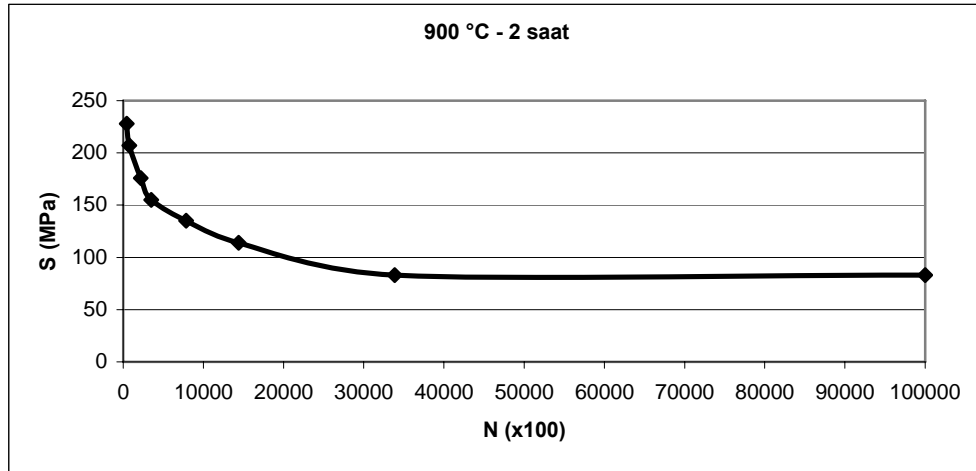
SIC. (°C)	YÜK (N)	ÇEVİRİM SAYILARI			SIC. (°C)	ÇEVİRİM SAYILARI			İŞLEMSİZ
		SÜRE				SÜRE			
		2 SAAT	4 SAAT	6 SAAT		2 SAAT	4 SAAT	6 SAAT	
900	22	45000	42000	27000	1000	34000	29000	19000	407000
	20	74000	102000	55000		191000	43000	54000	1227000
	17	218000	255000	65000		443000	146000	123000	3749000
	15	350000	485000	275000		618000	238000	323000	5983000
	13	787000	868000	795000		1075000	845000	521000	8876000
	11	1439000	2023000	1356000		1790000	1910000	629000	-
	8	3387000	4138000	3459000		-	-	3220000	-
	6	-	-	-		-	-	-	-
950	22	49000	22000	19000	1050	29000	36000	13000	
	20	77000	106000	73000		86000	44000	19000	
	17	223000	380000	222000		180000	256000	135000	
	15	478000	866000	530000		247000	673000	617000	
	13	734500	1964000	948000		800000	1022000	1037000	
	11	1157000	5918000	1982000		1875000	1416000	2554000	
	8	7913000	-	5715000		-	4772000	7547000	
	6	-	-	-		-	-	-	-

Şekil 6.17 de borlamanın etkisinin daha iyi görülmesi ve kıyaslama yapılabilmesi için ıslı işlemsiz numunelere ait deney sonuçlarının grafiği verilmiştir.

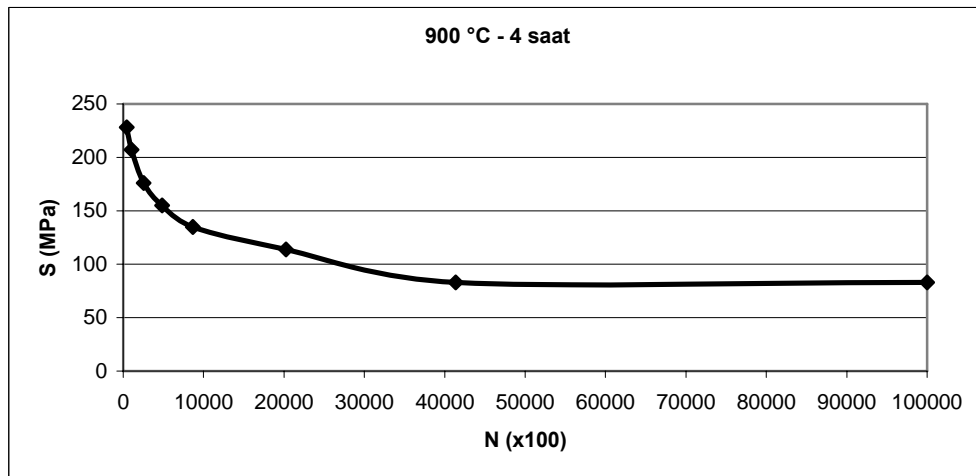


Şekil 6.17 : Isıl işlem yapılmamış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

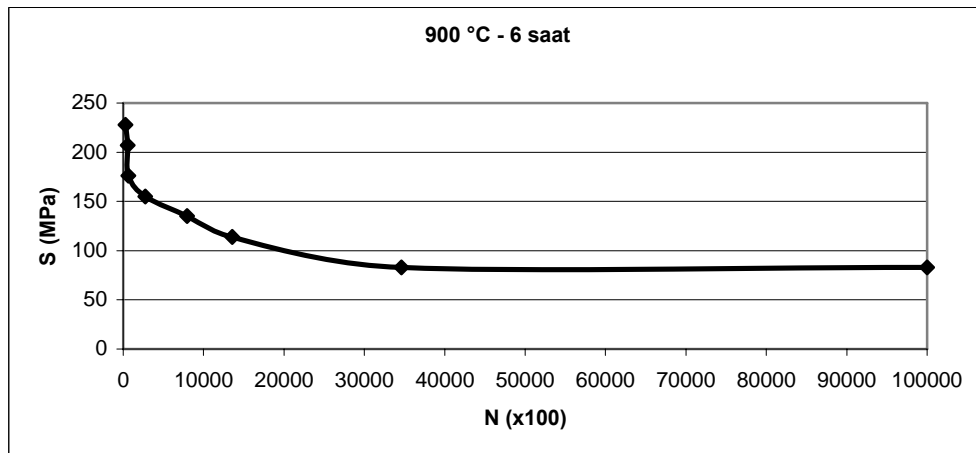
Borlama ısıt işlemlerine bağlı olarak yorulma çevrim sayılarının değişimini daha iyi görebilmek için Şekil 6.18 – 6.29 arasında gerekli diyagramlar verilmiştir.



Şekil 6.18 : 900 °C de 2 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

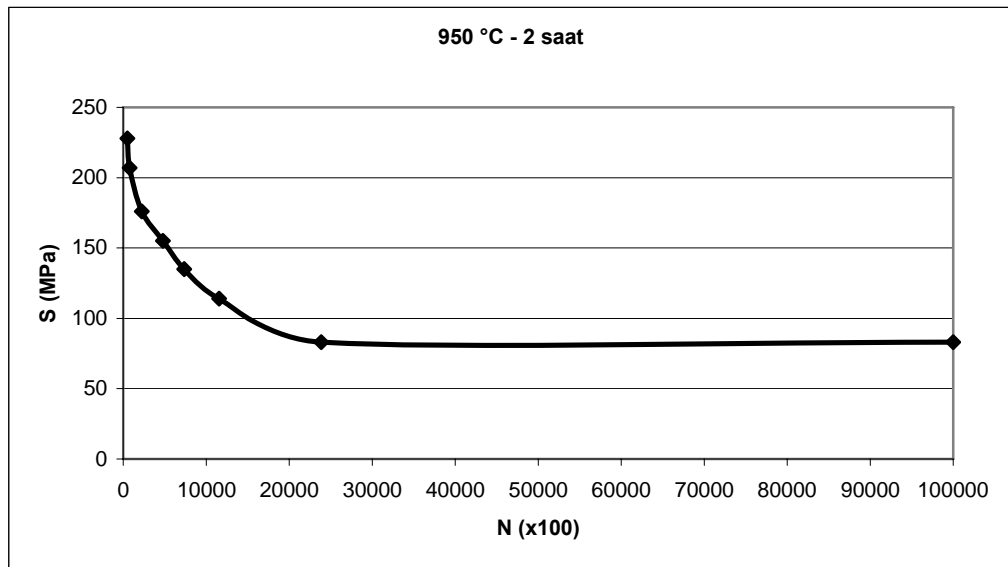


Şekil 6.19 : 900 °C de 4 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

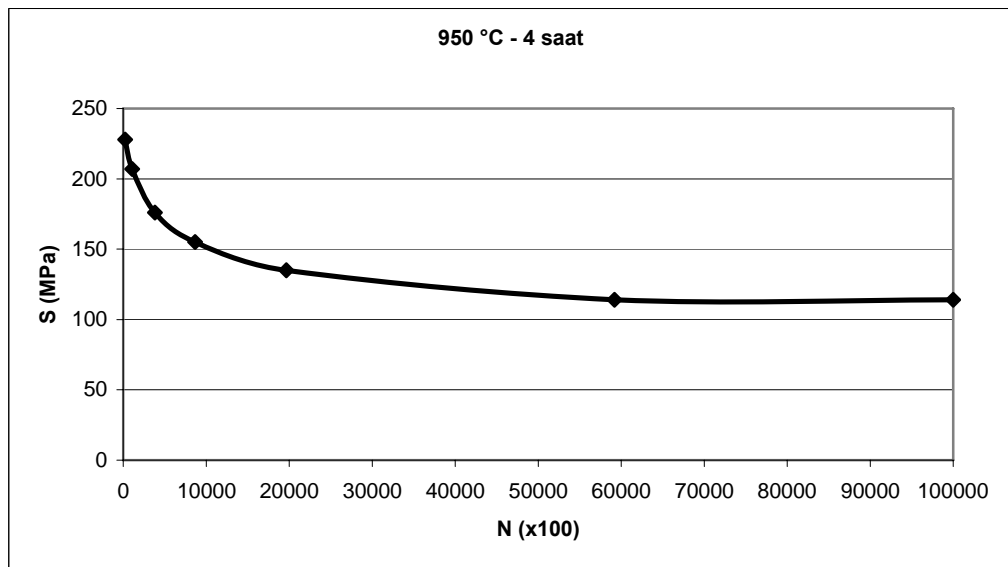


Şekil 6.20 : 900 °C de 6 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

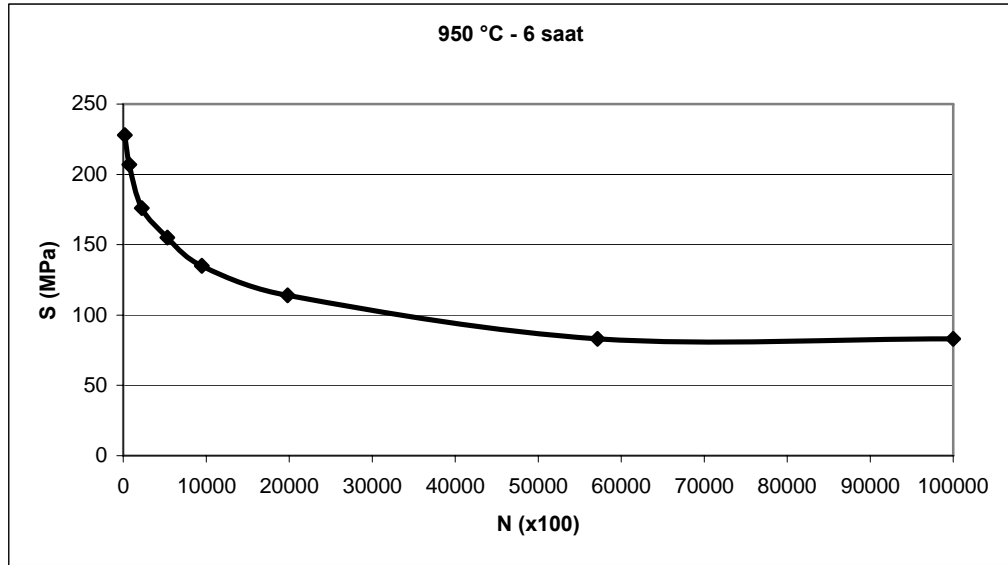
900 °C deki ısıtım koşullarına bakıldığında; 2 – 4 ve 6 saatlik sürelerde borlama yapılan numunelerin ısıtım işlemisiz numunelere oranla yorulma ömürlerinin düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sıcaklıkta yapılan borlama sürelerini kıyaslayacak olursak 4 saatlik süredeki değerler daha iyi çıkmıştır. Ancak diğer sürelerdeki değerlerle arasında çok büyük fark bulunmamaktadır.



Şekil 6.21 : 950 °C de 2 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

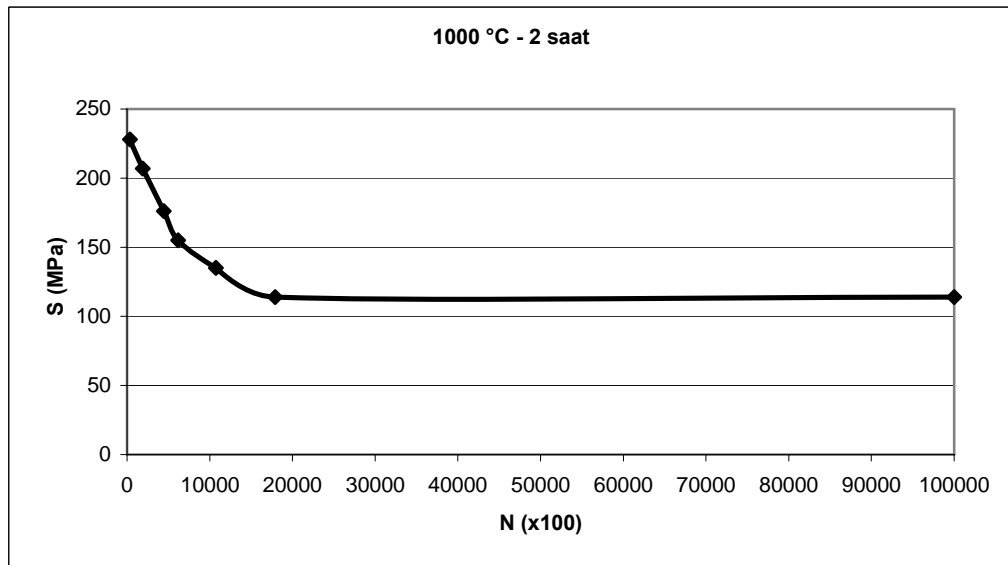


Şekil 6.22 : 950 °C de 4 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

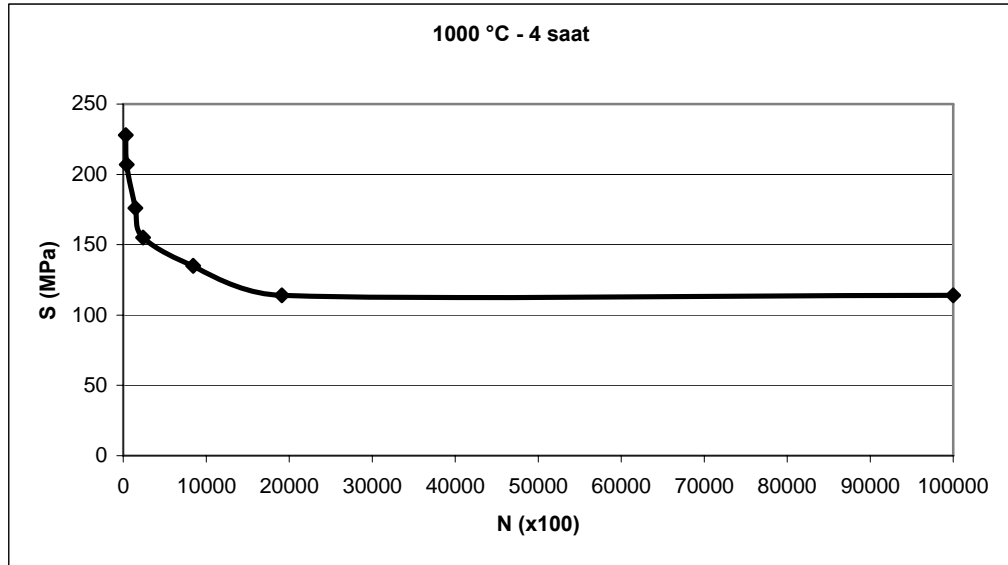


Şekil 6.23 : 950 °C de 6 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

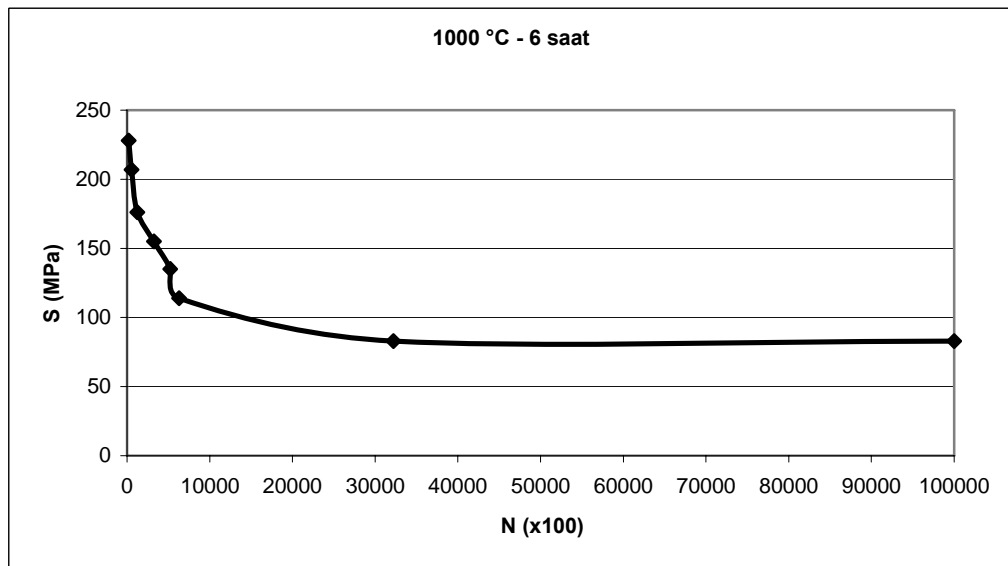
950 °C deki ısıl işlem koşullarına bakıldığında ise; yine 2 – 4 ve 6 saatlik sürelerde borlama yapılan numunelerin ısıl işlemsiz numunelere oranla yorulma ömürlerinin düşük olduğu gözlenmiştir. Ancak ısıl işlemsiz numunelerin elde ettiği değerlere yakın sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 6.24 : 1000 °C de 2 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

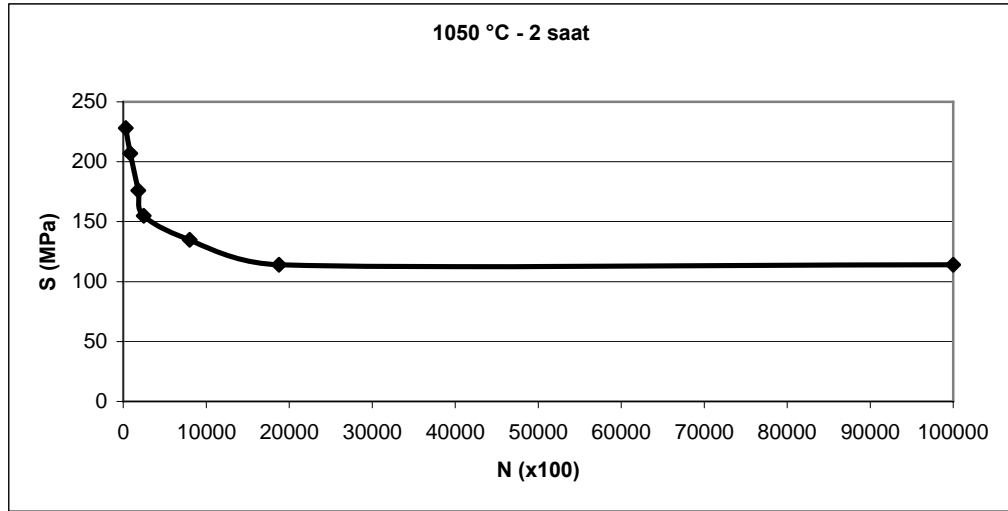


Şekil 6.25 : 1000 °C de 4 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

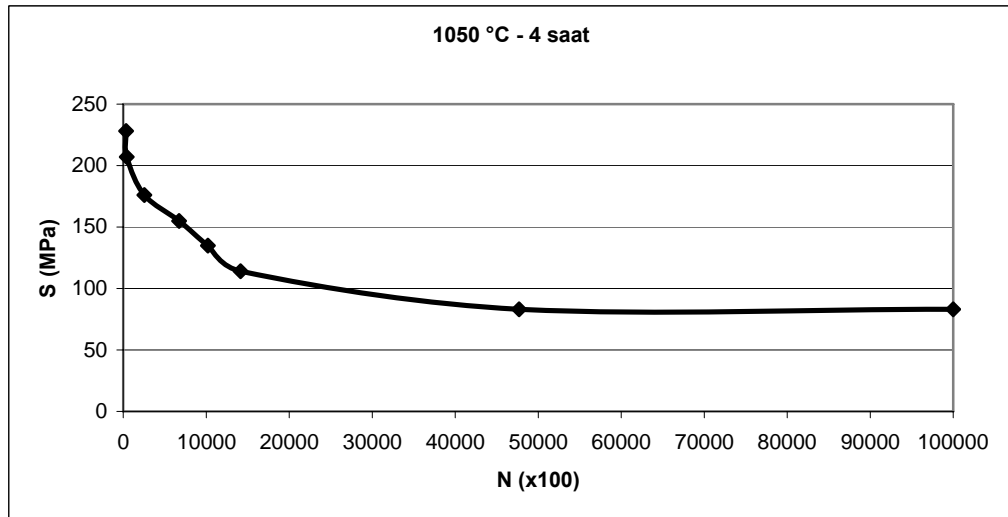


Şekil 6.26 : 1000 °C de 6 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

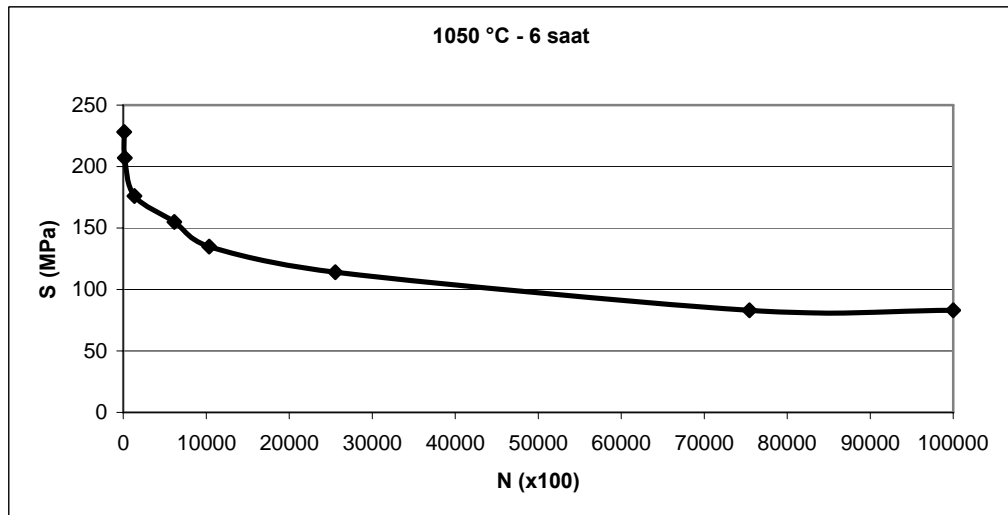
1000 °C deki numunelerin de ısıl işlem yapılmamış numunelere oranla düşük çevrim sayılarında kırıldığı gözlenmiştir. 950 °C deki numunelerde olduğu gibi burada da Wöhler eğrilerinde ufak sapmalar görülmektedir. Bu sapmalar deney koşullarından ya da numune özelliklerinden kaynaklanıyor olabilir. Ancak eğrinin elde edilmesine engel olacak bir durum söz konusu değildir. Bu duruma, numuneler üzerinde çentik etkisi yaratan ve gözle fark edilemeyen yüzey pürüzlülükleri neden olabilir.



Şekil 6.27 : 1050 °C de 2 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi



Şekil 6.28 : 1050 °C de 4 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

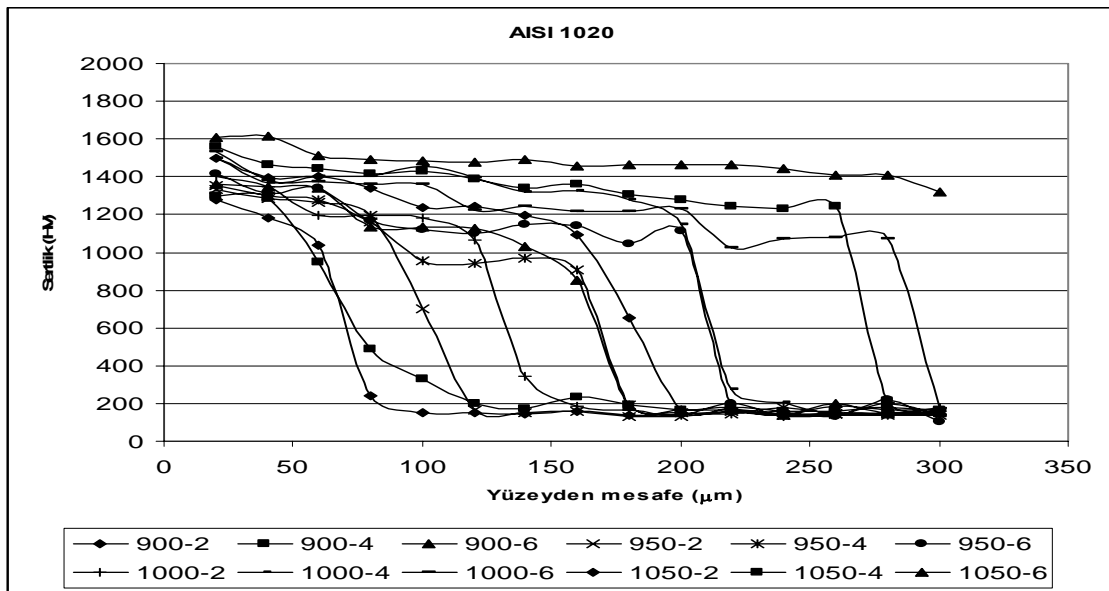


Şekil 6.29 : 1050 °C de 6 saat borlanmış deney numunelerine ait Wöhler Eğrisi

1050 °C deki numunelerin de ısıtılma işlem yapılmamış numunelere oranla düşük çevrim sayılarında kırıldığı gözlenmiştir. Bu sıcaklıkta borlanmış numunelerde de ufak sapmalar oluşmuş, Wöhler eğrileri yukarıdaki gibi elde edilmiştir.

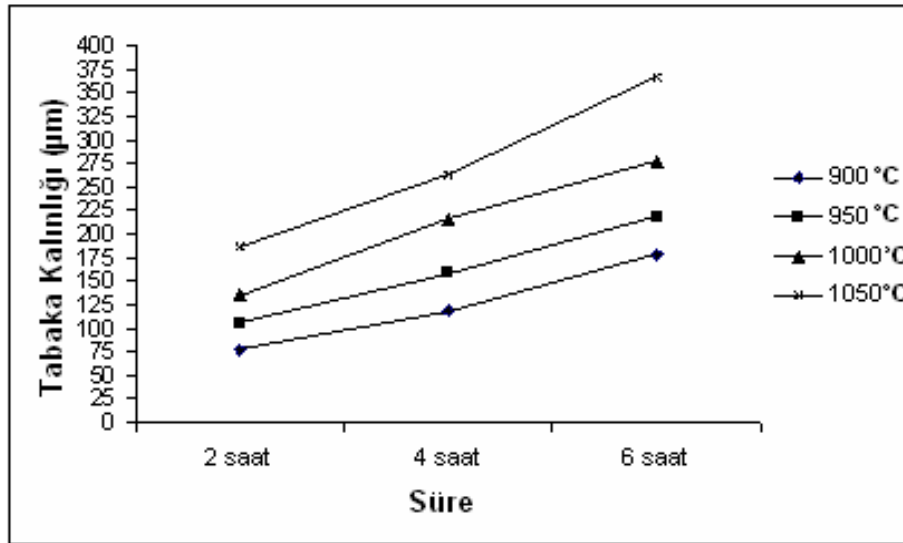
Tüm bu sonuçlar ve grafiklerden hareketle 1020 çeliklerinde borlama işleminin yorulma dayanımını düşürdüğü kesindir. Tabii ki buna, işlem sıcaklıklarında oluşan FeB ve Fe₂B tabakalarının etkisi büyüktür.

Şekil 6.30 daki grafikte ise 1020 çeliğine ait yüzeyden itibaren sertlik değerleri yer almaktadır. Bu grafikleri kullanarak borür tabakasının sertliğe etkisi hakkında yorum yapabiliriz.



Şekil 6.30 : 1020 çeliğinin yüzeyden itibaren sertlik (VSD) değerleri

1020 çeliği numunesine ait işlem süresi ve sıcaklıklarının, tabaka kalınlığına etkisini gösteren değerler Tablo 6.4 de verilmiştir. Bu tablodaki değerler kullanılarak Şekil 6.31 deki grafik oluşturulmuştur. Bu grafiklerden sıcaklık ve sürenin tabaka kalınlığını ne yönde etkilediği açıkça görülmektedir. Sıcaklık ve sürenin artmasıyla tabaka kalınlıklarında da artma olduğu açıkça ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.31 : Farklı sıcaklık ve sürelerde oluşan tabaka kalınlıkları. (AISI 1020 için)

1020 çeliğinde sıcaklık ve sürenin artmasıyla borür tabakasının kalınlığının arttığı grafikten açıkça görülmektedir. Ancak kalınlığın artması tek başına yorulma ömrünün iyileşmesine etkide bulunamamış, sonuçlardan da anlaşılacağı üzere borür tabakası malzemenin yorulma ömrünü düşürmüştür. Bu duruma, borür tabakasının artması sonucu yüzeyde oluşan FeB fazının Fe₂B ile arasında oluşan olası çatlakların neden olabileceği düşünülmektedir.

Tablo 6.4 : İşlem sıcaklığı ve süresinin numunelerdeki tabaka kalınlığına etkisi.

Sıcaklık (°C)	Süre (Saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)
900	2	77,91
900	4	118,06
900	6	178,13
950	2	104,89
950	4	159,23
950	6	217,86
1000	2	134,07
1000	4	216,68
1000	6	276,63
1050	2	186,1
1050	4	263,17
1050	6	366,86

7. GENEL SONUÇLAR VE İRDELEME

Bu çalışmada AISI 1020 çeliği için birçok kriter ele alınmıştır. Numunelerin yorulma ömürleri, yüzeyden itibaren sertlik değerleri, mikro yapı özellikleri, işlem süresi ve sıcaklığının tabaka kalınlıklarına etkisi gibi olaylar incelenmiştir. Bu incelemeler sonunda da birtakım sonuçlara varılmıştır.

AISI 1020 çeliğinin yorulma çevrim sayılarına bakıldığında tüm sıcaklık ve sürelerde borlanmış olan deney numunelerinin, ısıtılmış yapılmamış olan numunelere oranla daha kısa sürede yoruldukları gözlenmiştir.

Şekil 6.30 u inceleyecek olursak ısıtılmış yapılmamış numunelerin sertlik değerlerinin 200 VSD civarında olmasına rağmen ısıtılmış yapılmış olan numunelerde sertlik değeri 1600 VSD ne kadar ulaşmaktadır. Bu mantıkla hareket ettiğimizde borlanmış olan numunelerin yorulma ömürlerinin yüksek çıkması beklenmektedir. Çünkü yorulma ömrünün sertlik değeri ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Ancak sonuçlar dikkate alındığında sertliğin burada tek başına rolünün olmadığı görülmektedir.

Mikro yapılar incelendiğinde ise, malzeme yüzeyinde hem Fe_2B hem de FeB tabakalarının oluştuğu görülmektedir. Numunelerde, borür tabakası altında sıcaklığa bağlı olarak gittikçe kalınlaşan bir geçiş bölgesi saptanmıştır. Borlama işlemi sırasında malzemenin bileşiminde bulunan elementler yeniden dağılmaktadır. Bu arada FeB ve Fe_2B tabakalarının bu elementleri çözündürmemesinden dolayı bor difüzyonu sırasında borür tabakasından içeriye doğru itilmekte ve geçiş bölgesini oluşturmaktadırlar. AISI 1020 çeliğindeki borür tabakasından da bu nedene bağlı sonuçlar görülmektedir. Yani Fe_2B ve FeB tabakalarının oluşundan sonra bir geçiş bölgesi mevcuttur.

Her ne kadar 950 °C deki yorulma sonuçları diğer koşullardaki sonuçlara oranla biraz daha iyi çıktıysa da, tüm sıcaklık ve süre koşullarında yorulma ömürlerinin olumsuz yönde etkilendiği açıkça görülmektedir. Sebep olarak çift fazlı $Fe_2B + FeB$ tabakasının oluşması elimizdeki tek veridir. Çünkü bu çift faz oluşumları esnasında birbirlerine çekme ve basma gerilmeleri uygularlar. (FeB : Çekme gerilmesi, Fe_2B : Basma gerilmesi oluşturmaktadır). Bu yüzden iki faz arasında çatlaklar oluşur. Termal şok veya mekanik zorlamalar gibi dış etkenlere maruz kaldığında da malzeme yüzeyinden kopmalar oluşur. Bu olay, yorulma deneyi esnasında çentik etkisi yarattığından ötürü de deney numunelerinin yorulma ömürleri düşük çıkmıştır.

Tüm bu çalışma ve incelemeler sonunda; AISI 1020 çelikleri ile ilgili olarak şu sonuca varılabilir;

Deney sonuçları literatürde bahsi edilen genel sonuçlarla örtüşmemektedir. Bunun nedeni; hem yüzeyde oluşan iki fazlı ($FeB + Fe_2B$) yapının ara yüzeylerinde meydana gelen mikro çatlaklar, hem de alaşımsız malzemelerde karşılaşılan bor difüzyonunun köpek dişi yapısını destekleyerek yorulma çatlak başlangıcını teşvik etmesidir.

Borlama işlemi süresinin ve sıcaklığının; tabaka kalınlığını ve dolayısıyla malzemenin sertliğini arttırdığı görülmektedir. Ancak malzemenin mikro yapısı incelendiğinde yapıda çift fazlı ($Fe_2B + FeB$) borür tabakası oluşmaktadır. Farklı termal katsayılarından dolayı FeB / Fe_2B çift faz tabakasının ara yüzeyinde çatlaklar oluşmakta, bu durum da çentik etkisi yaratarak malzemenin yorulma ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

1. YILMAZ A.; Bor; Bilim ve Teknik Dergisi; Mayıs 2002; Sayı 414; sf. 41
2. DPT; 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı; Ankara; 2001
3. ÖZSOY A.; Termal Çevrimli Borlama Uygulamaları; Doktora Tezi; A.Ü.; Fen Bilimleri Enstitüsü; 1988
4. YAPAR U.; BAŞMAN G.; ARISOY C.F.; ŞEŞEN M.K.; Çeliklerde Borlama Yoluyla Yüzey Sertleştirme; Metal Dünyası Dergisi; Aralık 2002; Sayı 115; syf 69 – 74
5. KARAKAN M.; ALSARAN A.; ÇELİK A.; Plazma Borlama; Mühendis ve Makine Dergisi; Eylül 2002; Sayı 512
6. KAYALI E.S.; ENSARİ C.; DİKEÇ F.; Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri; İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi; İstanbul; 1996; syf 143 – 177
7. http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/mekanik_deneyler/yorulma.htm
8. ELLGİN Fernand; Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction; Chapman & Hall; 1997
9. DOWLING E.; Mechanical Behavior of Materials; Virginia; 1993; syf. 339 – 517
10. FROST N.E.; MARSH K.J.; POOK L.P.; Metal Fatigue; New York; 1999
11. GUY A.; Çev. : GÜLER D.; Fiziksel Metalurjinin Esasları; İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi; 1972; syf. 282 – 286
12. KOMAÇ O. Ş.; ÇELİK O.N.; I. Ulusal Metalurji ve Malzeme Günleri Bildiri Kitabı; Osmangazi Üniversitesi Basımevi; Eskişehir; 2004; syf. 313 – 329
13. TEZCAN R.; Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları; Yüksek Lisans Tezi; OGÜ; Makine Müh. Ana Bilim Dalı; Eskişehir; 1996; syf. 7 – 17
14. AL İ.; Dual Fazlı Çeliklerin Kısa Ömürlü Yorulması; Yüksek Lisans Tezi; OGÜ; Metalurji Müh. Ana Bilim Dalı; Eskişehir; 1996; syf. 31 – 32
15. ER Ü.; Bor Yayınımla Yüzeyi Sertleştirilmiş Çeliklerin Aşınmaya Karşı Dayanımlarının ve Pulluk Uç Demirlerinde Uygulama Olanaklarının Araştırılması; Doktora Tezi; OGÜ; Makine Müh. Ana Bilim Dalı; Eskişehir; 2003; syf. 45 – 47
16. Metals Handbook “Heat Treatments of Steels”; 1993; ASM; 10th edition
17. ASKELAND D.R.; Çeviren: ERDOĞAN M.; Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri; Nobel Yayın Dağıtım; Ankara; Cilt 1; syf. 114 – 117
18. TEKİN E.; Mühendisler İçin Çelik Seçimi; TMMOB; Ankara; 1992

19. VAROL R.; Malzeme Bilgisi ve Muayenesi; Süleyman Demirel Üniversitesi; Isparta; 2000
20. ŞEŞEN M.K.; Özel ve Süper Alaşımli Çelikler; İstanbul Teknik Üniversitesi; 1999
21. VİPİN J.; SUNDARARAJAN G.; Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel; Surface and Coatings Technology; Volume 149; Issue 1; 1 January 2002; pages 21 – 26
22. UZKUT M.; ÖZDEMİR İ.; Farklı Çeliklere Uygulanan Değişen Isıtma Hızlarının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi; Dokuz Eylül Üniversitesi; Fen ve Mühendislik Dergisi; Ekim 2001; Cilt 3; syf 65-73
23. YEŞİLDAL R., ŞEN S., KAYMAZ İ.; X40CrMoV 5 1 Çeliğinin 20 – 600 °C Arasındaki Yorulma Davranışı; Dokuz Eylül Üniversitesi; Fen ve Mühendislik Dergisi; Ocak 2003; Cilt 5; syf 159 – 171
24. FİDANER, S; ÇELİK, S.; DOĞMUŞ, H.; SÜZEN, C.; DURAN, A.; Genel Dökücülük Bilgisi; Milli Eğitim Basımevi; İstanbul; 1979; syf. 252 – 254.
25. TEKİN, A.; Çeliklerin Metalurjik Dizaynı; İ.T.Ü. Metalurji Fakültesi; 1996, syf. 40 – 43.
26. SMİTH, W.; Çev : ERDOĞAN, M.; Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri; Nobel Yayın Dağıtım; Ankara; 2000; Cilt 1; Syf. 88 – 89