33450

BORLANMIŞ AISI 1020 ve 5115 ÇELİKLERİNİN SÜRTÜNME ve AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Burhan SELÇUK
Mak. Yük. Müh.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜNE
MAKİNA ANABİLİM DALINDA DOKTORA TEZİ OLARAK SUNULMUŞTUR
HAZİRAN 1994

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışmada, jürimiz tarafından Makina Mühendisliği anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

23/6/1984

Başkan : Prof. Dr. Recep Kılıç
Üye : Prof. Dr. Ali Rıza Kaysan
Üye : Doç. Dr. Rafet Bozdoğan

ONAY :

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

04/07/1984

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Mehmet GÜNDÜZ
MÜDÜR

Şekil 4. Kabul ve Onay Sayfası

ÖZET

Bu çalışmada, semantasyon ile sertleştirilerek kam mili üretiminde kullanılmakta olan AISI 5115 çeliğinin yerine yüzeyi borlanarak sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, aşınmadan önce ve sonra sertleştirilmiş tabakanın mikro yapısı ve mikro sertlik dağılımı, sürtünme ve aşınma davranışları ile aşınmış ve aşınmamış yüzey partiküllerinin X–ışını yöntemi ile analizi yapılmıştır.

Bu deneyler için hazırlanan AISI 5115 ve AISI 1020 çelik numunelerinin yüzeyleri sementasyon ile Sivas – Estaş fabrikasında, borlama ile ise Salihli – Vezneli atölyelerinde sertleştirilmiştir. Yüzey sertleştirme işleminden sonra her numunenin yüzeyi taşlanmıştır.

Sertleştirilmiş tabakanın aşınmadan önce ve sonraki mikro sertlik dağılımı Kayseri Erciyes Üni. Müh. Fak. Mak. Böl.'de belirlenmiştir. Borlama ile sertleştirilmiş numunelerin etkili sertlik derinlikleri tesbit edilmiştir. Sertleştirilmiş tabakalar metalografik olarak incelenmiş ve kesit görünüşleri fotoğraflanmıştır.

Borlama ile sertleştirilmiş tabakaların mikro sertliklerinin taranması sonucunda elde edilen sertlik değerleri AISI 1020 çeliğinde 2700 HV 0.08, AISI 5115 çeliğinde ise 2850 HV 0.08 olarak elde edilmiştir. Ayrıca X–ışını yöntemi ile borlama sonucu sertleşen tabakanın Fe_2B fazından oluştuğu tesbit edilmiştir.

Aşınma deneyleri kuru sürtünme şartlarında yapılmış ve deneyler için plaka disk deney düzeneği seçilmiştir. Bu düzeneğe sürtünme kuvvetini tesbit edebilmek için sürtünme kuvvetine kalibre edilmiş bir Strain Gauge yerleştirilmiştir. Sürtünme kuvvetleri aşınma test sürelerinde bu cihazdan alınan değerlerle tesbit edilmiştir.

Her bir numune ayrı ayrı 55.6 N, 109 N ve 147.5 N yükte, 3.6 m/sn sabit kayma hızında ve 10, 30, 45, 60, 75, 90, 180, 300, 420, 540 sn'lik kayma sürelerinde aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Her bir durumda aşınma kayıpları tesbit edilmiş ve bunların aşınma değişkenleri ile değişimleri grafiklerle gösterilmiştir. En yüksek aşınma direncine borlanmış AISI 5115 çeliğinin sahip olduğu görülmüştür

Bu çeliği sırasıyla borlu AISI 1020, semente edilmiş AISI 5115, semente edilmiş AISI 1020, normalize AISI 5115 ve 1020 çelikleri takip etmektedir.

Aşınmış ve aşınmamış sertleştirilmiş yüzey partikülleri X–ışını analiz metoduyla C.Ü. Müh. Fak. Jeoloji Bölümünde analiz edilmiş ve beklenen faz gözlenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları birbirleri ile mukayese edilmiş, buna göre borlama ile sertleştirmenin semente etmeye göre daha etkili olduğu ve borlanarak yüzeyi sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin düşük yüklerde semente edilmiş AISI 5115 çeliğinin yerine kam mili üretiminde ve diğer kullanım alanlarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

SUMMARY

In this study Wheather AISI 1020 case boried steels insterad of AISI 5115 case hardesed by carburizing is used in manufucturing cam shaft was experimentally investigated. The experimentall study included the following;

1- The micro structure of the hardened case before and after wear

2- The friction and wear behavior.

3- The micro hardness of the hardened case before and after wear and

4- The particle analizing of the hardened case and debris by the metod of X-ray diffraction.

Some of the specimens prepared from AISI 5115 and AISI 1020 steels at the required size were hardened by carburizing at SİVAS-ESTAŞ faetory. The other were boried at Salihli-Vezneli work-shop after heat treatments. They were grinded.

The micro hardness distrubution of the case hardened steels was investigated before and after wear and the photograph of the cross section apperance of the hardened case were taken under the microscopy at E.Ü. Müh. Fak. The effective hardness depht of case hardened steels was determined.

The hardness values of the boried steels were 2700 HV 0.08 for AISI 1020 and 2850 HV 0.08 for AISI 5115 and Fe_2B phase was obtained by metod of X-ray diffraction at the boried case.

The wear test was investigated using the disk-plate mechanism in dry condition and to measure friction forces, the strainn gauge was installed to the wear test mechanism. The frictions were read and recorded during the test.

Each of the specimens was tested at the Normal Forces of 55.6 N, 109 N N and 147.5 N. When the slide speed. Was constant, that is, at 10, 30, 45, 60, 75, 90, 180, 300, 420 and 540 m/s. The wear test results was obtained as the lost of mass and shown as grafics. AISI 5115 boried steel had the highest resistance to wear among the specimens. This steel was followed by boried AISI 1020, carburized AISI 5115, carburized AISI 1020, normalized AISI 5115 and AISI 1020 respectively.

The hardened case particles were analyzed by the metod of X-ray diffraction before and after wear at C.Ü. Müh. Fak. and optained result was as expected.

When all the results of the experiments were compared with each other, it follows that the case hardened by boring is more effective than the case hardened by carburized steel can be used in steel instead of AISI 5115 carburized steel can be used in menufucturing a can shaft and other construction at least under low forces.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimimini Zara/SİVAS da, lise tahsilinide İstanbul Fenerbahçe lisesinde ve yüksek tahsilini Fachhochschule Niederrheine/ALMANYA da bitirdi. 1983 yılında Türkiye'ye dönerek askerlik hizmetini yaptıktan sonra 1 yıl özel çalışan Burhan SELÇUK 1986 yılında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Müh. Fak. Makina Mühendisliği bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı. Yüksek lisans eğitimini 1991 yılında tamamladı ve akabinde aynı Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora çalışmalarına başladı. Halen Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Müh. Fak. de öğretim görevlisi olarak çalışmakta olup evli ve dört çocuk sahibidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmam sırasında, gerek konu seçiminde ve gerekse çalışmanın bütün safhalarında bilgi ve yardımlarından sürekli istifade ettiğim ve bazı günler zamanının büyük çoğunluğunu bana ayıran sayın hocam Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Numunelerin hazırlanmasında ve aşınma deney setinin yapımında emeğini esirgemeyen Sivas Tüdemsaş Genel Müdürü sayın Hakkı COŞAR'a ve Bakım Onarım Müdürlüğü elemanlarına teşekkür ederim.

Numunelerin sementasyonunda yardımcı olan Sivas Estaş Müdürü sayın Abdullah DÖNER ve müh. İsmail TİMUÇİN ve elemanlarına, borlama işlemini yapan Salihli-Vezneli Aşındırıcı Şti. sahibi Hasan VEZNELİ ye ve ayrıca Kayseri Taksan Kalite kontrol laboratuvarları yetkilisi Ayşe KAYA hanıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Osman YİĞİT 'e, ve tez yazımında emeğini esirgemeyen Ahmet YÜCEL'e, yeğenlerim Şehmuz ve Tamer IŞIN'a, ayrıca bu konuda bana destek olan eşim ve çocuklarıma ve bölüm arkadaşlarıma teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Burhan SELÇUK
Haziran – 1994, SİVAS

İÇİNDEKİLER

		Sayfa:
BÖLÜM I.	SÜRTÜNME ve AŞINMA	
1.1.	GİRİŞ	1
1.2.	SÜRTÜNME	1
1.2.1.	Kuru Sürtünme	2
1.2.2.	Sonuç	4
1.3.	AŞINMA	5
1.3.1.	Zamanla Gelişen Aşınma	6
1.3.2.	Aniden Meydana Gelen Aşınma	6
1.3.3.	Aşınmanın Temel Unsurları	7
1.3.4.	Aşınma Çeşitleri	8
1.4.	AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	11
BÖLÜM II.	ISIL İŞLEM	
2.1.	GİRİŞ	13
2.2	AŞINMAYI AZALTMAK AMACIYLA ÇELİKLERE UYGULANAN YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ	14
2.2.1.	Yüzeyin Kimyasal Terkibini Değiştirmeden Yapılan Sertleştirme İşlemleri	15
2.2.1.1.	Fırında Isıtılarak Yüzey Sertleştirme	16
2.2.1.2.	Banyoya Daldırarak Yüzey Sertleştirme	16
2.2.1.3.	Elektron Işınıyla Yüzey Sertleştirme	16
2.2.1.4.	Lazer ile Yüzey Sertleştirme	17
2.2.1.5.	Alevle Yüzey Sertleştirme	17
2.2.1.6.	Endüksiyon ile Yüzey Sertleştirme	18
2.2.2.	YÜZEYİN KİMYASAL TERKİBİNİ DEĞİŞTİREREK YAPILAN SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ	19
2.2.2.1.	SEMENTASYON (Karbürleme)	19
2.2.2.1.1.	Kutu (Katı Ortamda) Karbürleme	21
2.2.2.1.2.	Sıvı (Tuz Banyosu) Karbürizasyonu	21
2.2.2.1.3.	Gaz Karbürizasyonu	22
2.2.2.1.4.	Tabaka Kalınlığı ve Sertliği	22
2.2.2.1.5.	KARBÜRLEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ	24
2.2.2.1.5.1.	Yorulma Mukavemeti	24
2.2.2.1.5.2.	Tokluk	24

2.2.2.1.5.3.	Yüzey Durumu ve Boyut Değişimi	25
2.2.2.2.	NİTRÜRASYON	25
2.2.2.2.1.	Toz ile Nitrürleme	28
2.2.2.2.2.	Tuz Banyosunda Nitrürleme	28
2.2.2.2.3.	Gaz Nitrürasyonu	29
2.2.2.2.4.	İyon İle (Plazma) Nitrürleme	29
2.2.2.2.5.	NİTRÜRLÜ TABAKANIN ÖZELLİKLERİ	30
2.2.2.2.5.1.	İç yapı	30
2.2.2.2.5.2.	Beyaz (Bileşik) Tabaka	31
2.2.2.2.5.3.	Yayınma (Difüzyon) Tabakası	32
2.2.2.2.6.	Tabaka Kalınlığı ve Sertliği	32
2.2.2.2.7.	Nitrürlenmiş Çeliklerin Mekanik Özellikleri	34
2.2.2.2.7.1.	Aşınma Direnci	34
2.2.2.2.7.2.	Temperlenmeye Karşı Yüksek Direnç, Yüksek Sıcaklıkta Yüksek Sertlik	35
2.2.2.2.7.3.	Gevreklik	35
2.2.2.2.7.4.	Yorulma Mukavemeti ve Çentik Hassasiyeti	35
2.2.2.2.7.5.	Korozyon Direnci	36
2.2.2.2.7.6.	Ölçü Değişimi	37
2.2.2.2.7.7.	Tokluk	37
2.2.2.3.	KARBONİTRÜRASYON	38
2.2.2.3.1.	Karbonitrürlemenin Yapılışı	38
2.2.2.3.2.	TABAKA YAPISI	40
2.2.2.3.2.1.	Bileşik Tabaka	40
2.2.2.3.2.2.	Yayınma (Difüzyon) Tabakası	41
2.2.2.3.3.	Tabaka Derinliği ve Sertlik	41
2.2.2.3.4.	KARBONİTRÜRASYONUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ	43
2.2.2.3.4.1.	Aşınma, Yorulma, Korozyon, Çentik Darbe Dayanımı, Akma ve Elastiklik Sınırı	43
2.2.2.3.4.2.	Temperleme Direnci	43
2.2.2.3.4.3.	Boyut Kontrolü	44

BÖLÜM III. BORLAMA

3.1.	GİRİŞ	45
3.2.	SAF BORUN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	46
3.3.	ÇELİKLERDE BOR BİLEŞİKLERİ	46
3.4.	BORLAMA TABAKASI	48
3.4.1.	Bileşik Tabaka	48

3.4.2.	Yayınma (Difüzyon) Tabakası	50
3.5.	BORLAMA YÖNTEMLERİ	51
3.5.1.	Katı Ortamda Borlama	51
3.5.1.1.	Toz Ortamda Borlama	52
3.5.1.2.	Macunlama ile Borlama	53
3.5.2.	Sıvı Ortamda Borlama	54
3.5.2.1.	Daldırma Yöntemi	55
3.5.2.2.	Elektroliz Yöntemi	56
3.5.2.3.	Derişik Çözeltide Borlama	56
3.5.3.	Gaz Ortamda Borlama	57
3.5.4.	Plazma (İyon) Borlama	59
3.6.	BORLANABİLEN MALZEMELER	60
3.7.	BORÜRLÜ TABAKANIN ÖZELLİKLERİ	60
3.7.1.	İç Yapı	60
3.7.2.	Tabaka Kalınlığı ve Sertliği	63
3.7.3.	Borlu Tabakanın Oluşumuna Etki Eden Faktörler	64
3.7.3.1.	Bor Verici Ortamın Etkisi	64
3.7.3.2.	İşlem Şartlarının Etkisi	65
3.7.3.3.	Alaşım Elementlerinin Etkisi	68
3.7.4.	Bor Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler	71
3.8.	BORLAMADAN SONRA YAPILAN ISIL İŞLEMLER	72
3.9.	BORLANMIŞ ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	73
3.9.1.	Sertlik	73
3.9.2.	Aşınma Direnci	73
3.9.3.	Yapışma Mukavemeti ve Gevreklik	75
3.9.4.	Korozyon Direnci	76
3.9.5.	Yüzey Durumu	77
3.9.6.	Ölçü Değişimi ve Çekme	78
3.9.7.	Diğer Mekanik Özellikler	79
3.10.	BORLAMANIN GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ	80

BÖLÜM IV. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1.	GİRİŞ	82
4.2.	DENEY MALZEMELERİNİN ÖZELLİKLERİ	84
4.3.	NUMUNE HAZIRLAMA ve UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	85
4.4.	AŞINMA DENEYLERİ	86

4.4.1.	Giriş	86
4.4.2.	Deney Tesisatının Özellikleri	88
4.4.3.	Deneyin Yürütülmesi	91
4.4.4.	Numunelerin Hazırlanması	91
4.5.	DENEY BÜYÜKLÜKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ	92
4.5.1.	Kayma Hızının Belirlenmesi	92
4.5.2.	Normal Yükün ve Kayma Süresinin Tayini	93
4.5.3.	Sürtünme Kuvveti ve Katsayısı	94
4.6.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	97
4.6.1.	Borlama Sonuçları	97
4.6.2.	Borlanmış Yüzeylerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları	106
4.6.2.1.	Sürtünme Kuvvetinin Normal Yük ve Kayma Mesafesi ile Değişimi	116
4.6.2.2.	Aşınma Miktarı	128
4.6.2.2.1.	Aşınmanın Kayma Süresi (Kayma Mesafesi) ile Değişimi	128
4.6.2.2.2.	Aşınmanın Normal Yükle Değişimi	129

BÖLÜM V.

5.1.	TARTIŞMA	140
5.2.	SONUÇLAR	142
5.3.	ÖNERİLER	142
	EKLER	143
	KAYNAKLAR	151

KULLANILAN SEMBOLLER

Sembol:	Anlamı:	Birimi:
μ	Sürtünme katsayısı	(–)
μ_d	Dinamik sürtünme katsayısı	(–)
μ_s	Statik sürtünme katsayısı	(–)
i	Çevirim oranı	(–)
z_1, z_2	Diş sayısı	(–)
ε_1	Şekil değişim oranı	(–)
β	Açı	(°)
α_1	Püskürtme Açısı	(°)
F	Kuvvet	(kg)
F_s	Statik sürtünme kuvveti	(kg)
F_d	Dinamik sürtünme kuvveti	(kg)
F_n	Normal kuvvet	(kg)
R_1	Kuvvet	(kg)
F_q	Kuvvet	(kg)
m	modül	(mm)
d (d_1, d_2)	Çap	(mm)
a, b, c	Mesafe	(mm)
D_k	Toboka kalınlığı	(cm)
t	zaman	(sn)
P	Güç	(kW)
T	Mutlak sıcaklık	(°K)
W	Mukavemet momenti	(mm^3)
w (w_1, w_2)	Çevresel hız	(1/sn)
v	Hız	(m/sn)
M_1 (M_{11}, M_{12})	Dönme momenti	(N mm)
σ	Gerilme	(N/mm^2)
E	Elastiklik modülü	(N/mm^2)
D	Difüzyon katsayısı	(cm^2/sn)
D_0	Frekans faktörü	(cm^2/sn)
n	Devir sayısı	(dev/dak)
n_1	Giriş devir sayısı	(dev/dak)
n_2	Çıkış devir sayısı	(dev/dak)
Q	Aktivasyon enerjisi	(Kcal/mol)
R	Gaz sabitesi	(Kcal/mol °K)

BÖLÜM I – SÜRTÜNME ve AŞINMA

1.1.GİRİŞ

Hiç şüphesiz her cisim bir veya birkaç cisim ile temasta olup birbirlerine göre ya hareketli veya hareketsizdir. Temasta olan ve birbirlerine göre relatif harekette bulunan iki elemanın temas yüzeyleri arasında sürtünmeyle hareketi engelleyici özelliğe sahip şiddeti sınırlı olan sürtünme kuvveti ve buna bağlı olarak aşınma, sıcaklık artışıyla enerji kaybı meydana gelir. Hareketi oluşturan kuvvetler yeterli oranda büyük olursa sürtünme kuvveti harekete engel olamaz [1]. Hareket sonucu sürtünerek çalışan bütün makina elemanlarında oluşan aşınma ise karmaşık bir özelliğe sahiptir ve günümüzde önemi gittikçe artmaktadır.

Makina aksamlarında oluşan aşınma, boyut değişikliğine neden olur ve onların hasaslığını bozar. Aşınma ile hassaslığı bozulan bir makinada imal edilen mamülse, istenen kalite ve hassaslıkta olmaz. Karmaşık yapılı aşınmaya sistemli bir çözüm getirilememiştir.

Sanayi sektöründe hammadde kaynaklarının sınırlı olması sebebiyle aşınma ile oluşan malzeme kayıplarının azaltılması için yapılan çalışmaların artırılması ve teşvik edilmesi gerekmektedir [2].

1.2. SÜRTÜNME

Bir katı cismin kendisiyle temas eden başka bir katı cismin bağıl hareketine veya hareket ihtimaline karşı gösterdiği dirençtir. Bir biri ile temasta olan yüzeyler arasındaki sürtünme hareketi kayma, yuvarlanma veya bu iki hareketin bileşimi şeklindedir [3,4,5].

Mekanik sürtünme teorisinde temel sürtünme konuları şunlardır [4]:

1. Katı cisimler arasındaki sürtünme, görünen temas alanından, yani sürtünme kuvveti sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanından bağımsızdır.

2. Sürtünme kuvveti, cisimlere gelen normal kuvvet ile doğru orantılıdır ve aralarında sürtünme katsayısı olarak bilinen sabit bir oran mevcuttur. Bu sürtünme katsayısı sürtünmeyi karakterize eden önemli bir faktör olup

$$Fs = \mu \cdot Fn \qquad (1.1)$$

tarzında tanımlanır.

3. Kinetik sürtünme kayma hızından bağımsızdır.

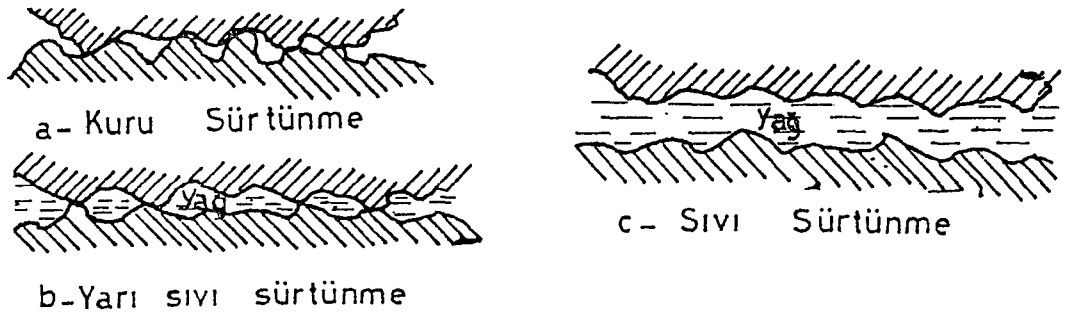
Sürtünme katsayısı, kayma mesafesi ve süresine, sertliğe, temas yüzeyinin ortalama tane büyüklüğüne ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu çeşitli deneylerle gösterilmiştir. Bu katsayı, artan kayma mesafesi ve süresi, yüzey tabakasının artan tane büyüklüğü ile belirli bir değere kadar artar ve daha sonra yaklaşık sabit bir değerde devam eder [3,4,5,6].

Sürtünme, temasta olan yüzeylerin durumuna da bağlıdır. Gerçekte, temas eden yüzeyler görünen geometrik yüzeyden daha küçüktür. Bu nedenle de sürtünme görünen yüzeyden bağımsız, fakat gerçek temas alanını oluşturan pürüzlere bağlıdır. Temas eden parçalarda oluşan basınç, birbirine değen pürüz noktalarında malzemenin akma sınırını aşabilmekte ve böylecede gerçek değme yüzeylerindeki pürüzler normal kuvvetin etkisi ile sıkışarak deforme olurlar ve bunun sonucunda temas yüzeyleride büyür. Temas eden yüzeylerin büyümesi ile birbirlerine yaptıkları basınçta o oranda büyür [1].

Bağıl hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulup konulmamasına göre sürtünme kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üçe ayrılır. Birbirlerine göre bağıl harekette olan yüzeyler doğrudan doğruya temasta iseler kuru, yüzeyler bir yağlayıcı tarafından ayrılıyorlarsa sıvı, yağlayıcı yüzeyleri birbirinden tam olarak ayırmıyorsa sınır sürtünme meydana gelir (Şekil 1.1) [4].

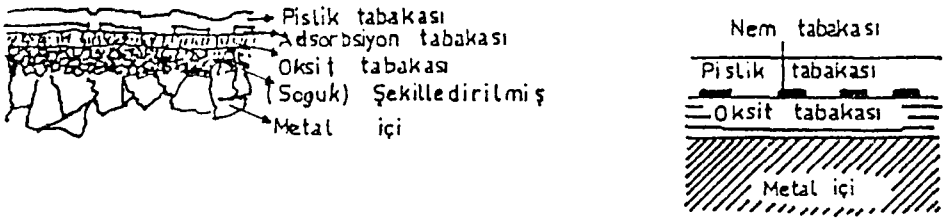
1.2.1. Kuru Sürtünme

Fiziksel anlamda kuru sürtünme sadece vakum ortamında mevcuttur. Makina tekniğinde sürtünme, sürtünmenin meydana geldiği çevre ve çevreyi oluşturan elemanların (oksit, yağ, su buharı, pislik v.s. gibi) etkisindedir. Atmosferin etkisindeki sürtünme yüzeylerinde absorbe edilmiş gazlar, bu gazların oluşturduğu oksitler, yağlar ve pislikler gibi kimyasal bileşikler vardır (Şekil 1.2). Bunlar sürtünmeyi kısmen azaltır ve bir yağlayıcı gibi rol oynarlar. Bu yüzey tabakaları çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle vakum da temizlenir ise metalsel temiz bir yüzey elde edilir. Bu tip yüzeylerde metal–metal teması sağlamak mümkün olur ve böylece de kuru sürtünme meydana gelir.

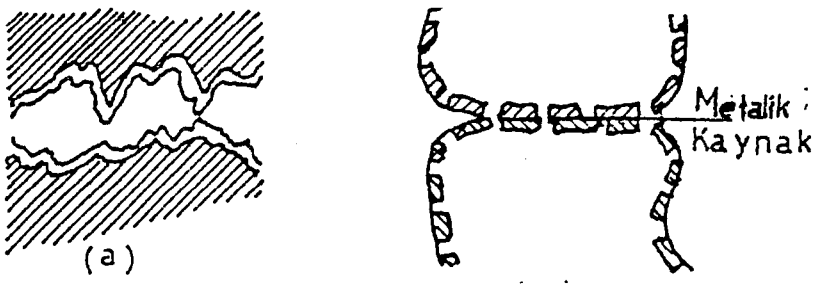


Şekil 1.1: Sürtünme çeşitleri [3]

Ayrıca bu yüzey tabakalarının hareketi neticesinde yırtılması sonucunda metal-metal teması olur. Metalik temas olan noktalarda ise soğuk kaynaklaşma olayı rahatlıkla meydana gelmektedir (Şekil 1.3). Bu kaynaklaşma genelde tam temas eden yüzeylerdeki çeşitli kimyasal bileşikleri ihtiva eden tabakalar arasında meydana gelir. Sürtünme esnasında bu kaynama noktaları ya hareketi engeller veya yüzeylerden parçacıklar koparark yırtılmalara ve dolayısı ile de makina parçalarının aşınarak kullanılmaz hale gelmesine neden olur. Bu duruma göre sürtünme metal kaynak bağları ile çeşitli kimyasal bileşikleri ihtiva eden tabakalar arasındaki bağların oluşturduğu dirençtir. Sürtünme kuvvetiyse hem kaynak bağlarını hem de kimyevi bileşiklerin meydana getirdiği tabakaların arasındaki bağlantıları koparan kuvvettir. O halde sürtünme kuvveti değme yüzeylerindeki düzensizlikler ve moleküler çekme kuvvetleri nedeni ile temas eden yüzeylere etkiyen çok sayıdaki kuvvetlerin bileşkesidir [1,3,4,5].



Şekil 1.2: Malzeme yüzeyinde atmosferin etkisiyle oluşan tabakalar [4].



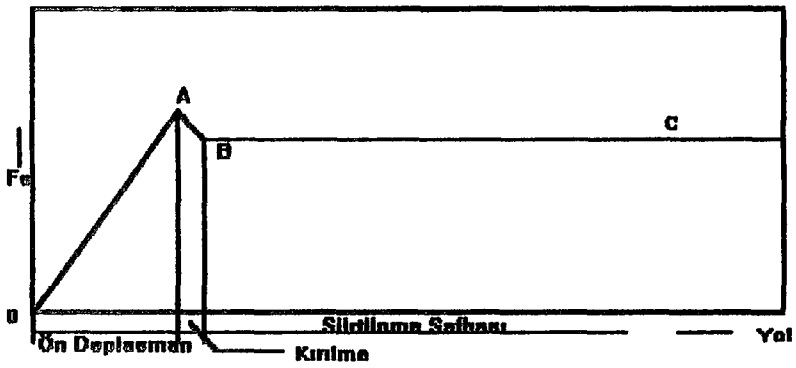
Şekil 1.3: Metal-metal temasında adhezyon ve kopma bölgeleri [3]

1.2.2. Sonuç

Metal kaynak bağı teşkil etmiş olan temas noktalarının kayması temas halindeki malzemelerin cinsine bağlıdır. Bu bakımdan:

1- Birbiriyle kolayca alaşım haline gelebilen Fe, Cr, Ni, gibi sert malzemeler arasında kuvvetli kaynak bağları oluşur. Sürtünme katsayısı düzensiz olarak değişir, yüzeylerde iz ve bir yüzeyden diğerine malzeme transferi olur.
2- Benzemeyen ve birbiriyle ilgili olmayan malzemeler arasında daha hafif ve düzenli bir sürtünme olur ve yüzeylerde ince izler meydana gelir.
3- Fe-C ve Fe-Ni gibi birbiri üzerinde kayan malzemelerin biri sert diğeri yumuşak (Ör; Sn, Pb, İr ve bunların alaşımları) olduğu taktirde yumuşak malzeme diğer malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan ince bir tabaka ile kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme bir yağlayıcı malzeme görevi yaparak sürtünme katsayısının azalmasına neden olur. Böylece de yüzeyler arasında yenme olayı gerçekleşmez. Bilindiği gibi birbirleri ile kolayca alaşım yapabilen malzemeler arasında kuvvetli kaynak bağları meydana gelebileceğinden sürtünmenin bu gibi iki malzeme arasında oluşmamasına özen göstermek gerekir. Yapılan araştırmalar, hekzagonal kafesli metallerin daha düşük, kübik hacim ve kübik yüzey merkezli kafes sistemlerine sahip metallerinse daha büyük sürtünme katsayılarına sahip olduklarını göstermiştir [3,4,5].

Pratikte pürüzlülük ve adhezyon birlikte sürtünmeyi oluşturur. Yüzey sürtünmesi, temas eden katı cisimlerin bağıl hareketleri esnasında gerçek temas alanlarında hareketi sağlayan sürtünme kuvveti tarafından yapılan işin enerjiye dönüşmesi işlemidir. Statik halden kaymanın başlangıcına kadar sürtünme kuvveti aniden yükselir (Şekil 1.4 de OA arası). OA arasında adhezyon meydana gelir ve temas noktalarında mikro kaynak bağları oluşur. AB arasında mikro kaynak bağları kayma hareketinin etkisi ile kırılır. Kırılma sebebi ile sürtünme kuvveti B noktasına kadar düşer. BC arasında ise kararlı sürtünme olan dinamik sürtünme oluşur [6].



Şekil 1.4: Sürtünme Kuvvetinin Kayma Mesafesi ile Değişimi [6]

1.3. AŞINMA

Birbiriyle temas halindeki iki cismin arasında meydana gelen bağıl hareket ile cisimlerin yüzeylerinin birbirini etkilemesi sonucu aşınma meydana gelir.

Aşınma sürtünme halinde bulunan yüzeylerde mekanik etkenler ile istenilmediği halde kopan malzeme kaybıdır. Bu şekilde, yüzeylerin ilk şekilleri bozulur, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez [4].

Sürtünerek çalışan bütün makina elemanlarında kaçınılmaz olan ve kompleks bir sistem özelliği gösteren aşınma, sanayide bir çok tribolojik sistemlerde görülen korozyonun ve yorulmanın yanısıra üçüncü büyük problemdir [6]. Bu nedenden dolayıda günümüz teknik sistemlerindeki araştırmalar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yoğunlaşmıştır. Sürtünmenin ve aşınmanın azaltılmasıyla malzeme kaybı önlenerek boyut hassasiyeti sağlanırken enerji israfıda önlenmiş olur [7].

Çeşitli makina elemanlarının, mühendislik malzemelerinin kullanma ömürlerine büyük oranda etki eden aşınma giderilememekte ve birbiri ile sürtünerek çalışan makina elemanlarının temas yüzeyleri zamanla aşınarak değişikliğe uğramaktadır [8].

Yukarıdaki izahatlardan anlaşıldığı gibi aşınma hakkında tam açıklayıcı bir tanım yapmak zor olmasına rağmen kabul edilen bir kaç tanım ise şunlardır:

1- Relatif hareket ve yüzey basıncı altında kalan iki cismin teması sonucu oluşan mekanik enerjinin tesiri ile malzeme yüzeyinden parçacıkların kopması sonucu meydana gelen malzeme yıpranmasıdır [9].
2- Mekanik etkenler ile cisimlerin yüzeyinde zamanla oluşan malzeme kaybıdır [3].
3- Katı cismin yüzey bölgesinden tribolojik zorlamalar sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybıdır [6,9,10].

Ayrıca aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki ve kimyevi değişmelerin sonucudur [4]. Mühendislik malzemesinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için şu şartların mevcut olması gerekir:

1- Mekanik bir etken olması,
2- Sürtünmenin (bağıl hareketin) olması,
3- Yavaş ve devamlı olması,
4- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
5- İsteğimiz dışında meydana gelmesidir.

Aşınma, ne bir malzeme ve ne de bir malzemenin yüzey özelliğidir, bilakis bir sistem özelliğidir [11]. Bu nedenle çok değişkenli bir fonksiyon olan aşınmanın sürekli incelenmesi gerekir.

Aşınma pratikte;

1- Zaman ile gelişen aşınma,
2- Aniden meydana gelen aşınma

şeklinde ikiye ayrılır [4].

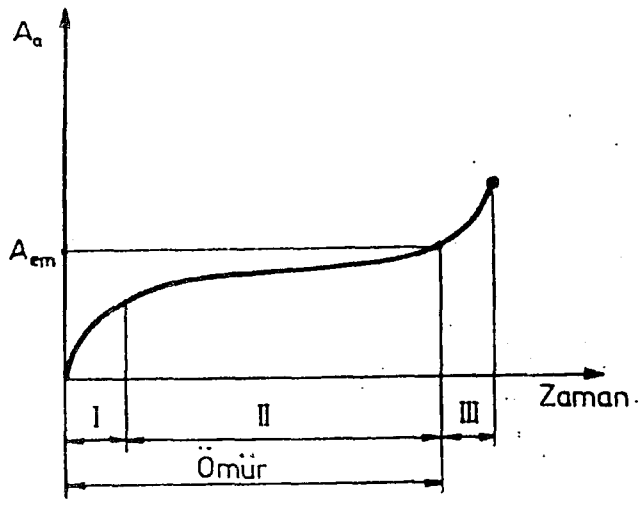
1.3.1. Zamanla Gelişen Aşınma

Şekil 1.5 de görüldüğü gibi aşınma, üç safhada meydana gelir [4].

1. safha (Rodaj safhası): Bu safha parçaların birbirine alıştırma safhasıdır. Bu safhada parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu aşınma daha sonraki aşınmayı büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle parçaların rodajlarının iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi, bu safhaya ait önemli şartlardır. Genelde rodaj, yüksüz ve normal hızdan daha düşük hızlarda yapılır. Rodajın iyi ve kısa süre içinde tamamlanması için bu safhaya ait olan özel yağlar kullanılır.
2. safha: Bu safhada aşınma, çalışma sırasında temas noktalarında meydana gelir.
3. safha: Bu bölgede artan aşınma hızı ile şiddetli aşınma oluşur.

1.3.2. Aniden Meydana Gelen Aşınma

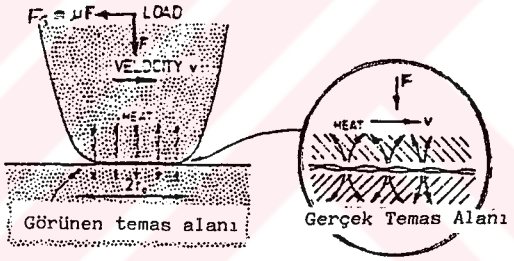
Parçaların yüzeyleri aniden bozulur veya bazı hallerde birbirine kilitlenir ve çalışamaz duruma gelir. Genellikle eş çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan veya yağlamanın yetersiz olması halinde meydana gelen aşınmadır [4].



Şekil 1.5: Aşınma zaman bağıntısı [4]

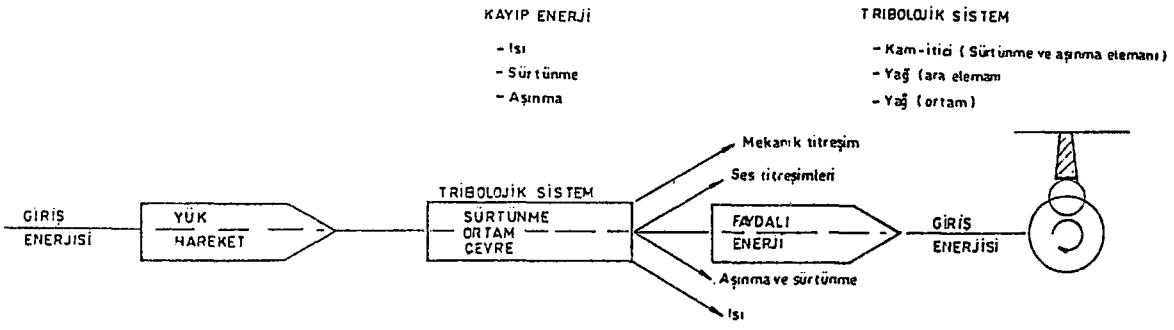
1.3.3. Aşınmanın Temel Unsurları

Aşınmanın başlaması ve devam edebilmesi için sürtünme olmalıdır. Sürtünen iki cismin temas alanı, görünen temas alanından küçüktür. En hassas işleme yöntemleri ile de olsa işlenen katı malzemelerin yüzeyi hiç bir zaman düz değildir [2]. Çünkü imalat tekniğinde tam olarak pürüzsüz düz bir yüzeyin elde edilmesi imkansızdır. Yüzeyi elde etmede kullanılan kesici ve yontucu araçlar ne kadar itinayla hazırlanırsa hazırlansın, işlem neticesi elde edilen yüzey üzerinde mutlaka belirli büyüklükte pürüzlülük, yani yüzeyde birkaç mikron yüksekliğinde mikroskopik pürüzler bulunur [12]. Yüzeylerinin temas etmesi halinde ise yüzeylerdeki karşılıklı pürüzler etkileşirler. İlk temas birkaç pürüz tepeleri arasında olur. Pürüz tepeleri arasındaki girintiler temas etmezler (Şekil 1.6). Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır. Yüklemenin şekli ve yük temas alanın büyüklüğünü etkiler. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar, yani ezilir ve bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Yüklemenin devam etmesi ile de pürüz sayısı azalır ve gerçek temas alanı görünen temas alanına yaklaşır [3,5,6]. Yüzey pürüzlülüğünün artışı ile aşınma direnci azalır [13].



Şekil 1.6: Tipik bir kayma çifti.

Temasta olan cisimlere bağıl hareket yaptırabilmek için sisteme bir enerji girer. Bu enerji yük ve hareket şeklindedir. Giriş ile çıkış enerjisi arasındaki fark, mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisine ve aşınmaya dönüşür (Şekil 1.7) [3,5,6].



Şekil 1.7: Tribolojik sisteme giren enerjinin dağılımı [3].

1.3.4. Aşınma Çeşitleri

Birçok araştırmacılar, malzemelerin aşınması üzerine yaptıkları araştırmalar sonucu aşınmayı farklı farklı sınıflandırmışlardır [3,6]. Bu sınıflandırmalardan bazıları şunlardır:

1. Adhesiv aşınma
2. Abrasiv aşınma
3. Ablativ aşınma
4. Koroziv aşınma
5. Yorulma aşınması
6. Tabaka aşınması
7. Yenme aşınması
8. Erozyon aşınması
9. Kavitasyon aşınması
10. Erozyonlu kavitasyon aşınması
11. Püskürtme aşınması

Özellikle kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesiv çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, metal ağırlığı veya etkiyen bir kuvvet, temasta olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etkir. Bu basınç, yani bu noktalardaki gerilme pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaklaşmalarına neden olurlar. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan mikro adhesiv temas yüzeyi boyunca yayılır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklaşmayı oluşturur. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesiv aşınmayı oluşturur [3,9,10,14–17].

Aşınma çiftinin yüzeyleri arasındaki tutma kuvvetleri (adhesiv bağ mukavemetleri) eşit büyüklükte ise veya adhesiv bağ mukavemeti, büyük ise pürüz kopar ve malzeme kaybına neden olur. Eğer adhesiv bağ kuvveti pürüz mukavemetinden küçükse, pürüz kaynak noktasından kopar ve hiç bir malzeme kaybına neden olmaz. Adhesiv aşınması sırasında iki sürtünme yüzeyi arasında üçüncü bir cisim meydana gelmektedir. Özellikle adhesiv aşınmada kırılan parçalar ara yüzey de serbest kalabileceği gibi metallerden birine bağlı kalarak da taşınabilirler. Parçacığın bir yüzeyden diğer yüzeye taşınmasına metal transferi denir [3,5,6,18].

Adhesiv aşınma kolay alaşım yapan benzer malzemelerde görülür. Bu aşınma bağıl hıza, normal kuvvete, yüzeylerin sertliğine bağlıdır. Yüksek hız ve yüklerde görülen bu aşınma yüzeydeki oksit ve nem tabakasının etkisindedir. Temiz yüzeylerde ise kısmen düşük hızlarda meydana gelir. Yüzeylerden biri diğerine göre sert ise, kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemede olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine transfer edilir. Yüzeyler arasında sert malzeme parçacıkları, yani abrasiv aşınmayı meydana getirecek şartların bulunması halinde, adhesiv aşınma meydana gelmez. Adhesiv aşınma, sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında oluşmamaktadır [3–5].

Sert ve keskin köşeli mineral tanelerin metal yüzeyini mikroskopik bölgede çizerek talaş kaldırması ve malzeme içerisinde oldukça derinlerde değişiklik yapmasına abrasiv aşınma denir. Bu aşınma farklı kristalografik yapıya sahip iki cisim arasında meydana gelir ve aşınma çifti arasında kaynaklaşma olayı oluşmaz [9,10].

Eğer küçük ve sert parçacıklar bir cisimde sürtünmenin etkisi ile çizilmeler oluşturuyorsa (meselâ; mineral–metal çiftinde aşınma mineralin etkisi ile oluşuyorsa) veya kayma hareketi esnasında hareketin etkisi ve uygulanan kuvvetle sert cismin yüzeyi kendine ait olan pürüzlerin tepeleri ile yumuşak cismin yüzeyinden ufak parçacıkları (mikro talaşları) kesip çıkarıyorsa abrasiv aşınma söz konusudur. Abrasiv aşınma yumuşak parça tükeninceye kadar kararlı bir şekilde devam eder [3,5,8,14,16].

Abrasiv aşınma esnasında yüzeylerin bozulması, dışarıdan yüzeyler arasına toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeyinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir. Bu sert parçacıklar bir zımpara tozu gibi yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğeleme ve taşlamaya benzer bir malzeme kaybının oluşmasına neden olurlar veya yüzey üzerine sürtünerek metal kaldırmadan plastik deformasyon oluşturarak yüzeyi çizerler. Abrasiv aşınmanın olabilmesi için temasta olan yüzeylerin pürüzlü ve birinin diğerinden daha sert olması gerekir. Genellikle aşınma, metal–metal sürtünmesinde abrasiv veya adhesiv olarak başlar, araya giren toz veya mineral tanelerinin çizmesiyle oluşan mikro talaşları veya parçalanmış oksit parçacıları ile üç cisimli abrasiv aşınma şeklinde devam eder [3,4,5].

Temas yüzeylerinde oluşan mekanik yıpranmaların yanısıra kimyasal ve elektrokimyasal tahribatların oluşmasına korozyon denir [16]. Metal veya metal alaşımlarının çevreleri ile (katı, sıvı ve gaz ortamlar) kimyasal, elektrokimyasal veya metalurjik ilişkiden dolayı yüzeylerinde yapısı farklı tabakaların oluşması ve sürtünme hareketi ile bu tabakaların parçalanıp taşınması sonucu meydana gelen hasara korozif aşınma denir. Bu aşınma için gerekli şart, korozyonun ve sürtünme hareketlerinin olmasıdır. Korozif aşınmanın faydası, çok yüksek basınç altında çalışan yüzeylere, oluşan oksit ve diğer ara tabakaların yapışmasını önleyerek adhesiv aşınmayı azaltmasıdır. Korozif aşınma, abrasiv ve adhesiv aşınmalar ile birlikte oluşabilir [3,5]. Sürtünen yüzeylerde oluşan korozyon ürünü sert parçacıklar halinde koparsa aşınma şiddetlenir [14].

Bu tip aşınma temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması ile kendini gösterir. Değişken (dinamik) zorlama altında zamanla malzemelerde bir yorulma olayı başlar. Dinamik yükün etkisi ile temas yüzeyinin altında ve yüzeye yakın yerlerde, iç yapının yorularak tahrib olması sonucu yüzeyde mikro çatlaklar oluşur. Sürtünmenin etkisiyle yüzeylerde plastik şekil değiştirme dolayısı ile de pekleşme oluşur ve malzeme gevrekleşir. Gevrekleşen malzeme ise değişken zorlamanın etkisi ile çatlar ve zamanla bu çatlaklar yayılarak yüzeyden pul pul malzeme kayıplarına neden olur [2,4].

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar oluşmaktadır. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte, büyümekte ve yüzeyde küçük çukurcuklar meydana getirmektedir [3–5,14]. Aşınma çifti yüzeylerinde, çevrede bulunan ara malzeme ve gazlar ile tribo–kimyasal, tribo–adsorbsiyon ve benzer olaylar sonucunda oluşan sınır tabaka, yassı aşınma parçacığı şeklinde sıyrıldığında yeniden oluşmakta ve aşınma olayını önemli ölçüde etkilemektedir.

Yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları oluştururlar. Bununla birlikte özellikle kimyasal maddeler ile temas eden yüzeyler bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluştururlar. Değişken yük altında bu sert tabakalar ve sert parçacıklar düşerek aşınma parçacıklarını meydana getiriler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder. Bu izahata göre tabaka aşınmasına oksidasyon aşınması veya sürtünme oksidasyonu denir [4,9,10].

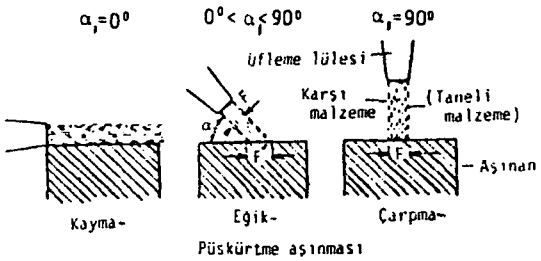
Malzemenin bölgesel olarak aşırı zorlanan yerlerinde, fiziksel veya kimyasal değişimler sonucunda meydana gelen bir aşınmadır. Genelde uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklı kabuğunda ve fren balatalarında görülür [9,10].

Birbirlerine kuvvetle temas eden iki metal yüzeyi arasında düşük genlikli titreşim hareketlerinin meydana gelmesi ile oluşur. Bu olay, çoğu makinalarda iletme ve çalışma esnasında meydana gelen titreşimler ile ortaya çıkar. Yenme adhesiv aşınmanın şiddetli bir çeşitidir [3,5,17].

Malzeme yüzeyi ile temas ortamı arasındaki bağıl hızın yüksek değerlere ulaştığı sistemlerde malzeme yüzeylerinde görülen bozulma şekline erozyon denir. Erozyon, içinde katı tanecikler ihtiva eden bir sıvının katı cismin yüzeyine çarpması ile meydana gelir [3,5,16]. Erozyon (yıkama veya hidroabrasiv aşınma) akıcı maddelerin oluşturduğu aşınmadır. Sıvılar ve gazlar akış sırasında yüzeyden parçacıklar koparmasına ve girdaplar etkisiyle dalgalı bir yüzeyin meydana gelmesine neden olur. Özellikle doğrusal akımın saptırıldığı ve bozulduğu yerlerde aşınma yüksek olmaktadır. Akışkanın birlikte sürüklediği maddeler, mesela, hava içerisindeki tozlar, su içindeki kumlar ve bunlar içindeki oksitler özellikle aşındırmayı artırıcı yönde etki yaparak malzemenin iç yapısını gevşetip, yüzeyden parçacıkların ayrılmasına neden olur. Akan sıvılarda, ani basınç düşmesi sonucu gaz kabarcıkları veya boşlukların oluşmasına kavitasyon denir. Sıvı içindeki bu boşluğun darbe şeklinde kapanması sonucunda (gaz kabarcıklarının patlaması) ani bir basınç ve sıcaklık artışı olur ve buna bağlı olarak doğan kimyasal etkileşimlerle malzemede oluşan hasarlar, çukurlaşmalar ve küçük çatlaklarla plastik deformasyonlar şeklinde görülür. Kavitasyon nedeniyle oluşan aşınma, artan malzeme sertliği ile azalmaktadır [10]. Erozyon ile birlikte korozyonun da temas yüzeylerinde oluşturduğu tahribata erozyonlu korozyon denir [16]. Ackert ve Haller'e [19] göre içinde katı tanecikler ihtiva eden sıvı akışkan katı cismin yüzeyine dalgalar halinde çarparak yüzeyde çukurlar oluşturarak aşındırır. Çukurluklar aşınmaya zorlanan yüzeyde oluşan çözünmeler ve girdaplar nedeniyle meydana gelirler. Buna göre parça yüzeyinde ki çok küçük her yükseltinin arkasında bir girdap akımı oluşmakta ve merkezkaç kuvvetle, katı tanecikler, yüzeye bastırılmakta ve dolayısı ile aşınma hızlandırılmış olmaktadır [20].

Bir gaz akımı ile üflenilen katı parçacıkların çarptığı veya sürtünerek kaydığı katı cisim yüzeylerinde, püskürtme aşındırması meydana gelir. Katı taneciklerin aşındırılan yüzeye geliş açısına göre kayma püskürtmesi aşındırması, dik püskürtme (çarpma) aşındırması ve eğik püskürtme aşındırması tarzında meydana gelir (Şekil 1.8) [21].

Püskürtme (özellikle çarpma) aşındırmasına zorlanan metalik yüzeyler, sürekli olarak yenilenen, şiddetli mikro plastik şekil değişimlerine uğramakta, sert ve gevrek malzemelerde ise darbe ve yorulma zorlamalarıyla malzemenin ayrılma direnci aşılarak, aşınma olayı cereyan etmektedir [21].



Şekil 1.8: Püskürtme aşındırması çeşitleri [21]
a) Kayma püskürtmesi aşındırması,
b) Eğik püskürtme aşındırması,
c) Çarpma püskürtmesi aşındırması,
α_f= Püskürtme açısı, F '= F/Sinα_f

Aşınan malzeme üzerine püsküren taneli malzemelerin neden olduğu aşınmada, aşınma direnci püskürtme açısına bağlı olduğu için bu açının önemi büyüktür. Püskürtme aşınması miktarı malzemeye ve onun özelliklerine bağlıdır. Yumuşak ve deforme olan malzemeler küçük püskürtme açısında (kayma püskürtmesi) büyük bir aşınma gösterirken, çarpma püskürtme aşınması durumunda sert malzemelere göre çok daha az aşınmaktadırlar. Çarpma püskürtmesi aşınması halinde de kayma sürtünmesi aşınmasına benzer şekilde alçak, geçiş ve yüksek aşınma bölgeleri görülmektedir. Bunlarda aşınmanın geçiş bölgesi, püskürtülen maddenin sertliğine bağlı olarak sağ yana doğru kaymaktadır. Malzemelerin püskürtme aşınmasında, aşınma miktarına malzeme sertliği kadar üfleme hızının etkisiide görülmektedir. Bitler deneylerle sert çelik malzemelerin yüksek üfleme hızlarında, yumuşak çeliğe göre daha fazla aşındığını belirlemiştir [10].

1.4. AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Yapılan çeşitli çalışmalar ile aşınmaya etki eden faktörler belirlenmiştir. Ancak aralarındaki ilişki tam olarak tespit edilememiştir. Aşınmaya etki eden değişkenler ise şunlardır:

1- Malzemenin cinsi ve kimyasal bileşimi
2- Malzemelerin mikro yapısı
3- Malzemelerin kristal yapısı
4- Malzemelerin sertliği
5- Isıl işlem
6- Kayma çifti
7- Ortama bağlı faktörler
8- Yük ve hız
9- Sıcaklık

Farklı yüzey basıncı ve çalışma hızlarında yürütülen deneyler neticesinde yüzey basıncının artması ile aşınmanın hızlandığı aynı yükte çalışma hızının artması ile aşınmanında arttığı tesbit edilmiştir. Basınç artışına paralel olarak çalışma hızının da artması aşınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca sürtünmeyi artıran yük aşınmanın artmasına neden olmaktadır [22,23].

Sürtünme enerjisinin ısıya dönüşmesi ile gerçek temas alanının sıcaklığı artar. Artan sıcaklığın etkisi ile sürtünen yüzeylerde bölgesel ergimeler olur ve yüzeylerden küçük parçacıklar koparak aşınmayı hızlandırır. Sürtünme ve aşınma

sonucu meydana gelen yapı dönüşümleride ısıl çatlamalara ve sürtünme esnasında parçacıkların koparak aşınmanın artmasına sebep olur. Bu nedenle katı cisimlerin aşınmasında sürtünen yüzeylerin sıcaklığı çok önemlidir [2,6,24,25].

Metal-Metal sürtünme aşınmasında aşınma miktarı, zamana ve kayma yoluna bağlı olarak belirtilir. Aşınma miktarları aşınan parçanın şekil ve ağırlık değişimine ait sayısal bir büyüklük olup aşınma (olay) ve aşınma miktarı (sonuç) olarak birbirinden ayırt edilmesi gerekir. Buna göre aşınma miktarı parçanın ağırlık kaybı (gravimetrik aşınma) ve hacımsal (volumetrik) aşınma veya sürtünme yüzeyinin yükseklik kaybı olarak ifade edilir [9,26].

Aşınmaya etki eden faktörlerin çok ve çeşitli oluşu ile birlikte sertlik, yüzey pürüzlülüğü, iç gerilmeler ve kristal eş yönlenmeli gibi başlangıç büyüklüklerinin sürtünme-aşınma prosesi sırasında da değişerek kendilerini oluşturan diğer faktörleri tekrar değiştirmeleri, bu konudaki her türlü hesap girişimlerini çok sınırlı bırakmıştır. Bu bakımdan zorunlu görülen deney standı konstrüksiyonunda, tribosistem etken faktörlerinin istenilen yönde değiştirilebilmesi ve/veya deney sırasında sabit tutulmasının sağlanmasın da ölçme değerlerindeki tekrarlanabilirlik açısından ayrıca dikkat edilmelidir. Bütün bunlara rağmen aşınma miktarları hacimce aşınma miktarı ve ağırlık kaybı tarzın da ölçülmektedir [27-29].

Aşınma araştırmaları deneysel, teorik veya deneysel ve teorik yollarla yapılmakta ise de teorik yaklaşımla aşınma faktörlerinin aşınma miktarını nasıl etkilediği ve aşınma eşitliğinde de nasıl gösterileceğini ortaya koymak çözüm için önemli bir etkendir [30].

Aşınma olayına etkiyen çok sayıdaki faktörler ve bunların sürekli olarak değişimi, çok defa labaratuvar deneylerinde elde edilen sonuçların benzeri olan pratik olaylara tatbikini mümkün kılmaz. Bu nedenle aşınma makina mühendisliğinin daima bakıma muhtaç bir dalı olup makina parçalarının hasarlarını kapsayan araştırmalardır. İşletme şartlarının değişken olması nedeni ile deneylerin aynı şartlarda yapılması ve sonuçların mukayesesi zordur. Bunun için aşınma deneylerinin, labaratuvarlarda işletme şartlarına yakın şartlarda yapılması daha uygundur [3,9].

Günümüzdeki teknik işlemlerdeki araştırmalar sürtünme ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yoğunlaşmıştır. Aşınma ve sürtünmenin azaltılmasıyla malzeme kaybı önlenerek boyut hassasiyeti sağlanırken enerji israfıda önlenmiş olur.

Yukarıdaki bahsedilen düşünceler doğrultusunda bir takım aşınma deneyleri yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir. Şimdiye kadar yapılan bütün aşınma deneyleri, çeşitli model deneyler ile yapılmıştır. Bu deneyler gerçek işletme şartlarında da yapılabilir [7,29].

Makina elemanlarının sürtünmeye, aşınmaya, yorulmaya ve korozyona karşı dirençlerini artırmak için çeşitli yüzey işlemleri uygulanır. Bunlardan bazıları sementasyon, nitrürasyon, karbonitrürasyon, borlama, kromlama, v.s. dır.

Bu çalışmada ise aşınmayı azaltma yöntemlerinden biri olan ısıl işlem çeşitlerinden borlama ile yüzeysel sertleştirilen çeliklerin aşınma direnci incelenmiştir.

BÖLÜM II – ISIL İŞLEM

2.1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde kullanılan metallerin bir çoğu elementlerin oluşturduğu alaşımlardır. Alaşımı oluşturan elemanların miktarı istenildiği gibi değiştirilebilinir. Gerek saf metaller gerekse alaşımlı metaller kristallerden dokunmuşlardır. Fakat alaşımların dokusu kendilerini oluşturan elementlerin dokusundan farklıdır.

Eriyik halinde birbirine tamamen karışan iki elemanın katılaşmasından sonra üç farklı durum oluşabilir [31]:

1- Elemanlardan birinin kristallerinin biçimi değişmeden öteki elemanın atomlarını içine alır.
2- Alaşımı meydana getiren elemanların kristalleri hiç bir değişikliğe uğramadan birbirlerinin arasına serpilir.
3- İki elemanın atomları birleşerek her ikisinin kristaline de benzemeyen yeni bir kristal meydana getirirler.

Teknolojide en yaygın olarak kullanılan alaşımsa çeliktir. Bunun için de çeliğin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gerekir. Çeliğin temel elemanı Fe ve C' dur. Saf demire teknolojik özellik, yani endüstriyel üstünlük kazandıran karbondur. Fe ile C belirli oranlarda alaşımlanırlarsa farklı mekanik özellikli alaşımlar elde edilir. Karbon demirin bünyesinde iki farklı durumda bulunur. Bu bulunuş, soğuma şartlarına ve yapıdaki Mn ve Si miktarına bağlıdır Yapıda Si miktarı fazla ve soğuma yavaşsa karbon grafit halde, Mn fazla ve soğuma hızlı ise C demire bağlı (Fe_3C) olarak bulunur. C' un yapıdaki miktarı ve dağılımı çeliğin mekanik özelliklerine etkide bulunur [3,32–36]. Karbon demirin şu özelliklerine etkide bulunur [3,32,33]:

1- %0.8 değerine kadar yapının sertliğini artırır.
2- Çekme mukavemetini ve akma sınırını yükseltir
3- Kopma uzamasını ve kopma büzülmesini azaltır.

4- Erime sıcaklığını ve γ-, α- dönüşüm sıcaklıklarını düşürür.
5- Isı iletkenliğini ve özgül ağırlığı düşürür.
6- Çeliğin sertleşmesini sağlar.
7- Sertleşme çatlaklarının meydana gelmesinden dolayı kaynak edilebilirliği azaltır.
8- Yapıda grafit halde bulunması durumunda, aşınma direncini artırır.

Çeliğin mikro yapısı soğuma şartlarına, Si ile Mn miktarına ve Fe ile C'nun oluşturduğu kristal çeşitlerine bağlıdır. Fe ile C' nun oluşturduğu kristal çeşitleri; Ferrit, Grafit, Ostenit, Sementit, Perlit ve Ledeburit' dir. Bu mikro yapılar, denge diagramından görüldüğü gibi, C oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bir veya birkaçı bir arada bulunabilir (Şekil 2.1) [3,34].

Mekanik özellikler basit fakat riskli olan ısıl işlemle geliştirilirler. Katı haldeki malzemenin belli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta bir süre bekletilmesi ve tekrar soğutulmasına genel olarak ısıl işlem denir. Isıl işlem, katı haldeki metal veya metal alaşımlarına, kimyasal bileşimi dikkate alınarak, belli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, yerine göre birbiri peşine zamanlanarak uygulanan ısıtma ve soğutma işlemidir (Şekil 2.2). Sıcak biçimlendirme veya sıcak işlemle yüzey korunması amacıyla yapılan tavlamalar ise ısıl işlem sayılmaz. Isıl işlemle malzemenin aşağıdaki özellikleri geliştirilebilir [2,33,34,37,38].

1- Tane yapısı
2- İç yapı
3- Sertlik
4- Tokluk
5- Mukavemet değerleri
6- Korozyon ve aşınma derecesi
7- Elektrik iletkenliği
8- Yorulma direnci

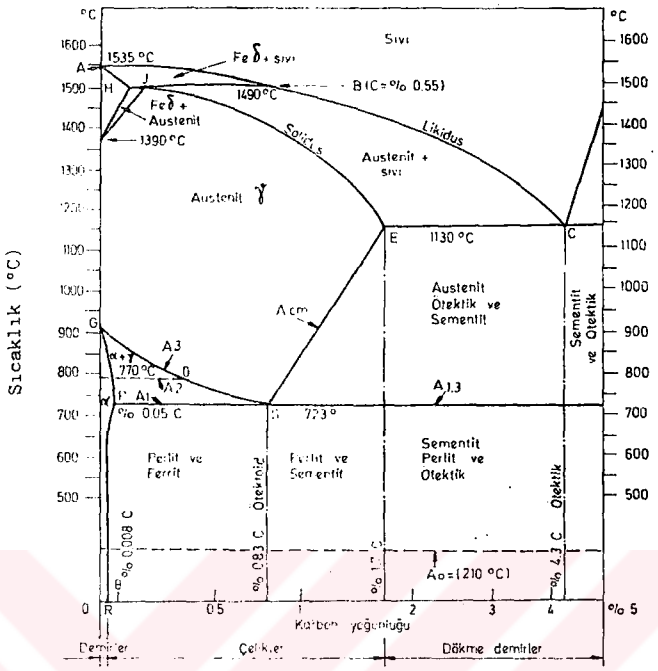
Birçok makina elemanları tasarım gereği sertleştirilirler. Bunun içinde sertleştirme sonucu çelikte oluşan ısıl (termal) ve dönüşüm gerilmelerine dikkat edilmelidir [39,40].

2.2. AŞINMAYI AZALTMAK AMACIYLA ÇELİKLERE UYGULANAN YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ

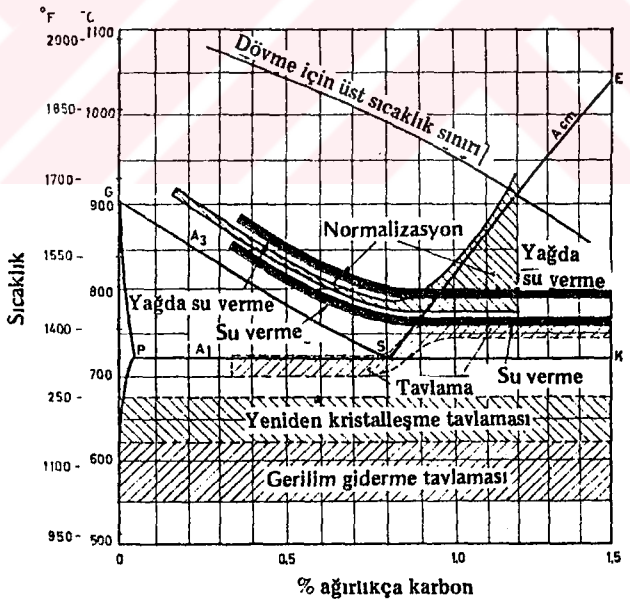
Bazı makina elemanlarının sadece yüzeysel sertleştirilmeleri tasarım gereğidir. Geliştirilen bazı yöntemlerle, düşük karbonlu çeliklerin sadece yüzeyleri sertleştirilmektedir. Yüzeye su verme ile malzemenin dış kısmı sert iç kısmı yumuşak kalır. Bu durumda malzeme hem sert, hemde sünek olur. Bu tip yapılar ise darbeli yüklere, yorulmaya ve aşınmaya karşı dirençli olurlar [3,41].

Yüzey sertleştirme işlemi iki şekilde yapılır [3,35]:

1) Yüzeyin kimyasal terkibini değiştirmeden yapılan sertleştirme yöntemi (termal)
2) Yüzeyin kimyasal terkibini değiştirerek yapılan sertleştirme yöntemidir (termokimyasal).



Şekil 2.1: Fe – C denge diyagramı [33]



Şekil 2.2: Çeşitli ısıl işlemler için sıcaklık bölgelerini gösteren Fe–C denge diyagramı [40]

2.2.1. Yüzeyin Kimyasal Terkibini Değiştirmeden Yapılan Sertleştirme İşlemi

Bir malzemede kimyasal terkibi değiştirmeden sertleştirme yapılabilmesi için malzemenin içerdiği karbon miktarının yeterli olması gerekir (C>%0.35). Bu çeliklerin sadece yüzeyleri ısıtılarak ostenite dönüşmeleri sağlanır. Isıtma için alev, ısı, indüksiyon akımı, elektron ışını ve laser ışınları kullanılır. Bu yöntemlerin hepsinde parça yüzeyi ostenite dönüştürülür ve sonrada soğutulur [3,42,43].

Yüzeyin kimyasal terkibini değiştirmeden yapılan sertleştirme yöntemleri şunlardır:

1) Fırında ısıtılarak yüzey sertleştirme
2) Banyoya daldırılarak yüzey sertleştirme
3) Elektron ışını ile yüzey sertleştirme
4) Laser ışını ile yüzey sertleştirme
5) Alev ile yüzey sertleştirme
6) İndüksiyon ile yüzey sertleştirme

2.2.1.1. Fırında Isıtılarak Yüzey Sertleştirme

Parçanın dış kısmı, içindeki C miktarına bağlı olarak dönüşüm sıcaklığının biraz üstünde tavlanır yada bu sıcaklıkdaki fırınlara konur. Bu fırınlarda en azından parça yüzeyinin ostenite dönüşmesi tamamlanıncaya kadar beklenir. Ancak bu süre çok önemlidir ve iyi ayarlanması gerekir. Malzeme daha sonra uygun ortamda soğutularak sertleştirilir [3].

2.2.1.2. Banyoya Daldırarak Yüzey Sertleştirme

Daldırma ile sertleştirme işleminde 1000–1200°C sıcaklıktaki tuz veya metal banyolarına daldırılarak parçanın dış yüzeyi su verme sıcaklığına erişinceye kadar hızla ısıtılır. Isıtma sırasında parçaların ince bir yüzey tabakası ostenitleşir ve iç kısmı yeterince ısınmaz. Metal banyoları (erimiş bronzlar) iyi ısı ilettikleri için sertleştirilecek parçanın hızla ısınmasını sağlar Daldırma, parçanın büyüklüğüne göre saniye mertebesinden bir kaç dakikalık süreler içinde yapılır. Su verme işlemi ısıtmadan sonra aralık vermeden hemen yapılmalıdır. Çünkü her türlü bekletme, sıcaklığın merkeze doğru akmasına sebep olur. Yani sertleşen tabakanın kalınlığı artar. Isıl işleme tabi tutulmuş parçaların, banyoya daldırılarak sertleştirilmeleri daha yaygındır [3,22,33,37].

2.2.1.3. Elektron Işınıyla Yüzey Sertleştirme

Işın kaynağında bulunan, genellikle wolframdan olan ve yüksek sıcaklığa ısıtılan katot elektron demeti yayar. Bu demeti oluşturan elektronlar katotla anot arasındaki yüksek gerilimle hızlanırlar. Elektron akımı bir elektrot tarafından demet haline getirilir ve bir ventil ile diyaframdan geçirilerek manyetik bir mercek üzerine düşürülür. Manyetik mercekse elektron ışınını iş parçası yüzeyine odaklayarak, büyüklüğü ayarlanabilir bir bölge oluşturmaktadır. Elektronların kinetik enerjileri odak noktasında metal atomlarıyla etkileşerek ısı enerjisine dönüşür. Odak noktasında oluşan yüksek güç yoğunluğu nedeniyle gereç doruk düzeyde bir hızla (yaklaşık 10^4 °C/saniye) ısınır. Bir kaç mili saniye sonra ışın kesilir. Bunu izleyen zaman içinde soğumanın olabilmesi ancak, ısının soğuk olan çevre bölgelerine geçişi ile mümkündür. Bu ise çok büyük negatif sıcaklık gradientleriyle gerçekleşmektedir. Böylece hızlı ısı akışı sertleşebilir çeliklerde çok yüksek sertlikli martenzit

oluşumuna neden olur. Elektron ışınının etkimesinden sonra gereğince hızlı ve yeterli soğumanın olabilmesi için işleme alınan hacim, iş parçasının en çok %10'u kadar olmalı, bu sınırın aşılmamasına özel bir özen gösterilmelidir. Sertleşme için en uygun sıcaklık çevrimi (ısıtma-kısa tutma süresi-çok hızlı soğutma) yaklaşık 10^{-1} ile 10^{-4} saniyelik süreler içinde gerçekleşir. Bunun için ise iki farklı çalışma tarzı amaca uygun olarak seçilir.

1) Sürekli Işınla Sertleşme: Bu yöntemde ışın iş parçası yüzeyi üzerinde uygun bir ilerleme hızıyla bağıl olarak ilerler. Sertleştirilecek bölgelerin geometresine göre ışın saptırılır yada iş parçasının hareket ettirilmesiyle ışının odak noktası yürütülmüş olur.
2) İmpulslu Işın ile Sertleşme: Herbir ışın impulsu iş parçası yüzeyinde küçük bir dairesel bölgeyi sertleştirebilir. Bu sertleşen bölgenin çapının odak noktasının çapına hemen hemen eşit olduğu söylenebilir. Odak noktasının çapıysa 0,1 mm'den birkaç milimetreye kadar değiştirilebilir [42,44].

2.2.1.4. Lazer ile Yüzey Sertleştirme

Lazer ışınları ile yapılan sertleştirmede etki çok kısa sürelidir. Soğuma etkisi parça yüzeyinde kendiliğinden ortaya çıkar ve ek bir soğutma işlemi gerektirmez. Sertleşme sadece yüzeyde Ac_3 sıcaklığı üzerine çıkılınca, ince bir yüzey tabakası üzerinde etkili olur. Bu tabakanın derinliği 2-3 mm'yi aşmaz. Işından etkilenen yüzey tabakasıyla, etki altında kalmayan ana kütle arasında sertliğin düşüşü diğer yöntemlere oranla daha ani olmaktadır. Lazer ile sertleştirmeyi belirleyen en önemli etkenler ışın yoğunluğu,ışının etki genişliği ve ışın hızının optimum seçimidir [43].

Gerek Lazerle gerekse elektron ışınıyla yapılan sertleştirmelerde parça yüzeylerinde tufal oluşmaz ve dolayısıyla da ek bir işleme gerek duyulmaz [42].

2.2.1.5. Alevle Yüzey Sertleştirme

Cr-Ni veya Cr-Mo alaşımlı çeliklere ve %0,35-0,70 C oranına sahip sade karbonlu çeliklere uygulanır. Alevle sertleştirmede, çelik sertleştirme sıcaklığına kadar bir kaynak üflecinden çıkan alevle ısıtıldıktan sonra su veya yağ ile ve sertleşme yeteneği iyi olan çeliklerde ise hava ile soğutulur. Esasta yüzeyi sertleştirilecek çeliklerin çok kısa bir zamanda ve çok kuvvetli bir ısı kaynağı altında yüzeylerinden ince bir katmanın su verme sıcaklığına kadar çıkarılarak hızla sertleştirilmesinden ibarettir. Ostenitik bölgeye ısıtılan yüzey ısıtmanın hemen ardından soğutulmalıdır. Aksi halde yüksek ısı dağılımı çekirdeğe doğru ilerler ve sertlik derinliğini artırır.

Alevle sertleştirmede kullanılan gaz genelde, oksijenle asetilen, doğal gaz veya propan gibi yanıcı gazların karışımıdır. Alevin şiddeti ve parçanın alevde kalma süresi istenilen sertlik değerine ve derinliğine bağlıdır. Bu yöntemle, her türlü büyüklükte çeliğin yüzeyini doğrudan ısıtmak mümkündür ve sertleştirilmiş kabuk 3-4mm derinliğe sahiptir. Alevle sertleştirme elle yapıldığı gibi, Spin de denilen dönel bir tabla üzerinde veya kademeli olarak yassı bir yüzey üzerinde de

yapılır. Bunların dışında çizgisel ve kaymalı sertleştirme mümkündür. Alevle sertleştirme yönteminde, çeliğin aşırı ısıtılması durumunda, oksitlenme ve çatlama tehlikesi vardır. Sertleştirmede kolay ulaşılan 1100°C'de çelik şiddetle oksitlenir, hatta yapıda azda olsa var olan bakır erir. Bu durumda çelik yüzeyi çekme gerilmesine maruz kalırsa, Cu tane sınırlarında toplanır ve çatlamaya sebep olur. Bu usulde parçanın istenen yerleri sertleştirilebilir bazı yerleride yumuşak bırakılabilir [3,31,33,35,37,40].

2.2.1.6. Endüksiyon ile Yüzey Sertleştirme

Endüksiyonla yüzey sertleştirme, yüzey sertleştirmesine elverişli çeliklerin yüzeyinin endüksiyon akımı kullanılarak dönüşüm bölgesi üstünde bir sıcaklığa kadar ısıtılması ve ani soğutulması ile yapılır [38].

Esas itibari ile alevle sertleştirmeye benzer, fakat bu yöntemde enerji kaynağı olarak elektrik akımı kullanılır. Yüksek frekans içeren bir alternatif akım kaynağına bağlı bakır sargılar yardımı ile parça yüzeyinde endüksiyon akımı oluşturulur. Oluşan olay transformatördeki olaya benzer. Bobin primer sargıyı, parçaysa hem demir çekirdeği, hem de sekonder sargıyı oluşturur. Parça yüzeyi kısa devre halindeki sargı gibidir. Bütün bunların yanında ayrıca fiziksel bir olay olan Skın Effekt'te yer alır. Akım frekansının artmasıyla endüksiyon akımı yüzeyde sıkışır. Bu amaç için 10-10000 kHz frekanslardaki akımlar kullanılır [3,33].

İletken olarak bilinen bobinler hem elektrik akımı, hemde çeliğin ısıl (termal) radyasyonu ile ısınırlar. Bobinler, sertleştirme esnasında soğutulması için iç kısmından su geçirilen bakır boru sargısından yapılmış olup sertleştirilecek yüzeye uygundurlar. Elektrik akımı parçayı sıkı saran bobine verilir parçaya verilmez. Endüksiyon yolu ile parçanın yüzeyinde bir elektrik akımı meydana gelir ve yüzey bir kaç saniyede su verme sıcaklığına ısıtılır ve hemen ısıtılan alanlara soğutma sıvısı püskürtülerek sertleşme sağlanır [32,40].

Bu işlem esnasında oluşan ısı yüzeyden çekirdeğe doğru ilerlemez, bilakis sertleşen yüzeyde kalır. Bu yöntem ile ulaşılan sertlik 50-60 HRC ve etkili sertleşme derinliği 0.1-3 mm dir. Bu yöntemle sertleştirilen çelikler su, yağ veya gerektiğinde hava ortamların da soğutulabilirler [3,33,36,40].

Endüksiyon ile sertleştirmenin avantajları [3]:

1) Sınırlandırılmış bölgesel sertleştirme,
2) Kısa ısıtma süresi,
3) En az oksitlenme riski,
4) Az miktarda deformasyon,
5) Yorulma direncinde artış,
6) Düşük maliyet,

olmasına rağmen, dezavantaj olarak şunlar sayılabilir [3,32,42]:

1) Elektrik üretimi,
2) Ayarlama aletleri için gerekli tesis masraflarının yüksek olması,
3) Belli parçalara uygulanabilmesi,
4) Yüzeyde tufal oluşumu

2.2.2. YÜZEYİN KİMYASAL TERKİBİNİ DEĞİŞTİREREK YAPILAN SERTLEŞTİRME İŞLEMİ

Bu yöntem, genelde düşük karbonlu çeliklere ve özellikle de hiç sertleştirilemeyen çeliklere uygulanır. Bu yöntemde çeliklerin yüzeyinde sert kabuk oluşturmak amacıyla, yüzeyin kimyasal yapısı değiştirilir. Bu nedenle geliştirilmiş yöntemler şunlardır [45]:

1) Sementasyon (Karbürizasyon)
2) Nitrürasyon (Azotlama)
3) Karbonitrürasyon (Siyanürleme)
4) Borlama
5) Alüminyumlama
6) Silisyumlama
7) Kromlama

Yüzey sertleştirmeyle aşınmaya ve yüzey basıncına dayanıklı sert bir yüzey tabakası ile nispeten yumuşak ve tok bir çekirdek elde edilir. Ayrıca yüzey sertleştirme sırasında yüzey tabakalarında basma gerilmelerinin gelişmesi yüzünden, çeliğin yorulma dayanımı artar, yüzeyde çatlama tehlikesi azalır [32,33,40].

Sementasyon metodunda düşük karbonlu çeliklerin yüzeyindeki C miktarı artırılır, çünkü yapılarındaki C sertleştirme için yeterli değildir. Nitrürleme ile yüzeyde sert nitrür, borlamada ise borür tabakası elde edilir. Karbonitrürasyon yöntemi sementasyon ve nitrürasyonun bileşimidir. Aliminyumlama, silisyumlama ve kromlama ise yüzey alaşımlama yöntemleridir [45].

Sementasyon, nitrürasyon, karbonitrürasyon ve borlama; katı, sıvı, gaz ortamlarda yapılabilen yüzey sertleştirme yöntemleridir. Bu medotların hepsinde de yüzeyin kimyasal yapısı değişikliğe uğrar.

2.2.2.1. SEMENTASYON (KARBÜRLEME)

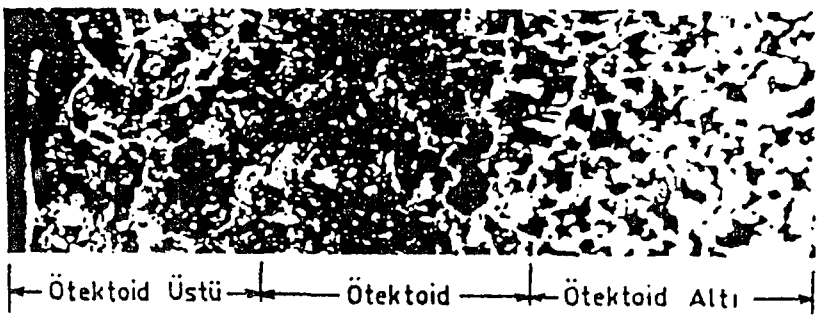
Semantasyon, uygun bir C verici ortamda çeliği, genelde dönüşüm bölgesi (Ac_1 ve Ac_3) üstündeki belirli bir sıcaklığa ısıtmak ve bu sıcaklıkta bir süre tutarak yüzeyindeki karbon miktarını arttırmaktır. Sert bir yüzey ve uygun özellikli bir çekirdek elde etmek için malzeme ya karbürlemeden sonra ani soğutulur veya tekrar ısıl işleme tabi tutulur [38].

Genellikle düşük karbonlu (C<%0.2) çeliklerin yüzeyleri karbon verici ortamda, 825–925°C arasında uzun süre tutulup karbonca zenginleştirildikten sonra hızla soğutularak semente edilir. Yaklaşık 900°C de karbürlenen çeliklerin yüzeyine atomik diffüzyon ile karbon atomları nüfuz eder ve yüzeyin C oranı %0.85'e çıkar. Böylece çelikler sertleşme yeteneği kazanır. Semente çeliklerinde atomik diffüzyonun oluşturduğu sıcaklıklarda yapı irileşmesini (tane büyümesini) önlemek ve diffüzyon olayını hızlandırmak için Cr, Ni ve Mo bulunur [3,35,40].

Yüksek sıcaklıkta semantasyon maddelerinin parçalanması ile oluşan CO_2 ve C' dan CO oluşur ve bu da ostenit fazdaki çelik parça yüzeyinde parçalanarak bir C atomunu çeliğe verir [2,41].

Sıcaklığın azalması ile ortamda CO_2 ce zengin bir gaz atmosferi oluşur. Eğer çelik böyle bir ortamda kalırsa C çelik yüzeyinden atmosfere geçer. Bunun sonucunda, yüzeydeki C oranı azalır. Buna ise dekarbürizasyon (karbonsuzlaşma) denir. Eğer çelik dekarbürize olursa, yüzeyin C oranı azalır, soğutma sonucu martenzit oluşmaz ve neticede çelik sertleşmez. Bu nedenle yüzey yumuşak kalır. Dekarbürizasyonu önlemek için, fırında endotermik gaz atmosferi meydana getirilir ve böylece de çeliğin yüzeyi CO, oksijen ve su buharından korunur.

Karbürleme sıcaklığında, karbon difüzyonunun arzu edilen derinliğe kadar ilerlemesi için beklenen süreye karbürleme süresi ve bu süre sonunda C'un ilerleme derinliğine de karbürleme derinliği denir. Yüzeyden itibaren C miktarı derinlik boyunca azalır. Eğer çelik yavaş soğutulur ise, dış kabuk perlit ve sementit ihtiva eder ve yüksek karbonlu ötektoid üstü çelik yapısında olur. C oranı %0.83' ün üzerinde olursa yüzeyde fazla miktarda sementit meydana gelir ki bu da sertleşen tabakanın gevrek yapıda olmasına ve çatlamasına neden olur. Bu olaya da aşırı karbonlanma denir. Yüzeyin biraz altında ötektoid yapı görünümü hakimdir. Daha derinlerde ise ötektoid altı ferritik yapıdadır (Şekil 2.3) [3,46].



Şekil 2.3: %0.2 C ihtiva eden bir çelik 6 saat süreyle semente edildikten sonraki mikro yapısı [3].

Karbürleme, metot ve uygulama olarak karbonun elde edildiği kaynak ve elde ediliş usulüne bağlıdır. Karbonlamanın yapılış biçimlerine karbürleme metodları denir. Bunlar ise [3,32,40]:

1) Kutu karbürleme (Karbonlama)
2) Sıvı (tuz banyosunda) karbürleme
3) Gaz ile karbürleme
4) Pastalama

Pastalamada semente pastası hazırlanır ve gereken yerlere sürülür. Bu durumdaki parça fırına konarak ısıtılır [36].

2.2.2.1.1. Kutu (Katı Ortamda) Karbürleme

Kutuda yapılan karbürleme işleminde C verici olarak genelde odun kömürü, bazan da kok, linyit, kemik tozu ile alkali bileşikler (baryum, sodyum ve kalsiyum karbonat) kullanılır. Alkali bileşikler aktivasyon maddesi olarak tesir ederler. Karbürlenecek parçalar çelik ve dökme demirden yapılmış ısıya dayanıklı kutular içine konulan odun kömürüne gömülür ve kutunun ağzı sıkıca kapatıldıktan sonra semantasyon sıcaklığındaki fırına konur. Yüksek sıcaklığa ısıtılan kutunun içindeki odun kömürü, kutu içinde mevcut olan oksijen ile reaksiyona girerek CO_2 ve bda tekrar kömürle tepkimeye girerek CO gazını meydana getirir. Sıcaklık arttıkça, CO gazının oluşumuda artar. Bu gaz çelik yüzeyinde CO_2 ve atomik C'a ayrışır. Atomik C ise ostenitik yapıdaki çelik tarafından yapıya alınır. Bünyeye alınan C ostenit fazında kolayca çözünür ve karbürleri meydana getirir. Açığa çıkan CO_2 gazı ise tekrar odun kömürü ile reaksiyona girerek CO gazının oluşmasını sağlar ve olay semente etme sürecinde sürekli tekerrür eder.

Kutu içindeki oksijen miktarı gittikçe azalır ve CO gazının oluşması için yetersiz olabilir. Bu nedenle odun kömürüne alkali bileşikler reaksiyon hızlandırıcı olarak ilave edilir [3,32,33,40, 41]. Bu alkali bileşikler %20 veya %40 oranında odun kömürü ile karıştırılır. Bu karışımlar ise;

1) %60 Odun kömürü + %40 $BaCO_3$ [33]
2) %80 Odun kömürü + %20 Alkali Bileşik [41]
3) %60 Odun kömürü + %25 Kok + %14 $BaCO_3$ + %1 $NaCO_3$ [31]

şeklinde tanzim edilebilir. Yüzey kısımlarındaki karbon miktarı başlangıçta hızla artar, daha sonra yavaşlayarak sıcaklık ve CO ile CO_2 gazlarının oranına bağlı olan bir değere yaklaşır.

Bu yöntemle, ısıtma ve soğutmaya fazla zaman harcandığından büyük parçaların karbürlenmesi uygun değildir, fakat büyük parçaların bölgesel olarak karbürlenmesi ekonomiktir. Semente tozu kötü bir ısı iletici olduğundan semente sıcaklığına kadar ısıtma süresi gerekir. Ayrıca bu yöntemle karbürlenen parçalar önce soğutulur daha sonra tekrar ısıtılarak sertleştirilir. Bu yöntemde, kabuk kalınlığı 1 mm' den fazla ve çarpılma 0.2 mm' dir. Semente sıcaklığı ise 875 – 950°C arasındadır. Bu yöntem, techizatı basit ve yatırım maliyeti düşük olmasından dolayı, seri üretim yapmayan düşük kapasiteli işletmeler için uygundur [3,32,41].

2.2.2.1.2. Sıvı (Tuz Banyosu) Karbürizasyonu

Bu yöntemde, sıvı C verici ortam olarak siyanür tuzları kullanılır Bu tuzlar ise kalsiyum siyanür ($CaCN_2$), Potasyum siyanür (KCN) ve sodyum siyanür(NaCN) bileşimlerinden ibarettir. Ayrıca bileşimlerin ayrışmasını frenleyen klorürler ve tuz içerisindeki karbonun parça yüzeyine geçişini hızlandıran stronsiyum ve baryum bileşikleri bulunabilir. Yüksek sıcaklıklarda siyanürlerin parçalanması ile C ve bir miktarda N verirler. Burada azot karbürlemeyi kolaylaştırır Bu tuzların seçimi, karbürleme sıcaklığına ve derinliğine bağlıdır [3,32].

Sodyum siyanür, düşük çalışma sıcaklıklarında kullanılır ve daha ince kabuk elde edilir. %20 NaCN içeren bir tuz banyosu kullanılırsa yaklaşık 0.9 mm kalınlığında bir kabuk elde edilir. Bu tip banyolarda çalışma sıcaklığı ise 845–899° C° dir.

%40–50 NaCN içeren banyolarsa 0.8 mm'lik bir karbürleme derinliği verir. %10 NaCN içeren ve aktive edilmiş banyolar kullanıldığında ise 1.5 mm'lik semente (yüzey sertleşme) derinliği elde edilir. İstenilirse bu derinlik 6 mm'ye kadar çıkarılabilir. %10 siyanür ihtiva eden tuz banyolarında çalışma sıcaklığı 899 –954°C arasındadır [3,40].

Banyoda kimyasal tepkimeler sonucu açığa çıkan CO gazı 850 – 950°C sıcaklıklarda, ostenit fazda bulunan çelikle reaksiyona girer ve karbonla birlikte azotuda bünyesine alır. Absorbe edilen C ve N'un miktarı, banyonun sıcaklığına ve siyanür oranına bağlıdır.

Parçalar tuz banyosuna daldırılmadan önce, 100°C–400°C sıcaklıkta tavlanarak parçaların nemi alınır. Eğer parçalar nemli olur ise, oluşacak buhar patlamaya yol açar. Parçalar yağ ve pisliklerden temizlendikten sonra banyoya daldırılmalıdır. Tuz banyosunda büyük parçalar karbürlenirken asılmalıdırlar ve homojenliği sağlamak içinde sıvı karıştırılmalıdır [3,35,40].

Sıvı karbürlemede yüksek ısı iletimi nedeniyle parçalar, kısa süre de istenilen sıcaklığa ulaşır.Karbürlemeden sonra tuz banyolarında doğrudan doğruya sertleştirmekte mümkündür. Bu metod genelde kabuk derinliği 2 mm den fazla olmayan kısmen daha küçük ve az girintili çıkıntılı parçalara uygulanır [3,32].

2.2.2.1.3. Gaz Karbürizasyonu

Son yıllarda yaygın olarak kullanılan gaz karbürleme ile çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Gaz karbürleme metan (CH_4), etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), asetilen ve hava gazı içeren CO–CO_2 esaslı kapalı fırın atmosferinde gerçekleştirilmektedir. Karbon kaynağı, CO gazı veya çeşitli hidro karbonlardır. Karbürizasyon sıcaklığında çeşitli reaksiyonlar oluşur. Bu reaksiyonlar sonucu açığa çıkan atomik karbon, ostenit fazdaki çelik bünyesine girerek yüzeyde karbonca zengin bir kabuk meydana getirir.

Bu yöntemde kullanılan gaz genellikle fırın dışında üretilir. Bileşimi devamlı kontrol edilir ve ayarlanır. Üretilen gaz genelde nötr gaz olup ısıtma soğutma sırasında fırına verilir. Bu gaz SO_2, CO_2, H_2O v.s. gibi içerisindeki zararlı maddeleri alınmış şehir gazı veya jeneratör gazından elde edilir. Gaz karbürlemeyle daha hassas, temiz ve hızlı sertleştirme yapılabilir. Bu yöntemde çalışma sıcaklığı 900 – 940°C arasında bulunur [3,32,33,40].

2.2.2.1.4 Tabaka Kalınlığı ve Sertliği

Karbürleme işlemi esnasında karbon çeliğin yüzeyinden belirli bir derinliğe kadar yayınır. Bu derinliğe etkili sertlik derinliği denir. Bu yayınmada çeliğin bileşimi ve özellikle ortamdaki nem miktarı C'nun çeliğe geçişini etkilerler. Yüzeye yayınacak

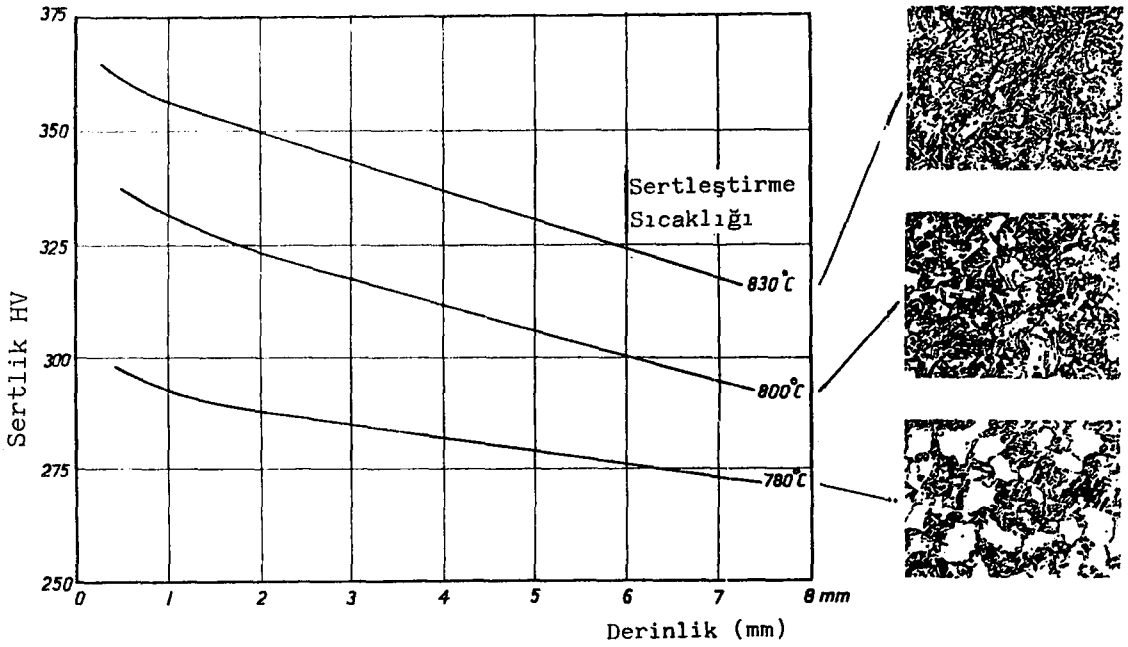
karbon miktarı işlem süresine ve sıcaklığınada bağlıdır. Etkili sertlik derinliği karbürleme sınır değeri olarak kabul edilir. Bunun için C oranı yavaş soğuma sonucu belli perlit yüzdesine tekabül eder ve yüzeyin sertleştirilmesi için de yeterlidir. Yüzeyin sertliğine, soğuma şartları, çeliğin kimyasal bileşimi, parça boyutu etkili olur. Bu nedenle bu şartların arasında uygunluk sağlanması gerekir.

Sertleşme sonucu, yüzey tabakasında sadece martenzit oluşur ise o zaman yüzeyin sertleşme derinliği, karbonun çelikteki yayınma derinliğine eşdeğer olur. Parça kalınlığıda burada önemli rol oynar. Çünkü parça kesiti arttıkça soğuma hızı azalır. Sertleşme için şartlar değişir.

Semente edilen bir parçada iki farklı bölge oluşur [3,32,40,46];

1- C oranı, %0.65'i geçen kabuk kısmı (yüzey tabakası),
2- C oranı yaklaşık %0.2 olan merkez kısmı (çekirdek bölgesidir)

Semente edilen parçanın yüzey tabakası sertliği bir çok değişkene bağlıdır. Bunlarsa ostenit fazında çözünen karbon miktarı, çeliğin bileşimi, su verme ortamı, sıcaklığı ve süresi ile birlikte parça boyutu ve çelik tipide etkili olur. Yüksek karbonlu ve alaşımlı çeliğin karbon oranı %0.7'yi geçerse ve bunlar oda sıcaklığında soğutulursa yapıda bir miktar artık ostenit kalır. Bunun için bu çeliklere 0°C'nin altında sıfır altı sertleştirmesi uygulanır. Yüzeyde C oranı %0.8'i geçmemesi gerekir, çünkü bu orandan fazlası sertleşme sonucunda yapıda artık ostenitin kalmasına veya semente edilen çelik yavaş soğutulursa perlit tane sınırında sementit ağı oluşmasına sebep olur. Bu yapı ötektoid üstü bölgede sertleştirilirse sementit ağı yapıda kalır ve sertliğin düşmesine neden olur. Yüzeydeki karbon oranı semente süresi ve uygun seçilen sertleşme sıcaklığıyla beraber çift sertleştirmeyle kontrol edilebilir [3,40]. Sertlik dış kısımdan itibaren çekirdeğe doğru gidildikçe önce artar, sonra azalır. İdeal şartlarda yapılan sertleştirmede yüzey sertliği 65–67 HRC olarak elde edilir.



Şekil 2.4: 13NiCr6 çeliğinin sertleştirme sonrası iç yapısı sertliği ve bu sertliğin semente sıcaklığı ile ilişkisi [3,40]

Çekirdek sertliğine, parça boyutu,sertleştirme sıcaklığı azda olsa yüzeye emdirilen C miktarı etkide bulunur. Yüzeye su verme sadece çeliğin bünyesine karbonun girmesi veya karbonca zenginleştirilen bölgenin sertleştirilmesi olmayıp, aynı zamanda sertliği ile çekirdek arasındaki ilişkiyide ortaya koymaktadır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi sertlik semente sıcaklığının artışıyla artmakta fakat bununla da yapıdaki ferrit oranı azalmaktadır [3].

2.2.2.1.5. KARBÜRLEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Karbürlenen malzeme yüksek yüzey mukavemetine sahiptir. Karbürlü çeliğe uygulanan yüzey sertleştirme işlemi, çeliğin yüzey sertliğine, aşınma direncine, yorulma mukavemetine, esneklik ve basma kuvvetlerine dayanabilme kabiliyetine, çentik darbe dayanımına, tokluğuna, ayrıca yüzeye ve boyuta etkide bulunur [3].

2.2.2.1.5.1. Yorulma Mukavemeti

Semente edilen çeliğin dış yüzeyinde sert ve onun altında da dış tabakaya göre daha yumuşak olan çekirdek mevcut olduğundan bu iki bölgenin birleşimi yerinde iç gerilmeler bulunur. Bu iç gerilmeler ise yorulma çatlaklarının meydana gelmesine sebep olurlar. Basma iç gerilmeleri, yüzeydeki C oranı ve soğutma hızı ile orantılı olarak artar. Karbürlenmiş parçalarda, yorulma çatlakları kabuğun hemen altındaki çekme iç gerilmeleri bölgesinde başlar. Kabuk kalınlığı ne kadar fazla ise çekme gerilmeleride o kadar fazladır [3,41,46].

Çekirdek mukavemetide yorulma sınırına etkide bulunur. Çünkü çatlaklar, genellikle, yorulma sınırı karbürize olmuş tabakadan daha düşük olan çekirdekte başlamaktadır. Çekirdeğin mukavemeti alaşım elementinin ilavesiyle, özellikle de C ile artırılır. Çünkü alaşım elementi, çeliğin sertleşme sıcaklığındayken soğutulursa ostenitin dönüşüm sıcaklığını düşürür. Fakat çekirdeğin mukavemeti artar. Ancak çekirdekteki dönüşüm başlamadan önce geçen süre ne kadar uzun olursa, semente tabakasında (sertleştirilmiş tabaka) en düşük basma gerilmeleri [40] oluşur. Bu düşük bir yorulma sınırını ve sertleştirilmiş tabakanın büyük bir çentik hassasiyetini ifade eder.

2.2.2.1.5.2. Tokluk

Düşük karbonlu ve alaşımlı çelikler semente ile sertleştirilirler. Yumuşak ve sünek olan bu çeliklerin yüzeyi sertleştirildiğinde yumuşak kalan iç kısım (çekirdek) sert dış kabuğu destekleyerek çeliğin darbeli yüklere karşı mukavemetinide korur. Böylece de dış kabuğun kırılganlığı önlenmiş olur. Genelde sertleştirilmiş çeliğin yüzey sertliği, yapısı, çekirdek özellikleri ve dayanımı, çeliğin sertleşebilirliğine ve soğuma şartlarına bağlıdır. Yüksek karbon miktarı ile yüzeyde sertleşme rahatlıkla sağlanırken, çekirdeğin tam sertleşmesi sağlanamaz. Yüzey ile çekirdek arasındaki karbon farkı sertliğe ve çekme dayanımına belli bir oranda etkide bulunur. Çekirdek, tokluğu artırmak için fazla yumuşak seçildiğinde, toplam yükü taşısada sert ve kırılgan kabuğa gerekli desteği veremez [3].

Karbonlama sonrası ostenitleme sırasında karbür çözünmesi tam olur ise alaşım elementlerinin sertleşebilirliği üzerindeki etkileri gövde ve kabukta eşdeğer orandadır. Tokluğun önemli olduğu durumda çekirdek sertliği düşük olan, yani düşük karbonlu çelikler seçilir. Yüksek basma yüklerinin olduğu durumlarda, kabuğa destek sağlamak için, yüksek çekirdek sertliğine sahip çelikler, yani %0.2 karbonlu çelikler seçilirler [47].

2.2.2.1.5.3.. Yüzey Durumu ve Boyut Değişimi

Karbürlenmiş kabuğun, işlenerek kaldırılması ve taşlanması halinde yüzeyde çatlamalar olabilir. Bununla beraber, karbürlenen çelikler de boyut değişimi görülür. Bu iki sebepten ötürü hassas toleranslı parçaların karbürlemeyle sertleştirilmeleri zordur. İlave önlemler ile, mesela basınç altında bu yöntem ile sertleştirme yapılabilir. Bu durumda maliyet artar.

Karbürleme, şekil ve boyutunun kontrol edildiği, Mn-Cr veya Mo-Cr' lu büyük boyutlu çeliklerede uygulanır. Şekil ve boyut değişiminin fazla olduğu Cr-Ni-Mo'li çelikler yağda soğutulur ve böylecede çatlama riski azaltılır [3,46].

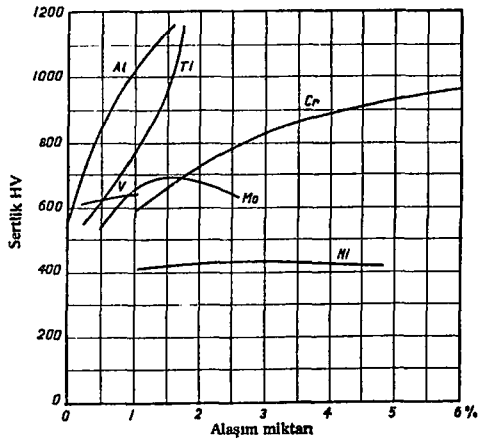
Karbonlanıp su verilen çeliklerin kabuklarının mekanik özellikleri karbon ve alaşım oranları ile kabuk derinliği, kabuğun iç yapısı ve iç gerilimlerin düzey ve dağılımına bağlıdır. Kabuğun karbon yüzdesi karbonlama işleminin ayrıntılarına ve çeliğin bileşiminde bulunan elementlere bağlıdır. Fakat çeliğin ilk C yüzdesi kabuğun karbon yüzdesini pek etkilemez. Bu nedenle kabuğun sertleşebilmesi doğrudan alaşım yüzdesine ve karbonlama sonucu oluşturulan kabuğun C yüzdesine bağlıdır [47].

2.2.2.2. NİTRÜRASYON

Bu yöntem genellikle soğuma şartları kontrol edilebilen alaşımsız çeliklere, düşük karbonlu çeliklere ve γ-alanını daraltan alaşım elemanını (Cr, Si, Al, Ti, W, Mo, V v.s.) ihtiva eden az alaşımlı çeliklere uygulanır.

Nitrürleme, parçanın azot verici bir ortamda, 350-592°C aralığında saatlerce tutularak ortamdaki atomik N' un parça yüzeyine yayınımı sonucu yüzeyin azotça zenginleştirilmesi esasına dayanan ferritik termo kimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlem ferritik bölgede (350-592°C) yapıldığından oda sıcaklığına yapılan soğutma da herhangi bir faz dönüşümü meydana gelmez. Bu nedenle de parçaya su verilmesi gerekmez. İşlem sırasında atom halindeki azotun çeliğe yayınması ile yüzeyde oluşan nitrürler sert bir tabakanın meydana gelmesini sağlarlar. Azot, çeliğin yüzeyinde demir ve diğer alaşım elemanları ile nitrürler oluşturur. Bu nitrürler, nitrürleme sıcaklığına ve bu sıcaklıkta bekleme süresine bağlı olarak yapıda α-Fe ile birlikte γ'-fazı (Fe_4N), ε-fazı ($Fe_{2-3}N$) veya ($\gamma'+\varepsilon$)-fazı şeklinde bulunabilir [3,48-50].

Alaşım elemanlarından Al en büyük etkiye sahiptir. Al'u sırasıyla Ti, Cr, Mo ve V takip eder. Ni'in etkisi ise oldukça azdır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Nitrürleme sonrası alaşım elementlerinin sertliğe etkisi [40]

Sertlik artışında en büyük etkiye sahip Al ve Ti aynı zamanda N'un yayınmasını en çok geciktirici etkide bulunurlar. Bu elementlerin miktarı arttıkça, N'un çelik tarafından bünyeye alınması zorlaşır. Çünkü alaşım elementleri azot ile beraber nitrürler oluşturdukları için azotun difüzyonunu engelleyici etki gösteriler. Karbonunda azotun diffüzyonuna kuvvetli bir engelleyici etkisi vardır.

Mikro yapı, çeliğin nitrürlenmesine, iki şekilde etkide bulunur. Yüksek oranda serbest ferritli mikro yapı azotun difüzyonu için, düşük karbür içerikli mikro yapıysa hem azotun difüzyonu ve hem de sertlik için uygundur. Alaşımlı çeliklere genellikle, ısıl işlem uygulanmış halde, yani su verildikten ve 550 – 650°C arasında temperlendikten sonra nitrürleme uygulanır. Bu sıcaklık aralığında çökelme ve aynı zamanda da karbürlerin birleşmesi söz konusudur. Karbür çökelmesi tane sınırında olur. Burada difüzyonu engelleyici etki ortaya çıkar. Çünkü difüzyon tane içlerine oranla sınırlarda daha hızlı yer alan nitrürler ve karbonitrürler ile engellenir.

Yapılan deneyler, çeliğin, sertleştirilmeden ve tavlanmadan önce nitrürlenebilirliğinin daha iyi olduğunu göstermiştir. Nitrürlenebilirlik, çeliğin kimyasal terkibine, soğuma şartlarına, nitrürleme süresine ve sıcaklığına bağlıdır.

Esas olarak nitrürleme sıcaklığının etkisi çok önemlidir. Sıcaklık ne kadar düşükse, yüzey sertliği o denli yüksek ancak, aynı zaman da nitrürasyon derinliği de o kadar küçüktür. Bu durumsa özellikle alaşımlı çelikler için geçerlidir.

Nitrürleme işleminde, diğer önemli bir faktörde N'un aktifliğidir. Difüzyon kanunlarına göre, yüzeyin altına yayınan (difüze olan) N miktarı, çeliğin yüzeyinde oluşturulan azot miktarı ve sıcaklık ile kontrol edilir [3,40].

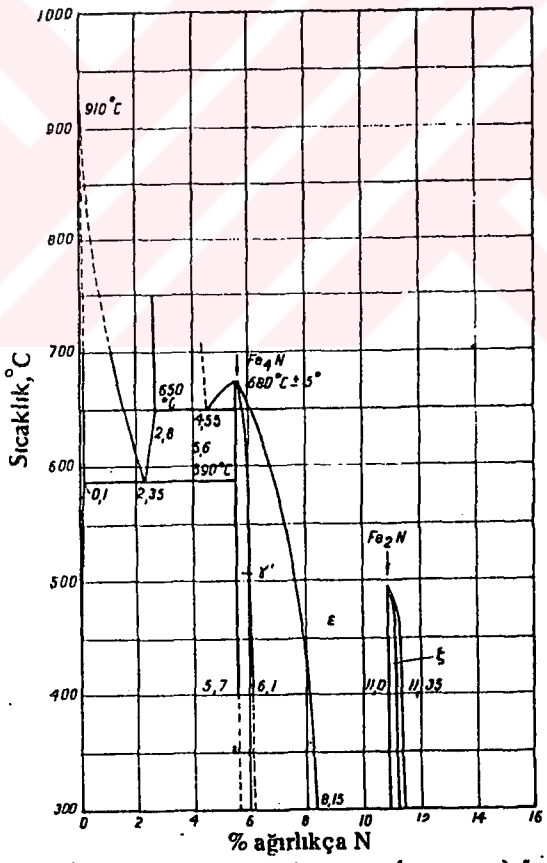
Nitrür yapıcı elementler, menevişleme sırasında sıcaklık ve karbon miktarına bağlı olarak karbür çökeltilerini oluştururlar. Bu durum da karbür şeklinde bağlanmış olan elementler, nitrürleme sırasında nitrür oluşturma işlevini yerine getiremeyeceğinden, nitrürlenmiş yüzey sertliği beklenenden düşük olur. Yüzey sertliğini arttırmak için çeliğin karbon miktarını ve nitrürleme sıcaklığını azaltmak yeterli ise de tercih edilmez. Çeliğin azotu, çözündürme sınırı azaldığında nitrürler tane sınırında ve belli kristalografik düzlemler boyunca çökebilirler.

Tane sınırında oluşan nitrür ve karbonitrür çökeltileri atomik azotun tane içine ve daha derinlere nüfuz etmesini engellerler. Bu nedenle de N atomunun daha derinlere ilerleyerek nitrür tabakasını kalınlaştırması için uzun zaman gerekir. Bu usul, sertleştirmeden sonra taşlanamayan ve yüksek sertlik dolayısı ile iç gerilmeleri fazla olan parçalara uygulanır.

Nitrürleme yapılacak çeliklerin C miktarı %0.2 – 0.4 ve nitrürün meydana gelişini kolaylaştıran alaşım elemanlarının miktarıda %2–3 arasında olmalıdır.

Reaksiyon esnasında serbest kalan N ve H çelik yüzeyindeki C'un yanmasına ve dolayısıyla da, nitrür tabakasının pul pul kalkmasına neden olurlar. Eğer nitrürasyonda başarı sağlanmazsa tekrarlanma imkanı kesinlikle yoktur [3,35,40].

Nitrürasyon, alçak sıcaklıklarda uygulanan bir işlem olduğu için parçalarda fazla çarpılma ve gerginlik görülmez [35,52]. Fakat az da olsa bir çarpılma görülebilir. Çelik parçaların nitrürlenmesi istenmeyen bölgeleri %80 Pb ve % 20 Cu–Ni alaşımı ile kaplanarak nitrür etkisinden korunur. Fakat kaplama kalın olmamalıdır [3,40].



Şekil 2.6: Fe–N denge diyagramı (M.Hansen) [3,40].

Nitrürleme işlemi için Fe–N denge diyagramından yararlanılır (Şekil 2.6). Azot verici bir ortamda bulunan çeliğe, atom halindeki azotun difüzyon yoluyla girmesi ve nitrür yapıcı maddelerle çok kuvvetli nitrürler meydana getirmesi ile oluşan sertleştirmeye nitrürleme veya nitrürasyon denir. Azotun yayılma hızının çok düşük olması nedeniyle azot atomlarının çeliğin bünyesine girebilmesi için uzun süre tavlanması gerekir. Bu süredeyse N atomları fazla derinliklere giremez ve dış yüzeyde sert bir ince tabaka meydana getirirler. Bu sert tabaka ise aşınmaya, korozyona ve sürekli mukavemete karşı

martenzitik yapıdan daha dirençlidir. Nitrürlemeden sonra ise parçaya su vermeye gerek kalmaz. Nitrürlemede kullanılan katkı maddelerine ve teknikteki uygulama şekillerine göre bir birinden farklı nitrürleme yöntemleri geliştirilmiştir. Katkı maddeleri ve uygulama yöntemlerine bağlı olarak farklı yapıda yüzey tabakası meydana gelir. Nitrürleme usulü olarak azotun çekildiği ve işlemin yapıldığı ortama göre gaz ile, tuz banyosunda, toz ile ve iyon ile (plazma) nitrürleme olmak üzere dört farklı nitrürleme yöntemi geliştirilmiştir [3,40,48].

Her dört metotda da N, nitrür ortamının termik şartlarda reaksiyon sonucu meydana gelir ve parça yüzeyi tarafından emilir, yani parça yüzeyine difüzyon yoluyla girer [48].

2.2.2.2.1. Toz ile Nitrürleme

Toz nitrürasyonunda parçalar tıpkı kutu karbürizasyonunda olduğu gibi kutu içerisine yerleştirilirler. Önce nitrürlemeyi hızlandıcı malzeme, ağırlıkça yaklaşık %15 oranında kutunun dibine konur. Daha sonra nitrürlenecek parçalar yerleştirilir ve nitrürasyon tozları da bir tabaka halinde bu parçaların üzerine konulur. Parçaların nitrürleme hızlandırıcı malzemeler ile temas etmemesi gerekir. Gerektiğinde fazla nitrürleme tozu ilave edilerek bir sıra daha parça yerleştirilebilir. Kutular sıkıca kapatılarak sıcaklığı 520– 570°C olan fırının içine konulur. Nitrürleme işleminin 12 saati geçmemesi tavsiye edilir. Toz nitrürasyondan sonra çelik yüzeyinin oyuklaşması ve kabarıp pul pul dökülmesi görülür [3,40].

Toz ile nitrürleme yönteminde kalsiyum siyanür tozu kullanılır. Bu toza gömülen parçalar bir kutuya konduktan sonra ağzı sıkıca kapatılarak elektrik veya gazla ısıtılan bir fırına yerleştirilir. Teknik sebeplerden dolayı kutuların boyutları sınırlıdır. Bu neden ile de toz nitrürasyonu yalnız küçük parçalara uygulanır. Bu usul sonucu beyaz tabaka hekzagonal ε-$Fe_{2-3}N$ den, difüzyon tabakasıda karbonitrürden oluşur. Yöntem, 470 – 570°C sıcaklıkları arasında yapılabilir [48].

2.2.2.2.2. Tuz Banyosunda Nitrürleme

Bu usulde NaCN, KCN, NaCNO v.s. siyanürleri ve birazda Na_2CO_3 gibi karbonatlar kullanılır. Siyanür tuzu, meselo KCN açık ve ısıtılmış demir veya titan potasında nitrür maddelerinin sıvı hale geçmesi için eritilir. Ayrıca oksidasyonda (banyonun havalandırması) oluşturulan siyanatlar 550–570°C sıcaklıkta termik veya oksitlenme ile karbonata dönüşürler. Bu olayı, çeliğin varlığı kolaylaştırır. Bu reaksiyonda açığa çıkan azotu ve karbonu, tuz içinde asılı olan parçalar difüzyon yolu ile bünyelerine alırlar. Fakat α-Fe'i bu sıcaklıkta karbonu hemen hemen hiç çözündürmez.

Bu yöntemle beyaz tabaka hekzagonal ε-$Fe_{2-3}N$, difüzyon tabakasıda karbonitrürden meydana gelir. Bu beyaz tabaka Cr, Al, Ti, V ve Mo gibi nitrür teşkil eden elementlerin nitrürlerini ihtiva edebilir [48,53,54].

Tuz banyosu nitrürasyonundan sonra yapılan hızlı bir soğutma ile difüzyon tabakasında azot atomlarına doymuş termodinamik olarak instabil (stabil olmayan) α-karışım kristalleri meydana gelir ve oda sıcaklığında α-karışım

kristallerinden bir kaç saat içerisinde metastabil olan $Fe_{16}N_2$ arafazı ayrışmaya başlar ve böylece yayınma tabakası içinde karışım kristallerinin pekleşmesi yanısıra tane pekleşmeside oluşur [53,55].

2.2.2.2.3. Gaz Nitrürasyonu

Gaz nitrürasyonunda, nitrürleme N ihtiva eden gaz atmosferinde, bilhassa 480–520°C sıcaklıkları arasında yapılır. Bu sıcaklıkta beyaz tabaka özellikle yüzey merkezli kafesli γ'–fazından (γ'–Fe_4N) veya γ'–fazı ve ε–fazı karışımı şeklinde de olabilir. 570°C de ise sadece ε–fazından (ε–$Fe_{2-3}N$) oluşabilir. Difüzyon tabakası ise nitrürler (karbonitrürler)' den oluşur. Bu difüzyon tabakasının yapısı ve sertliği genelde malzemenin kimyasal bileşimine bağlıdır. Nitrürlemeden sonra yavaş bir soğuma yapıldığı taktirde Cr, Al, Ti ve Mo gibi, özel nitrür oluşturan alaşım elementlerini ihtiva eden malzemelerin difüzyon tabakasında hissedilebilir sertlik artışı görülür [48,53].

Azot verici atmosfer olarak kullanılan gazlara göre değişik gaz nitrürasyonları geliştirilmiştir [3].

1. Amonyakla nitrürleme,
2. Amonyak, azot veya hidrojenle nitrürleme,
3. Amonyak ve hidrokarbonla nitrürleme.

Amonyakla nitrürlemede azot kaynağı olarak amonyak gazı kullanılır. Takriben 510°C de amonyak gazı parçanın tüm yüzeylerini sararak temas ettiğinde ayrışır ve N parçaya nüfuz eder. Amonyak az miktar su buharı içerdiğinde bu nem önceden alınmalıdır. Nitrürlenecek parçalar, çok iyi temizlenmeli ve yağdan arındırılmalı ve parça yüzeyinde kesinlikle toz veya tufal belirtisi olmamalıdır. İkinci usuldeyse %20 amonyak ve %80 N içeren bir gaz karışımı kullanılır.

Üçüncü usulde ise, nitrür gazına saf propan veya endogaz şeklinde hidrokarbonlar katılır. İşlem sırasında C ve N aynı anda çeliğe yayınarak ε–tipi karbonitrürler oluştururlar. Yüzeydeki yüksek C miktarı, çeliğin aşınma direncini artırır. Böylece aşınma halinde yüzey tabakasının parçalanıp dökülme tehlikesini azaltır [3,40].

2.2.2.2.4. İyon ile (Plazma) Nitrürleme

İyon ile nitrürleme, azot gazının iyonlarına ayrıştırılarak metal yüzeyine emdirilmesi olayıdır. İyon ile nitrürleme metal yüzeyinde kimyasal reaksiyonlar sonucu gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar, metal yüzeyinde ve yüzeye çok yakın bölgelerde sert ikinci faz parçacıklarının (nitrürlerin) oluşmasına neden olmaktadır. Bunun gerçekleşmesi için gerekli azot (N_2) gazı, azot hidrojen (N_2–H_2) karışımı gazın veya azot, hidrojen ve hidrokarbon karışımı gazın elektrik enerjisiyle iyonlarına ayrıştırılması sonucu oluşmaktadır. Sert parçacıkların meydana gelmesi için gereken ısı aktivasyon enerjisiyse iyonların metal yüzeyini bombardımanı sırasında ortaya çıkmaktadır [49,53,56].

N içeren gaz karışımı, bir vakum kabında sağlanan düşük basınçlar da ve yeterli seviyede doğru akım uygulanarak iki elektrot (katot olan iş parçası ile azot bulunan kab) arasında iyonlaşmaya tabi tutulmaktadır. Pozitif azot iyonları katod olarak konumlandırılan metal iş parçası tarafından çekilmekte ve yüzeyi iyon bombardımanına uğratmaktadır. Bu sırada anod ve iş parçası arasında parıltılı boşalım olmaktadır. Önce fiziksel olarak yüzeye tutunan N iyonları daha sonra burada oluşan ısının etkisi ile içeri doğru yayınmakta ve kimyasal reaksiyonlar neticesinde yüzey sertliğini sağlayacak olan nitrür parçacıklarını meydana getirmektedir. Malzeme yüzeyini bonbardımana tutan pozitif iyonların kinetik enerjisi malzeme yüzeyinde tamamen ısıya dönüşür ve malzeme yüzeyinin arzu edilen nitrür sıcaklığına ısınmasını sağlar veya bu kinetik enerjinin bir kısmı termal (ısı) enerjiye, bir kısmıda yüzey enerjisine dönüşür. İyon bombardımanından kaynaklanan ısı iş parçasının ayrıca ısıtılmasını gereksiz kılmaktadır [48,50,51,53,56-59].

İyon ile nitrürleme sonrasında malzeme yüzeyinden içeri gidildikçe değişik yapılara sahip tabakaların oluştuğu görülür. Yüzeyde beyaz (bileşik) tabaka , onun altında difüzyon ve çekirdek bölgeleri yer alır. Yüzeydeki beyaz tabaka γ'-Fe_4N veya ε-$Fe_{2-3}N$ fazından veya da her ikisinin bileşiminden oluşur. Beyaz tabakanın oluşumunda en önemli rolü gazın bileşimi oynamaktadır. Gaz karışımındaki azot oranı %5'in altında olursa beyaz tabaka oluşmaz. Azot oranı %10-35 arasında ise yüzeyde ince bir beyaz tabaka elde edilmektedir. Sertliğe en önemli katkıyı bu tabaka yapmaktadır. 10 µm'den kalın olması istenmeyen bu tabaka gevrek ve kırılgandır. Azot oranının %60-70 olması ve gaz karışımının asal gaz ile birlikte %1-3 oranın da metan veya etan ihtiva etmesi durumunda, alaşımsız çeliklerde ε-$Fe_{2-3}C_xN_y$, alaşımlı çeliklerde ise ε-$Fe_{2-3}N$ fazından oluşan ve γ'-fazından daha sert ve gevrek bir beyaz tabaka oluşur. Amonyak gazı ile yapılan nitrürleme sonucu ise ($\gamma'+\varepsilon$) karışım fazından meydana gelen bir beyaz tabaka oluşur [48,51,53,56,57,59].

İyon nitrürlemenin ileri safhalarında, yeterli sıcaklık ve sürenin katkısı ile, bileşik bölgeden içeri doğru yayınan azot, alaşım elementlerinin nitrürlerini yaparak yayınma (difüzyon) bölgesi oluşturur. Bu tabaka aynı zamanda parça göbeğindeki malzeme yapısı ile yüzeydeki sert tabakanın yapısı arasında bir geçiş bölgesi olarak kabul edilebilir. Yayınma bölgesinin ve bileşik (beyaz) tabakanın kalınlığı beraberce nitrürleme işleminin derinliğini belirler. Azot yayınma bölgesinde, çeliğin alaşımına, katı eriyik halinde seçilen soğutma şartlarına göre Fe_4N, alaşım elementlerinin nitrürleri veya karbonitrürleri şeklinde bulunmaktadır. Yayınma bölgesinin kalınlığı daha çok çelik çeşidine, ilgili nitrür işlemi sıcaklığına ve süresine bağlıdır. Bu tabakanın yapısı da farklı nitrür yöntemleri ile değiştirilebilir. Aynı zamanda bu tabakanın kalınlığı, gaz basıncına ve sıcaklığa bağlı olarak kontrol edilebilmektedir. İyon nitrürleme yöntemi ile nitrür tabakasının durumu çok iyi kontrol edilir. Ayrıca bu işlem literatürdelerde parıltılı boşalım (Glow-Discharge, Glimmentladung) ve plazma nitrürleme isimleri ile de tanınmaktadır [48,56,59].

2.2.2.2.5. NİTRÜRLÜ TABAKANIN ÖZELLİKLERİ

2.2.2.2.5.1. İç Yapı

Demir esaslı malzemeler nitrürlendikten sonra iç yapıları iki farklı bölgeden meydana gelir. Birinci bölge nitrürleme işleminden sonra yeni bir iç yapı görünümüne kavuşan ve dış yüzeyden itibaren belirli kalınlıkta meydana gelen sert

tabakadır. İkinci bölge ise malzemenin nitrürlemeden önceki iç yapısını muhafaza eden ve sert tabakanın altında yer alan çekirdek kısmıdır. Sert tabaka ise azotun bağlanması ve yayınması bakımından beyaz (bileşik) tabaka ve yayınma (difüzyon) tabakası olarak ikiye ayrılır [48–50,52,57,59].

2.2.2.2.5.2. Beyaz (Bileşik) Tabaka

Bu tabaka parçanın en dışında, yani direkt yüzeyinde meydana gelen ve birkaç µm kalınlığında olan bir tabaka olup bünyesinde farklı demir nitrürler ve alaşım elementi nitrürleri bulundurur [48].

Alışılmış olarak kullanılan nitrürleme sıcaklıklarında, azot demir içinde çözünür. Ancak bu değer 0.1 gibi çok küçük bir yüzdedir. Bu orandan daha fazla azot bulunması halinde Fe_4N kimyasal formülüne haiz γ'–nitrürü oluşur. Eğer azot oranı %6'yı aşarsa γ'–nitrürü ε–nitrürüne dönüşmeye başlar. 500°C'nin altında, N oranı yaklaşık %11 olan $Fe_{2-3}N$ kimyasal formüllü ε–nitrür fazı oluşabilir [3,40]. γ'– ve ε–nitrür fazları ile $(\gamma'+\varepsilon)$–nitrür fazı, mikroskopta beyaz bir yüzey tabakası olarak görülür. Bunun için bu tabakaya beyaz (bileşik) tabaka denir. Nitrürleme sırasında beyaz tabakanın kalınlığındaki artış ile, azotun çeliğe daha fazla yayınması aynı anda olur. Çözünebilirlik azaldığında, nitrürler tane sınırında ve belli kristallografik düzlemler boyunca çökelirler. Al, Cr ve Mo gibi alaşım elementleri nitrür oluşturucu olarak kullanılırlar. Demir esaslı malzemelerde nitrürasyon sonucu elde edilen nitrürlü bölge iki farklı tabakadan oluşmaktadır. Bunlardan beyaz tabaka parçanın üst yüzeyinde bulunur ve demir nitrürleri, yani ε–$Fe_{2-3}N$, γ'–Fe_4N den birini veya her ikisinin karışımını ihtiva eder. Bu tabaka asitle dağlandığında etkilenmez ve mikroskop altında beyaz bir bölge olarak gözükür. Bu tabakanın kalınlığı ise bir kaç µm kadardır. Bu tabakanın yapısı röntgenografik yöntemde mikro yapı analizin yardımıyla tespit edilir. Beyaz tabakayı meydana getiren γ'–Fe_4N kübik yüzey merkezli, ε–$Fe_{2-3}N$ ve C'un ortamda bulunması halinde oluşan ε–$Fe_{2-3}C_xN_y$ fazıda hekzagonal yapıdadır [3,40,48,57].

Beyaz tabaka tuz banyosu nitrürasyonuyla elde edilirse üst yüzeyde gözenekli bir tabaka elde edilir. Bu tabaka toplam beyaz tabakanın 1/3 kalınlığındadır. Bu gözeneklilik tuz banyosu nitrürasyonunun tipik özelliği olup banyonun kirliliğine ve kullanımına bağlıdır. Optik ve röntgen grafikleri ile varlığı belirlenen gözenekliliğin oluşumu ε–fazından kaynaklandığı sanılmaktadır. Fakat bunun kesin bir açıklaması henüz mümkün değildir. 550°C altındaki sıcaklıklarda yapılan iyon nitrürlemeyle gözeneksiz beyaz tabaka oluşmaktadır [48].

Gaz nitrürasyonu sonucu meydana gelen beyaz tabaka genelde $(\gamma'+\varepsilon)$ karışım fazından oluşur ve çok gevrektir. 500°C'nin üzerinde veya altında yapılan iyon nitrürlemeyle oluşan beyaz tabaka, ya γ'–fazı ya da ε–fazı veya her ikisinin karışımı şeklinde oluşabilir.

Toz ve tuz banyosu nitrürasyonları sonucu beyaz tabakanın yapısı genellikle tek fazlı olup hekzagonal ε–nitrür (ε–$Fe_{2-3}N$) veya ε–karbonitrür (ε–$Fe_{2-3}C_xN_y$), nadirende tek fazlı kübik yüzey merkezli γ'–nitrürü (γ'–Fe_4N) gibi fazlardan oluşan sert ve gevrek bir yapı meydana gelir. Gaz nitrürasyonu sonucunda beyaz tabaka ya ε–$Fe_{2-3}N$ veya ε–$Fe_{2-3}C_xN_y$ ya da $(\gamma'+\varepsilon)$–karışım fazından oluşur ve çok gevrektir. Bu nedenle kullanımı iyi değildir. Bu fazlara etki eden faktör azot verici ortamda bulunan N miktarına bağlıdır.

İyon (plazma) nitrürleme sonucu ise beyaz tabaka γ'-Fe_4N fazı, ε-$Fe_{2-3}N$ (ε-$Fe_{2-3}C_xN_y$) fazı veya her ikisinin karışımı olan bir fazdan oluşur. Beyaz tabakanın oluşmasında en önemli rolü gazın bileşimi oynamaktadır. Gaz bileşimi içinde %60 N bulunması halinde beyaz tabaka γ'-Fe_4N fazından oluşur. Gaz oranı düşük olursa, %10 N gibi gevrek ve kırılgan γ'-beyaz tabakası elde edilir. %10-35 azot içeren gaz karışımıyla yapılan iyon nitrürleme ile sertliğe en önemli katkıyı yapan γ'-beyaz tabakası elde edilir. %60-70 azot oranına sahip gaza %1-3 metan veya etan ilave edilirse γ'-fazından daha sert ve gevrek özelliklere sahip ε-$Fe_{2-3}C_xN_y$ fazı, etan veya metan ilave edilmez ise sadece ε-$Fe_{2-3}N$ fazı elde edilir. Gaz bileşiminde %35-60 N bulunursa ($\gamma'+\varepsilon$) bileşim fazı elde edilir. Hidrojen gaz oranı arttıkça beyaz tabakanın kalınlığıda azalır [48,54,56,59].

2.2.2.2.5.3. Yayınma (Difüzyon) Tabakası

Bu tabaka, beyaz tabakanın altında yer almaktadır. Azot difüzyon tabakasında, demir esaslı malzemelerin alaşım miktarına ve katı eriyik halinde seçilen soğutma şartlarına bağlı olarak demirnitrür (Fe_4N), alaşım elementlerinin C' lu nitrürleri (*alaşım elementleri nitrürü*) şeklinde bulunur. *Bu tabakanın yapısı farklı nitrürasyon yöntemleriyle değiştirilebilir.* İyon nitrürleme yönteminde ortamın N miktarı düşük tutulursa beyaz tabakanın meydana gelmesi tamamen engellenerek sadece yayınma (difüzyon) tabakası oluşturulabilinir.

Gaz ve tuz banyosu nitrürasyonundan sonra difüzyon tabakasının kenar bölgesinde tane sınırının nitrürlenmesi (tane sınırındaki nitrürlerin ve karbonitrürlerin tortusu) ortaya çıktığı taktirde, yayınma tabakasının kenar bölgesinde oluşan ve gevrekleşmeye etki eden bu tane sınırı nitrürleri amonyak veya N-H karışımında yapılan iyon nitrürleme ile engellenmektedir.

İyon nitrürasyonu esnasında karbonsuz atmosferin kullanılması ile yayınma tabakasının kenar bölgesinde oluşan tortu yapılanması geniş ölçüde bastırılarak tek fazlı γ'-beyaz tabakanın teşekkülü sağlanır. Bu ise dış kenar tabakanın kesin olarak karbondan arınmasını sağlayan katot püskürtücüsünün yardımı ile olmaktadır. Böylece de karbonlu nitrür tortularının önlenmesi sağlanmaktadır [48,57].

Ayrıca N, karbonla da karbonitrür oluşturur. Karbonitrürün miktarı azotun ve karbonun aynı anda çelik tarafından bünyeye alınması ile artabilir [3,40]. Difüzyon tabakası ise azot verici ortamdaki N miktarına ve alaşım elementleri miktarına bağlı olarak genelde alaşım elementlerinin karbonitrürlerinden oluşmaktadır. Hidrojen gazının artışı ile birlikte difüzyon tabakasının derinliğide artmaktadır [59].

2.2.2.2.6. Tabaka Kalınlığı ve Sertliği

Nitrür tabakasının sertliği ve kalınlığı, nitrürleme süresine ve sıcaklığına, alaşım elementlerinin miktarına ve azot verici ortama bağlıdır. Genellikle toz, gaz ve tuz banyosu nitrürasyonu ile elde edilen beyaz tabakanın kalınlığı 10-25 μm, iyon

nitrürlemeyle elde edilen γ'-beyaz tabakası 3-30 μm ve γ'-beyaz tabakası ise her iyon nitrürleme işlemine bağlı olarak 1-8 μm arasında değişmektedir. Beyaz ve yayınma tabakalarının sertlik ve kalınlığına etki eden faktörler aynıdır. Beyaz tabakanın sertliği alaşımsız çeliklerde az, alaşımlı çeliklerde ise daha fazladır. Yayınma tabakasının kalınlığı alaşımsız çeliklerde fazla, alaşımlı çeliklerde azdır. Alaşımlı çeliklerde oluşan difüzyon tabakası sertliğin azalmasına neden olmaktadır.

Arzu edilen büyük nitrür derinliklerine erişebilmek için tuz banyosu nitrürasyonunun uzun süre uygulanması gerekir. Fakat bunun sonucunda ise sertlik azalmaktadır. Tuz banyosu nitrürasyonunda işlem süresinin artması ile artış gösteren gözeneklilikden dolayı nitrürleme süresi 4 saatle sınırlıdır. Gaz nitrürasyonunda ise bu konuda bir kısıtlama yoktur. Bu kısıtlamadan dolayı tuz banyosu nitrürasyonu ile elde edilen nitrürasyon derinliği yeterli değil, fakat gaz ile nitrürlemede yeterlidir.

Genelde difüzyon tabakasının sertliği aynı nitrürleme şartlarında (eşit sıcaklık ve eşit zaman) alaşım miktarının artması ile artar [3,40,48].

Karbonun, yüzey sertliğine ve nitrürleme hızına etkisi çeliğin nitrürleme öncesi yapısına bağlıdır. Uygulama da gerekli çekirdek mukavemetinin artışını sağlamak, kararlı yapı oluşturmak için nitrürlemeden önce parça su verilerek sertleştirilebilir ve nitrürleme sıcaklığının biraz üzerindeki bir sıcaklıkta menevişlenir. Ayrıca nitrürlü tabakanın sertliği derinliğiyle değişmektedir (Şekil 2.7) [3,48-50,54-57].

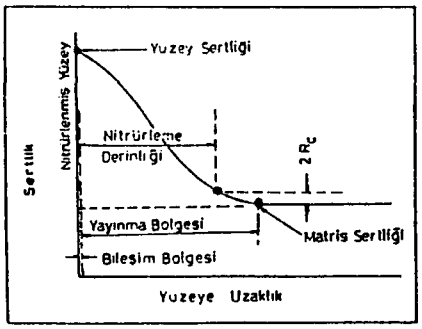
Çelik bileşiminde bulunan Cr, Mo, V, Ti gibi kuvvetli nitrür yapıcı elementler iyon nitrürasyonu sırasında yüksek yüzey sertliği ve derinliğinin elde edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Alaşım elementlerinden alüminyum ise yüzeyde yüksek sertlik yaratmakla beraber diğerlerinin yokluğunda sağladığı nitrürleme derinlikleri sınırlı kalmaktadır. Çelik bileşiminde artan karbon miktarı beyaz tabakanın kalınlaşmasına neden olmakta, buna rağmen nitrürasyon derinliğini azaltmaktadır. Alaşımlı çeliklerdeyse artan C yapıdaki karbür oluşumunu teşvik ettiği için nitrür oluşturacak, serbest alaşım elementi miktarında azalma olacak ve nitrürleme kabiliyeti ters yönde etkilenecektir [56].

Yüzeyin kenarında sertliğin artmasına malzeme içerisinde bulunan alaşım elementlerinin azotla koherent ve yarı koherent olarak ince nitrürler oluşturmaları neden olur [59].

Çeliğin bünyesinde bulunan demir ve alaşım elementlerinin azot ile oluşturduğu nitrürler alaşım miktarına ve nitrürleme sıcaklığına bağlıdır [51].

İyon nitrürlemenin gerçekleştirildiği sıcaklık aralığı arttıkça beyaz tabakada kalınlaşma görülmektedir. Ayrıca artan sıcaklıklar yüzey sertliğini düşürmekte nitrürleme derinliğini artırmaktadır. İyon nitrürleme uygulanan çelikler genelde temperlenmiş martenzit yapıya sahip oldukları için yüksek nitrürleme sıcaklıklarında çekirdeğin aşırı temperlenmesi ile beraber nitrür çökeltilerinin de büyümesi yüzeydeki sertliklerde azalmalara neden olmakta, ancak yayınmanın hızlanması nedeniyle daha derin nitrürlenmiş tabakalar elde edilmektedir. 600°C gibi yüksek sayılabilecek sıcaklıklarda beyaz

tabakanın çok kalınlaştığı ve çatlamalara neden olduğu görülmüştür. İyon nitrürleme işlemleri, uygulanacak malzemeye ve gereksinimlere göre seçilmek şartıyla 400-580°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir [3,40,56,59].



Şekil 2.7: İyon nitrürleme sonrasında yüzeydeki sertlik derinliği [56]

Uzun işlem süresi beyaz tabaka kalınlığını artırmakta ve bu artış, bir doyma özelliği göstermektedir. İyon nitrürleme, kullanılan malzeme, üründen beklenen özellikler ve işlem sıcaklığına bağlı olmak üzere 4-100 saatlik sürelerde tamamlanmaktadır [60]. İki kademeli işlemlerin kullanılması durumunda sürenin büyük çoğunluğu ikinci kademe tarafından kullanılmaktadır[45,57].

Difüzyon tabakası kalınlığı ve yüzey sertliği de işlem süresine bağlı olarak artmaktadır [48,54,59]. γ'-beyaz tabakası kalınlığı, nitrürleme süresinin bir fonksiyonu olmasına rağmen, bu tabakanın kalınlığı, 530-570°C arasında uzun süre yapılan nitrürleme de dahi 10.5 μm'yi geçmez. Bunun sebebiyse ε-fazının özelliğine ve bu fazın azotu az çözündürme kabiliyetine bağlıdır. γ'-beyaz tabakasıysa yükselen nitrür sıcaklığında ve daha kısa işlem süresinde oluşmaktadır [49,50,60].

2.2.2.2.7. Nitrürlenmiş Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Nitrürlenmiş çeliklere uygulanan deneyler, nitrürleme sonrası çeliğin mikro yapısına bağlı olduğunu göstermiştir. Genel olarak nitrürleme sonucu, mukavemet değerleri artar. Bu değerlerin artması ise mikro yapıya bağlıdır. Malzemenin aşınma ve korozyon direnci, yüzey tabaka yapısıyla yakından ilişkilidir [3,46,51].

2.2.2.2.7.1. Aşınma Direnci

Bir metalin aşınma direnci malzemenin yüzey yapısına ve sertliğine bağlıdır. Bunun için nitrürleme işlemi yüzey sertliğinden dolayı metallerin aşınma direncini artırır, yani artan sertlik ile aşınma direnci artar. Nitrürlü çeliklerin aşınma direnci

abrosiv aşınmaya karşı düşük, adhesiv aşınmaya karşı ise fazladır. Nitrürlü yüzeyin sürtünme katsayısı düşük, dolayısıyla nitrürlü çeliklerin sürtünme aşınmasıda düşüktür [3,40,61].

Nitrürleme sonucu oluşan γ'–beyaz tabakasının aşınma ve gevreklik özelliği iyidir. Tuz banyosu nitrürasyonu ile elde edilen ε–beyaz tabakasının sürtünmeye ve aşınmaya karşı dayanımı yüksektir. Fakat yayınma tabakasındaki tane sınırı nitrürlerinin meydana gelmesi engellenirse aşınma direnci çok daha yüksek olur. İyon nitrürleme ise sürtünmeden kaynaklanan aşınmaya karşı mukavemeti artırır. Nitrürlü tabakaya etki eden faktörler aşınmaya da etki ederler. Cr alaşım elementi olarak aşınma direncini artırır [48,51,54,56].

2.2.2.2.7.2. Temperlenmeye Karşı Yüksek Direnç, Yüsek Sıcaklıkta Yüksek Sertlik

Temperlenmeye karşı yüksek direnç ve yüksek sıcaklıklarda yüksek sertlik, nitrürasyon çeliklerinin en belirgin özelliklerindendir. Çelik, nitrürlemeden sonra oda sıcaklığında herhangi bir sertlik kaybı olmaksızın, nitrürleme yapılan sıcaklığa ve bazı hallerdeyse daha yüksek sıcaklığa kadar ısıtılabilir [3,40].

2.2.2.2.7.3. Gevreklik

Nitrür tabakasının yapısı parçalardaki gevrekliğe etkide bulunur. (γ'+ε) karışık fazlı beyaz tabaka çok gevrek, tek fazlı ε–beyaz tabakası daha gevrek ve tek fazlı γ'–beyaz tabakası ise yayınma (difüzyon) tabakasındaki bastırılmış tane sınırı tortuları ile son derece gevrektir. Beyaz tabakanın tamamen bastırılarak oluşturulan nitrürlü tabakanın gevrekliği daha fazla artmaktadır. Nitrürleme esnasında karbonlaştırma veya karbonsuzlaştırma ile nitrür tabakasının gevrekliği arasında bir ilişki vardır. Nitrürleme (özelliklede tuz ve gaz banyosu nitrürasyonu) ile oluşan difüzyon tabakasının kenar bölgesindeki tane sınırları fazla nitrürlenirse tane sınırında nitrürler ve karbonitrürler tortulaşarak diffüzyon tabakasının gevrekleşmesine neden olurlar. Diffüzyon tabakasının gevrekliği bu tabakanın ve sertliğinin artması ile azalır. İyon nitrürleme ile difüzyon tabakasında oluşan tane sınırı tortularının oluşması engellenir. Bu durumda sadece tek fazlı γ'–beyaz tabakası ile tortusuz difüzyon tabakasından teşekkül eden nitrürlü tabakanın gevreklik değerleri (dayanım değerleri) iyileşir [48,57].

Gevrek tabakalar bir darbe anında kırılarak zamanla çeliklerin aşınmasına veya yorulmasına neden olurlar.

2.2.2.2.7.4. Yorulma Mukavemeti ve Çentik Hassasiyeti

Yüzeyde çatlak meydana gelmesi ve bunların hızla büyümesi yorulma kırılmasında kritik bir olaydır. Uygun sertleştirme yöntemlerinin seçilmesi ile metallerin yorulma direncini geliştirmek mümkündür [48,54,56,59,61].

Nitrürleme ile yorulma ve aşınmaya çalışan demir esaslı makina parçalarında ince ve sert yüzey tabakaları elde edilir [56].

Nitrürasyon çelikleri, yüksek yorulma mukavemeti ve düşük çentik hassasiyeti ile karakterize edilirler. Nitrürleme sonucu yorulma dayanımındaki artış, nitrürleme zamanına ve derinliğine, parçanın kalınlığına ve şekline bağlıdır. Parça kalınlığı arttıkça yorulma mukavemetide azalır [3,40,53].

Tuz banyosu nitrürasyonuyla alaşımsız çeliklerden mamül parçalarda iyi yorulma mukavemeti değerleri elde edilir. Fakat alaşımlı çeliklerin yorulma mukavemeti, gaz ve iyon nitrürlemeye karşılık, uygun olmayan işlem sıcaklığında (570 °C'de) yapılan tuz banyosu nitrürasyonu sonucu azalır. Gaz ve sıvı nitrürleme sonrası yüzeyde oluşan beyaz tabaka hem γ'– ve ε–fazlarının beraberce içermekte hemde daha kalın olmaktadır. Buysa yapı farklılığından kaynaklanan yüksek iç gerilmeleri doğurmaktadır. Dolayısı ile gevrek ve kalın bu tabakada çatlak oluşumu kolaylaştığından malzemenin yorulma özelliği kötü yönde etkilenmektedir. Dişli çarklarda dişdibi yorulma mukavemetinin en yüksek değerlerine iyon nitrürleme ve en düşük değerlerine ise tuz banyosu nitrürasyonu ile ulaşılmaktadır. İyonla nitrürlenen yüzeylerdeki bileşik (beyaz) tabakanın çok ince olması yorulma dayanımının da artmasına yol açmaktadır [48,56].

Gerek malzemenin yüzeyinde gerekse iç yapısında gerilimi artırıcı çentik, çizgi, çıkıntı, girinti, kalıntı, çökelti, kılcal çatlak gibi hataların bulunması malzemenin yorulma dayanımına kötü yönde etkide bulunurlar. Bu hatalar yorulmanın başlama noktasını oluştururlar. Eğer malzemede bu tip hatalar nitrürlemeyle engellenir ise yorulma mukavemeti de artırılmış olur. Yorulma mukavemeti, nitrürlü tabakanın iç yapısının homojenliğini (eş dağılımını) bozan her etkenden etkilenir. Bunun için yüzeyin kimyasal bileşimini ve iç yapısını değiştirerek yorulma dayanımını düşüren her durumdan kaçınılması gerekir. Fakat yüzeyde basma gerilimi yaratabilen her etmen, yorulma mukavemetinide artırır. Bunun için nitrürleme ile çelik yüzeyinde kalıcı basma gerilmeleri oluşturulabilir. Ancak nitrürleme sonucu oluşan difüzyon tabakasının kalınlığını belirli sınırlar içinde tutmak gerekir. Şayet difüzyon tabakasının kalınlığı belirli sınırlar içinde artar ise o takdirde yüzeyde meydana gelen basma gerilmeleri zararlı yönde, yorulma mukavemetini azaltıcı etki yapabilir [47,54].

2.2.2.2.7.5. Korozyon Direnci

Korozyon mukavemeti veya asite dayanıklılık nitrürleme yöntemi ile fazlaca kazanılmaktadır. Alaşımsız, düşük alaşımlı ve orta alaşımlı çeliklerin korozyon dirençleri, atmosferik etkilere ve organik asitlere karşı nitrürleme ile artırılmaktadır. Yüzey gözenekliliği korozyon dayanımını azaltır. İyon nitrürleme korozyon direncini artırır. Çünkü bu yöntem ile gözeneksiz yüzey meydana gelmektedir. Korozyon özellikleri malzemenin bileşimi ile doğrudan ilgilidir. Alaşım elementi içermeyen basit karbonlu çelikler iyon nitrürleme sonrasında korozyona daha direçli hale gelmektedir [48,56].

Alaşım elementlerinden krom aşınma ve özelliklede korozyon direnci açısından çok önemlidir. Paslanmaz ve asite dayanıklı çeliklerin korozyon dayanımları nitrürleme sonucu bünyelerinde bulunan kromun nitrür oluşturması ile azalmaktadır. Bu elementin dışındaki C, Si, P, Mo, Ti ve Nb elementleri korozyonu artırıcı etkide bulunmazlar. Bunlardan Si ve P tane ayrılmalarına, Mo ise paslanmaz çeliğin homojenliğini bozarak tane ayrışmasına neden olduğundan korozyonu artırırlar, yani korozyon direncini azaltırlar. Bu duruma taneler arası korozyon denir. Bu korozyon özellikle kararlı halde olmayan paslanmaz çeliklerde nitrürleme sırasındaki sıcaklık artışı ile oluşur. Bütün bunlara rağmen plazma (iyon) nitrürleme ile

sağlanan tabakaların korozyon direncindeki azalmanın en aza düşürülmesinde ($\gamma'+\varepsilon$) tabakasının faydalı olduğu saptanmıştır [3,40,51,56,62].

2.2.2.2.7.6. Ölçü Değişimi

Nitrürasyon esnasında az da olsa bir ölçü değişimi söz konusudur. Nitrürleme sırasında meydana gelen ölçü değişikliği çekme, hacım artışı (hacımsal genleşme) ve yüzey kabalaşması şeklindedir. Büyüme nitrür tabakasının %2 si kadardır ve bu büyüme taşlama ile giderilebilir [3,48,50].

Çekmeler, mekanik ve teknik gerilmeler veya madde çökelmesi sonucu oluşur. Son işlemden önce uygun gerilme giderme tavı uygulanır ve nitrürlemede yavaş ısıtma ve soğutma uygulanırsa çekmeler minimum değerde tutulabilir. Çekme, iyon nitrürleme sonucu en az, tuz banyosunda nitrürleme sonucunda ise, banyoya daldırma sıcaklığıyla banyodan çıkarma sıcaklığının farklı olması nedeni ile en fazla düzeyde oluşmaktadır. Nitrürasyon esnasında çekirdekten yüzeye doğru artan N çekilmesi nedeni ile malzemenin nitrürlü tabakasında hacim artışı meydana gelir. Bu hacim artışı ise bütün nitrürleme yöntemlerinde bir kaç µm değerindedir ve ihmal edilebilir. Yüzey pürüzlüğündeki artış çok az ve tüm nitrürleme yöntemlerinde hemen hemen aynıdır [48,63].

Çeliklerin nitrürlenmesi esnasında çeliğin bünyesindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu nitrürler, çelik içerisinde kümeler halinde çökelti meydana getirirler. Bu çökeltiler ise, malzemede çok az da olsa bir hacim artışına neden olurlar. Bu hacim artışı sadece nitrürlü tabakada vuku bulur. Nitrürlü tabakadaki bu hafif hacim artışından dolayıda yüzeyde basma gerilmeleri meydana gelir.Nitrürleme esnasında oluşan basma gerilmeleri çeliğin boyutlarında değişime, yani distorsiyona neden olurlar. Aynı nitrür derinliği için gaz ve tuz banyosu nitrürasyonunda da çarpılma (distorsiyon) oluşur. Tuz banyosu nitrürasyonunda ısıl (termal) gerilmelerin daha fazla olması nedeniyle şekil değişimi daha fazla görülür [3,40,54].

Nitrürleme yöntemleri içinde en düşük oranda boyut değişimi veya distorsiyon iyon nitrürleme yönteminde görülmektedir. Az bir hacim değişmesi ile bağlantılı olduğundan malzeme kesitinin tamamında eşit oranda düzgün bir ısıtma yapıldığı takdirde karışık şekillendirilmiş parçalarda dahi çekme meydana gelmez. İşlenmiş parçalarda ölçü değişimi her yönde boyuna orantılıdır [52,56,64].

2.2.2.2.7.7. Tokluk

Gaz nitrürleme sonrası elde edilen nitrürlenmiş tabakanın tokluğu, soğuma hızına bağlıdır. Hızlı soğuma durumunda, tabakanın tokluğu daha kötü olur. Bu durumun pratik sonuçları, gaz ve tuz banyosu ile nitrürlenmiş parçaların soğuma hızlarının mukayesesi ile yapılmıştır. Kısa işlem süresi ve düşük maliyet tuz banyosu nitrürasyonunun gaz nitrürasyonuna olan yegane üstünlüğüdür [3,40].

2.2.2.3. KARBONİTRÜRASYON

Sanayide son 20 yıldır yaygın olarak kullanılan karbonitrürleme, karbürizasyon ve nitrürasyon işlemlerinin karışımı şeklinde olup, karbürleme banyosuna benzeyen tuz eriyiklerde veya gaz ortamında yapılır. DIN 17014 teki tarife göre; Çelik bir parçanın yüzeyinin termokimyasal bir işlemle, C ve N ile zenginleştirme işlemidir. Karbonitrürasyon işlemi esnasında C ve N aynı anda çeliğin içine yayınır. Azot, karbürize tabakanın sertliğini artırır ve karbonun çözeltiye geçmesini kolaylaştırır.

Karbonitrürasyonda işlem süresi kısadır ve genellikle 1-1.5 saati geçmez. Karbonitrürleme işleminin sıcaklığı normalde 800-900°C dir. Ancak bu sıcaklıklardan daha düşük ve daha yüksek sıcaklıklarda yapılabilir. Karbonitrürlenmiş tabaka oldukça sert (yaklaşık 65 HRC) ve incedir. Ayrıca işlem esnasında parçanın iç kısmı dönüşüme uğramaz [3,32,40,65].

Düşük sıcaklıklarda gaz ortamda yapılan karbonitrürasyona ferritik nitrokarbürizasyon veya nitrükarbürizasyon denir. Nitrokarbürleme işleminin sıcaklığı 540-580°C dir. Gaz ortamında düşük sıcaklıklarda yapılan karbonitrürasyon (ferritik nitrokarbürizasyon) işlemi sonucunda malzeme yüzeyinde, yapısı ve özellikleri bilinen ve literatürlerde tanımlanan çift tabaka oluşur. Bileşik tabakaların ince yapıları ve bileşimleri ve hatta N, C ve oksijen konsantre (çökelme) değişimlerinin gevreklik ve aşınma dayanımına etkisi tamamen açıklanmış değildir. Düşük sıcaklıklardaki karbonitrürleme yani nitrokarbürleme yüzey pürüzlülüğü 6.3-0.03 μm arasında olan ve sonradan işlem görmeyecek parçalara uygulanır [65,66].

Diğer yüzey sertleştirme yöntemlerinde olduğu gibi karbonitrürleme işlemi ile ince ve sert bir tabaka elde edilir. Bu yöntem sonucu oluşan yüzey sertliği, diğer sertleştirme yöntemlerine göre daha iyidir. Sert ve ince yüzey tabakası ince parçaların yorulma ve aşınma dayanımını, şekil katılığını artırır.

Karbonitrürasyonla; alaşımlı, düşük alaşımlı ve karbonlu çelikler sertleştirilir. Bu çelikler, gerektiğinde çekirdeğe kadar sertleştirilebilirler. Sertleşme yağ, gaz ve koruyucu gaz ortamında en az distorsiyonla gerçekleştirilir. Ağır yük altında çalışan makina parçaları önce belirli kalınlığa kadar karbürize edilir. Daha sonra karbonitrürasyon ortamında ısıtılır ve yağda soğutularak çok sert, aşınma direnci yüksek temiz bir tabaka elde edilebilir. Karbonitrürleme işlemi genellikle karbonlama sıcaklığının altında yapıldığından, yayılma hızları daha düşük, kabuk derinlikleri daha azdır (0.05-0.75 mm). Bu nedenle de genelde 35 mm den küçük çaplı parçalara karbonitrürleme uygulanmaz.

Darbe şeklinde olmayan düşük yüzey basınç kuvvetlerinin aşınma tesiri altında olan parçalara uygulanır. Sertleşme sonucu kendini çekme düşük olduğundan parçalar, karbonitrürasyon ve su vermeden sonra 180°C' de yapılan temperleme işlemi ile kullanılabilir hale gelirler. Merkez malzemesi yumuşak olduğu için doğrultma ve tekrar ayarlama mümkündür [2,32].

2.2.2.3.1. Karbonitrürlemenin Yapılışı

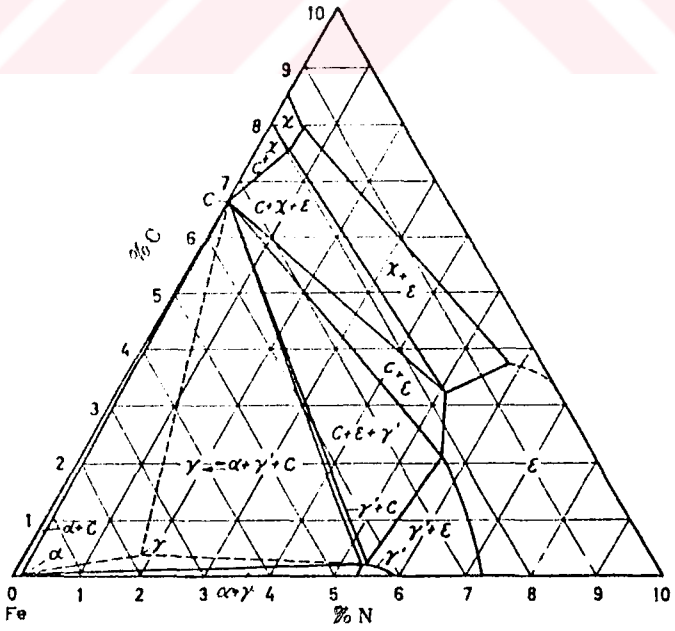
Ferritik nitrürleme, nitrokarbürizasyon, oksinitrürleme, nikofer, nikotürleme, nitrok, oksikat, triniding, kuru ve gaz siyanürleme adlarıyla da anılan karbonitrürlemede, önce çelik parçalar dönüşüm sıcaklığının üzerine kadar ısıtılır. Sonra

azot ve karbon içeren gaz atmosferinde yeterli süre tutulur. Daha sonra istenen yüzey şartları elde edilecek tarzda soğutulur. Böylece yüzeyin kimyasal yapısı ve buna bağlı olarak da mekanik özellikleri değiştirilir. Karbürizasyon işlemi için, sıvı hidrokarbon buharı veya karbonca zengin gazdan karbon sağlanır. Amonyaksa azot için kaynak teşkil eder.

Karbonitrürleme, nitrürleme işleminden çok karbürleme atmosferine azot ilave edilerek yapılan bir işlemdir. Fırın atmosferinde karbon ve amonyaktan ayrışan azot bulunur ve her ikisi çelik tarafından bünyeye alınır. Amonyak, karbürleme sıcaklığında ayrışır ve açığa çıkan atomik azot çelik yüzeyine kolayca nüfuz eder [3,65].

Fırın atmosferine amonyak ilave edildiğinde parça yüzeyindeki karbon miktarında bir azalma görülür. Bu karbon azalması, gerekli toleranslar dahilinde olmalı ve arzu edilen sertlik değerlerinin sağlanması durumunda, karbonitrürlenmiş parçaların aşınma mukavemetine ve yorulma özelliklerine bir olumsuzluk yaratmaz [3].

Amonyak miktarı genelde %3–4 arasında tutulur. Yüzey tabakasının N miktarı %0.4 civarındadır, yani α–Fe maksimum %0.4 N çözündürür. Bu sınır aşılırsa kübik yüzey merkezli γ'–nitrürü (Fe_4N) meydana gelir. Bu yapı ise %20 azot atomu ihtiva eder. Eğer atomdaki azot miktarı artar ise bu sefer de %25–26 azot atomu içeren hegzagonal ε–nitrür ($Fe_{2-3}N$) oluşur. Bu durum 590°C ye kadar teşekkül eder. Bu sıcaklıkta %2.35 ağırlıklı azotlu ötektoid yapı meydana gelir. Bu sıcaklığın üzerinde ise azot yığılması (konsantrasyonu) sonucu ferrit ve azot ihtiva eden ostenitten meydana gelen iki fazlı yapı oluşur [40,65,67]. Difüzyon esnasında azotun refakat elementi olan karbonun difüzyon eğilimiyse Fe–C–N üçlü denge diyagramından görülebilir (Şekil 2.8)



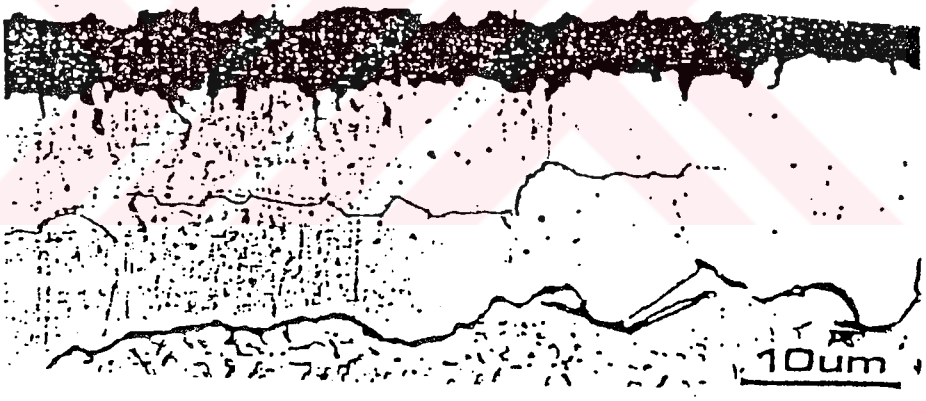
Şekil 2.8: Fe–C–N denge diyagramının 565°C de izotermal kesiti [65]

α–Fazında N konsantrasyon (yığılma) eğilimi ile C miktarı artar ve nitrürün yanısıra karbür de oluşur. Yükselen sıcaklık ile ε–nitrür az oranda C çözündürür. Yüksek sıcaklıklarda ise kuvvetli karbür oluşumu beklenmelidir. Karbonitrürasyon sonucu oluşan nitrokarbür tabakası temizdir ve ilave bir taşlama gerekmez.

Amonyağın ilavesi bazı hallerde işlemin sadece son 30–60 dakikasında yapılırsa, yüzey tabakasında iç oksitlenmenin sonucu oluşacak yumuşak bir deri tabakasının oluşumu engellenir. Bu tür oksitlenme sonucu, alaşım elemanları oksijen ile birleşirler ve dolayısıyla sertleşmeye katkıda bulunmazlar. Azot C ile beraber aynı şartlarda ve zaman diliminde verilirse, N ve karbonun difüzyon oranı aynı olur. Çünkü azot C gibi aynı derinliklere yayınır. Eğer azot ilavesi geciktirilir ise difüzyonda bir gecikme olur. Bu durumda azotun karbon ile aynı diffüzyon derinliğine ulaşması için konsantrasyonu artırılır [3,40,65].

2.2.2.3.2. TABAKA YAPISI

Karbonitrürasyonda elde edilen yüzey tabakasının durumu atmosferde bulunan maddelere, sıcaklığa, zamana, çeliğin tipine ve alaşım elementlerine bağlıdır. Karbonitrürasyon sıcaklığı ne kadar yüksek ise amonyak o kadar az aktiftir. Karbonitrürasyon için, yüzeyde yeterli miktarda N ve C bulunması şarttır. Karbonitrürlenmiş veya nitrürlenmiş çeliklerin yüzeyinde, Fe–C ve nitrürden meydana gelen bileşik tabaka ve hemen onun altında difüzyon (yayınma) tabakası meydana gelir (Şekil 2.9). Ayrıca, bu işlem sonunda daha iyi bir aşınma direnci istenmezse, soğutma sıvı içinde yapılmaz. Yüzeydeki N un malzemeye yayınması, azotun demire geçiş katsayısı düşük olduğundan düşük sıcaklıklarda uzun sürede olur [3,65].



Şekil 2.9: Karbonitrürlenmiş bir çeliğin kabuk mikro yapısı [3]

2.2.2.3.2.1. Bileşik Tabaka

Bu tabaka ε–Fe(N,C) ve γ'–Fe_4 (N,C) gibi demir karbonitrürlerinden oluşur (Şekil 2.9–10). Bu tabakanın oluşumunu, soğutma ve temperleme şartları belirler. En üstteki koyu bölge ε–Karbonitrür parlak kısımlarsa γ'–Karbonitrürdür (Şekil 2.9). γ'–Karbonitrür tabakası yüksek miktarda C ihtiva eder. γ' – fazı ise %0.2 C çözündürür [3].

ε – Fe_2 (N,C, 1–x)	Bileşik Tabaka
γ' – Fe_4N	
Demirde α'' – $Fe_{16}N_2$	Diffüzyon Bölgesi
γ' – Fe_4N	

Şekil 2.10: Karbonitrürlenmiş bir çeliğin yüzey yapısı [3]

2.2.2.3.2.2. Yayınma (Difüzyon) Tabakası

Bu tabaka, işlem sonrası soğumaya ve oda sıcaklığındaki yaşlanmaya bağlıdır. Azot metastabil α''-$Fe_{16}N_2$ ve stabil γ'-Fe_4N nitrürleri olarak çökelirler (Şekil 2.8). Arayer katı eriyiki olarak çökelen demir nitrürlerin bulunduğu bu bölgeye difüzyon tabakası denir. Karbonitrürleme sonucu yapıdaki azot %1 civarında ise kabuk yapısı karbonitrürler, %0.3-0.4 kadarsa martenzit ve sementitten oluşur.

Karbonitrürleme düşük sıcaklıkta yapılırsa yüzeyde yüksek nitrür oranı elde edilir. Yüksek sıcaklıkta ve düşük oranda azot bulunan atmosferde karbonitrürleme yapılırsa, amonyak miktarına bağlı olarak yapıda artık ostenit yer alır. Artık ostenit miktarı, karbonitrürasyon atmosferindeki azot veya amonyak oranı ile ayarlanabilir. Amonyak işlemin son dakikalarında (15-20 dk.) ilave edilirse yapıda artık ostenit miktarı azalır [3].

2.2.2.3.3. Tabaka Derinliği ve Sertlik

Karbonitrürlenmiş yüzey tabakası Fe, N, C bileşiklerinden meydana gelmektedir. Bileşik tabaka olarak adlandırılan karbonitrürlenmiş yüzeyin sertliği semente edilmiş tabakanınkine göre daha yüksektir. Yüzey sertleştirme işlemlerinde kabul edilen en düşük sertlik değerine etkili sertlik ve bu sertliğe karşılık gelen max. tabaka kalınlığına da etkili derinlik denmektedir. Karbonitrürasyon ile sertleştirilmiş tabaka derinliği C ve N'un difüzyonuna bağlıdır. Aynı işlem şartlarında yapıya sertlik kazandıran karbon, azota göre daha derinlere difüze olduğu şeklinde yorumlanmaktadır [68].

Tercih edilen karbonitrürlü tabaka parçanın çalışacağı ortama ve istenen çekirdek sertliğine göre belirlenir. Kabuk kalınlığı, hafif yüklerde aşınmaya maruz kalan parçalar için az, yüksek basma gerilmelerine maruz ve yüzeysel temasta olan eğmeye, basmaya ve çekmeye maruz makina elemanlarında daha fazladır.

Kabuk kalınlığı aslında etkili kabuk kalınlığı esas alınarak ölçülür. Ancak özellikle düşük sıcaklıkta ve düşük karbon oranına sahip parçaların karbonitrürasyonunda elde edilen kabuk kalınlığı hemen hemen aynıdır. Yüksek sıcaklıkta yapılan karbonitrürlemede çeliğin karbon oranı fazlaysa etkili derinliği tespit etmek zordur

Sertlik tamamen tabakanın yapısına bağlıdır. Kısmi olarak amonyak atmosferindeki karbonitrürlemede N miktarı yüksektir. Yapıda artık ostenitin varlığı yüzeyin sertliğini azaltır. Artık ostenit miktarı azalırsa sertlik artar. Bunun için amonyak miktarı azaltılır.

Karbonitrürasyonda kabuk kalınlığının yüzey boyunca aynı kalması, fırının şarjına, boşaltılmasına ve bütün bunların iyi derecede kontrol edilmesine bağlıdır. Nitrokarbürleme, yani düşük sıcaklıkta yapılan karbonitrürleme sonucu daha homojen yapı elde edilir [3].

Nitrokarbürlenmiş tabaka ile nitrürlenmiş tabaka arasında bir farkın olmadığı, yani her iki yöntemle elde edilen tabakanın ε- ve α-fazlarını ihtiva ettiklerini, fakat karbür fazının oluşmadığı faz analizi ile tespit edilmiştir.

Karbon bileşik tabakanın kalınlığına etki etmektedir. Diğer bir tespite göre de γ'–tabakasının kalınlığı artan karbon miktarı, difüzyon derinliğide alaşım elementleri ile azalmaktadır. Nitrürlenmiş ve nitrokarbürlenmiş çeliklerin mikro yapıları mukayese edildiğinde, meydana gelen tabakanın yapısına gaz fazından karbon difüzyonunun etki etmediği görülebilir [65,69,70].

Sabit sıcaklık şartlarında, karbonitrürleme çevrimi çeliğin N ve C ile doyması, difüzyon kanununa göre cereyan eder. Azotun demir ile olan ilişkisi nitrürleme bahsinde belirtilmiştir. Azotun α– demiri içerisindeki difüzyonu γ–Fe'ine oranla 50 kat daha fazladır. Bu oran C için 40 tır. Ayrıca temper sıcaklığında yüzeyde oksit film var ise difüzyon hızlanır. Bekleme süresinin artmasıyla yayınma tabakasının kalınlığı da artmaktadır. Oksijen yüzeyin mekanik karakterini etkilemez, fakat nitrürleme etkisini artırır ve yüzey pürüzlülüğüne sebep olur. %2 oksijen yapıya homojenlik sağlar. Tabaka oluşumuna özel bir etkide bulunan oksijen bileşik tabakanın özelliklerini düzeltir. Düşük sıcaklıkta yapılan gaz nitrürleme durumunda, bilakis oksijensiz gaz karışımı için yüzey aktivitesi gereklidir [3,40,66].

Yüzey sertleştirme, C ve N oranına, alaşım elemanları miktarına, işlem sıcaklığına ve süresine, soğuma hızına, uygulanan işleme ve kimyasal yapısına bağlıdır. Karbonitrürlenmiş parçanın nitrürlü tabakasının kalınlığı, sertliği, kalitesi çok önemlidir ve tabaka sertliği artık ostenit miktarı ile belirlenir [3].

Çelik içindeki karbon miktarının artması ile birleşik tabakanın sertliğinde azalma meydana gelmektedir. ε–nitrür yükselen sıcaklık ile daha az karbon çözündürür. Fakat artan sıcaklıklarda kuvvetli karbon oluşumları beklenmelidir.

Karbon ve azotun müşterek etkilerinde, (C+N) oranının fazla miktarda olmaması gerekir. Çünkü azotun etkinliği tamamen doymamış karbonitrür nedeni ile daha az olur. Bununla beraber azotun difüzyonu kolaylaşır. Azot miktarı amonyak miktarındaki artışla artmakta ve sıcaklık yükselmesiyle düşmektedir [65,67,71].

Karbonitrürlemenin en önemli özelliği işlem sırasında azotun çelik tarafından absorbe edilmesinde kritik soğuma hızının düşmesidir. Aynı yapıdaki çeliğe N verilerek yapılan karbonitrürleme sertleşmesi, karbürlemeye göre daha yüksektir. Aynı karbürleme ile homojen olarak sertleştirilemeyen çelikler, karbünitrürleme ile daha düşük maliyette ve üniform olarak sertleştirilirler.

Yüzeye yayınan azot, yüzey tabakasının sertleşmesini artırır. Yüzeyin sertliği özellikle, noktasal yükler taşıyan makina parçaları için çok önemlidir. Azotun yüzey sertliğinde istenilen etkiyi sağlaması için amonyak miktarı, fırına verilen endogazın %5'i kadar olması gerekir. Bu oranda karbon miktarının azot içeriğine etkisi çok azdır. %0.2 N oranı ise sertleşmeye etkili olmaktadır. Parça yüzeynin her tarafında aynı miktarda azot elde etmek için yüksek sıcaklıklarda daha düşük oranlarda amonyakla çalışabilirler [3,40].

Nitrokarbürleme yönteminde, alaşım elementlerinin azot ve karbona olan ilgileri nedeniyle azot miktarının artmasına ve nitrür oluşumunun azalmasına neden olurlar. Nüfuz eden azot ile alaşım elementleri reaksiyona girerler. Asıl malzemedeki bağlanmış azot miktarı, azotun bu elementlerle özel nitrür oluşturmaları sonucu yükselir [65].

Düşük sıcaklıklarda (özellikle 700°C) yapılan karbonitrürleme esnasında patlama riski ve yüzeydeki azotun kırılganlık etkisi büyüktür. Bu sıcaklıkta yapı daha kırılgan çekirdek sertliği daha düşüktür. Bu nedenle çoğu karbonitrürleme, bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir [3,65].

2.2.2.3.4. KARBONİTRÜRASYONUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

2.2.2.3.4.1. Aşınma, Yorulma, Korozyon, Çentik Darbe Dayanımı, Akma ve Elastiklik Sınırı

Yapılan çok sayıdaki araştırma ve deneyler, karbonitrürasyon ile malzemenin sertliğinin, akma ve elastiklik sınırının, yorulma ve korozyon dayanımlarının ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği ortaya konmuştur. Sıcaklık, metallerin yorulma ve aşınma özelliklerine, sertliğine, boyut kontrolüne etkide bulunur.

Azot ve karbonun toplanması tabakanın sertliğini ve mukavemetini artırır. Yüzeyin sertliği, işlem sıcaklığına ve alaşımlı çeliklerde nitrür oluşturan alaşım elementlerine bağlı olarak artar. Nitrokarbürleme adhesiv, abrasiv, yorulma, tribooksidasyon aşınmaları bakımından aşınma dayanımının düzeltilmesi için tam etkiyi sağlamaktadır.

Karbon miktarına bağlı olarak malzeme yüzeyinde sadece ε-fazından meydana gelen bileşik tabakanın aşınma dayanımı daha iyidir.

Malzemenin tribolojik özellikleri yanısıra yorulma direncininde önemli miktarda arttığı belirlenmiştir. Difüzyon bölgesinde yer alan arayer katı eriyik alaşımı olan demir nitrür alaşımları, yapıda, soğumaya bağlı olarak oluşur ve yorulma direncini artırırlar.

%0.2–0.25 C içeren çeliklere karbonitrürasyondan sonra ısıl işlem uygulanırsa bu çeliklerin sertlik ve yorulma dirençleri artar. Bu usulle elde edilen çentik darbe dayanımı diğer yüzey sertleştirme yöntemleriyle elde edilenin yarısına eşittir. 140°C de yapılan tavlama sonucu ise hem elastiklik sınırında ve hemde % uzamada iyileşmeler görülmüştür [3,65].

2.2.2.3.4.2. Temperleme Direnci

Karbonitrürlenmiş çeliğin temperlenme direnci, azot bulunması nedeniyle, karbürlemeye göre daha yüksektir. Yüzeydeki azot miktarı, temperleme sonrası yumuşamayı belirleyen en önemli faktördür. Karbonitrürasyonda, amonyak miktarının maksimum ve yapının tamamen martenzit olması, yani en az artık ostenit bulunması durumunda temperlemeye karşı direnç en yüksek değerindedir. Temperleme direncindeki bu artış yüksek çalışma sıcaklıklarında arzu edilir.

Çoğu karbonitrürleme işlemlerinde sertlik 58 HRC den aşağı olmamak üzere, kırılganlığı azaltmak için çelikler 190–204°C arasında temperlenirler. Alaşımlı çeliklerse yüzeydeki taşlama çatlaklarını en aza indirmek için temperlenirler. Düşük alaşımlı çelikler ise 135–176°C arasında temperlenirler. Böylece boyut değişimi en aza indirilir ve ostenit dengelenir. Fakat

aşınmaya dayanıklı olması istenen parçaların temperlenmesi gerekmez. Yapılan çeşitli deneyler ile temperleme sıcaklığı artırıldığında, yani 204°C nin üzerine çıkarıldığında, sertliğin 58 HRC nin altına düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca karbonitrürlemeden sonra yapılan temperlemeyle çentik darbe dayanımında da artışlar tespit edilmiştir [3].

2.2.2.3.4.3. Boyut Kontrolü

Karbonitrürleme sıcaklığı boyut kontrolü için çok önemlidir. 780°C den daha düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen karbonitrürleme sonucu malzemenin daha az distorsiyona uğradığı ve daha esnek olduğu, 708°C den daha düşük sıcaklıklarda ise gerekli kabuk kalınlığına daha uzun sürede ulaşıldığı tesbit edilmiştir.

Çekirdek sertliği ve yüzey durumu sıcaklığa bağlıdır. Yüksek sıcaklıkta ise yüksek çekirdek sertliği elde edilir. Yüksek yüzey gerilimine sahip uygulamalarda çekirdek sertliğinin yüksek olması arzulanır. 788°C de yapılan karbonitrürlemeyle elde edilen yumuşak ve ince iç yapı tatmin edici aşınma direncine sahiptir.

Karbonitrürleme yöntemi distorsiyonu artırır. Karbonitrürlemeden sonra parçalarda oluşan şekil değişimi soğutma ortamına bağlıdır. Su ortamı distorsiyonu artırması nedeniyle düşük distorsiyona sahip az karbonlu alaşımsız çelikler suda soğutulur. Alaşımlı ve yüksek karbonlu çelikler suda soğutulduğundan çarpılma ve çatlama riski çok daha artar ve şekil değişimi (distorsiyon) nedeniyle boyut kontrolü zorlaşır. Soğutma, erimiş tuz banyolarında veya yüksek tutuşma sıcaklığına sahip yağlarda yapılırsa distorsiyon en azа indirgenir. Gaz ortamda yapılan soğutmada ise distorsiyon ile beraber çatlama riskide azalır [3].

BÖLÜM III – BORLAMA

3.1. GİRİŞ

1895 yılında Moissan [72,78] çeliklerin borlanabileceğini söylemiş ve bu konuda çalışmalar yapmıştır. Ancak özellikle II. Dünya savaşından sonra bu konudaki araştırma ve çalışmalar yoğunluk kazanmıştır.

Borlama, metalik malzemenin yüzeyine B'un yayındığı termo kimyasal bir işlemdir. Borla yüzey sertleştirme, esas olarak borun yüksek sıcaklıkta çeliğe yayınımı olayıdır. Bor kaynağının fiziki durumu katı, sıvı veya gaz olabilir. Borun malzeme yüzeyine 800–1000°C sıcaklıkları arasında bor verici ortamda yayınmasıyla borlu tabaka oluşur. Borlu tabakanın özellikleri, borlanan çeliğin bileşimine, borlama sıcaklığıyla süresine ve ısıl işleme bağlıdır. Borlamayla çelik yüzeyinde oluşan tabaka çok sert 2500 HV [76,87] olup ayrıca sementasyonda olduğu gibi sertleştirmeye gerek olmaz. Fakat çekirdek malzemesininde sert olması istendiğin de borlama sonrası ısıl işlemler uygulanabilir. Borlu tabakada bor Fe_2B ve FeB şeklinde bulunur.

Bor, çeliklerde alaşım elementi ve yüzey sertleştirici ve ayrıca çelik üretiminde de cüruf yapıcı olarak kullanılır.

Bor, yüzeyde alaşım elmentleri ile de borürler oluşturarak tabaka özelliğini iyileştirir. Borun α ve γ demiri içinde çözünebilirliği çok sınırlıdır. Bor ile sertleştirilmiş parçaların korozyon direnci oldukça yüksektir. Ayrıca kimya, cam, seramik ve nükleer sanayiinde, jet ve roket yakıtında bor ve bileşikleri yaygın olarak kullanılmaktadır [72–82].

3.2. SAF BOR'UN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Borlama bu tezin esasını oluşturduğundan bor ve bileşikleri hakkında aşağıda detaylı bilgi verilmiştir.

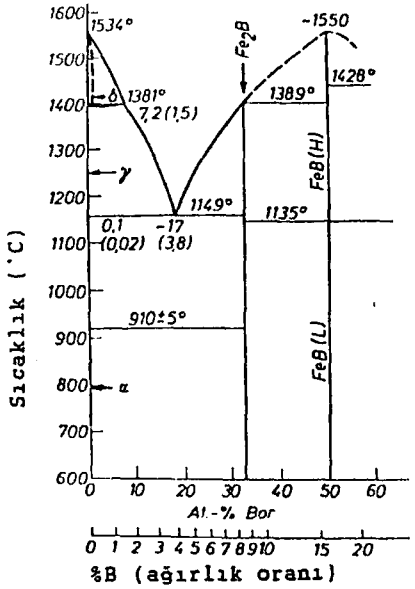
Borun atom numarası 5, atom ağırlığı 10.82, atom çapı 1.78 A° ve ergime noktası 2400°C dir. Bor 2.33±0.02 gr/cm^3 yoğunluklu kristal ve 2.3 gr/cm^3 yoğunluklu amorf olmak üzere iki şekilde bulunur. Kristal bor, tetragonal ve hekzagonal kafes yapısına sahiptir. Doğal bor elementi %18.83 oranında B^{10} ve %81.17 oranında B^{11} izotoplarının karışımıdır.

Bugün borun, diğer elementlerle 100 üzerinde bileşikleri üretilmektedir. Bu bileşiklerin bir kısmı katı, bir kısmı sıvı ve bir kısmı da gaz halindedir. Borlama işleminde ve endüstrinin diğer dallarında bor ya saf halde yada bileşikleri şeklinde kullanılmaktadır [79].

3.3. ÇELİKLERDE BOR BİLEŞİKLERİ

Borun atom çapı demirden %25 daha küçük olduğundan bu elementle katı eriyik yapar. Demirde sıcaklığa bağlı olarak bor erirliği 20- 80 ppm (pörpersin milyon), ostenitte ise 55-260 ppm dır. Bor ostenitte arayer katı eriyiği, α-Fe'de ise yer alan katı eriyik yapar.

Çeliklerde alaşım elementlerine bağlı olarak borür de oluşur. Bor bileşiklerinin oluşumunda, atom çapı faktörü valans faktöründen daha etkindir. Nedenide, borun atom çapının diğer arayer atomlarından (C,N,H) daha büyük olmasıdır. Çeliklerde B konsantrosyonu yeterliyse B-B bağı oluşur. Bu bağın konfigrasyonu borür fazının kristal yapısını kontrol eder.



Şekil 3.1: Fe-B denge diyagramı [72].

Bor, çeliğe yayındırıldığında demir ile iki farklı borür meydana getirir. Bu durumu ise Fe–B denge diyagramından görmek mümkündür (Şekil 3.1). Fe ile B, Fe_2B (%8,83 B) ve FeB (%16,23) fazlarının ve 1149°C'de, %3,8 B bileşiminde bir ötektoid nokta oluştururlar. Tablo 3.1 de Fe_2B ve FeB fazlarının bazı özellikleri verilmiştir [72,74,79,82,83].

Çeliğin borlanması neticesinde en üst tabakada sırasıyla FeB_x FeB ve Fe_2B gibi çeşitli demir borürler oluşur. Borlu tabakaların altında bor atomlarının demir kristal kafesinde katı eriyik olarak çözünmüş olduğu, bir de difüzyon tabakası denen çözündüğü ölçüde borca zenginleştirilmiş bir kısım mevcuttur.

Borür ve difüzyon tabakalarının altında, içinde bor olmayan iç doku meydana gelir. Bu iç dokunun borlu tabakalar ile sınır kesiminin metalografik yapısı, daha derinlerdeki normal dokudan farklılıklar gösterir. Borun difüzyonu sonucu C içerilere doğru yayınır, çünkü demir kafesi her iki atomu (B ve C atomu) nu yanyana aynı hücrede çözündüremez. İçeriye doğru yayınan karbonun bir kısmı arayer katı eriği oluşturur.

Tablo 3.1 : Fe_2B ve FeB fazlarının özellikleri [72,79,83].

Özellik	BORÜR	
	Fe_2B	FeB
Erime Noktası (°C)	1390	1550
Mikro Sertlik (HV)	1600–1800	1600–2400
Uzama katsayısı (1000°C)	$8 \cdot 10^{-6}$ 1/°K	$10–16 \cdot 10^{-6}$ 1/°K
Termal iletkenlik (1000°C)	0.2–0.3 W/[cm°C]	0.1–0.2 W/[cm°C]
Küri noktası (°C)	742	325
Yoğunluk (gr/cm^3)	7.00	6.3
Kristal Sistemi	Tetragonal hacim merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri (A°)	a: 5.078 b: 4.249	a: 4.053 b: 5.495 c: 2.496

Difüzyon tabakası homojen bir yapıya sahip değildir. Bu bölgelerin üst kısmında çelikteki alaşım elementlerine göre $(Fe,Me)_2B$ ve (Fe,Me)B gibi çeşitli karma borürler oluşur (Me: Çeliğin bünyesindeki alaşım elementi).

FeB fazında en fazla oranda (%50) B bulunur. Bu orandan az veya çok da olabilir. O zaman FeB_x fazı oluşur. Fe_2B ise %33 oranında B atomu ihtiva eder [82].

Yüksek karbonlu çelik ve dökme demirlerde $Fe_3(B,C)$ ve $Fe_{2-3}(B,C)_6$ formülündeki borkarbür fazları oluşabilir. Bu fazlarda C ve B oranı değişebilmektedir. $Fe_3(B,C)$, Fe_3C gibi ortorombik sistemlerdir. Alaşımlı çeliklerde ise yukardaki bileşiklerin yanısıra alaşım elementlerine bağlı olarak Cr_2B, CoB, CoB_2, TiB_2, NiB_2 ve kübik yapılar $Me_{2-3}(B,C)_6$ bileşiklerini de içerirler.

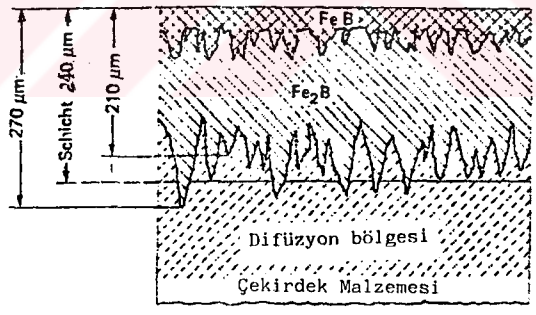
Bor, çeliklerde alaşım elementi olarak da bulunabilir. Bu durumda da bor az alaşımlı çeliklerde ostenitin dönüşümünü önemli derecede yavaşlatarak sertleştirme kabiliyetinin yükselmesine ve çelik bünyesinde ince dağılmış olan partikülleri azalmasına neden olur. Borlu çeliklerin özellikleri, bor elementinin bünyedeki dağılım şekli ve diğer alaşım elementleri ile olan etkileşiminin bir fonksiyonudur. Ostenitik paslanmaz çeliklere ve bazı süper alaşımlara az oranda bor ilave edilirse onların yüksek sıcaklık dayanımlarını iyi yönde etkiler.

3.4. BORLAMA TABAKASI

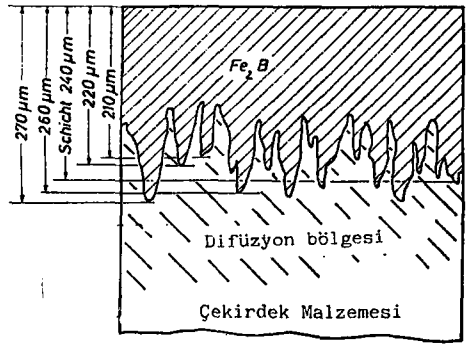
Borlama işleminde borun yüzeye yayınması sonucu parçanın en üst yüzeyinde bileşik tabaka adı verilen borürlü bölge, onun altında yer alan yayınma (difüzyon) bölgesi ve en iç kısımda ise çekirdek bölgesi yer alır.

3.4.1. Bileşik Tabaka

Borlama işlemi ile elde edilen borürlü, yani bileşik tabaka Fe esaslı malzemelerde en dışta koyu renkli FeB ve onun altında da açık renkli Fe_2B fazlarından meydana gelir. Bu tabakanın görünüşü çoğunlukla diş şeklindedir (Şekil 3.2a) [73,75,76,83].

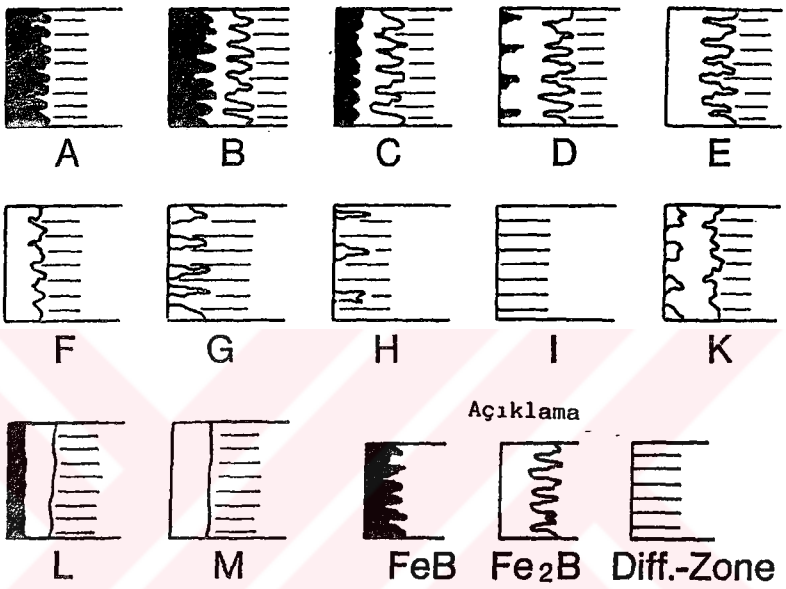


Şekil 3.2a: Alaşımsız çelikte iki fazlı borür tabakasının şematik gösterilişi [76]

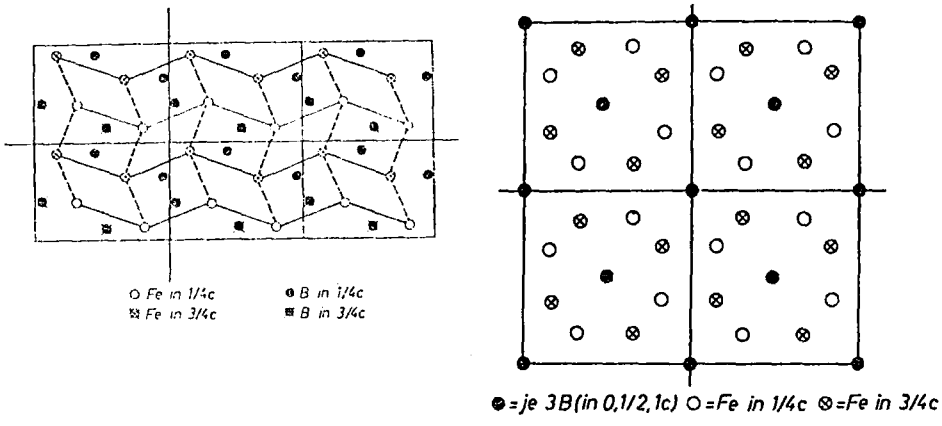


Şekil 3.2b: Tek fazlı borür tabakasının şematik gösterilişi [72]

Yüksek bor potansiyeline sahip olan borlama maddesi ile çalışıldığında tabaka 2 fazlı teşekkül eder. Bu fazlardan dıştaki FeB borca zengin, Fe_2B ise daha az bor ihtiva eder. FeB, Fe_2B'ye oranla biraz daha serttir, fakat oldukça gevrektir. Borlama maddesinin bor potansiyeline bağlı olarak birleşik tabaka tek veya çift fazlı olarakta meydana gelir (Şekil 3.2a ve 3.2b). Ayrıca bazı durumlarda birleşik tabakanın oluşumunu engelleyerek, sadece difüzyon tabakası teşekkül ettirilebildiği gibi, bileşik tabakanın dişli şekilde olması engellenebilir (Şekil 3.3) [72,76,77].



Şekil 3.3: Borlu tabaka tipleri [72]



Şekil 3.4: Atom yerleşimine (001) göre [83]
a) FeB' in yapısı b) Fe_2B' in yapısı

Yapılardaki bor miktarı (FeB/Fe_2B) oranına, borlama süresine ve borlama sıcaklığına da bağlıdır. Tabakanın ve asıl malzemenin dişlenme derecesi ayrıca alaşım elementlerinin miktarına da bağlıdır. Kuvvetli dişlenmeler, karbonlu çeliklerde ve düşük alaşımlı ıslah çeliklerinde ortaya çıkmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise alaşım elementleri miktarına bağlı olarak

değişmektedir. Alaşım elementi miktarı artınca dişlenme azalmaktadır. Borürlü tabakalar, dişli şekilleri nedeni ile asıl metale daha iyi bağlanırlar. Alaşımlı çeliklerde bu tabaka daha incedir. Hatta bazen hiç yoktur (Şekil 3.3). Oluşan bu dişler yüzeye dik olduğu için, işlem öncesi parçanın çok iyi bir şekilde işlenmesi gerekir [73,74,76,77].

FeB tabakası sert ve gevrek olduğu için yalnız tek fazlı Fe_2B tabakası elde edilir. Eğer FeB'in oluşması engellenemiyorsa, kapalı bir yüzey bölgesinin oluşmasına dikkat edilmelidir.

Borürlü tabakanın kalınlığını sınırlayan faktörler alaşım elementlerinin yanısıra borürlü tabakanın gevrekliğidir. Borlanmış tabakaların kırılganlığı kalınlık arttıkça artar. Borlama sıcaklığına ve süresine de bağlı olarak tabakanın kalınlığı artar.

Her iki borürün kafes yapısı bellidir. FeB rombik veya ortorombik kafes yapısına (Şekil 3.4a) ve Fe_2B de yüzey merkezli kafes yapıya (Şekil 3.4b) sahiptir [72,73,76,83].

3.4.2 Yayınma (Difüzyon) Tabakası

Bu bölgeye Geçiş Bölgesi de denir. Düşük konsantrasyonlardaki borun analiz zorluğu ve geçiş bölgesinin optik mikroskopta görülmemesi nedeniyle bu tabaka birçok araştırmacı tarafından fark edilememiş, varlığını tespit eden araştırmacılar da bu tabaka hakkında tam bir görüş birliğine varamamışlardır. Bu bölge C'un borür tabakasından içeri itilerek oluştuğu görüşü hakimdir [79].

Bazı araştırmacıların bu tabaka hakkındaki görüşleri şöyle sıralanılabilir [76,79,82,83].

1- Yayınma tabakası, borür tabakasından 3-3.4 defa daha kalın ve ana malzemeye göre daha fazla perlit içerir.
2- Yayınma tabakası içinde bor erimiş demir.
3- Bu tabakanın kalınlığı alaşım elementlerine bağlı olarak değişen karbonca zengin bölgedir.
4- Metalografik olarak ispat edilemeyen bu bölge borür tabakasının altında %0.003-0.005 B çözünmüş bir diffüzyon bölgesidir.
5- Armco demirde yapılan araştırmada bu tabakada %0.001 B belirlenmiştir.
6- Bor çelikteki karbonu derinlere iterek diffüzyon tabakasında $Fe_3(B,C)$ bileşiği yapmaktadır.
7- Bazılarına göre bu tabaka karboborürden meydana gelir.
8- Bazı araştıracılara göre bu tabaka sadece sementitden (Fe_3C) oluşmaktadır.
9- Diğer bir görüşte sementitden (Fe_3C) oluşan bu bölgede C borun yerine geçerek $Fe_3 B_{0,8} C_{0,2}$ bileşiğini oluşturur.
10- Bir araştırmacıya göre bor karbür oluşumuna etki etmez.

Difüzyon tabakasının üst kısmında, yani borür tabakası ile temas ettiği yerde çeliklerdeki alaşım elementlerine göre $(Fe,Me)_2B$ ve (Fe,Me)B gibi çeşitli karma borürler oluşur.

Dışarıdan sürekli verilen bor atomları karbon atomlarını parça yüzeyinin iç kesimlerine doğru sürerler. İçerilere itilen C atomları Fe kafesi içinde imkan verdiği ölçüde arayer katı eriyiği olarak çözünür ve fazlasıylada karbür fazları oluştururlar. Bu karbür tabakası borür tabakasından daha kalın olabilir. Alaşımsız çeliklerin bor veren ortamda 1000°C de borlanması esnasında bor ortamdaki azot ve oksijen ile bornitrür ve boroksit oluşturur. Soğuma esnasında serbest bor demir karışım kristalleri içinde aşırı doymuş çözelti olarak kalır veya sementit kafesindeki karbon atomları ile %80 oranında yer değiştirerek bor sementit $Fe_3B_{0.8}C_{0.2}$'ini oluşturur. Böylecede diffizyon tabakasını meydana getirir. Yüksek karbon içeren çeliklerin işlenmesi esnasında oluşan birleşik tabakanın altında teşekkül eden difüzyon tabakasının biçimi açıklanamamıştır [72,74,82,83,84].

3.5. BORLAMA YÖNTEMLERİ

Esas itibari ile bir yayınma işlemi olan borlama, karbürleme ve nitrürlemeye, benzer. Diffüzyon yöntemi olan borlama termokimyasal bir işlemdir. Termokimyasal işlem süresince bir metal yüzeyinin bor ile zenginleştirilmesi olayına borlama denir. Uygun işlem sıcaklıklarında metal malzemenin yüzeyine yayınan bor, metal ile bir ve bir kaç intermetalik fazdan meydana gelen bir tabaka oluştururlar. Bu işlemin esası, borla metalin bir arada bulunduğu bor verici ortamda kimyasal veya elektro-kimyasal reaksiyonlar neticesinde borun metal yüzeyine yayınması olayıdır. Bu olayda bor kaynağının fiziksel durumu katı,sıvı veya gaz olabilirler. Borlama ortamının sıcaklığı 800-1000°C arasında değişir. Borlama ortamı ise, bor kaynağı (bor veya bileşikleri), aktivatör, dolgu veya deoksidantlardan oluşur. Aktivatörler tabakanın düzenli büyümesine ve oluşumuna etki ederler. Dolgu ve deoksidantlar ise borlama sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar ve ayrıca borlama maddelerinin ana malzemeye yapışmalarını önlerler [72-80,85-87].

Borlama sonucu oluşan tabakaya Borür Tabakası denir. Bu tabakanın özellikleri şöyle sıralanabilir: [88]

1) Çok yüksek sertlik,
2) Yüksek ısınma direnci,
3) Alt yüzeye iyi tutunma özelliği,
4) Yüksek sıcaklık dayanımı,
5) Yüksek ısılarda sertliğini koruma özelliği,
6) Minimum soğuk kaynak eğilimi,
7) Demir malzemelerininkine uygun genleşme katsayısı'dır.

3.5.1. Katı Ortamda Borlama

Katı ortamda borlama iki farklı şekilde yapılmaktadır. Bunun biri toz ortam, diğeriyse macunlama (pastalama) yöntemidir. Bu iki yöntemde de kullanılan bor verici ortam aynıdır. Toz ortamda kullanılanlar en ince taneden oluşmaktadır. Macunlamada ise aynı maddeler macun haline getirilmiştir. Her iki tarzda da kullanılan borlama maddelerine Ekabor adı verilmektedir [72,78,88-91].

3.5.1.1. Toz Ortamda Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde 800 – 1000°C sıcaklıklarda 4–10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Borlama tozu ısıya dayanıklı çelik sac kutu içine konur ve borlanacak parça bu tozun içine gömülür. Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde enaz 10 mm kalınlığında olmalıdır. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak önceden belirli bir sıcaklığa ısıtılmış fırın içine konur ve fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına ısıtılır. Bir süre bekletildikten sonra kutu fırından alınarak soğutulur ve parça içinden çıkarılır. Bu sırada çelik kutunun kapağı kutunun üzerine kendi ağırlığında konulmalıdır. Yani sementasyonda olduğu gibi sıkıca kapatılmasına gerek yoktur. Eğer işlem normal atmosferde yapılacak ise kapak sıkıca kapatılmalıdır. Bu yöntem koruyucu gaz atmosferi içinde de yapılabilir. Yöntem ucuzdur ve özel bir teknik gerektirmez [74,75,79,80,87].

Borlama ortamının ana bileşeni borkarbür, ferrobor ve amorf bordur. Borkarbür diğerlerine göre ucuzdur. Toz ortamda katı bor vericiler ile borlamanın ilk olarak Kunst ve Schaaber tarafından yapıldığı ve daha sonra Minkevic'in bu yöntemle sadece ince ve gözenekli tabaka elde ettiği, dolayısıyla toz ortamda borlama ile ilgili araştırmaların bir müddet ihmal edildiği ifade edilmektedir. Kunst ve Schaaber, Minkevic'in bu düşüncesinin, çalışmasında uygun olmayan bor verici malzemeler, meselo fazla kristal içeren amorf bor veya yüksek oranda Al veya Si içeren ferrobor kullanılmış olabileceğinden kaynaklandığını zannediyorlardı. Amorf borun saf halinin çok pahalı oluşu ve saf ferroborun eldesinin endüstriyel olarak çok zor olması bu metodların bırakılmasına neden olmuştur. Diğer bor verici toz ortam borkarbür ise, amorf bor ve ferrobordan ucuz olup, bileşimi zamana göre sabittir. Elverişli tane boyutunun ve etkin aktivatörün seçimiyle iyi sonuçlar alınmıştır. Bütün bunlara rağmen amorf bor tozuna aktivatör olarak Amonyumklorür eklenerek yapılabilir. Ferrobor ortamında yapılan borlama sonucu elde edilen tabaka teknik açıdan kullanılamaz. Aktivatör dolgu maddeleri ile kullanılabilir [72–74,83,92].

Ana borlayıcı kaynağa NH_4Cl, BoF, $NaBF_4$, NH_4BF_4 NH_4F, Na_2CO_3 KBF_4 ve Na_2AlF gibi aktivatörler eklenerek kullanılırlar [72,79].

Çeşitli araştırmacılar tarafından aşağıdaki karışımlar kullanılarak katı ortamda borlama çalışmaları yapılmıştır.

1) Ferrobor + %10–15 NBF_6 [79]
2) %50 Amorf bor + %1 Amonyum biflorit + %49 Al_2O_3 [79]
3) %5 NaF + %95 B_4C [79]
4) %20 Na_2CO_3 + %80 B_4C [79]
5) %80 B_4C + %20 Magnetit [79]
6) %98–99 B_4C + %1–2 Florür (NaF, KBF_4, NH_4F) [79]
7) %100 B_4C [79]
8) %84 B_4C + %16 $Na_2B_4O_7$ + %1.5 NaCl + %1.25 NH_4Cl [79]
9) %99 B_4C + %1 NH_4Cl [72]

10) %82 B_4C + %15.5 $Na_2B_4O_7$ + %1.2 NH_4Cl + %1.3 NaCl [72]
11) %66 Ferrobor + %32 Al_2O_3 + %2 BaF [72]
12) (B_4C + Na_3AlF_6 + Etil Silikat) karışımı [72]
13) (Ferrobor + Na_3AlF_6 + Cam suyu) karışımı [72]
14) (Amorf bor + bir aktive edici) karışımı [72]
15) (B_4C + bir aktive edici) karışımı [72]
16) %33 Amorf bor + %2 NH_4Cl + %65 Al_2O_3 [72,79]
17) B_4C + $Na_2B_4O_7$ [79,92]
18) Amorf bor + HCl (gaz) [79,92]
19) %5 B_4C + %5 KBF_4 + %90 SiC [75,78]

Tablo 3.2 de amorf bor, ferrobor ve bor karbürün bazı özellikleri verilmektedir [72,79].

Bugün toz ortam borlamasında B_4C geniş ölçüde kullanılmaktadır. Borlama sonucu elde edilen tabakanın kalınlığına göre B_4C çeşitli boyutlara sahip taneler halinde üretilmekte ve hatta Ekabor ticari ismiyle satılmaktadır [107,108,109]. Demir malzemelerin borlanması için kullanılan Ekabor (borlama tozu) bor verici olarak B_4C' den, aktivatör olarak KBF_4 (Potasyumborflorür) ve deoksitanlardan veya dolgudan oluşur [76,93-95].

Tablo 3.2: Katı ortam borlamada kullanılan maddelerin bazı özellikleri [72,79].

Malzeme	Kimyasal Formülü	Moleküler Ağırlığı (gr/mol)	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf Bor	B	10.82	95...97	2050
Ferrobor	---	---	17...19	---
Borkarbür	B_4C	55.29	77.28	2450

3.5.1.2. Macunlama ile Borlama

Borlama için kullanılacak tozlar macun haline getirilir ve borlanacak parçanın üzerine 2 mm kalınlıkta sürülür. Parça yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum 150°C'de kurutulması gerekir. Gerektiği takdirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konulur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı alınır ve soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur. Bu yöntemle borlama mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir, aksi taktirde kötü bir borür tabakası oluşur. Bu yöntem ile kısmi borlama yapılabilir [90,91].

Borkarbür (B_4C), kriyolit (Na_3AlF_6) ve bağlayıcı olarak da hidrolize edilmiş etilsilikat karışımından macun yaparak borlama yapılmıştır. Borlama sonucu elde ettikleri tabaka ise Şekil 3.3 te E ve F olarak verilen tiptedir. Kunst ve Schaaber ise ferrobor ve su camından yaptıkları macun ile borlama sonucu Şekil 3.3 teki K tipi bir tabaka elde etmişlerdir. Bu yöntemde borlama süresi diğerlerine göre oldukça kısadır [72,92].

Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar ise Tablo 3.3 te verilmiştir [91].

Tablo 3.3.: Koruyucu gaz atmosferinin özellikleri [91].

Koruyucu Gaz Adı	Bileşimi
Argon	%99.996 Ar
Kalıp gazı (Formier Gazı)	%5–30 H_2, geri kalanı N_2
NH_3 – Spalt gazı (Amonyak)	%75 H_2, %25 N_2
Saf Azot	%99 N_2, %1 H_2

3.5.2. Sıvı Ortamda Borlama

Borlama şartlarında ortam sıvıdır. Borlanacak malzeme 800–1000°C arasındaki sıcaklığa sahip sıvı bir borlu ortam içinde 2–6 saat bekletilerek bor yayınımı gerçekleştirilir. Banyonun esas bileşenleri ve özellikleri Tablo 3.4 te verilmiştir [79].

Sıvı ortamda borlama tuz eriyiği içinde elektrolitli veya elektrolitsiz (doldırma) ve derişik çözeltide olmak üzere yapılabilir [72–74,79].

Tablo 3.4: Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri [72,79]

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı (gr/mol)	Teorik Bor Miktarı (%)	Erime Sıcaklığı (°C)	Açıklama
Borax	$Na_2B_4O_7$ +10 H_2O	381.42	11.35	---	Su miktarından dolayı eritmek için
Susuz Borax	$Na_2B_4O_7$	201.26	21.50	741°C	20°C de 25.2 gr/lt H_2O çözünür.
Metabor Asidi	HBO_2	43.83	24.69	---	---
Sodyum Borflorit	$NaBF_4$	109.81	9.85	---	---
Borik Asit	B_2O_3	69.64	31.07	450°C	20°C de 25.2 gr/lt H_2O çözünür.
Borkarbür	B_4C	55.29	78.28	2450°C	---

3.5.2.1. Daldırma Yöntemi

Elektrolizsiz ergitilmiş tuz eriyiği veya normal sıvı ortam borlaması olarakta adlandırılır. Bu yöntem genelde B_4C' in katı fazı ile sıvı sodyum klorit (NaCl) den ibarettir. Buda boraksın viskozite azaltma yöntemleriyle elektrolit olarak erimesi esasına dayanır.

Ortamın esas bileşimi boraks olup, aktivatör olarak B_4C, SiC, Zr, B, v.s. kullanılır. Klorürlerin karışımı veya klorürler ile floritlerin karışımına borkarbür ilavesi ile, veyahut erimiş boraks banyolarına bor karbür ilave edilerek yapılır. Bu yöntem ucuz ve fazla ihtisas istemez. Fakat termal şok, borlamadan sonra parçanın temizlenmesi, büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanamaması metodun kötü yönlerindendir. Çalışma sıcaklığı 800–1000°C ve borlama süresinde 2–6 saattir [72–74,79].

Aşağıdaki banyolar, demir grubu malzemeler için en yaygın borlama ortamıdır.

1) %66 Boraks + %20 Ferrosilis + %14 Kalsineborikasit [79]
2) %72 Boraks + %14 Ferrosilis + %14 Kalsineborikasit [79]
3) %10 $Na_2B_4O_7$ + %40 B_4C [79]
4) %73–79 Boraks + %15–20 NaCl + %6–7 B [79]
5) %65 (%85 $Na_2B_4O_7$ + %55 NaCl) + %35 Kalsit [79]
6) %65 Boraks + %35 B_4C [72]
7) %80 NaCl + %20 $NaBF_4$ [72]
8) (B_4C + NaCl + $BaCl_2$ + $NaBF_4$) [72]
9) Boraks + Ferrosilis [79]
10) %70 $Na_2B_4O_7$ + %30 SiC [72,79]
11) %45 NaCl + %45 $BaCl_2$ + %10 B_4C [72,79]
12) %80 NaCl + 15 $NaBF_4$ + %5 B_4C [72,79]
13) NaCl + B_4C [72,79]

Morosova ve Florensa tarafından %0.1 C'lu çelik (%45 NaCl + %45 $BaCl_2$ + %10 Ba_4C)'lu eriyikte 3 saat süreyle 950°C'de yapılan borlama sonucu 300 μm kalınlığında borürlü tabaka elde edilmesine rağmen tabakanın görünüşü tesbit edilmemiştir. (%80 NaCl + %20 $NaBF_4$) tarzındaki eriyikte yapılan borlama sonucu borürlü tabaka elde edilmemiştir. Fakat banyoya B_4C ilave edildiğinde ise borürlü tabaka elde edilmiştir. Orniq ve Schaaber, yukarıdaki 12 nolu bileşiği kullanarak yaptıkları borlama sonucu borlu tabaka elde etmişlerdir. Bunlara göre $NaBF_4$ eriyik içinde sodyum florit (NaF) ve borflorit(BF_3) parçalanmakta ve gaz halindeki BF_3 eriyiğin kaynamasını dolayısı ile tabanda bulunan borkarbürün kimyasal tepkimeye girerek borun serbest kalmasını ve parçaya yayınmasını sağlamaktadır. Açığa çıkan gazlarda B_4C'ün etkisi ile dışarı atılır. Buna göre ne $NaBF_4$ nede BF_3 tek başlarına borlama maddesi olarak kullanılır. Bu nedenle de B_4C işlem için gereklidir [72].

3.5.2.2. Elektroliz Yöntemi

Yüksek sıcaklıkta tuz banyosu elektrolit, iş parçası katot ve grafit çubukta anot olarak işlem gerçekleştirilir. Tuz banyosu ise ergitilmiş borakstır [86,87,93]. Bu yöntem laboratuvar çalışmalarında gayet iyi sonuçlar vermiştir. Ancak ergimiş boraksın vizkozitesinin çok yüksek olması, endüstriyel uygulamalarda sıcaklığın homojenliğini engeller yani boraks eriyiğinin yüksek viskozitesi 850°C nin altındaki borlamayı pratik olarak imkansız kılar. 850°C nin üzerinde ise banyodaki düzgün sıcaklık dağılımı oldukça zorlaşır [72,73,79].

Farklı akım şiddetleri, özellikle karmaşık şekilli parçalarda borür tabakası kalınlığının düzgün olmasına sebep olur. Bu yöntemde iş parçası bir tuz tabakasıyla kaplanırki bunu temizlemek oldukça masraflıdır. Elektrolizle borlamada anotun bir tarafında ince borür tabakası oluşur. Buda gölge etkisi yaparak değişik ve düzensiz kalınlıklara sebep olur [72,73,92].

Sodyum klorür (NaCl) ve borasitanhitritinin karışımı ile yapılan çalışma sonucu banyodaki sıcaklık dağılımının eşit olduğu (homojen), parçaların daha kolay yıkandığı ve viskozitenin azaldığı tesbit edilmiştir. Ayrıca NaCl, B_4C ve $NaBF_4$ bileşiminden oluşan tuz eriyiğinde diğer problemler çıkmaktadır [72,73].

Bu yöntemin tesisatı pahalıdır ve karışık şekilli parçalarda homojen kalınlıklı tabaka oluşumu oldukça zordur. İşlem 800–1000°C sıcaklıklarında 0.5–5 saat süre ile yapılır. Banyo bileşimlerinde 0.2 A/cm^2 akım yoğunluğu, 600–700°C sıcaklık ve 2–6 süre şartlarını kullanarak sade karbonlu çelikte 15–70 µm kalınlıklı borlu tabaka elde edilmişdir.

Elektrolizin ana bileşimi boraks ve borik asittir. Ana bileşene ilaveten NaF, NaCl, $NaF+B_2O_3$, Na_2PO_4, $Na_2CO_3+B_2O_3$, Na_2SO_4 NaOH, B_4C, B_4C+NaCl, B_2O_3+MeF, B_2O_3+MeOH, $B_2O_3+Me_2CO_3$ (Me=Li,Na,K) gibi aktivatörler kullanılır. Bu aktivatörlerden ayrıca banyonun akışkanlığını arttırması istenir. Çeşitli araştırmacılar, aşağıdaki banyoları kullanarak elektrolizle borlama yapmıştır [79].

1) %30 Boraks + %40 B_2O_2 + %30 Na_2CO_3
2) %90 Na_2CO_2 + %10 $Na_2B_4O_2$
3) %30 Na_2SO_4+ %70 $Na_2B_4O_2$
4) %10 NaOH + %90 $Na_2B_4O_2$
5) %15 Na_2PO_4+ %85 $Na_2B_4O_2$

3.5.2.3. Derişik Çözeltide Borlama

Boraks ve borasiti anhidriti içeren derişik ortamlarda yüksek frekanslı ısıtmayla deneyler yapılmıştır. Belli bir bor diffüzyonu sağlandığı halde birleşik tabakalar elde edilememiştir. Boraks ve borasiti anhidriti içeren değişik miktarlı çözeltilerde yapılan deneyler kapalı borür tabakaları vermemişler ve 1000°C de 10 dakika süre ile 0,1 A/cm^2 ve 450 kHz frekans ile

doymuş boraks çözeltisinde tabakalar elde edilmiştir. Bu yöntem esnasında açığa çıkan bor halojenleri ilgili (uygun) asit oluşumları altında su ile kuvvetli reaksiyona girerler. Bu sebeple de borlama derişik çözeltide (sulu çözeltide HF–ısıtma ile) başarılı olmamıştır [72,73].

3.5.3. GAZ ORTAMDA BORLAMA

Gaz ortamın bileşimi, basıncı ve gazın tanktan akış hızı borlamaya etki eden faktörlerdir [79,92,96]. Gaz ortamda borlama yapmak için bor verici ortam olarak bor halojenleri, diboran (B_2H_6) ve organik bor bileşikleri kullanılır. Bu bor vericilerden BF_3, BCl_3, BBr_3 ya saf veya su ile; B_2H_6 su ile ve $(CH_3)_3$ $B/(C_2H_5)_3B$ olarak kullanılırlar. Bunlardan diboran (B_2H_6) ile beraber bor halojenleri kullanılırsa çok olumlu sonuçlar elde edilir. Fakat diboran zehirli ve patlayıcıdır. Ayrıca diboranın hidrojen ile inceltilmesi çok pahalı olup 150°C'ye yakın ayrışır. Bu neden ile de sıcak bir parça üzerine uygulamak için soğutmak gerekir. Bu da işlemi karışık hale getirir. Bütün bunlara rağmen bir çok araştırmacı diboran ve su karışımı ile gaz ortamda borlamayı yapmışlardır [72–74,79].

Organik bileşiklerden bortrimetil $(CH_3)_3B$ ve bortrietil $(C_2H_5B)_3B$ yüksek oranda karbon ihtiva ettiklerinden, borlama sonucu oluşan borür tabakası yanısıra yüksek karbonlu bir tabaka da oluşur. Çok daha fazla karbon içeren bortrietil ile oluşan yüksek karbonlu tabaka bor trimetil ile oluşandan daha fazla karbon içerir. Böylece borlama ile birlikte yayınan karbon oluşan tabaka kalıntısını bozar. Bor halojenleri ise uygun halojen bileşimlerinin teşekkülü ile korozyona neden olurlar. Bortribromit (BBr_3) ve bor triklorit BCl_3 ile yapılan çalışmalarda tamamen korozyon hasıl olmaktadır [72,73,79,92].

Amerikada geliştirilen bir yöntem ise bor ve borkarbürden ayrışan bir gaz fazıyla yapılan borlamadır. Bunun esasını ise, bortriklorit ile hidrojen karıştırılarak 1300–1500°C de sıcak grafit çubuk üzerine gönderilir ve borkarbür oluşumu sağlanır. Bu yöntem ilk etapta daha yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelere uygulanmaktadır. Bu yöntemle Fe–esaslı malzemeler yanısıra silika, mullite, Ti, Ni, Co ve W başarıyla borlanmıştır.

Eipeltauer, Pcelkina ve Lachtin'in yaptığı çalışmalardan hareket eden Skugorova ve arkadaşları gaz verici ortamda borlamayı, yaptıkları bir çok deneyler ile basitleştirmişlerdir. Bu şekilde yapılan borlamada hidrojen ve bortriklorit bir rotametrede dozajı ayarlandıktan sonra bir meme içinde karıştırılırlar ve borlama işlemi kuvarstan mamül bir reaktör içinde yapılır. Borlama BCl_3/H_2 gaz karışımı içinde 700–950°C sıcaklık ve 0–500 torr basınçta bir kaç saat tutulmak suretiyle yapılmaktadır. 920°C de 2 saat süreyle yapılan borlama sonucu 120–150 µm tabaka kalınlığı elde edilmiştir Araştırmacılar, bu yöntem sonucu elde edilen borür tabakaları ile sertliklerin, elektroliz yöntem ile elde edilenler arasında esaslı bir farkın olmadığını tesbit etmişlerdir [72].

Bor triklorit ile yapılan borlama esnasında ayrışarak serbest kalan Cl, ortamdaki mevcut H_2 ile birleşerek HCl oluşturur. Oluşan Cl ve HCl, atmosfer ve sıcaklık oranlarına göre borlanan demir ile reaksiyona girer. Bu durum ise gaz ile borlamadaki asıl problemi teşkil etmektedir.

Hegewoldt ve arkadaşları [96] tarafından BCl_3–H_2–N_2 karışımı ile gaz ortamda borlama yapılmıştır. Çıkış karışımı %73 N_2, %24 H_2 ve %3 BCl_3 olan ortam kullanılarak 827°C'de yapılan borlamada bir kısım BCl_3 termodinamiksel olarak parçalanmış bir kısmı ise parçalanmamıştır. Parçalanan kısmın miktarı, parçalanma sonucu oluşan HCl'nın yaklaşık üç katı kadardır. Sonuçta ise meydana gelen HCl metal ile reaksiyona girerek

$$Me + XHCl \leftrightarrow MeCl_x + x/2\ H_2 \qquad (4.1)$$

şeklinde metal klorit oluşturur. Borlama çelikte yapıldığında;

$$Fe + 2HCl \leftrightarrow FeCl_2 + H_2 \qquad (4.2)$$

şeklinde demir klorit oluşur. Bu ise demir borürün oluşumunu engeller ve böylece de korozyona neden olur.

Eğer işlem gazı %50 oranında N_2 ve geri kalanı H_2 den olursa az miktardaki bortriklorit aktif bor taşıyıcı olarak etkide bulunur. Bunun sonucu olarakta borür tabakasının yapısı pratik olarak atmosferde en az miktar da bulunan BCl_3'ten dolayı BCl_3'ün miktarından bağımsızdır. Bu yöntemde ise sürelerin kısa olması gerekmektedir. Eğer gaz ortamda borlama esnasında bor verici olarak H_2 ve N_2 den oluşan taşıyıcı gaz içindeki bor triklorit olursa ve BCl_3 ile H_2 oranları ayarlanırsa işlem hacmi HCl ve H_2 den oluşan gaz ile dolarsa parça yüzeyi korozyona uğramaz [96]. Gaz halindeki borlama ile çalışmak çok uygun bir yöntem olmasına rağmen tesisatın çok pahalı olması, gazların zehirliliği ve patlama tehlikesi yöntemin kötü yönleridir [74,79]. Tablo 3.5' te gaz haldeki borlayıcı bileşikler ve özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.5: Gaz halindeki bor verici bileşiklerin özellikleri [72,79].

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı [gr/mol]	Teorik Bor Miktarı (%)	Donma Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)	Açıklama
Bor triflorit	BF_3	67.82	15.95	−128.8	−101	Minimum seviyedeki nemliliğe karşı çok hassastır.
Bor triklorit	BCl_3	117.19	9.23	−107.3	13	
Bor tribromit	BBr_3	250.57	4.32	−46	90.1	
Bor Trimetil	$(CH_3)_3B$	55.92	19.35	−161.5	−20	
Bor trietil	$(C_3H_5)B$	98.01	11.04	−94	95	
Diboran	B_2H_6	27.69	39.08	−165.5	−92.5	Çok zehirli ve neme karşı hassas

Aşağıdaki gaz bileşenleri kullanılarak borlama çalışmaları yapılmıştır.

1) $BCl_3 / H_2 = 1/15$ [72,79,96]
2) B_2H_6 [72–74,79]

3) B_2H_6 / H_2 = 1/50 [72–74,79]
4) BCl_3 + H_2 [79,92,96]
5) $(C_2H_5)_3B$ [72,92]
6) $(CH_3)_3B$ [72]

3.5.4. Plazma (İyon) Borlama

Gaz ortamda 300–700 Pa basınçla borlama yapmak mümkündür. İşlem sıcaklığı diğer borlama yöntemlerine kıyasla düşmekte ve borlama süresi kısalmaktadır. Reaktif gazın daha iyi kullanımı ile işlem atmosferinde BCl_3–buharının miktarı azaltılır. Bu yöntemde işlenen parça yüzeyinin aktiflenmesi katodik püskürtmeden dolayı (özellikle işlemin başlangıç aşamasında, yani ısınma esnasında) akkor ışık ile başarılır.

Yüzey diffüzyonu ve kimyasal emilme gibi yüzey işlemlerinin büyük ölçüde yükseltilmiş yüzey enerjisinden dolayı yüzeyde ki kimyasal reaksiyonlar katalitik etki ile hızlanırlar. Bunun sonucu oluşan iyon ve elektronlar ise elektrik alanına etkide bulunurlar. Sistemi besleyen enerji, bu iyon ve elektronlar tarafından iletilir. Elektriksel alanın etkisi altında iyon ve elektronlar gaz moleküllerinin bu sıcaklığa ait ortalama enerjisinden daha yüksek bir enerji kazanırlar. Elektronlar ile moleküllerin çarpışmasında sonuç olarak moleküllerin bir kısım enerjisi iletilir.Bu durum, bu şartlar altında, sistem içindeki partiküller (iyonlar, atomlar, moleküller)'in uygun sayıları yüksek enerji ile mevcut olduklarından ve atmosferdeki bu sıcaklıkta dengeli enerji dağılımını anormal akkor ışık saçılımı olmadan karşılanabilindiği için başarılır.

Gaz ortamda termik aktiflenme sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aktiflenmiş malzeme yüzeyinin katalitik etkisi ile hızlanırlar. Bu yöntem genelde BCl_3–buharı ile hidrojenin oluşturduğu gaz karışımında yapılmaktadır. Bu ortamda BCl_3–buharı ve hidrojenden oluşan atmosfer içinde plazma (iyon) borlama esnasında kloritin hidrojen ile indirgenmesi borür tabakasının oluşumuna ait ayrıntılı rolü oynar. İlgili reaksiyon, indirgenme reaksiyonunun tahrik edildiği katodik bölge içindeki atomik hidrojenin varlığına bağlı olarak akkor ışık saçılımı ile oluşur. Reaksiyon sonucu açığa çıkan bor katodik püskürtme ile aktiflenen malzeme yüzeyine emdirilir. Reaksiyon gidişinin yükseltilmiş hızı gaz karışımındaki fazla hidrojene bağlıdır.

BCl_3–buharı ve hidrojen karışımının kullanılmasında hacmin %10'unu teşkil eden BCl_3–miktarı ile gaz fazındaki kimyasal reaksiyonlar ile kimyasal emilmiş bor miktarı ve hatta iş parçasının kenar tabakasına borun yayınması arasındaki dinamiksel denge elde edilir. Karışımda BCl_3–buhar kısmının artması gevrek ve gözenekli tabakaların oluşmasına neden olur. Karışımda BCl_3–buhar miktarı %20 çıkarılırsa o zaman

$$2/3\ BCl_2 + 5/3\ Fe \leftrightarrow 2/3\ FeB + FeCl_2 \qquad (4.3)$$

reaksiyonuna göre gevrek borür tabakası meydana gelir. Bu tabakada Fe ve Cl bulunur. Tabakadaki $FeCl_2$ ise mevcut işlem

şartlarında buharlaşır. Eğer BCl_3-buharı ile hidrojen karışımında BCl_3-buhar miktarı %10 u geçmez ise, tabakada klorun varlığı tesbit edilmez, yani oluşan borür tabakası klordan etkilenmez [97-99].

3.6. BORLANABİLEN MALZEMELER

Borlama işlemi gerek toz ve gerekse diğer metodlar ile bütün ferro alaşımlara uygulanabilmektedir. Refrakter metaller (W,Ta,Mo Zr,Hf,Nb), karbürler (özellikle Co ile bağlı WC) ve Ni esaslı alaşımlara başarı ile uygulanarak özel yapıda borlu tabakalar elde edilebilmektedir. Ti ve Ti esaslı alaşımlarda bor yayınımı ile aşınmaya dayanıklı TiB_2 tabakası elde edilebilmektedir [93].

Yeni geliştirilen metodlar ile Cu ve alaşımlarınada tatbik edilebilmektedir fakat düşük ergime sıcaklığına sahip Zn ve Al'a uygulanamamaktadır [93]. Borlama termokimyasal bir ısıl işlem olup çeliklere, dökme demirlere ve hatta demir olmayan metallerede uygulanabilir [96].

Demir esaslı tüm malzemeler, mesela yapı çelikleri, semente çelikleri, ıslah çelikleri ve takım çelikleri, aynı zamanda çelik döküm, armco demir, gri döküm, sfero döküm, sinter demir ve sinter çelik borlama için uygun malzemelerdir [86].

Demir esaslı malzemelerin yanısıra diğer elementler ve alaşımlarıda, mesela sert metal, Wolfram, Molybden, Titan v.s. de borlanabilmektedir [86].

Ayrıca karbonlu çelikler, hafif ve düşük alaşımlı çelikler, yüksek alaşımlı çelikler de borlanmaya elverişli malzemelerdir [72-74,79,82,89,100].

Sıcak ve soğuk şekillendirme de kullanılan makina ve takım parçalarının, dövme kalıpları parçalarının yapıldığı çelikler, dökümler ve demir dışı malzemeler ömür artırmak için borlanırlar. Ayrıca cam endüstrisi, otomobil, uçak, gemi ve silah sanayiinde kullanılan aynı cins malzemeler (çelik, döküm, demir dışı metaller ve sertmetaller) borlanmaktadır [88,101,102].

Sonuç itibari ile Fe esaslı malzemeler, demir dışı malzemeler ve sert metaller borlanabilirler [102].

3.7. BORÜRLÜ TABAKANIN ÖZELLİKLERİ

Borlu tabakanın özellikleri, borlanan malzemenin bileşimi başta olmak üzere, borlama ortamı, sıcaklık, zaman ve ilave ısıl işlemlere bağlıdır. Çeliklerde borlama ile başlıca iki tabaka (birleşik ve yayınma tabakaları) oluşmaktadır [79].

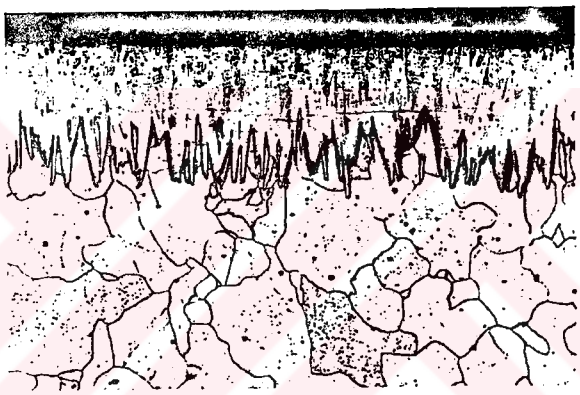
3.7.1 İç Yapı

Alaşımsız çeliklerde borlama şartlarına bağlı olarak dıştaki bileşik tabaka FeB ve/veya Fe_2B den oluşur. Alaşımlı çeliklerde ise bu iki fazın yanısıra alaşım elementlerinin borürlerini de ihtiva ederler [79].

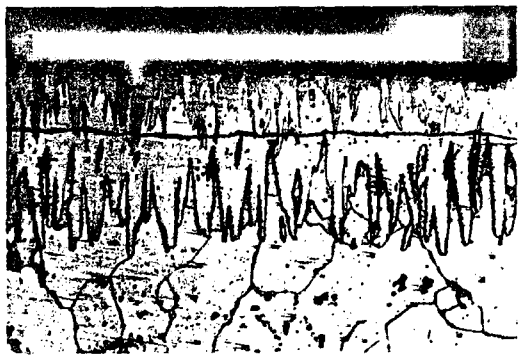
Borid tabakasının faz bileşimi, borlama ortamının kapasitesine ve borlanacak asıl malzemeye de bağlıdır. Borid tabakaları FeB, Fe_2B veya FeB + Fe_2B şeklindedir [75].

Sıvı borlama ortamında FeB ve Fe_2B' den oluşan iki fazlı borit tabakası elde edilir. Toz ortamda ise tek fazlı veya çift fazlı borür tabakası oluşabilir. Toz ortamda yüksek sıcaklıklarda veya uzun işlem sürelerinde FeB teşekkül eder. Gaz ortamda da FeB ve Fe_2B interfazlarını içeren tabaka elde edilir. Plazma (iyon) borlama da ise sadece Fe_2B fazından oluşan borür tabakası elde edilir [74,76,97].

İki fazlı borit tabakaları açık renkli Fe_2B ve koyu renkli FeB 'ten oluşur. FeB fazı bileşik tabakanın üst kısmını, Fe_2B ise alt kısmını teşkil eder (Şekil 3.5 ve 3.6).



Şekil 3.5: İnce çatlaklı armco demirdeki iki fazlı borür tabakası, elektro eroziv ayrılma [72]



Şekil 3.6: 900°C de 4 saat aktif borkarbürde borlanmış St 37 çeliğindeki iki fazlı borür tabakası [72]

İki fazlı borür tabakalarında eğer FeB kapalı tabakalarda yer alırsa, her iki intermetalik faz arasında önemli gerilmeler teşekkül eder. Bu gerilmeler mekanik zorlamalar esnasında çatlak oluşmasına neden olurlar. Bu iki fazda farklı iç gerilmeler oluşmaktadır. Deger, Riehle ve Schatt gibi araştırmacılara göre FeB fazında çekme, Fe_2B fazında ise basma

gerilmeleri mevcuttur. Borlama işleminden sonra parçaların soğutulması sırasında Fe_2B fazında basma, FeB' de ise çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilmeler, her iki faz arasında ve tabakaya dik olan çatlamalara neden olurlar (Şekil 3.5 ve 3.6). Bunun içinde tabakadaki FeB kısmının oldukça küçük tutulması gerekir. Bu da bor miktarına bağlıdır [72-77,85,93,96].

Yüksek sıcaklıklarda, toz ortamda uzun süre yapılan borlama ile sadece Fe_2B den oluşan tek fazlı tabakalar elde edilebilmektedir. Mesela St37 çeliği 1000°C'de 6 saat süreyle borlanmıştır. Bu çelikte yalnız yaklaşık 320 µm kalınlığında tek fazlı Fe_2B tabakası elde edilmiştir (Şekil 3.7) [74].



Şekil 3.7: 1000°C de 6 saat toz ortamda borlanmış
St 37 çeliğindeki tek fazlı borür tabakası [74].

Kısa işlem süresinde (2-3saat) ve düşük sıcaklıklarda (800°C) yapılan borlamada da FeB fazı oluşmaz, yani tek fazlı Fe_2B teşekkül eder. Uzun işlem sürelerinde veya yüksek sıcaklıklarda ise daima FeB fazı ihtiva eden borit tabakası elde edilir (Şekil 3.5-3.6).

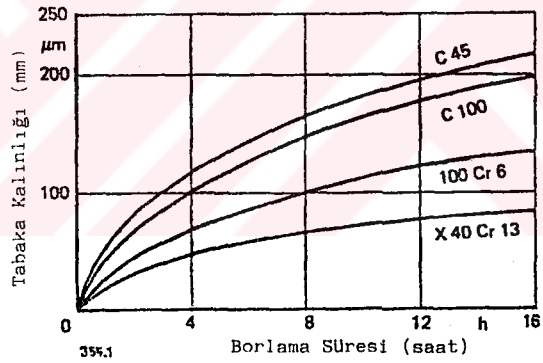
Çatlaklar FeB fazından Fe_2B ye geçiş yerinde elektroerosiv ayrılma esnasında gerilmenin serbest kalmasıyla oluşurlar ve FeB fazına ait en uzun dişlerin (çıkıntıların) bulunduğu bölgede ince yarıklar (çatlaklar) şeklinde ortaya çıkarlar (Şekil 3.6). Oluşan bu çatlaklar sonucuda tabaka pul pul dökülebilir.

Borürlü tabaka, diffüzyon tabakası içine doğru dişlenmiş, yani kök salmış şeklinde oluşur. Bu dişlerin (köklerin) az veya çok tırtıllı oluşu ile kabuğun FeB mi, Fe_2B mi veya FeB+Fe_2B mi olacağı çeliğin alaşım elementlerine, borlama sıcaklığına, borlama ortamının bileşimine ve borlama zamanına bağlıdır. Alaşım elementi oranı arttıkça tortulu kök sayısıda azalır [72,77,87].

3.7.2 Tabaka Kalınlığı ve Sertliği

Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Bu da işlem süresinin ve/veya sıcaklığın artması sayesinde olur. İşlem sıcaklığı 1149°C'nin altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar lokal erimeler yaparak malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur. Ayrıca toz ortamda yapılan borlamada ise toz maddenin özelliklerinden dolayı 1050°C'nin üzerine çıkılmaz. Zaman faktörününde ekonomik yönden mantıki bir değeri geçemeyeceği aşikardır. Kalınlığın artmasını sınırlayan diğer bir faktörde kırılganlıktır. Borlanmış tabakanın kırılganlığı kalınlık arttıkça artar. Dolayısıyla çelik esaslı malzemeler için 20-200 µm'lik kalınlık, kullanma şartlarına, su verilip verilmeme durumuna ve borlanan malzeme cinsine göre ayarlanır. Kırılganlık yönünden alaşımlı çeliklerde maksimum 100 µm alaşımsız çeliklerde 150-200 µm ve hatta darbesiz aşınmaya maruz kalacak parçalarda su vermeme şartı ile 400 µm'lik kalınlığa kadar çıkabilmektedir. Borlama sıcaklığı, tabaka kalınlığını ve gözenekliliği artırarak tabakanın gevrek olmasına neden olur [73,79].

Tabaka kalınlığı borlama süresine bağlıdır (Şekil 3.8). Tabaka kalınlığı olarak yüzey ile diş uçlarının ortalama değeri arasındaki uzaklık kabul edilir [72,76,80].



Şekil 3.8: Farklı malzemeler için 900°C borlama sıcaklığında tabaka kalınlığının borlama süresine bağlı olarak değişimi[76]

Aktivatörler tabakanın büyümesine ve düzenliliğine etkide bulunurlar. Borlama sıcaklığının yükselmesi ve/veya borlama kapasitesinin artması tabakanın büyümesine hızla etki eder [75,85, 94].

Borür tabakasının sertliği oldukça yüksektir. Bu nedenlede gevrek bir yapıya sahiptir. Borlu tabakanın kalınlığı kullanma amacına uygun olmalıdır. FeB fazı Fe_2B fazından biraz daha serttir. Borlu tabaka zorunlu olarak iki fazlıdır ve bu tabaka ince olursa çok elastiktir ve yeterli oranda da yapışma (tutma) mukavemetine haizdir [77,87,100]. Sertlik 1600-2400 HV arasındadır. Elde edilen bu yüksek sertlik değeri borlamadaki en büyük kazançtır [73].

Mesela alaşımsız Ck 15 çeliğinin 5 saat süreyle 900°C'de Ekabor 2 içinde borlanması sonucu 100 µm kalınlığında ve 2300 kg/mm^2 sertliğinde Fe_2B tabakası elde edilmiştir. Aynı ortamda ve aynı işlem şartlarında borlanan 100Cr6 çeliğinde ise

2500 kg/mm^2 sertliğe ulaşılmıştır [76]. Ayrıca aynı işlem şartlarında borlanan 42CrMo4 çeliğinde 2200-2500 kg/mm^2'lik sertliğe ulaşılmıştır [87].

Borlu tabakalar çok sert oldukları için de çok gevrektirler. Bu nedenle 100 gramın üzerindeki yüklerle sertlik ölçümü yapılırsa tabaka çatlar [72].

3.7.3 Borlu Tabakanın Oluşumuna Etki Eden Faktörler

Borlu tabakanın oluşumuna etki eden faktörler, bor verici ortam, işlem sıcaklığı ve zamanı ile alaşım elementleridir.

3.7.3.1. Bor Verici Ortamın Etkisi

Borlama yönteminin uygulanması için gerekli borlama ortamlarının hazırlanması gerekir. Borun çelik yüzeyine yayılması sonucu ana malzemeye gömülü diş (kök) şeklinde bağlanmış bir tabaka meydana gelir. Bu tabaka işlem şartlarına ve kullanılan borlama vasıtasının etkisine göre bir veya iki fazlı (FeB, Fe_2B veya FeB+Fe_2B) demir borürden oluşur. Bu oluşumu sağlayan etkenlerden biride bor verici ortamdır. Bu etkenin yanı sıra tabakanın oluşumuna etki eden diğer etkenler aracılığı ile kullanma amacına uygun olan kalınlıkta tabakalar elde edilir. Mesela erozyonlu zorlamada kalın tabaka, adhesiv aşınmada ise 15- 20 µm'lik tabaka yeterlidir. Kullanma amacına uygun kalınlıktaki tabakaları elde etmek için bor veric ortamdaki borun miktarının ayarlanması gerekmektedir [72,74,76,88,89,95,103].

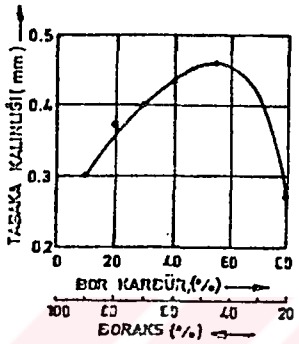
Gaz ortamda borlama sadece BF_3 ve BCl_3 içinde yapılırsa sonuç alınamaz. BCl_3 gaz ortamda ayrıştığında açığa çıkan klor demir ile $FeCl_2$ oluşturur. Buda demir borür oluşumunu engeller. Bu neden ile sisteme H_2 veya N_2 + H_2 aktivatör olarak verilirse H_2 kloru HCl şeklinde tutar ve borda demir ile borür oluşturur.

Plazma borlamada BCl_3-buharı ile hidrojen karışımında BCl_3-buhar miktarı hacmin %10' unu geçerse yine demir ile klor $FeCl_2$ oluşturur ve buharlaşır. Bunun sonucunda ise meydana gelen tabaka gevrek ve gözenekli olur. BCl_3-buhar miktarı %10'u geçmez ise daha iyi bir tabaka elde edilir.

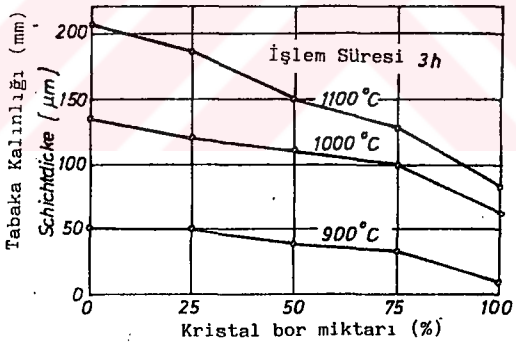
Sıvı ortamda, mesela %80 NaCl + %20 $NaBF_4$ karışımında borürlü tabaka elde edilmemiştir. Sistemdeki $NaBF_4$, NaF ve BF_3 şekline dönüşmüş ve BF_3 gaz halinde olduğu için borlanma oluşmamıştır. Sisteme bor verici olarak B_4C verildiğinde ise borlu tabaka elde edilmiştir [72,96,97]. Katı ortamda da durum aynıdır. Katı ortamda borlama tozu veya Ekabor ticari ismi ile bor verici ortamlar geliştirilmiştir. Bu ortamlarda belirli oranlarda bor verici madde, aktivatör (eritici) ve dolgu maddesi bulunmaktadır.

Aktivatörler, tabakanın büyümesine ve düzgünlüğüne etkide bulunurlar. Aktivatörler bor kaynağındaki borun ve dolgu maddesindeki karbonun aktif hale geçmesini sağlar. Aktif hale gelen bor bağlanma eğilimine sahip olması nedeniyle kısa

süre serbest kalır. Borlama ortamının direk olarak iş parçasının yüzeyi ile temas ettiği yerde borlama olur. Aktif karbon ihtiva eden dolgu maddesi aracılığı ile borlama sıcaklığına indirgenen atmosfer çıkar, yani ortamın oksijenini CO_2 veya CO şeklinde tutarak gaz halinde ortamdan ayrılır. Böylecede oksijenin tabakaya olan zararlı etkisini önler. Eğer ortamdan oksijen uzaklaşmaz ise işlem sıcaklığında oksijen bor ile B_2O_3 oluşturarak tabakanın borsuzlaşmasına neden olur. Ayrıca dolgu maddeleri borlama maddesinin yapışmasını geniş ölçüde engeller [76,87,93,94]. Şekil 3.9 ve 3.10 bor verici ortama bağlı olarak tabaka kalınlığının değişimi görülmektedir.



Şekil 3.9: Banyo bileşiminin tabaka kalınlığına etkisi (Ticari saflıktaki Fe 1000°C'de 6 saat süre ile borlanmış) [79]

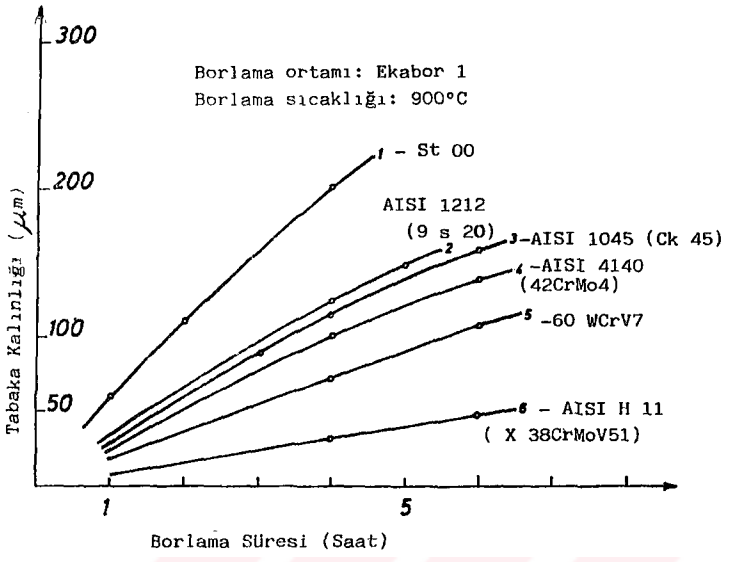


Şekil 3.10: Tabaka kalınlığının kristalik bor miktarına bağlı olarak değişimi [72]

$Na_2B_4O_7$, KBF_4 ve B_4C karışımı olan toz ortamda borlama sonucu heterojen ve gevrek bileşik tabaka (FeB+Fe_2B) ve SiC, KBF_4 ve B_4C karışımı olan toz ortamda borlama ile de sadece reaktif sert Fe_2B-bileşik tabaka elde edilmiştir. Boraks+Ferrosien sıvı ortamında Fe_2B, Boraks + Ferrosilis + Kolsinoborikasit sıvı ortamında bileşim oranına bağlı olarak Fe_2B veya FeB + Fe_2B birleşik tabakaları elde edilmiştir [72,79].

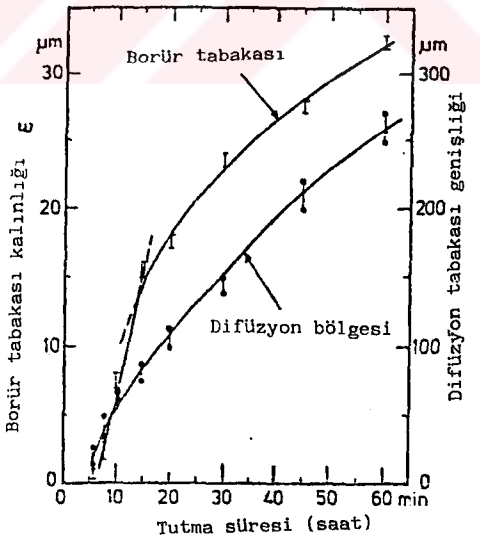
3.7.3.2. İşlem Şartlarının Etkisi

İşlem şartları, borlama sıcaklığı ve borlama zamanıdır. Borlama sıcaklığı tüm borlama yöntemlerinde 800–1050°C arasında bulunmaktadır. Buna karşılık zaman ise plazma ve gaz borlama da bir dakika ile bir saat diğerlerinde ise 2–24 saat arasında değişir [88,95–97].



Şekil 3.11: Çeşitli çelikler için borür tabakası kalınlığının borlama süresine bağlı olarak değişimi [75]

Borlama sonucu oluşan tabakanın kalınlığı borlama süresine bağlıdır. Şekil 3.8 ve 3.11'de sabit sıcaklıkta değişik malzemelerle değişik sıcaklıklarda yapılan borlama ile elde edilen tabaka kalınlığı görülmektedir [72,76,94].



Şekil 3.12: Fe_2B fazının kalınlık ve difüzyon bölgesinin derinlik artışının zamana bağlı olarak değişimi [75]

Diğer taraftan Fe_2B fazından oluşmuş tabaka kalınlığının ve yayınma bölgesi derinliğinin zamana bağlı olarak artışının belirlenmesi için Ming-Jiang Ly tarafından yapılan deneyler sonucu Şekil 3.12 elde edilmiştir. Yukarıdaki eğri borit tabakasının kalınlık artışını, aşağıdaki ise diffüzyon bölgesi genişliğini vermektedir [75]. Kısa işlem sürelerinde ve düşük sıcaklıklarda da tek fazlı Fe_2B fazı elde edilmektedir (Şekil 3.13). Fakat uzun işlem süresi düşük sıcaklık (800°C civarında)

veya yüksek sıcaklık kısa işlem sürelerinde ise daima ($FeB+Fe_2B$) fazları birlikte teşekkül eder (Şekil 3.5 ve 3.6). Tabaka kalınlığına etki eden sıcaklık arttıkça tabaka kalınlığıda artmaktadır (Şekil 3.14) [72,74,75].

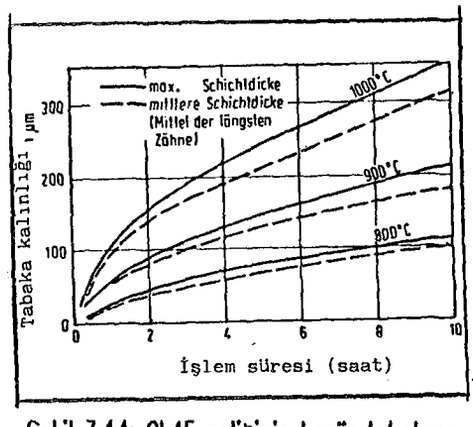
Katı ortamda Borlama süresi 15 dakika ile 30 saat arasında olmasına rağmen genelde 1-8 saat arasında yapılmaktadır (Şekil 3.11 ve 3.14). Genelde yüksek sıcaklıkta kısa süre borlama, düşük sıcaklıkta uzun süre borlamadan çok daha iyidir.

Hiçbir zaman borlama ortamı her seferinde tek fazlı bir borit tabakası vermez. Borlama sıcaklığı, borlama süresi, alaşım elementleri yanı sıra ısıtma hızı, özelliklede 700-800°C arasında, çok önemli bir rol oynar. Bor atomlarının düffüzyon hızı alaşımsız ve düşük alaşımlı malzemeler içinde ilk olarak takriben 800°C'den itibaren teknikte kullanılabilir borit tabakasının oluşumu için yeterli olan değere erişir. Fakat buna karşı termo kimyasal yolla bile takriben 700-800°C sıcaklık bölgesi hızlı ısıtma ile geçilmesi garantilenemez. Bu durum en dış sınır bölgesi içinde borun tabakasına ve bu şekilde ısıtma sırasında kalın tabakalarda çoğu zaman tertibi bozulan 2. faz (FeB) oluşumuna neden olur. Tecrübelere göre bunu artık devam eden borlama seyrinde gidermek mümkün değildir [89,95].



a) b)

Şekil 3.13: a) 900°C de Ekabor 1'de borlanan St 37 (10 saat)
b) Ck45 (4 saat) çeliklerinin borür tabakası [72]



—— = max. Tabaka kalınlığı

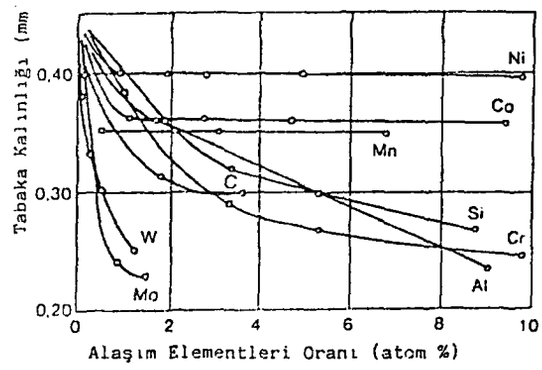
---.= Ortalama tabaka kalınlığı

(en uzun borür dişinin ortasından)

Şekil 3.14: Ck45 çeliğinin borür tabakası kalınlığının işlem süresine ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi[72]

3.7.3.3. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Tabaka kalınlığına işlem şartları ve bor verici ortamın yanısıra önemli ölçüde alaşım elementlerinin cinsi ve oranıda etki eder (Şekil 3.15) [72,82].



Şekil 3.15: Çeliklerde alaşım oranına bağlı olarak oluşan borür tabakası kalınlığı [82]

Bilindiği gibi borlama sonucu oluşan borür fazları (FeB ve Fe_2B) genelde diş şeklindedir (Şekil 3.16). Esas malzeme ile borürlerin dişlenme derecesi işlenen malzemenin alaşım miktarına bağlıdır. Kuvvetli dişlenmeler karbonlu ve düşük alaşımlı ıslah çeliklerinde ortaya çıkmaktadır. Dişlenme alaşım elementlerinin artan miktarı ile azalmaktadır [76,77].

Genel olarak alaşım elementleri çelikteki bor diffüzyonunu yavaşlatarak tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Yüksek alaşımlı çeliklerde oluşan ince tabakalar zorunlu olarak (FeB +Fe_2B) şeklinde iki fazlı olurlar. Tabakalar ince olduğu için elastik özellik gösterirler. Yüzeydeki FeB girintilerinin oluşumu işlem sıcaklığına ve malzemeye bağlıdır.Yüksek alaşımlı çeliklerde borun yayınma hızı düşük olduğu için kenar tabakada oluşan kalın FeB fazını ortaya çıkartan bir kabartı oluşur. Yüksek alaşımlı çeliklerdeki dişlenmenin az olmasından dolayı tabakanın tutma mukavemeti, düşük alaşımlı veya alaşımsız çeliklerinkinden daha azdır. Bu neden ile darbeli zorlamalarda bu tabakanın pul pul dökülmesi mümkündür [72,73,78,79,87,89,92,93,100].

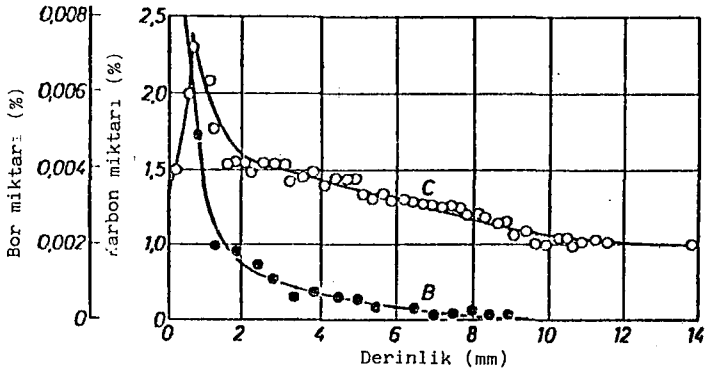


Şekil 3.16: Diş şeklinde demir borür kristalleri (Fe_2B) [95]

Alaşım elementlerinin diğer bir etkiside, borür tabakasının sertliğini artırması ve Fe–B denge diyagramındaki ötektik noktayı aşağıya kaydırmasıdır. Fe–B sisteminde %l C ötektik sıcaklığını 50°C kadar düşürmektedir [72,79].

Çelik içinde C ve Si miktarı arttıkça FeB stabilitesi azalmakta ve %1.2–1.25 C lu çelikte FeB tamamen yok olmaktadır. Borlu tabaka, büyüme sırasında karbonu çözündüremediği için bor vasıtası ile karbon içeriye itilir. İtilen karbon ise borür tabakası altındaki difüzyon tabakasında toplanır. Yüksek sıcaklıklarda karbon malzeme içine daha iyi nüfuz eder. Bu nedenle de diffüzyon tabakasının çekirdek malzemesine düzgün geçişi olur. Bunun için yüksek C içeren çelikler borlama süresinin bitiminden sonra,karbür ayrışmasını önlemek amacıyla çok yavaş soğutulmalıdır. Çünkü karbür kafesi borür tabakasını desteklemeye uygun değildir. Artan C miktarı borür tabakasının kalınlığını azaltmaktadır. Fakat M. Deger, M. Riehle, W. Schott'ın araştırmalarına göre, tabaka kalınlığı 120 µm den az olursa karbonun tabaka kalınlığına etkisi yoktur. Bor tarafından içeriye doğru itilen karbonun diffüzyon tabakasında toplandığında karbon miktarı artar ve troostik benzeri bir yapı teşekkül eder. Meselo Şekil 3.17 de görüldüğü gibi 1000°C de 25 saat süre ile borlanmış Ck 100 çeliğinin diffüzyon bölgesindeki karbon miktarı %1 den %2.3 e çıkmıştır [72,75,83,87, 101,104].

Silisyum da C gibi borlu tabakaya alınmaz ve bor tarafından içeri doğru itilir. Bu neden ile yaklaşık %1 Si içeren çeliklerde borür tabakası ile çekirdek arasında 300 HV sertliğe sahip yumuşak ferritik tabaka teşekkül eder. Bu nedenle yüksek miktarda Si ihtiva eden çelikler borlama için uygun değildir. Bütün bunlara rağmen Si tabakanın asitlere karşı korozyon direncini artırır. Bu yumuşak Ferritik tabaka genelde vurma veya basınca zorlanan parçalarda borlu tabakanın ezilip çökmesine neden olur [72,76,79, 81,87,93].

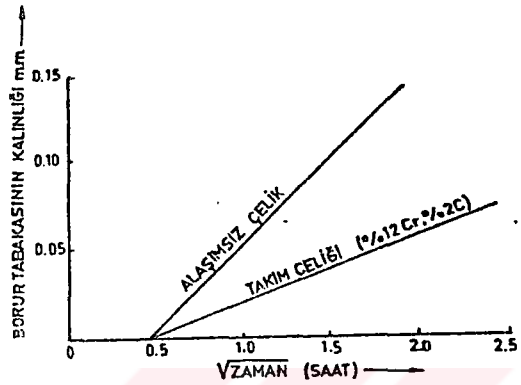


Borlama şartları:
Amorf bor içinde
1000°C'de 25saat

Şekil 3.17: Ck 100 çeliğinde bileşik tabakanın altındaki difüzyon bölgesi yayınma derinliğinin C (üst eğri) ve B (alt eğri) miktarına bağlı olarak değişimi [83]

Bor tarafından içeri itilen C ostenitik fazda çözündürülmediği zaman borür tabakasının büyümesini engeller ve sementit teşekkül eder. Nicholson'a göre oluşan bu sementitte %80 oranında C, borla yer değiştirerek bor sementit $Fe_3B_{0,8}C_{0,2}$ meydana getirir. Periyodik tablonun aynı bölgesinde yer alan P, N, Ti, V, Nb, Ta da karbon ve silisyum gibi etkimektedir. V nin %0.15 i geçmemesi istenir.

Cr, Mo, W, Mn, Ni in FeB ve Fe_2B ye etkisi aynıdır. Bu alaşım elementlerinden W, Cr, Mo in miktarı çelik içinde arttıkça borlanmış parçanın yüzey pürüzlüğü azalır. Eşit şartlarda borlanmış alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde elde edilen tabaka kalınlığının değişimi Şekil 3.18 de görülmektedir.



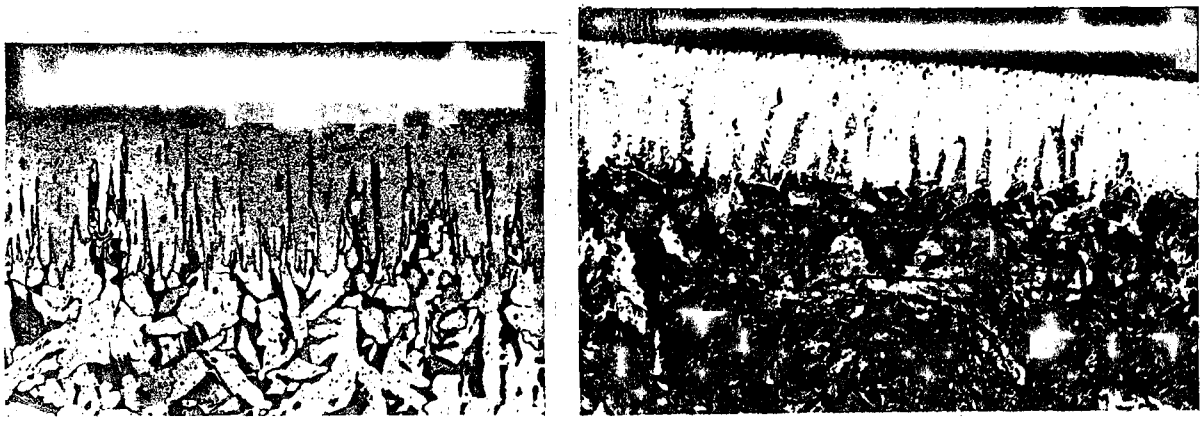
Şekil 3.18: Alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde eşit şartlarda yapılan borlamayla elde edilen borür tabakası kalınlıkları [79]

Alaşımlı çeliklerin borlanması sırasında Cr, Ni ve Mn alaşım elementlerinin Fe_2B de konsantre olduğu saptanmıştır. Alaşım elementleri, tabaka kalınlığını azaltırken tabaka geometrisinide değişikliğe uğratırlar. Bor ostenit fazı içinde hızla yayınır. Bu neden ile FeB-Fe_2B ve Fe_2B-ana malzeme arasındaki sınırı girintili çıkıntılı, yani dişlidir. Bu tür yayınma, borür tabakasının ana metale bağlanmasını kuvvetlendirir ve böylecede sınırdaki kalıntı gerilmelerin daha geniş bir alana yayınmasını sağlar. Çelikteki alaşım elementleri özellikle de C, Ni ve Cr borun difüzyonunun tercihli yönlenmesini etkileyerek tabaka-anametal ara yüzeyini çizgisel hale sokar [72,79].

Alaşım elementlerinden W, Mo ve V un artan miktarları ile tabakanın büyümesi azalır ve dişlenme kısmındaki diş boyları küçülür.

Krom da tabaka kalınlığının ve dişlenmenin azalmasına neden olur. %6 dan fazla Cr içeren çeliklerde borür tabakası ana malzeme üzerine hemen hemen pürüzsüz dayanmakta ve borür tabakasının tutunma mukavemetine zararlı etkide bulunmaktadır. Cr un etkisiyle incelen tabaka yine FeB ve Fe_2B fazlarından oluşur kromda bu faz içerisinde yer alarak (FeCr)B ve $(FeCr)_2B$ şeklinde borür oluşur. Bu durumda ise tabakanın aşınma ve korozyon dayanımlarını artırır.

Mn ve Ni'in tabaka oluşumuna etkileri çok azdır. Fakat artan miktarları ile dişlenme derecesinin azalacağı dikkate alınmalıdır [72,74,76,87]. Şekil 3.19 da alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde borür tabakası geometrileri görülmektedir.

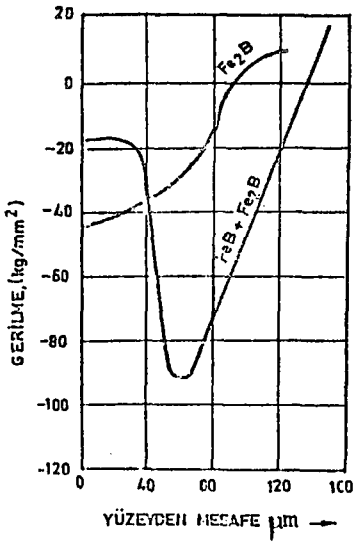


a) C 15 (4 saat) b) 42 CrMo 4 (6 saat)

Şekil 3.19: 900°C de Ekabor 1 de borlanmış iki farklı çeliğe ait borlu tabakalar [72]

3.7.4. Borür Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler

Borürlü tabakanın mekanik özellikleri kalıntı gerilme ile ilgilidir. Isıl işleme, malzeme cinsine ve borlama şartlarına bağlı olarak, borür tabakası ve tabaka–anametal ara yüzeyinde iç gerilmeler oluşur. Tabakanın faz yapısı (tek fazlı Fe_2B ve çift fazlı FeB+Fe_2B) ve geometrisi (girintili çıkıntılı veya düz oluşu) iç gerilmelerin tabaka da yapacağı hasara etki eder. İdeal tabaka için tek faz (Fe_2B) ve içgerilmenin daha geniş bir alana yayılması için tabaka geometrisinin dişli (girintili çıkıntılı) olması arzu edilir. Tabakanın çift fazlı (FeB +Fe_2B) olması halinde Fe_2B basma ve FeB çekme gerilmesi olmak üzere farklı yönlenmiş iç gerilmeler oluşur. Bu tür gerilmeler tabakanın çatlamasına ve FeB tabakasının dökülerek malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur. İç gerilmelerin nedeni FeB ve Fe_2B ana malzemenin termal uzama katsayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Tablo 3.6). Şekil 3.20, tek ve çift fazlı borür tabakasındaki kalıntı gerilme dağılımlarını vermektedir [72–74,79,87].



Şekil 3.20: Tek ve çift fazlı borür tabakasındaki gerilme dağılımı [79]

Tablo 3.6: Borürlü tabakadaki fazlar ile çelikle saf demirin değişik araştırmacılar tarafından verilen temel uzama katsayıları [79]

FAZ	TERMAL UZAMA KATSAYILARI		
Fe_2B	$7.85 \cdot 10^{-6}$/°C	$8.7 \cdot 10^{-7}$/°C	$8 \cdot 10^{-6}$/°C
FeB	$23 \cdot 10^{-6}$/°C	$1.53 \cdot 10^{-6}$/°C	$10-15 \cdot 10^{-6}$/°C
Saf Fe	$15.6 \cdot 10^{-6}$/°C	---	---
Çelik	---	$12 \cdot 10^{-6}$/°C	---

3.8. BORLANMADAN SONRA YAPILAN ISIL İŞLEMLER

Borlamayı müteakiben uygulanan ısıl işlem borür tabakasının iç gerilme durumuna etki etmektedir. Soğuma hızı arttıkça iç gerilmeler azalmakta ve en yüksek iç gerilme borlamadan sonra fırında soğutma ile meydana gelmektedir. Borlamadan sonraki soğuma hızının sonucu ana yapının martenzite dönüşmesiyle oluşan hacimsel değişiklikler, tabakadaki iç gerilmeleri dengeleyerek bu gerilme değerlerinin düşmesine neden olduğu sanılmaktadır [79].

Borlanan parçalar, parçanın yapıldığı malzemeye ve borlu tabakanın kalınlığına bağlı olarak sonradan sertleştirilebilir. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra parçalar konuldukları kutular ile fırından alınarak genellikle havada yavaş soğutulurlar. Fazla çekme tehlikesi olan parçalar da fırında soğutulur. Yüksek alaşımlı çeliklerse işlemden sonra borlama sıcaklığından direk yağda, sıcak banyoda veya basınçlı havada soğutulabilirler. Yüksek alaşımlı çeliklerse basınçlı havada soğutularak yüksek çekirdek dayanımı elde edilir. Mukavemet nedeni ile ilave bir ıslah işlemi gerekli ise bu işlem, bor tabakası için güçlük çıkarmaksızın ve yırtılma tehlikesi yaratmaksızın oksijen bulunmayan (oksijensiz) bir ortamda ısıtma yapılarak uygulanmalıdır.

Sertleştirme veya ıslah etme muhakkak parçaların soğumasından sonra yapılmalıdır. Çeliklerin ostenit sıcaklığına yeniden ısıtılmasında ve su verilmesinde de aşırı sıcaklık değişiminden sakınmalıdır. Aksi takdirde borlu tabaka yırtılabilir. Isıtma mümkün mertebe nötr tuz banyosu içinde veya endüktif olarak yapılmalıdır. Soğutma ise sıcak banyoda, yağda, havada veya basınçlı havada yapılmalıdır. Ostenitleşme için GS 540/C3 veya benzeri siyanür tuzu ihtiva eden banyo kullanılmamalıdır. Çünkü siyanür borür tabakasına zarar verir [78,87,94,95].

Borür tabakasının (Fe_2B) genleşme katsayısı çelik grubu malzemelerin ortalama genleşme katsayılarına yakın olduğundan, bu tür malzemelere borür tabakasına hasar vermeden alışılagelmiş ısıl işlem uygulanabilmektedir. Ostenitleme, 1150°C nin üstüne çıkmama şartı ile nötr atmosferde yapılmalıdır. Ostenitleme sıcaklığı 1100°C yi aşan çeliklerde, işlem sıcaklığı 1050°C yi geçmemelidir, çünkü Fe_2B fazı 1150°C de (alaşımlı çelikler de daha az) bir ötektik oluşturmakta ve bu sıcaklık civarında, yüzeyde erimeler oluşmakta ve tabakanın bozulmasına sebebiyet vermektedir [73,74,79].

Yüksek basınçlara maruz kalacak borlu parçalar ısıl işleme tabi tutulmadan kullanılmamaktadır. Borlu tabakanın alt yapısı yumuşaksa, lokal basınçlar yüzünden tabaka çökmesi ve dökülmesi olabilir.

Tek fazlı bor tabakasına sahip malzemelerde borlama ortamından oda sıcaklığına hızla soğutma (suda) borür tabakasında dikine çatlaklara neden olmaktadır [79].

3.9. BORLANMIŞ ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Borlanan malzemelerin bazı özellikleri değişmektedir. Bu özelliklerin değişmesindeki sebep genelde yüzeyde oluşan tabakanın özelliklerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Borlama sonucu parçanın kazandığı özellikler aşağıda açıklanmıştır.

Borlama Fe grubu malzemelerin kopma ve akma mukavemetlerini %10–20, yorulma dayanımını %25 ve korozyonlu yorulma ömrünü %200 artırmasına karşılık plastisite özelliklerini azaltır. Borlu tabaka özelliklerine ait çalışmalar daha ziyade sertlik, aşınma, korozyon ve yorulma özelliklerine yöneliktir [79,85].

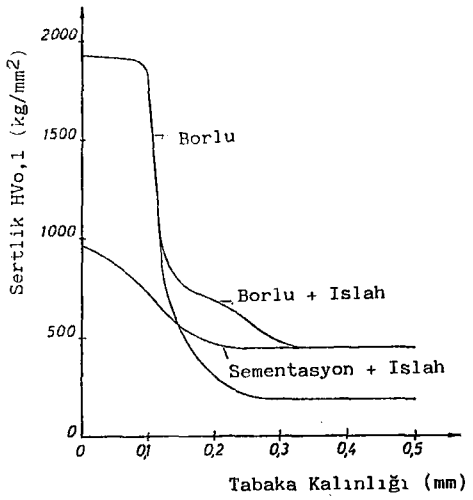
3.9.1. Sertlik

Borlamadaki en büyük kazanç sertliktir. Sertlik ölçme mikro sertlik şeklinde ve tabaka kalınlığına bağlı olarak 20–200 gr'lık yüklerle yapılır. Fakat mikro sertliğin ölçümü için maksimum 100 gr tavsiye edilir. Borlu tabakanın çok ince ve oldukça da gevrek olması daha fazla yüklerde çatlamasına, kırılmasına neden olur. Bu mikro sertlik Viskers ve Knoop yöntemlerine göre ölçülür. Sertlik, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak FeB veya Fe_2B fazlarına bağlıdır. FeB fazı Fe_2B'den daha sert ve daha gevrektir. Brinell ve Rockwell yöntemleri borlu tabaka için uygun değildir. Çünkü borlu tabakaya ait sertliğin ölçümü esnasında tabakanın tahribatına ve ana malzemeninde şekil değiştirmesine sebep olurlar. Borlama ile elde edilen sertlik çeliklerde 2000 HV, titanyumda ise 3000 HV dir. Şekil 3.21'de borlu tabaka ve sementasyonlu tabakadaki sertlik dağılımları kıyaslanmıştır [72–74,77,79,80, 87,95].

Borlu tabakanın sertlik yönünden bir özelliğide müteakip ısılişlemlerle bu sertliğini muhafaza etmesidir. Borlu tabakanın ısı sertliği (ısıya dayanıklılığı) fevkalade iyidir ve diğer sertleştirme metodları ile elde edilen kenar tabakalarınkinden daha yüksektir [79,86].

3.9.2. Aşınma Direnci

Termo kimyasal yüzey işlemleri çeliklerin sürtünme ve aşınma karakteristiklerinin iyileştirilmesi gayesi ile yaygın olarak kullanılır. Bu işlemler neticesinde yüzeyin özellikleri yararlı bir şekilde değiştirilir. Bu termokimyasal yüzey işlemlerinden biri de borlamadır. Borlama sonucu en sert ve aşınmaya karşı dayanıklı yüzey tabakaları elde edilir [82].



Şekil 3.21: Borlanmış parçaların sertliği ile semente edilmiş (aynı zamanda ıslah edilmiş) parçalarınkiyle mukayesesi [72]

Her ne kadar sertlik ve aşınma dayanımı arasında doğrudan doğruya bir bağıntı yoksada, borlama sonucu yüzeyin sertliği önemli oranda artmaktadır. Buda yüzeyin aşınma dayanımını arttırmaktadır. İki yüzeyin birbirine sürtünmesi durumunda sertlik ve akma dayanımı arttıkça temas yüzeyi azalır [77,78,82,87].

Yüzeyin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlığı, element çifti arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltır ve dolayısıyla aşınma dayanımını artırır. Borlu tabaka soğuk kaynakbağı oluşturmaya meyilli değildir, ayrıca aşınmayı önlemek için yağlanmasına da gerek yoktur. Uygulamada çok defa yüksek bir sertlik yüksek aşınma direnci verir şeklinde değerlendirilmektedir. Fakat bu sertliğin yanısıra yüzey durumu, soğuk kaynak eğilimi ve zorlamanın cinsi gibi bir dizi faktör de aşınma özelliklerine etkide bulunurlar. Borlu tabakalar yüksek sertlik ve hafif kaynak eğilimi ile kendilerini gösterirler [72,76,78,85,101].

Ayrıca sürtünme esnasında ısı açığa çıkacağından yüzeyin yumuşamasına ve termal kararlığına etki eder. Borlanan yüzeyde ise demir borür fazları sertliklerini 1000°C ye kadar koruduklarından termal kararlılıkları, yani tabakanın ötektik noktası 1149°C de bulunduğundan termik yüklenebilirlikleri oldukça iyidir [82,86].

Borlu tabaka ısıya çok dayanıklıdır. İlk oksitlenme olayları, ısıl işlemin uzun sürmesi halinde 650°C nin üzerinde ortaya çıkar. Borlu tabaka bu sıcaklıklarda oldukça mükemmel bir aşınma direnci gösterirler.

Bor'un oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşur. Buda metal–metal temasını geciktirir ve yağlayıcı görevi yaparak sürtünme katsayını düşürür [72,79,82,105].

Borlanmış numuneler vakumda aşınmaya tabi tutulurlarsa, atmosferik şartlar altında yapılan aşınmaya göre oldukça düşük aşınma direnci gösterirler. Burodan hareket ile Habig şu sonuca varmıştır. Eğer ortamdaki oksijen borür tabakası üzerinde oksit tabakası oluşturursa, o zaman borlu tabaka adhesiv aşınma esnasında iyi bir aşınma direnci gösterir [78].

Tabaka kalınlığı veya tabaka kalınlığının kalan kesite oranı, sertlik farkı ve tabaka ile ana malzeme arasındaki kenetlenme aşınma özellikleri olarak kabul edilmektedir. Eskiden abrasiv aşınmanın azaltılması için daha kalın tabakalar tercih edilirdi. Bugün ise borlanarak elde edilen ince borlu tabakalar yeterli olmaktadır. Deneyler, borür tabakası kalınlığının kullanma amacına uygun olması gerektiğini göstermektedir. Meselo makina parçalarının maruz kaldığı metalik sürtünmede en çok 50–150 μm lik tabakalar yeterlidir. Soğuk şekillendirme kalıplarında 20–40 μm lik tabaka kalınlığı yeterli görülmektedir. Halbuki mineral aşınmasında 300 μm ve daha fazla tabaka kalınlıkları gereklidir [76,100,101,106].

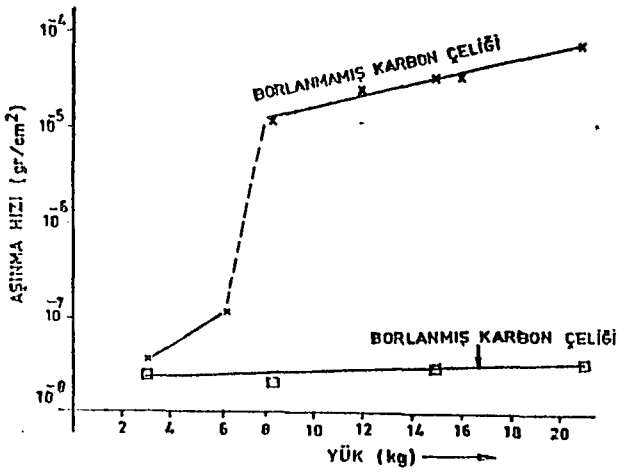
Kayma hızının yükselmesi ile termal gerilmeler ve bunun sonucunda demir borür tabakasında kayma yönüne dik çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar ilerleyerek aşınma oranını artırır.

Şekil 3.22 de borlanmamış ve borlanmış karbonlu çeliğin aşınma durumu görülmektedir. Borsuz malzemede 7 kg yüke kadar oksidasyon, 7 kg dan sonrada adheziv aşınması hakim olduğundan eğride kırıklık görülmektedir. Borlu malzemede ise aşınma son derece az olmakta ve eğride bir kırıklık görülmemektedir [79,82].

3.9.3. Yapışma Mukavemeti ve Gevreklik

Tabakanın zorlanma esnasında soyulmaması veya pul pul olmaması şartıyla ana malzeme ile borür tabakasının iyi dişlenmesi gerekir [79].

Aşınmaya maruz yüzey tabakasındaki en önemli özellik yeterli tutunma (yapışma) ve gevrekliktir. Bor demire yayındığı zaman kullanılan borlama ortamının etkisine ve işlem şartlarına bağlı olarak tek (Fe_2B) veya çift ($FeB+Fe_2B$) intermetalik bileşik tabaka oluşur. Bu bileşik tabaka ana malzemeye dişli şeklinde bağlanmış bir tabakadır. Ana malzemeyle yüzey tabakasının bileşimi bileşik malzeme olduğundan tabaka malzemesinin gevrekliğinin önemi yoktur. Çünkü gevreklik tabaka kalınlığına, geri kalan artık kesite ve onun özelliklerine bağlıdır [72,75,78,87].



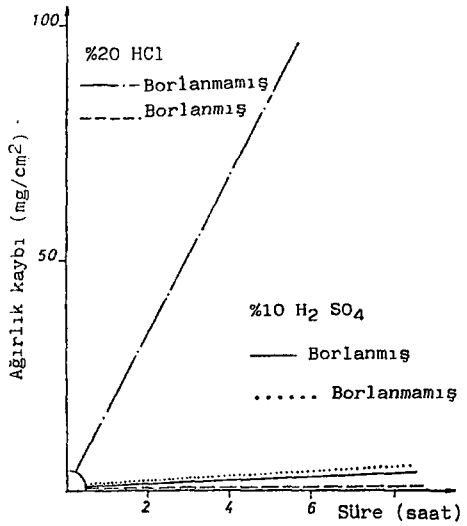
Şekil 3.22: Yüzeyi borlu ve borsuz AISI 1116 çeliğinin yüke karşı aşınma davranışı [79]

Tek fazlı borür tabakasına sahip numunelerin eğme deneyleri esnasında oluşan şekil değişimi çatlak oluşmadan yaklaşık 60-80 μm tabaka kalınlığında %8, 150-200 μm tabaka kalınlığında takriben %4 kadardır. İki fazlı tabakalarda ise çatlak oluşmaktadır, çünkü bazı araştırmacılara göre FeB tabakası çekme, Fe_2B tabakası ise basınç gerilmeleri etkisindedir [72,76,104].

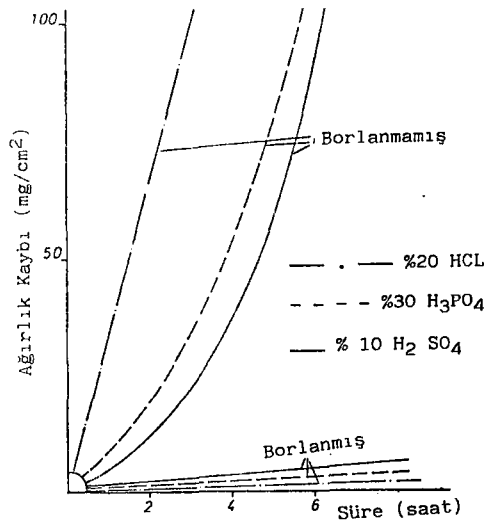
3.9.4. Korozyon Direnci

Demir grubu malzemelerin borlanması atmosferik korozyona karşı az fakat bazı asit ve sıvı metallere karşı büyük dayanıklılık kazandırır. Özellikle HCl asiti Al, Pb ve Zn metallerinin sıvı banyolarında borlu malzemenin korozyon direnci çok yüksektir. Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerin korozyon direnci borlama ile iyileşmektedir. Borür tabakası altında yer alan ana malzemeye oranla borür tabakası çevre ortamının oluşturduğu korozif şartlara oldukça fazla dayanıklıdır. Borlanmış parça %18 lik HCl (Tuz asiti) içine daldırılırsa borlu tabakada herhangi bir hasar oluşmazken ana malzeme asitin etkisi ile çözünür ve demir borür dişleri (çıkıntıları) sertbest hale gelir. Ayrıca korozyon özellikleri sülfürik asit (H_2SO_4) gibi oksitlenmeyen asitlere karşı da iyidir. Buna karşılık HNO_3 (Nitrik asit) gibi oksitlendirici asitler de tekrar kötüleşir. H_3PO_4 (Fosforik asit) e karşıda borlu tabakanın korozyon direnci iyidir [72,73,76,78,79,80,87,95]. C45 çeliğinden yapılmış numuneler aynı asitik ortamda tropik şartlar (%100 nem ve 40°C) altında korozyona tabi tutulmuşlardır. Korozyon, borlu numunelerde yüzeysel olarak önemsiz kabarcıklar şeklinde kendini göstermiştir. Borlanmamış numunelerde ise az veya çok noktasal korozyon oluşmuştur. Sabit korozif şartlar altında ağırlık kaybı borlanmış ve borlanmamış numunelerde pratik olarak eşittir. Korozif şartlar değiştirildiği zaman, borlanmış numunelerin ağırlık kayıpları, borlanmamış olanlara oranla daha iyidir (Şekil 3.23) [78].

Ck 45 (AISI 1045) çeliği 56°C de farklı asidik ortamda, borlanmış ve borlanmamış olarak korozyon deneyine tabi tutulmuş ve bu asidik ortamların çeliğe etkisinin sonuçları Şekil 3.24 de verilmiştir [72,74,79,95].



Şekil 3.23: X 10 CrNiTi 18 9 çeliğinin %20 lik HCl ve %10 luk H_2SO_4 asitlerine karşı korozyon direncinin değişimi [72]

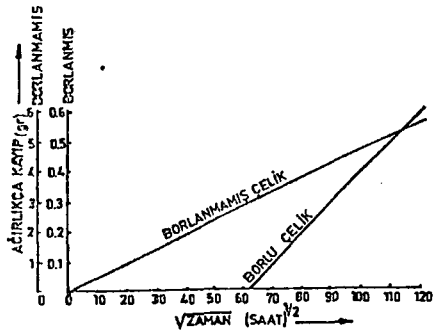


Şekil 3.24: Borlanmış Ck 45 çeliğinin farklı asitik ortamlardaki korozif aşınması (56°C Asit sıcaklığı) [72]

İlginç olanı ise yüksek alaşımlı çeliklerin korozyon dirençidir. Şekil 3.23 de görüldüğü gibi X 10CrNiTi 18 9 yüksek alaşımlı çeliğin korozyon direnci tuz asiti (HCl) içinde kötüleşmektedir. Sülfürik asite (H_2SO_4) karşı ise aynı çelik daha iyi korozyon direnci göstermektedir. Aynı çelik fosforik asittede (H_3PO_4) benzer sonuçlara sahiptir.

Yüksek kromlu çeliklerde borlamayla koruyucu kromoksit yerine daha az koruyucu olan krom borür oluşmaktadır. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir.

Borlu malzemeler bazı sıvı metal korozyonuna karşı da başarı ile kullanılmaktadır. Şekil 3.25 da sade karbonlu bir çeliğin borlanmış ve borlanmamış hali ile sıvı Zn banyosundaki korozyon kıyaslanması görülmektedir [72,74,79].



Şekil 3.25: Borlanmış ve borlanmamış sade karbonlu çeliğin sıvı çinko banyosundaki korozyonu [79]

3.9.5. Yüzey Durumu

Yüzey parlatma veya çok hassas tornalama yolu ile mümkün mertebe metalik parlaklıkta düzgünce işlenmeli ve kaplama olmamalıdır. İşlenmemiş veya kaba işlenmiş yüzeylerde borür tabakasının düşey dişlenme(çentik) şekli düzgün olmayabilir.

İş parçalarının ısıl işlemden sonra tekrar bir işleme tabi tutulması için parça yüzeyleri mümkün mertebe düzgün (pürüzsüz) işlenmelidir. Yüzeyler borlanmadan önce 3 µm' den daha az pürüz derinliğine sahip iseler, borlama esnasında yüzey kabalığı değiştirilir. Fakat kabasını olma 3 µm' ye kadar mümkündür, yani pürüzsüz veya parlatılmış bir yüzeyde pürüz derinliği 3 µm ye kadardır. Daha büyük pürüz derinliğine sahip parçaların işlenmesi esnasında yontma işlemine gerek yoktur. Fakat düzeltmede yapılamaz. Bundan dolayı birçok durumlarda iş parçaları sonradan işlenmeksizin, yani tamamlayıcı bir işlem gerektirmeden kullanılırlar. Yüksek sertlik sebebi ile borlanmış parçaların sonradan işlenmesi zordur [76,87,94].

Malzeme yüzeylerinin işlenmesi malzemenin kendine bağlıdır. Alaşımsız ve hafif alaşımlı çeliklerin yüzeyleri işlendiklerinde 3 µm' lik pürüz derinliği elde edilir. Fakat dökme demir malzemeler ile yüksek alaşımlı çeliklerde pürüz derinliği daha fazladır.

Edinilen tecrübeler, yüzeyin parlatılması için sertten daha serte kadar sıralanmış saf koruntdan imal edilmiş parlatma cisminin en iyisi olduğu anlaşılmıştır. Taşlama malzemesinin tane boyutları 100–120 µm olmalıdır. Eğer talaş kaldırma işlemi gerekliyse elmas takımları ve yine benzer sertlik derecesine ve tane boyutuna sahip korund veya silisyum karbürden yapılmış taş cinsi kullanılmalıdır [76,87].

Rt–pürüz değerleri parlatılmış yüzey üzerinde 0.05 µm' lik asıl pürüz derinliğine sahip iken borür tabakasının kısmi büyümesi sonucu yaklaşık 2–4 µm' ye çıkarlar. Belirtilen bu pürüz derinlik değeri edinilen tecrübelere göre pratiğin birçok amacı için tamamıyle yeterli gelmektedir. Fakat çıkıntı teşkil eden kristal ucu borkarbürlü parlatmayla düzeltilebilir. Böylece elmas takımlar kullanılmadan gerekli düzgünlük elde edilir.

Pratikte honlama taşlarının kenarlarındaki mikro bölge içinde, yüzeyde yer değiştirmelere sebep olan çok yüksek bir basınç meydana geldiğinden borür tabakalarının honlanmaya uygun olmadıkları görülmüştür [72,74].

3.9.6. Ölçü Değişimi ve Çekme

Borlama işlemindeki ölçü değişiklikleri daima pozitiftir. Yani parçalar bütün diffüzyon yöntemlerinde olduğu gibi borür tabakasının oluşumunda da bir hacim artışı olmaktadır. Boyut değişimi, tabaka kalınlığı ve kullanılan malzemeye bağlıdır. Boyut artışı genel olarak tabaka kalınlığının %20'si kadardır. Alaşımlı çeliklerde ise bu değer %80'e kadar çıkabilmektedir. Borlama sonucu oluşan borür tabakasının %20'si dışa doğru büyürken %80'ide içe doğru büyür. Bu büyüme sırasında ise borür tabakasının ana malzemeye bağlandığı yerde ve tabakanın üst kısmında çatlaklar ve kavlama gibi durumlar olabilir.

Bütün ısıl işlemlerde olduğu gibi borlamada da ölçü değişimi ısıl işlem şartlarına, ve malzemenin yoğunluğuna bağlıdır.

Hacım artışı önceden yapılacak deneyler ile belirlenmeli ve böylece de tabakanın büyümesi parçanın işlenmesi esnasında dikkate alınmalıdır. Parçanın son talaş kaldırma işleminden önce gerilme giderme tavına tabi tutulması şarttır. Böylece

işlem gerilmelerinin meydana getireceği ilave boyut değişimleri önlenmiş olunur. Şekil değişimleri, borlama esnasındaki yavaş ısıtma ve soğutmayla normal olarak azdır. İşlem kutularının ve yerleştirmenin iş parçası şekline uygun olması ile uzun ve ince parçaların hemen hemen çekmesiz borlanması mümkündür. Borür tabakası, çatlak oluşmaksızın genleşme miktarını karşılayabilir ise, hafif çekme esnasında düzeltmek mümkündür.

Çarpılmayı azaltmak için, mesela uzun millerde olduğu gibi, parçalar işlenmeden önce gerilme giderme tavına tabi tutulmalı ve borlamak için bor verici ortam ile birlikte kutu içine iyi yerleştirilmelidir [76,81,87,94].

3.9.7. Diğer Mekanik Özellikler

Esneklik (elastiklik) sınırı, 0.2-akma sınırı ve çekme mukavemetinde borlama sıcaklığından yapılan yavaş soğutmayla herhangi bir değişiklik olmaz, yani normal tavlanmış durumdaki değerler ile aynıdır. Kopma uzaması ve kopma büzülmesi ise azalmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ıslah edilen parçaların, küçük kopma bölgelerinde kopma uzaması ve kopma daralması azalırken mukavemet değerleride düşer.

Borlama sıcaklığından yavaşça soğutulan parçaların çentik darbe dayanımı borür tabakasının kalınlığı ile azalır. Yüksek sıcaklıkta borlanan parçaların çentik darbe mukavemeti düşük bulunmuştur.

Mukavemet özellikleri ve çentik darbe dayanımı mevcut zorlamalarla bir rol oynuyorlarsa, düşük sıcaklıkta ve uzun sürede belirli bir tabaka kalınlığı elde edilmelidir. Ayrıca borlamadan sonra ıslah etme gerekli ise, kullanılabilir mukavemet değerlerine ulaşmak için, tavlama sıcaklığı mümkün olduğu kadar yüksek seçilmelidir [106].

Malzemelerin statik mukavemet değerleri borlama sonucunda çok az etkilenmekte ve hatta etkilenmemektedir. Düzgün olarak borlanan parçalar çarpma ve vurma zorlamaları karşısında geniş ölçüde hassas davranmamışlardır. AISI 4140 (42CrMo4) çeliğinden yapılmış numuneler borlandıktan sonra hem el çekici ve hem de dövme çekici ile dövülmüşler ve her iki durumda da borlanmış parçaların borlu tabakalarında kırılmalar ve dökülmeler görülmemiştir.

Numune şekilleri (çentikli, çentiksiz, düz, yuvarlak v.s.), yükleme çeşitleri ve çevresel ortam periyodik zorlamalar üzerine önemli oranda etkide bulunurlar. Korozif olmayan ortamlarda çalışan parçaların yorulma dayanımları borlama ile artırılmıştır. Buna karşılık korozif olan ortamlarda çalışan borlanmış parçaların yorulma dayanımlarıysa kötüleşmiştir. Bu yorulma dayanımlarına tabaka kalınlığının ve tabaka oluşumunun da etkisi vardır. Scheiber ve Riehle're göre tabaka kalınlığı 40-50 μm arasında ise yorulma mukavemeti %33 oranında iyileşir. Tabaka kalınlığı 40 μm' nin altında ise tabakanın oluşumu etkide bulunur. Mevcut yüzey hatalarının negatif etkileri ile borlu tabakadaki basınç gerilmeleri, dolaylı olarak yorulma mukavemetinin yükselmesine etkide bulunurlar. Kalın tabakaların etkisi yoktur. Minimum tabaka kalınlığı ise yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Parlatılmış numunelerin yüzey pürüzlülükleri az olduğu için borür tabakasının hafif kalınlığı yeterlidir [72,78].

3.10 BORLAMANIN GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ

Termokimyasal işlem yöntemleri sementasyon, nitrürasyon ve borlamadır. Bütün bu yöntemlerin müşterek yanı, özelliklerin elde edildiği bileşimlerin temin edilmesi ve yabancı bir elementin iş parçası yüzeyine yayınmasıdır. Bununla beraber, mesela karbürlemeden sonra sertleşme ile sert bir bölgeden yumuşak bir çekirdeğe sürekli bir geçişi sağlamak ve banyo nitrürasyonunda da tabakanın özellikleri yanısıra intermetalik tabakanın altındaki diffüzyon bölgesi oldukça önemli birrol oynar. Borlamada ise sadece yüzey bölgesi, yani borür tabakası ilgi çekmektedir (Şekil 3.22) [77].

Geleneksel yöntemlerle sertleştirilmiş yüzey tabakasına sahip bir iş parçasının kullanılması gereken yerlerde borlanmış iş parçalarıda kullanılabilir. Diğer bir yöntemin masrafına karşılık parçaların aynı süredeki imalatında tasarruf edilmesi gerekli ise borlama yöntemi tercih edilmelidir. İş parçasının aşınmaya zorlanan kısmı ana malzeme değil, özellikle borür tabakası olduğu için yüksek alaşımlı malzemelerin yerine çoğu kez düşük alaşımlı malzemeler kullanılabilir. Bu düşük malzemelerin sayesinde şu masraflar tasarruf edilir: Daha az malzeme masrafı, daha basit işlem, ömrün uzatılması ve daha yüksek üretim hızıdır [88].

Çeliğin ve borlu tabaka kalınlığının doğru seçilmesi ile ana (çekirdek) malzemenin özelliklerine göre konvensiyonel işlenmiş parçalara oranla takımlar ve yapı elemanları önemli oranda yüksek ömüre erişirler. Aynı zamanda şimdiye kadar kullanılan pahalı ve çoğu kez işlenmesi kötü olan malzemelerin yerine borlama için ekonomik olan uygun fiatlı malzemeler kullanılabilir [87].

Edinilen tecrübelere göre borlanabilir ucuz çeliklerde ömür borlamayla 7–10 katına çıkmaktadır. Aşınmaya eğilimli parçaların gerçeğe uygun borlanması ile parçaların ömürleri 10–20 katından daha fazla yükseltilebildiği ve böylece de arıza süresi ve malzeme masraflarından tasarruf sağlandığı anlaşılmıştır [101,105].

Demir dışı metaller için alaşımsız çelikten imal edilmiş döküm yollukların cidar kalınlıkları her seferinde 8 saatten sonra %50 oranında eriyik tarafından çözündürüldüğü için tabakanın yenilenmesi gerekirdi. Ancak yollukların borlanması ile ömürleri beş katına çıkmıştır [100].

PVC imal eden işletmelerde vinilklorit sevk eden borular akan vinilkloritin etkisiyle korozyona uğradıklarından 6 aylık bir ömüre sahiplerdi. Bu borunun ömrü iç yüzü borlanarak 15 µm kalınlığında elde edilen borür tabakasıyla 2 yıla çıkmıştır. 2 yıl sonunda yapılan mikroskopik muayene sonucu korozif aşınma sebebiyle iç yapı da hasar tesbit edilmemiştir.

Plastik malzeme sanayiinde, silikon içeren elastomerlerin işlenmesinde kullanılan nitrürlenmiş ters akım mandallarının ömrü sadece 5–8 gün kadardır. Aynı mandallar borlandıktan ve çekirdek mukavemetini artırmak içinde ıslah edildikten sonra ömürleri 8 katına çıkmıştır [86].

X 8 Cr17 alaşımlı çeliğinden yapılmış delikli levhalar sigara sanayiinde tütün yapraklarının kesiminde kullanılmaktadır. Bu delikli levhalar tütün yapraklarına yapışık madeni maddelerden dolayı kuvvetli erozyona uğradıklarından normal olarak her 4

hafta da bir değiştirilmektedirler. Oysa bu parçalar borlandığında 2 yıllık bir ömüre, yani normal ömürün 25 katına ulaşmışlardır.

Büyük kavurmalarda kullanılan kahve değirmeninin öğütme diskinin normal ömrü borlama ile 5 katına çıkarılmıştır. Seramik sanayiinde kullanılan baskı kalıplarının alt ve üst zımbalarının ömrü borlamayla 3 katına yükseltimiştir. Kimya sanayinde kullanılan besleme suyu regülatörü normal olarak 2000 işletmme saatinden sonra erozyona uğramaktadır. Fakat aynı parçalar karbonitrürlemeyle 8000 borlama ile de 18000 işletme saatinden sonra tamamen devre dışı kalmaktadır. Brülörler, helezon cisimler ve enjektör başlıkları gibi kimya endüstrisinde ve endüstriyel yağ yakımında ve hem de sıvı kimyasal kırıntıların giderilmesinde kullanılan tesislerdeki parçaların ömürleri borlama ile 2–3 katına yükselmektedir [89].

Cam elyafı ile kuvvetlandirilmiş termoplastiklerin işlenmesi esnasında ekstruder takımlarında önemli oranda aşınma meydana gelmektedir. Ekstruder takımların ömürleri karbonitrürleme veya nitrürleme ile arzu edilen seviyeye ulaşmamıştır. Alaşımsız ve Cr–Mo alaşımlı ıslah çeliğinden imal edilmiş ekstruder sonsuz dişlisinin borlanmak suretiyle elde edilen ömrü, yüksek alaşımlı çelikten yapılarak nitrürlenmiş ekstruder sonsuz dişlisinin ömrünün 100 katına yükselmiştir.

50 CrV 4 çeliğinden imal edilmiş soğuk damga zımbaları ile normal durumda 4000, Tenifer işleminden sonra 8000 damga yapılırken borlama sonucu 29000 damga yapılmıştır.

Tekstil makinası yapımında kullanılan ve otomat çeliklerden iyi işlenerek imal edilmiş iplik klavuzları, deflektör plakları (klavuz levhalar) ve dümen makaraları gibi parçalarda oluşan yüksek hız aşınması, bu parçaların borlanması ile önemli oranda azaltılmıştır [76].

Yüksek alaşımlı çeliklerden yapılmış kokil döküm kalıp parçalarının borlanması sonucu ulaşılan ömürleri, şimdiye kadar kullanılan ömrün 10 katından daha fazla bir ömre ulaşmştır. Bu sırada ise erozyon görünümlerinede rastlanmamıştır [74].

Sonuç olarak şunlar söylenebilmektedir; 1) Borlama sonucu parçalar 2–20 kat daha fazla ömre ulaşmaktadır.
2) Borlama ortamları, özellikle toz ortamlar, siyanit ihtiva etmezler.

Bundan dolayıda ne kullanan şahıs için, ne de çevre için bir tehlike arz etmezler.

BÖLÜM VI DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 GİRİŞ

Kam mili, motorda bir çok görevi yerine getiren en önemli parçalardan biridir. Görevleri ise şunlardır [3,107,108]:

1) Üzerindeki kam çıkıntıları vasıtası ile motorun emme ve eksoz subaplarına açma ve kapama görevlerini yaptırır.
2) Distrübütör miline hareket verir.
3) Yağ pompasını çalıştırır.
4) Benzin pompasını çalıştırır.

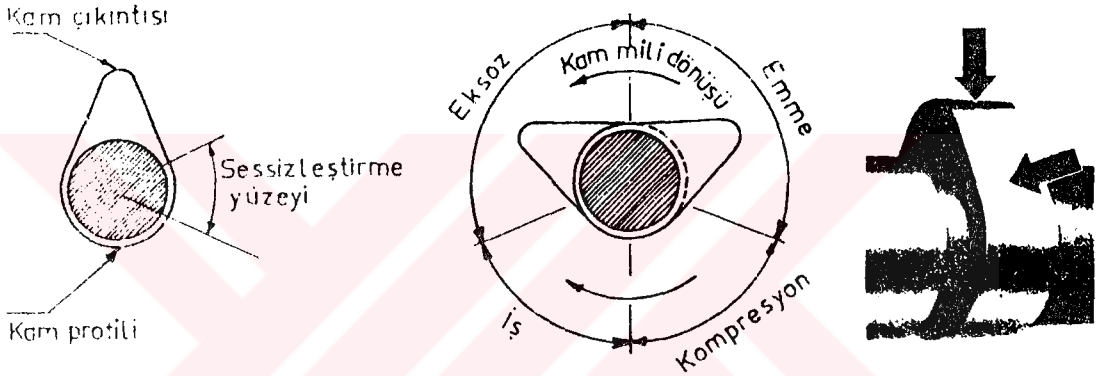
Kam milleri kam çıkıntılarından başka çeşitli hareket iletıcileri vasıtası ile yukarda belirtilen görevleri yapar. Kam mili grubu, hareket dişlisi, subap itici kamları, yatak muyluları, benzin pompası kamı ve yağ pompasına hareket veren dişliden oluşur [108].

Kam milleri, kaliteli çelik alaşımlarından pres ile dövülerek tek parça halinde imal edildiği gibi, dökme demir alaşımlarından da dökülerek imal edilirler. Mil üzerinde muylular, kamlar ve hareket dişlileri bulunur. Mil sertleştirilmeden önce muylu ve kam yüzeyleri özel tezgahlarda kabaca işlenir. Sonra kam ve muylular ısıl işleme tabi tutularak sertleştirilirler. Kabaca işlenen ve sertleştirilen yüzey, hassas olarak özel tezgahlarda taşlanarak istenen ölçü tamlığına getirilir [3,108] Şekil 4.1 de bir kam mili kesiti verilmiştir.

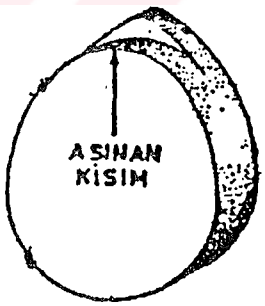
Kam milleri, alev veya indüksiyon ile sertleştirilirler. Sertlik 500–700 HV arasındadır. Sertleşme sonucu oluşan sert kabuk aşınmaya karşı dirençli, sağlam ve özlü bir tabakadır. Bu kabuğun derinliği 0.76–1.01 mm dir [3,109].

Kam milinin kam çıkıntıları, genelde normal aşınmaya, korozyona, karıncalanmaya, derin çizik, çatlak ve kırılma, burulma gibi zorlamalara maruzdur (Şekil 4.2). Kam millerinin aşınması, daha çok kamın ucunda ve yan yüzeyinde olur. Bu durum motorun sesli ve verimsiz çalışmasına neden olur [3].

Kam miline eksantrik milde denir. Kam mili eğilmeye, burulmaya ve ani kuvvetlere karşı dayanıklı malzemelerden yapılır. Genellikle iki grupta toplanan bu malzemeler, dökme demir ve çelik çeşitleridir [108].



Şekil 4.1: Bir kam milinin enine kesiti [109]



Şekil 4.2: Aşınmış bir kam [3]

Özellikle dökme demir alaşımlarından imal edilen kam milleri kam tepelerinin döküm esnasında hızlı soğutularak sertleştirilmesi sonucu (çil etkisi) kam sert, kam merkezi ve şaft yumuşak kalır. Bu şekilde sertleştirilen kam tepelerinin ayrıca sertleştirilmesi gerekmez. Genelde pik döküm, yani beyaz katılaştırılmış pikten imal edilir [107].

Çok çeşitli çelik ve alaşımları, kam mili imalinde kullanılabilir. Ancak seçilecek çeliğin özelliklerinin kam mili konstrüksiyonuna uygun olması gerekir. Genellikle motorun dizaynına göre malzeme seçilir. En çok kullanılan çelik ve alaşımları: DIN 20MnCr5, 16MnCr5, Ck53, Ck60 ve Ck45 çelikleridir. Ayrıca 15CrNi6, 15Cr3, 18CrNi8, 41Cr4 ve C15 çeliklerde kullanılır.

Kam milinin çelikten veya pik dökümden olmasını kam iticinin malzemesi belirler. Kam itici çelik ise genelde kam mili pik döküm veya tersi olur [3,107].

4.2. DENEY MALZEMELERİ ve ÖZELLİKLERİ

Deney malzemesi olarak kam mili yapımında sıkca kullanılan AISI 5115 çeliği ve ikame malzemesi olarak AISI 1020 çeliği seçilmiştir. Böylece klasik uygulamalardan farklı bir yüzey sertleştirme ile daha verimli veya daha ekonomik bir mil yapılıp yapılamayacağı test edilmiş olacaktır. Esas sürtünme elemanı olarak seçilen semente edilmiş AISI 5115 çeliği, orta derece mukavemetli ve aşınma direnci istenen ağır yükler altında çalışan mil, dişli, yatak ve kam mili gibi makina elemanlarının imalatında kullanmaktadır. AISI 1020 çeliği ise düşük mukavemetli, kolayca şekil verilebilir ucuz ve son derece esnek olması nedeniyle de geniş kullanım alanı vardır. AISI 1020 çeliği sementasyonla sertleştirildikten sonra aşınma direnci artar. Aşınma direncindeki bu artış ağır yük makinaları için yeterli değildir. Bu nedenle de ağır yük altında çalışan makina imalatında tercih edilmez.

Her iki çeliğin kullanıldığı konstrüksiyonlar çok farklıdır. Bu nedenle AISI 1020 çeliğinin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ile AISI 5115 çeliğinin yerine kullanılabileceği düşünülmüştür ve bu iki çeliğin kimyasal bileşimleri Tablo 4.1 de ve normalleştirilmiş durumdaki mekanik özellikleri de Tablo 4.2 de verilmiştir.

Tablo 4.1: Deney malzemelerinin kimyasal bileşimleri [3,47]

MALZEME	KİMYASAL BİLEŞİMİ (%)							
	C	Mn	Si	P	Cr	S	Ni	Mo
AISI 1020	0.18	0.3	0.04	0.03	---	0.03	---	---
AISI 5115	0.18	1.25	0.03	0.03	1.10	0.03	---	---
AISI 8640	0.40	1.00	0.03	0.04	0.50	0.40	0.50	0.20

Tablo 4.2: Deney malzemelerinin normalleştirilmiş durumdaki mekanik özellikleri [47,110,111].

MALZEME	MEKANİK ÖZELLİKLER				
	Kopma Direnci (N/mm^2)	Akma Sınırı (N/mm^2)	Kopma Uzaması (%)	(%) Kopma Kesit Daralması	Sertlik HB
AISI 5115	500	400	27 (5do)	60	207
AISI 8640	790	600	20	41.5	222
AISI 1020	420	270	27	55	121

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dirençleri ile sertlik ve yüksek ısıya dayanımlarının diğer yöntemlerle sertleştirilmiş çeliklere göre daha iyi olduğu ortaya konmuştur.

Bu çalışmada borlama ve sementasyon ile sertleştirilen AISI 1020 ve AISI 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre borlanarak sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin, sementasyon ile sertleştirilerek kam mili imalatında kullanılan AISI 5115 çeliğinin yerine kullanılıp kullanılmayacağı mukayese edilmiştir.

Karşı malzeme olarak sertleştirilmiş AISI 8640 çeliği tercih edilmiştir. Çünkü Cr ve Ni içeren malzemelerde itici olarak kullanılmaktadır [108]. Bu çeliğin mekanik özellikleri Tablo 4.2 de, kimyasal bileşimi ise Tablo 4.1 de verilmiştir.

Yüksek mukavemete ve aşınma direncine sahip olan AISI 8640 çeliği, ağır yük altında çalışan makina parçalarının imalatında kullanılmaktadır.

4.3. NUMUNE HAZIRLAMA ve UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Sürtünme elemanları olarak AISI 1020 ve AISI 5115 çeliklerinden 20x26x30 mm boyutlarında, karşı eleman olarak ise AISI 8640 çeliğinden 76 mm dış çap ve 12 mm kalınlığında disk şeklinde numuneler hazırlanmıştır (Şekil 4.3). Deney elemanının 20x30 mm boyutlu bir yüzeyi ve karşı diskin yanal yüzeyi orta hassaslıkta taşlandı ve çapakları temizlendi. Bu şekilde hazırlanan numuneler aynı şartlar altında ayrı ayrı borlandı ve semente edildiler. Karşı eleman ise sadece borlandı. Sementasyon Sivas Estaş Firmasında borlama ise Manisa-Salihli'de bulunan Vezneli Aşındırıcı San. ve Tic. şirketinde gerçekleştirildi.

Sementasyon, numunelerin 1.5 ve 3 saat süre ile 930°C de sıvı ortamda tutulması şeklinde gerçekleştirildi ve takiben banyodan alınarak 50°C sıcaklığa sahip yağa daldırılmak sureti ile sertleştirme yapıldı.



a) Numune

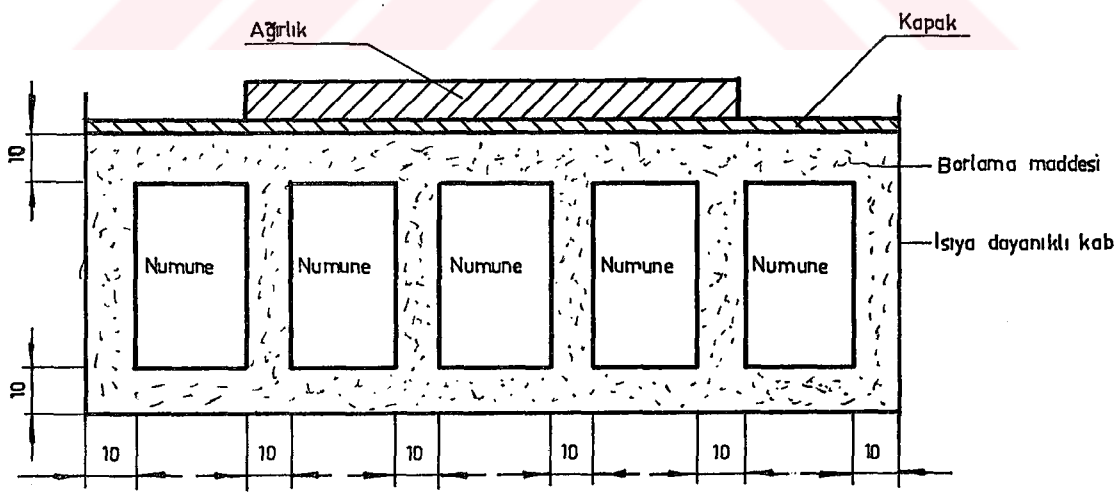
b) Karşı eleman

Şekil 4.3: Deney numunelerinin şekil ve boyutları

Borlama için numuneler, yüzeylerinde bulunan yağ ve oksit tabakalarının giderilmesi amacıyla tek tek yağ ve oksit giderici bir kimyasal sıvı (aseton) içinde yıkandılar. Yüksek ateşe dayanıklı çelikten yapılmış olan bir kutu içerisine yaklaşık 1 cm kalınlığında toz halindeki borkarbür serildi. Daha sonra numuneler borkarbürün üzerine en az 1 cm aralıklarla yerleştirildi. Kutunun kenarına rastlayan numuneler ile kutu kenarı arasında da 1 cm aralık bırakıldı. Aralıklar toz borkarbürle doldurulduu ve üzerine de yaklaşık 1 cm kalınlığında toz borkarbür serildi (Şekil 4.4). Bu şekilde hazırlanan kutu serbest halde bir kapak ile kapatıldı. Bu işlemler yapılırken alttan alev yardımı ile ısıtılan fırında ön ısıtmaya tabi tutuldu. Fırının içi ateş tuğlaları ile döşenmiş ve ısı kaybı önlenmiştir. Hazırlanan kutular ısıtılan fırının içine yerleştirildi ve fırın kapağı sıkıca kapatıldı. Daha sonra alevle ısıtmaya devam edilerek önceden belirlenen borlama sıcaklığına ulaşıldı ve bu sıcaklıkta önceden belirlenen borlama süresince bekletildi. Isıl işlem şartları Tablo 4.3 te verilmiştir. Sürenin dolmasından sonra alev kesildi ve fırın kapağı açılarak kutular alındı. Kutular üzerine su dökülerek soğutuldu, numuneler kutudan çıkarılarak bir fırçayla yüzeyleri iyice temizlendi ve P500'lük zımpara ile hafifçe parlatıldı. Karşı elemansa borlama işleminden sonra 850°C'de 1 saat süreyle semente edildi. Böylece borlu tabakanın ana malzeme ile bağlantısı güçlendirildi.

BORLAMA ORTAMI	TOZ HALİNDE BOR KARBÜR		
Sıcaklık (°C)	950	930	930
Süre (saat)	1.5	1.5	3

Tablo 4.3: Isıl işlem şartları



Şekil 4.4: Numunelerin kutuya yerleştirilme düzeni

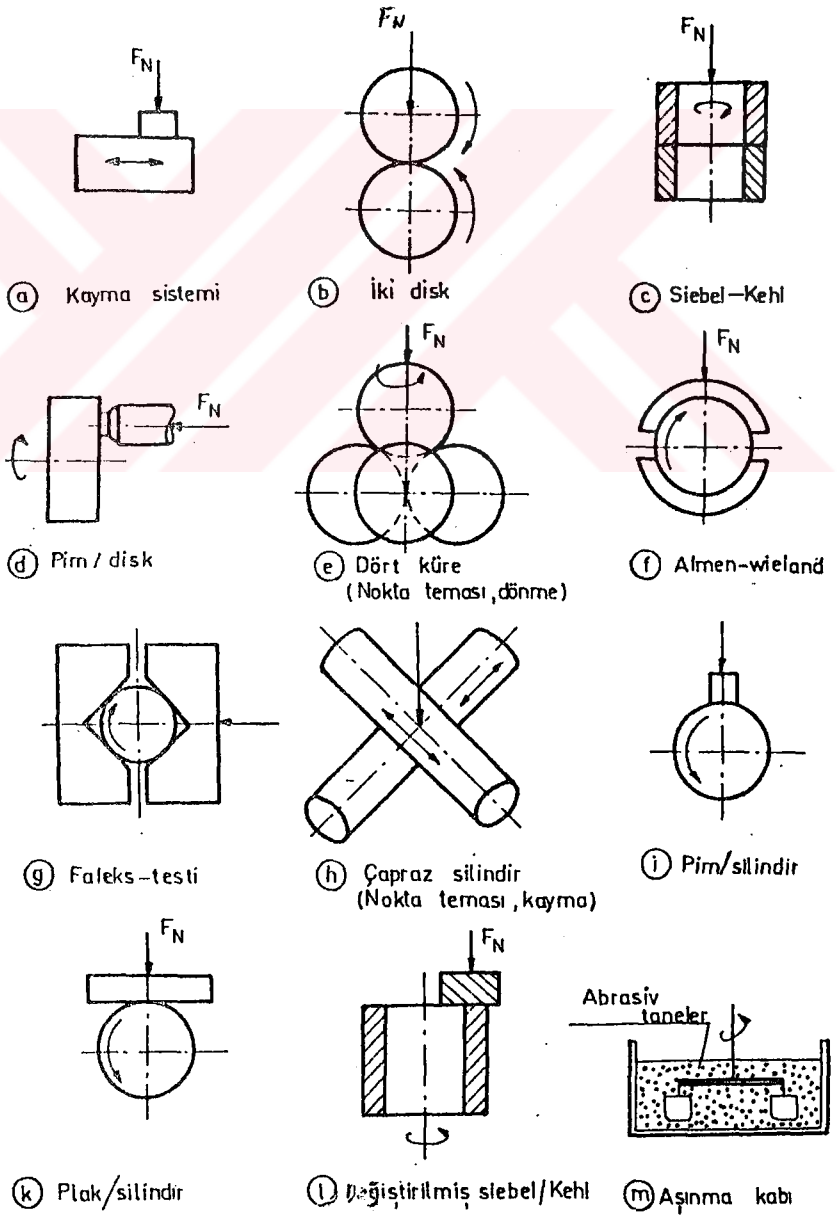
4.4. AŞINMA DENEYLERİ

4.4.1. GİRİŞ

Sürtünerek çalışan bütün makina parçalarında görülen çeşitli etkenler ile malzeme kaybına neden olan ve giderilmesi mümkün olmayan aşınma, teknolojinin ilerlemesi ile önemini gittikçe artıran bir olaydır.

Aşınmaya etki eden faktörlerin çokluğu ve aşınma olayının karmaşıklığı (çok safhalılığı) nedeni ile aşınma için henüz matematiksel bir bağıntı geliştirilmemiştir. Bu nedenlerle aşınma deneyleri değişik yerlerde değişik biçimlerde uygulanmakta ve bilinen bir malzemenin aşınma özellikleri ile karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmaktadır.

Birçok durumlarda tek bir aşınma mekanizması yerine bir kaç tür aşınma birden etkili olabilir. Bir malzemenin ve özellikle bir çeliğin sürtünme ve aşınma davranışlarının araştırılması için, bu elemanların çalıştığı tribolojik sistemlerin laboratuvar şartlarına indirgenmesi gerekir. Fakat en gerçekci değerlendirme gerçek uygulama şartlarında yapılan denemelerden çıkarılan sonuçlarla olur. Aşınan parçanın yüzeyinde oksit, absorbe edilmiş gaz, pislik ve yağlayıcı olabilir. Ayrıca yüzeye çevre, üretim yöntemi ve çalışma şartları etki eder. Tribolojik sistemin tanımlanabilmesi için sisteme etki eden parametrelerin bilinmesi, çevrenin kontrol edilmesi, kullanıcının durumu ve faktörlerin birbiri ile etkileşimi de farklı önlemler alınmasını gerektirebilir.

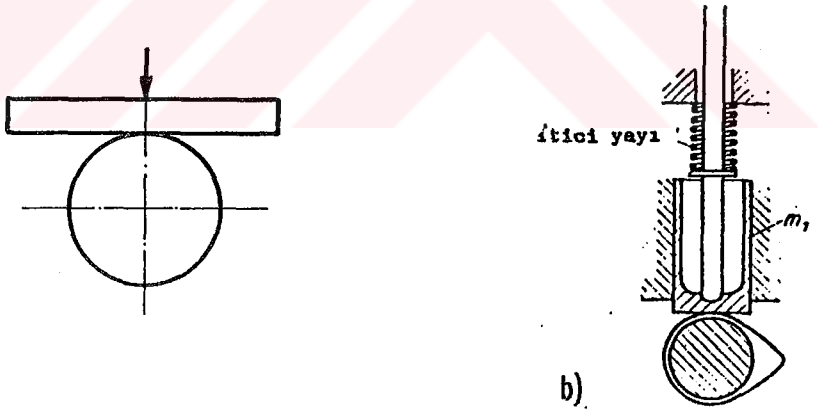


Şekil 4.5: En çok kullanılan Sürtünme–Aşınma deney düzeneklerinin şematik ve toplu olarak gösterilmesi [112]

Sürtünme ve aşınmanın azaltılması veya kontrol edilmesi ve bu amaç için malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi için aşınmaya etkiyen faktörlerle etkilerinin bilinmesi sistematik bir araştırmayı gerektirir. Bu çerçevede aşınma araştırmaları yıllardır laboratuvarlarda işletme şartlarına uygun olarak model deney setleriyle sürdürülmektedir. Uygulamada işletme şartlarının hassas bir şekilde kontrol edilmemesi veya ölçülememesi elde edilen sonuçların sıhhatini etkilemektedir. Bu nedenle önce şartların kontrol edilmesi ve ölçülebilme imkanlarının artırılması gerekir. Laboratuvar denemelerinde deney faktörlerine hakim olmak ve onları ölçebilmek daha kolay ve kesinlik arzeder. Ancak laboratuvar denemelerinden elde edilen sonuçların uygulamaya aktarılması ve yorumlanması modelin işletme şartlarını iyi simulize edip etmediğine bağlıdır. Fakat sürtünme çiftlerine ait özelliklerin bilinmesi ve tarif edilmesi zorunludur.

Temel tribolojik büyüklüklerin duyarlı bir biçimde ölçülmesine izin veren bir deney düzeneği tasarımı yapılmalı ve bu düzeneğin gerçek işletme şartlarını temsil etmesi sağlanmalıdır. Bu güne kadar geliştirilmiş deney düzeneklerinin prensipleri Şekil 4.5 de görülmektedir [22,23,47,82,112].

Bu çalışmada kam mili mekanizmasına benzediği için Şekil 4.5 deki plaka disk sistemi tercih edilmiştir (Şekil 4.6). Tasarımı sırasında imalatta tekrarlanabilir deney sonuçlarının elde edilebilirliğine dikkat edilmiş ve tasarımın gerçekleştirilmesi açısından sadelik ve duyarlılık esas alınmıştır. Bu mekanizmada bir yönde noktasal, diğer yönde çizgisel temas söz konusudur. Sistemde kayma hareketi tek yönlü olduğu için sürtünme kuvveti hareket değişiminden daha az etkilenir.



Şekil 4.6: "Plaka-disk" aşınma deney modeli ve kam itici [108]
a) Deney numuneleri pozisyonu
b) Kam ve itici etkileşimi

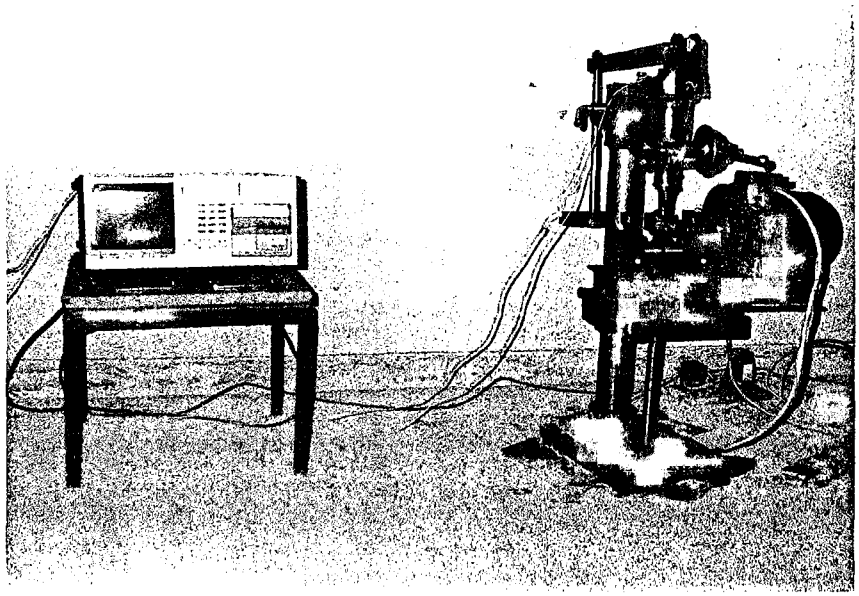
4.4.2. Deney Tesisatının Özellikleri

Deneysel çalışma için mevcut imkanlar dahilinde kayma sistemi olarak plaka-disk deney tesisatı yapılmıştır. Numuneler plaka, karşı elemanda disk olarak tasarlanmıştır. Deney tesisatı, aşınma deneyi için önerilen yapıdadır. Şekil 4.7 ve 4.8 de deney tesisatı görülmektedir.

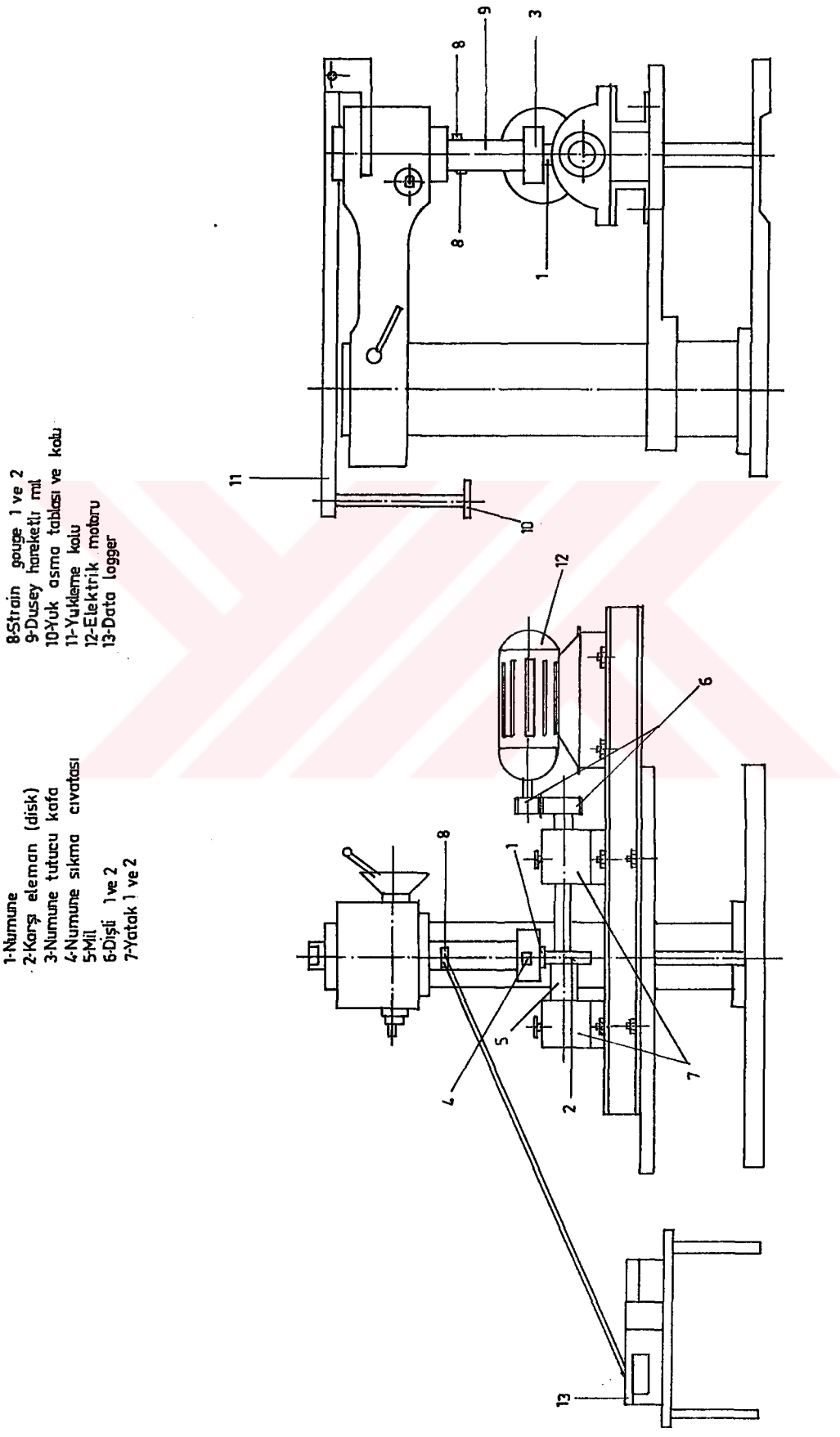
Deney tesisatında hareket 0.75 kW gücünde, üç fazlı ve dakikada 1360 devirle dönen bir elektrik motoru ile sağlanmıştır. Modülleri 1.5 mm ve 23 ile 35 dişe sahip iki düz dişlinin oluşturduğu bir redüktör, motor mili ile karşı malzemenin bir kama ile bağlandığı mili birleştirmektedir. Her iki mil birbirine paraleldir. Karşı malzemenin bağlı olduğu mil iki yerinden kaymalı yatak ile yataklanmış ve kendi ekseni etrafında dönmektedir (Şekil 4.7 ve 4.8).

Şekillerden görüldüğü gibi ana gövdenin üzerinde yataklanmış yükleme kolu, sonsuz vida açılmış bir mile hareket vermektedir. Yük kolu sonsuz vida milini düşey doğrultuda hareket ettirmektedir. Sonsuz vida milinin diğer ucuna, bir ucu vidalı diğer ucuna numune boyutuna uygun yatak açılmış 2 nci mil vidalanmıştır. Sonsuz vidalı mile yukarı doğru hareket verebilen bir yay yerleştirilmiştir. Bu yay, sistem çalışmadığı zaman numunenin karşı elemandan temasını kesmektedir. Sisteme ait yük koluna önce yay kuvvetini yenerek numunenin karşı elemana temasını sağlayan ağırlık asılarak temas sağlanır. Daha sonra sürtünme ve aşınmayı sağlayacak ağırlıklar yük koluna asılarak gerekli yükleme yapılır.

Numune, numune tutucu ucuna bir civatayla sıkıştırılmaktadır. Numunenin bağlı bulunduğu alt kısım, sürtünme kuvvetinin etkisi ile mikron boyutunda şekil değiştirebilir durumdadır. Yani numune tutucunun bağlı olduğu mil sonsuz vida miline ankastre olarak bağlanmış ve sürtünme kuvvetinin etkisi ile mikron boyutunda sehim yapabilmektedir. Yük koluna asılan değişik ağırlıklarla sonsuz vida üzerine etkiyen ağırlık (moment) değeri artırılıp azaltılabilinir. Bu şekilde numune üzerine etkiyen yük ayarlanabilmektedir. Çalışma esnasında sonsuz vida milinin, titreşimlerden etkilenmemesi için gövdeye rijit bir şekilde yataklanmıştır.



Şekil 4.7: Aşınma deneylerinde kullanılan deney tesisatı



Şekil 4.8: Aşındırma deney tesisatı

4.4.3. Deneyin Yürütülmesi

Deney esnasında numunelerin titreşimlerden etkilenmemesi için yataklandıkları yuvaya vidalanarak kısmen sabitlenmişlerdir. Karşı malzeme ise daha önce belirtildiği gibi motor miline paralel olan bir mile bir kama yardımı ile sabitlenmiştir. Her iki mil düz iki dişliden oluşan bir redüktörle döndürülmektedir. Yatağında kısmen sabitlenmiş numune, dönmekte olan karşı sürtünme elemanına çizgisel olarak temas etmektedir (Şekil 4.6).

Yüzeyleri sementasyonla ve borlama ile sertleştirilen numunelerin yüzey durumu, sürtünme ve aşınma davranışları, yüzey ve mikro sertlik durumu, aşındırılmış yüzey ve sertleştirilmiş tabakanın metalografisi, aşınmış ve aşınmamış partiküllerin X-Ray diffractionla analizi yapılmıştır.

Deney yükü, 55.6, 109 ve 147.5 N, deney süresi 10, 30, 45, 60, 90, 180, 300, 420 ve 540 saniye, deney hızı ise 3.6 m/sn olarak alınmıştır.

4.4.4. Numunelerin Hazırlanması

Bölüm 4.3'de belirtildiği gibi hazırlanan numunelerin yüzeylerinin statik sürtünme katsayıları ısıl işlemden önce ve sonra Cum. Üni. S.M.Y.O. temel fizik laboratuvarlarında tesbit edildi. Eğim açısı ayarlanabilen bir eğik düzlem üzerine konan deney numunelerinin kendi ağırlık kuvveti etkisinde kayması sağlanmıştır

Numunenin ilk hareket ettiği andaki eğim açısı sistemden okunmak süretiyle belirlenmiştir. Belirlenen bu eğim açısı ise sürtünme kanununa göre numunenin statik sürtünme katsayısına eşittir. Bu şekilde tesbit edilen statik sürtünme katsayıları Tablo 4.4' te verilmiştir. Aşınma deneyinden önce ve sonra herbir sürtünme elemanı etil alkol içerisinde yıkanıp kurutulduktan sonra aşınma öncesi ağırlıkları belirlenmek üzere 0.01 mg hassasiyetindeki dijital bir terazide tartılmışlardır. Aynı terazi ağırlık kaybının belirlenmesi için deney sonrası numune tartımlarında da kullanılmıştır. Deneylerin tamamı, normal atmosferik şartlarda ve ortam sıcaklığı 18-23°C de yapılmıştır. Aşınma öncesi ve sonrası yapılan tartımlarla belirlenen ağırlık kayıpları Ektablo 1a ve 1b de verilmiştir.

Tablo 4.4: Numunelerin deney öncesi ortalama statik sürtünme katsayıları

	YÜZEY İŞLEM DURUMU		
MALZEME CİNSİ	Normalize Edilmiş	Semente Edilmiş	Borlanmış
AISI 1020	0.15-0.16	0.19-0.21	0.16-0.18
AISI 5115	0.15-0.18	0.18-0.21	0.17-0.19

4.5. DENEY BÜYÜKLÜKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

4.5.1. Kayma Hızının Belirlenmesi

Deneysel çalışmalarda 0.75 kW gücünde, üç fazlı ve dakikada 1360 devirle dönen bir asinkron elektrik motoru kullanıldığı daha önce ifade edilmiştir. Sabit devirli bu motorun boşta ve yükte çalışma devri takometreyle ölçülmüştür.

Daha önce belirtildiği gibi karşı eleman 30 mm çaplı mile bir kama yardımı ile bağlanmıştır. Milin bir ucunda modülü m=1.5 mm ve diş sayısı z_2=35 olan düz bir dişli bulunmaktadır. Motor milinde ise yine modülü aynı ve diş sayısı z_1=23 olan düz bir dişli yer almaktadır. Buna göre karşı elemanı taşıyan milin devri;

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \qquad (4.1)$$

şeklindeki çevirim oranı bağıntısına göre,

$$n_2 = \frac{n_1 \cdot z_1}{z_2} = \frac{1360 \cdot 23}{35} = 893.7 \text{ dev/dak} \qquad (4.2)$$

olarak bulunur. Karşı elemanın dış çapı 76 mm olduğuna göre açısal ve çevresel hızları;

$$w = \frac{2\pi n_2}{60} = \frac{\pi n_2}{30} = \frac{\pi \cdot 893.7}{30} = 93.6 \text{ 1/sn} \qquad (4.3)$$

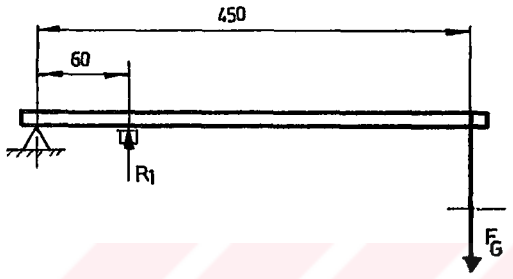
$$v = w \frac{d}{2} = 93.6 \times \frac{76}{2} = 3556.4 \text{ mm/sn} \qquad (4.4)$$

$$v = 3.6 \text{ m/sn} \qquad (4.5)$$

şeklindedir.

4.5.2. Normal Yükün ve Kayma Süresinin Tayini

Numuneler, Şekil 4.7 ve 4.8 de görülen deney tesisatında boyutlarına uygun imal edilen sürtünme elemanı yatağına yerleştirildikten sonra numunelerin üzerine etkiyen yük moment koluna uygulanan ağırlıklarla sağlanmıştır. Aşağıdaki bağıntılara göre tatbik edilen yük teoriktir. Şekil 4.9 da görüldüğü gibi, numuneye etki eden yük denge denklemlerine göre hesap edilebilir.

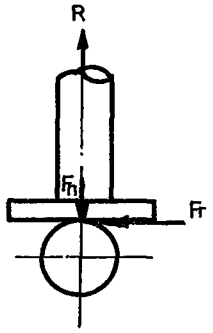


Şekil 4.9: Yük kolu ve yükün uygulanması

$$\Sigma M_c = 0 = F_g \cdot b - R \cdot C$$

$$R_1 = \frac{F_g \cdot b}{C} = \frac{450}{60} F_g = 7.5\, F_g \qquad (4.6)$$

şeklinde numuneleri tutan parçanın kola uyguladığı yüktür. Bu tepki kuvveti numune tutucunun diğer ucunda numunelerin karşı elemana uyguladığı normal kuvvettir. Şöyleki:



$$\Sigma F_y = 0 = R - F_n$$

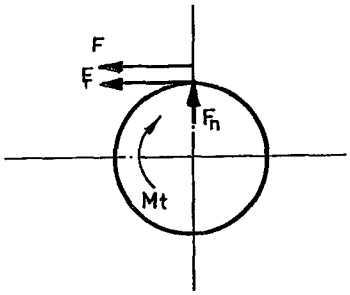
$$F_n = R \qquad (4.7)$$

Numunelere etki eden normal yük yukarıdaki bağıntılara göre yaklaşık olarak tesbit edilmiştir. Sistemin kendi ağırlığı ve toplam yüke etki eden diğer faktörler dikkate alınarak yükleme sonrası toplam gerçek yük bir dinamometre yardımı ile tesbit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kam mili esas alındığı için buna uygun olarak 55.6, 109 ve 147.5 N seçilmiştir.

Aşınma süreleri de bu yükler altında yapılan bir seri ön denemeler sonucu tesbit edilmiştir. Maksimum süre 9 dakika olup maksimum yük ve sürenin belirlenmesinde sertleştirilmiş numunelerin şiddetli aşınmamaları esas alınmıştır.

4.5.3. Sürtünme Kuvveti ve Katsayısı

Sürtünme kuvveti ve katsayısı deneysel olarak tesbit edilmiştir. Bunun için karşı elemanı döndüren momentin temas yüzeyinde meydana getirdiği kuvvet (F) aşağıdaki gibi bulunur.



$$P = M_t \cdot w$$

$$M_t = 9550\ P/n \quad [113] \tag{4.8}$$

Bu bağıntıda P [kW], n [1/dk] yazılırsa M_t [Nm] olur.

$$M_{t1} = 9550 \cdot 0.75/1360 = 5.27\ Nm \tag{4.9}$$

$$i = n_1/n_2 = w_1/w_2 = z_2/z_1 = d_2/d_1 = M_{t2}/M_{t1} \tag{4.10}$$

$$M_{t2} = M_{t1} \cdot z_2/z_1 = 5.27 \cdot 35/23 = 8.02\ Nm \tag{4.11}$$

$$M_{t2} = F \cdot r \tag{4.12}$$

$$r = d/2 = 76/2 = 38\ mm$$

$$F = M_{t2} / r = 8.02/38 = 211.05\ N = 21.5\ kg \tag{4.13}$$

değeri elde edilir. Diskin devri ise (4.2) bağıntısındaki gibidir.

Bu hareketin etkisiyle numune ve karşı eleman arasında sürtünme kuvveti (F_s) meydana gelir. Bu iki kuvvet arasında üç farklı durum söz konusudur.

1) $$F_s > F$$

şeklindedir. Bu ise deneysel çalışma esnasında görüldüğü gibi mümkün değildir. Çünkü hareketin etkisi ile oluşan yer değiştirmenin ters yönde meydana gelmesi, yani hareket başlangıcındaki değerin altına inmesi mümkün değildir.

2) $F_s = F$

olabilir. Budo deneysel çalışmo esnosında görüldüğü gibi mümkün değildir. Çünkü bu durum sistemin frenlenmesi ve durması demektir.

3) $F_s < F$

Bu ise deneysel çalışmada gözlenen durumdur. F_s kuvveti sabit olmayıp değişken olduğu deney esnasında gözlenmiştir. Bu değişken kuvvet (F_s) ise strain indikatöründen alınan ortalama şekil değişim oranı ile hesaplanır.

$E = 2.1x10^4$ kg/mm²

a = 76 mm = Numunenin karşı eleman ile temas ettiği yüzeyin strain gauge'nin ortasına olan uzaklığıdır.

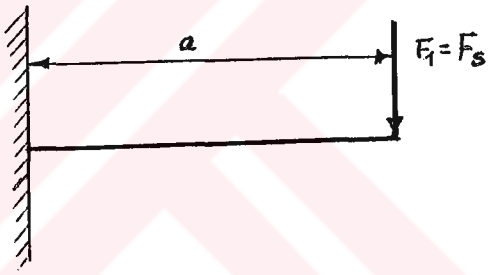
$W = \pi \cdot d^3/32 = \pi \cdot 19.5^3$ mm^3/32

$W = 728$ mm^3

$\varepsilon = \sigma/E$

$\sigma = M_{max}/W$

$M_{max} = a \cdot F_1$



Bu denklemlerden;

$$F_s = W \cdot E \cdot \varepsilon/a = 728 \cdot 2.1x10^4 \cdot \varepsilon/76 = 201158 \cdot \varepsilon_{ort} \qquad (4.14)$$

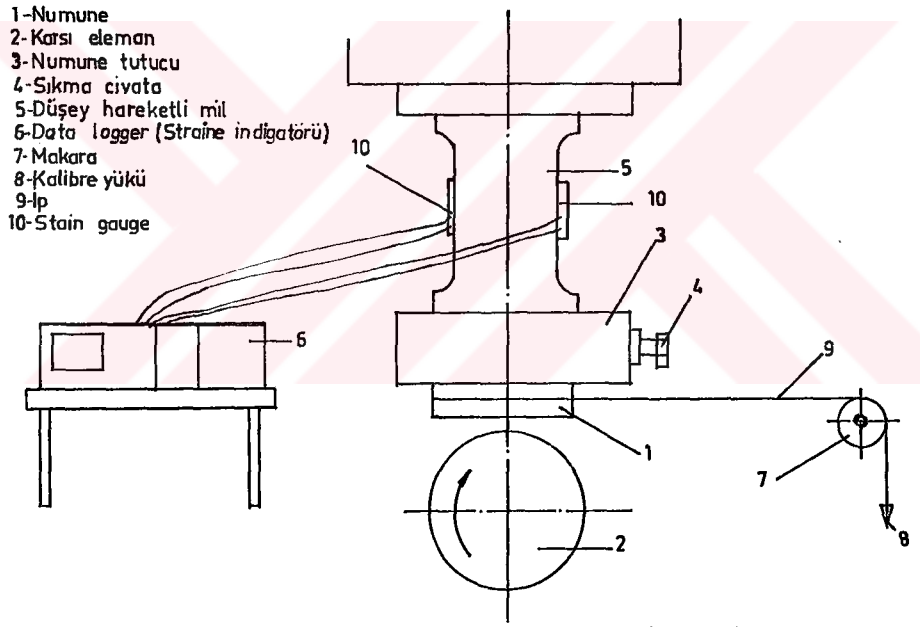
olarak tesbit edilmiştir. Bu kuvvet (F_s) oşınma esnasında oluşan gerçek yer değiştirmeyi eski konumuna getirmeye çalışır. Sürtünme kuvveti ve katsayısı (1.1) bağıntısıyla bulunur. (1.1) bağıntısına göre dinamik sürtünme katsayısı μ_d

$$\mu_d = F_d/F_n \qquad (4.15)$$

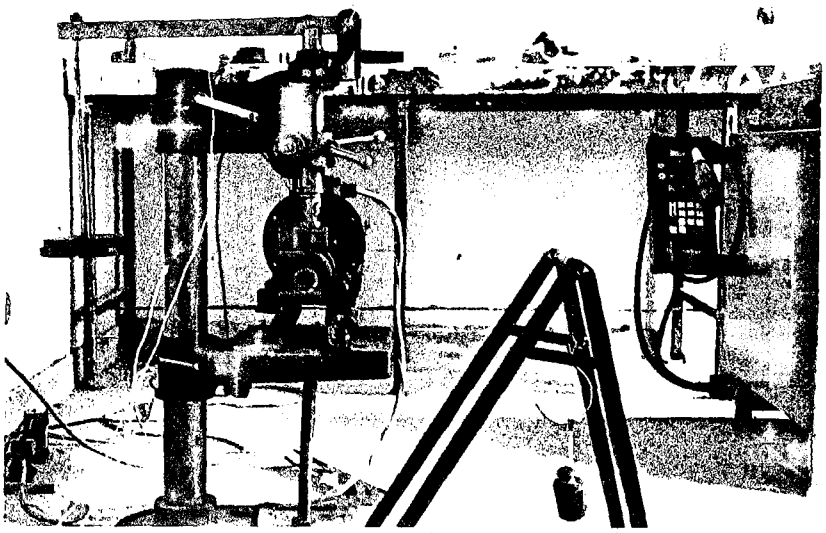
şeklinde hesaplanır. Burada F_d dinamik sürtünme kuvvetidir.

Sürtünme kuvvetini (4.14) bağıntısına göre tesbit etmek ise mümkün değildir. Çünkü numune karşı elemana temas ettikten sonra hareketin başlaması ile sürtünme kuvvetinde ani yükselme oluşmakta ve daha sonra sürtünme kuvveti sürekli değişmektedir. Sürekli değişken kısımda dinamik sürtünme kuvveti ani yükselme kısmında ise statik sürtünme kuvveti etkili olmaktadır. Bu nedenle sürtünme kuvveti esas alınarak kalibre edilen strain gauge düzeneği oşınma deney setine ilave edilmiş ve sürtünme kuvveti değişimi deney esnasında gözlenebilmiştir (Şekil 4.7).

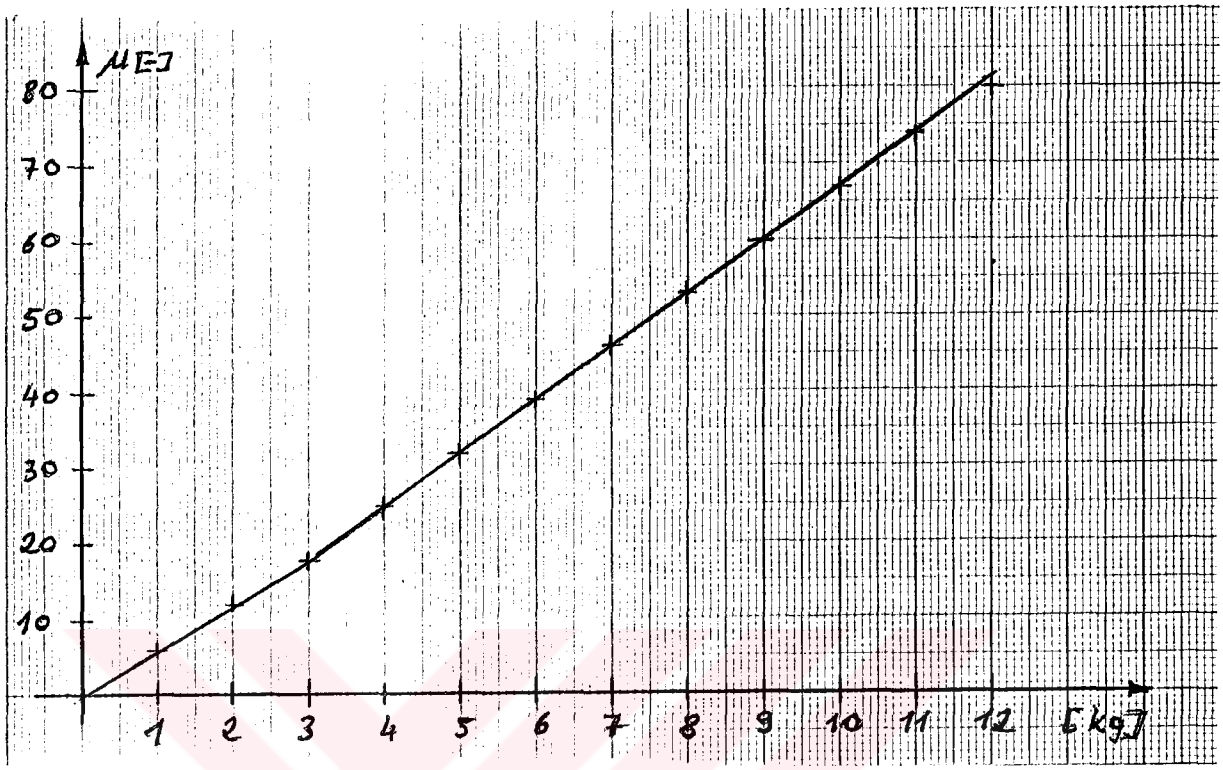
Sürtünme kuvvetini deney esnasında tesbit etmek için numuneyi tutan milin üzerine iki strain gauge yerleştirilmiştir. Bu strain gaugelerden biri çekme zorlamasına maruz kalacak şekilde mile yapıştırılmıştır (Şekil 4.7–4.8 ve 4.10). Buradaki çekme zorlaması sürtünme kuvvetinin etkisi ile oluşmaktadır. Çünkü mil sonsuz vida miline ankastre olarak bağlı ve numunenin bulunduğu uc ise serbesttir. Böylece sürtünme kuvveti F_s'nin etkisi ile mil eğilmeye zorlanır ve ters taraftaki strain gauge'nin bulunduğu kısımda çekme meydana gelir. Strain gauge'lerin uc kabloları şekil değişim oranını ölçen alete (data logger) bağlanmış ve buradan ε şekil değişim oranı alınmıştır. ε şekil değişim oranı deneyden önce, Şekil 4.10 da görüldüğü gibi F_k kalibre yükü ile F_s sürtünme kuvvetine kalibre edilmiştir. F_k yükü 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 8, 9, 10, 11, 12 kg'lık yükler olarak seçilmiş ve bu yükler, Şekil 4.10 da görüldüğü gibi sisteme uygulanmıştır. Bu yüklerin etkisi ile meydana gelen şekil değişim oranları data logger (şekil değişim oranı ölçüm cihazı)' den okunarak, Şekil 4.11 deki kalibrasyon grafiği elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik yardımı ile F_s sürtünme kuvvetlerinin değerleri bulunmaktadır. Bu sürtünme kuvvetleri ve (4.7) bağıntısıyla bulunan normal kuvvetler (4.15) bağıntısına yazılmak sureti ile de μ_d sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Bu şekilde tesbit edilen değerler Ektablo 2a ve 2b de verilmiştir.



Şekil 4.10 a: Kalibrasyon düzeneği (şematik)



Şekil 4.10 b: Kalibrasyon düzeneği



Şekil 4.11: Sürtünme kuvveti kalibrasyon grafiği

4.6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.6.1. Borlama Sonuçları

Bölüm 4.3 de belirtildiği gibi borlanan numunelerden bir kısmı, aşınmadan önce ve sonra metalografik inceleme ve sertlik taramaları yapılabilmesi için Kayseri Taksan firmasında kesilerek bakalite alındı ve parlatıldılar. Parlatılan numunelerin mikro sertlikleri Kayseri Erciyes Üni. Müh. Fak. Makina Bölümünde bulunan Karl Zeiss marka mikro sertlik ölçüm cihazı ile 80 gr'lık deney yükünü 15 saniye uygulayarak ölçüldü. Herbir numuneden alınan sertlik değeri sayısı 11-14 arasında değişmektedir. Mikro sertlik dağılımları Ek tablo 3a - 3b ve 4a - 4b de verilmiştir.

Mikro yapı belirlemeleri için parlatılan numuneler Nital 10 ile dağlandı. Dağlanan numunelerin yapıları, Cum. Üni. Müh. Fak. Mak. Müh. Bölümünde bulunan Nikon Marka optik metal mikroskobunda incelendi ve fotoğraflandılar.

Borlanmış yüzeyin faz özellikleri, Cumhuriyet Üniv. Müh. Fak. Jeoloji Bölümü laboratuvarlarında bulunan Rikagu Marka X-Ray dikraftometre kullanılarak, yüzeyden alınan toz halindeki tabakanın incelenmesi sonucunda belirlenmiştir.

Şekil 4.12 ısıl işlem görmüş (borlanmış) malzemelerin mikro sertlik dağılımlarını göstermektedir. Şekil 4.12 a da farklı zaman ve sıcaklıkta borlanan AISI 1020 çeliğinin, Şekil 4.12 b ise değişik şartlarda borlanmış AISI 5115 çeliğinin mikro

sertlik dağılımını göstermektedir. Şekil incelendiğinde işlem zamanı ve sıcaklığının sertlik üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Her iki çeliktede (AISI 1020 ve 5115) 1.5 saat süreyle 950°C de yapılan borlama sonucu en yüksek sertliğe ulaşılmıştır.

Şekil 4.12 den 950°C de 1.5 saat borlanmış 1020 çeliğinin 2700 HV 0.08, 5115 çeliğinin ise 2850 HV 0.08 sertliğe ulaştıkları görülebilir. Dikkat edilirse sıcaklık azaldıkça sertlikde azalmaktadır. Her iki çelik türünde de 1.5 saat süreyle 950 ve 930 °C de borlanmış numunelerden 930°C de borlanmış olanların maksimum sertlikleri 950°C de borlanmış olanlara göre daha düşüktür. Böylece işlem sıcaklığının borlanmış yüzeyin sertliğine etkisinin olumlu yönde olduğu gözlenebilir. Borlama süresinin etkisi ise her iki çeliktede aynıdır. Yani 930°C de 1.5 ve 3 saat borlanmış aynı cins çeliklerden üç saat süreyle borlanmış olanların daha yüksek sertliğe ulaştığı tesbit edilmiştir. Bu çerçevede Şekil 4.12 a incelendiğinde 3 saat borlanan 1020 çeliğinin aynı sıcaklıkta 1.5 saat borlanmış olanla aynı sertlikte olduğu, Şekil 4.12 b incelendiğinde de aynı sıcaklıkta (930°C) 3 saat borlanmış 5115 çeliğinin 1.5 saat süreyle borlanmış olanla hemen hemen aynı yüzey sertliğine sahip olduğu gözlenebilir.

930°C de 1.5 saat süreyle borlanan her iki çelikte elde edilen en yüksek sertlik 1020 çeliği için yaklaşık 2320 HV 0.08 ve 5115 çeliği için 2440 HV 0.08 dir. Etkili sertlik değeri 1020 çeliği için 259 HV 0.08 ve 5115 çeliği için ise 260 HV 0.08 dir. Bunlara karşılık gelen etkili sertlik derinliği ise 1020 çeliği için 68 μm ve 5115 çeliği için 55 μm dir. Fakat 930°C de 3 saatlik sürede borlanan her iki çelikte ise en yüksek sertlik 1020 çeliği için 2320 HV 0.08 ve 5115 çeliği için ise 2440 HV 0.08 olarak elde edilmiştir. Etkili sertlik değeri ise 1020 çeliğinde 311 HV 0.08 ve 5115 çeliğinde ise 328 HV 0.08 dir. Etkili sertlik derinlikleri ise 1020 çeliğinde 70 μm, 5115 çeliğinde 61 μm olarak tesbit edilmiştir. Diğer taraftan 950°C de 1.5 saat süreyle borlanan her iki çelikte en yüksek sertlik 1020 çeliği için yaklaşık 2710 HV 0.08 ve 5115 çeliği için ise 2860 HV 0.08 olarak belirlenmiştir. Etkili sertlik değeri 1020 çeliğinde 368 HV 0.08 ve 5115 çeliğinde ise 351 HV 0.08 olup etkili sertlik derinliği ise 1020 çeliği için 72 μm ve 5115 çeliği için 82 μm bulunmuştur. Tesbit edilen bu değerlere göre artan sıcaklık ve süre ile sertlik ve tabaka kalınlığı artmaktadır.

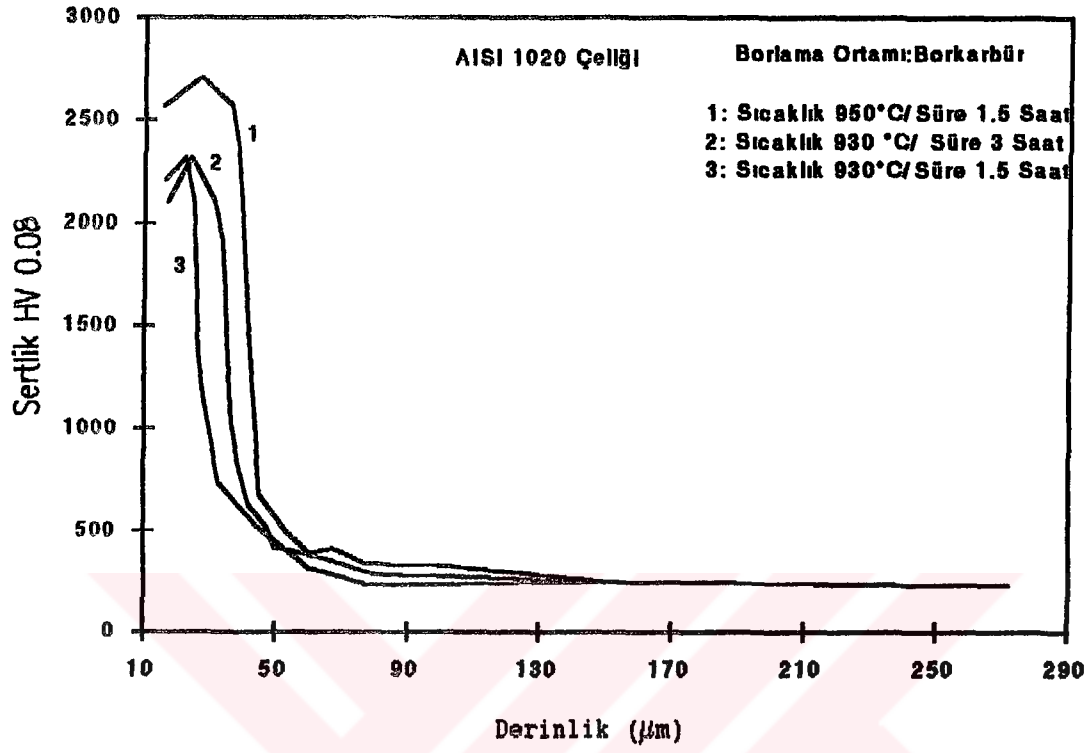
Gerek yukardaki izahatlar gerekse şekillerden anlaşıldığı gibi elde edilen sonuçlar literatürle uyum içindedir. Sıcaklığın borlanmış tabaka derinliğine etkisi, sertliğe olan etkisiyle benzeşmektedir. Yani yüksek işlem sıcaklıkları daha derin tabakalar vermektedir. Mesela 930°C de 1.5 ve 3 saat süreyle borlanmış her iki cins çelikten 3 saat borlanmış olanların sertlik derinlikleri diğerlerine göre daha fazladır. Ayrıca daha yüksek sıcaklıkta (950°C) fakat daha kısa süreyle (1.5 saat) borlanan çeliklerde daha derin tabakalar elde edilmiştir. Çünkü 2. Fick difüzyon kanununa göre difüzyon katsayısı ile sıcaklık arasında

$$D = D_0 e^{-Q/RT}$$

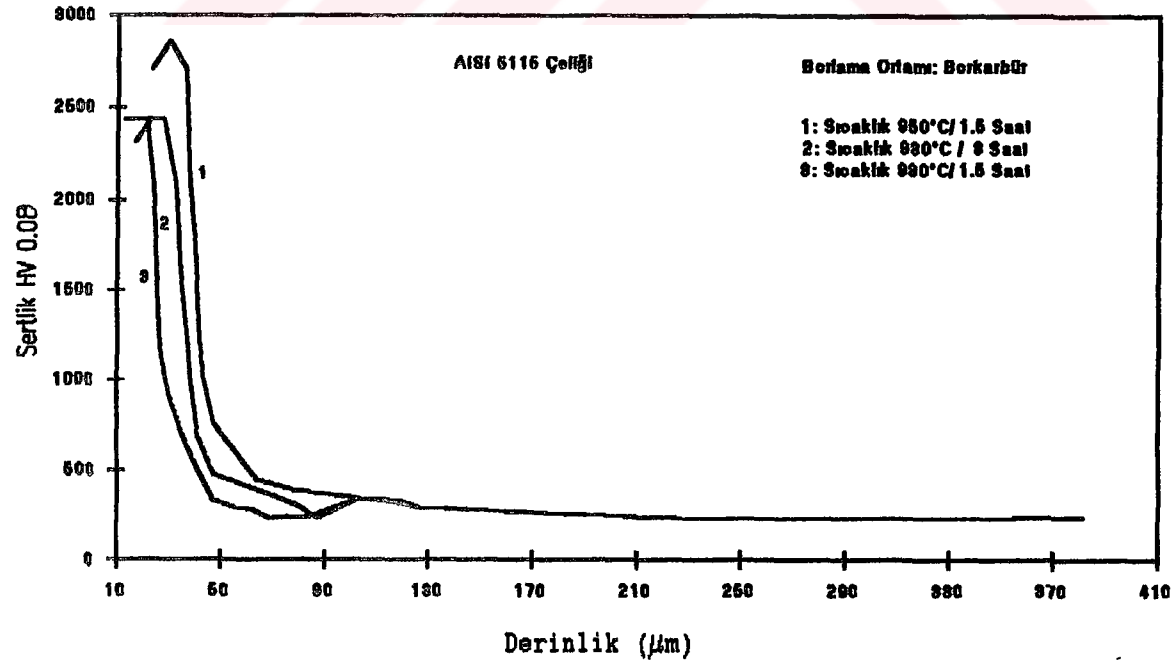
ve tabaka kalınlığı ile difüzyon katsayısı arasında

$$d_k^2 = 2Dt$$

şeklinde bağıntılar mevcuttur [75,79]. Bu bağıntılara göre artan sıcaklık ile difüzyon katsayısı ve dolayısıylada tabaka kalınlığı artmaktadır.



a)



b)

Şekil 4.12: Farklı Sıcaklık ve Sürede Borlanan Deney Malzemelerinde Mikro Sertlik Dağılımı

Bu bağıntılarda;

T = Mutlak sıcaklık (°K)	D = Difüzyon katsayısı (cm^2/sn)
d_k = Tabaka kalınlığı (cm)	D_0 = Frekans faktörü (cm^2/sn)
t = zaman (saniye)	Q = Aktivasyon enerjisi (Kcal/mol)
	R = Gaz sabiti (1.987 Kcal/mol K)

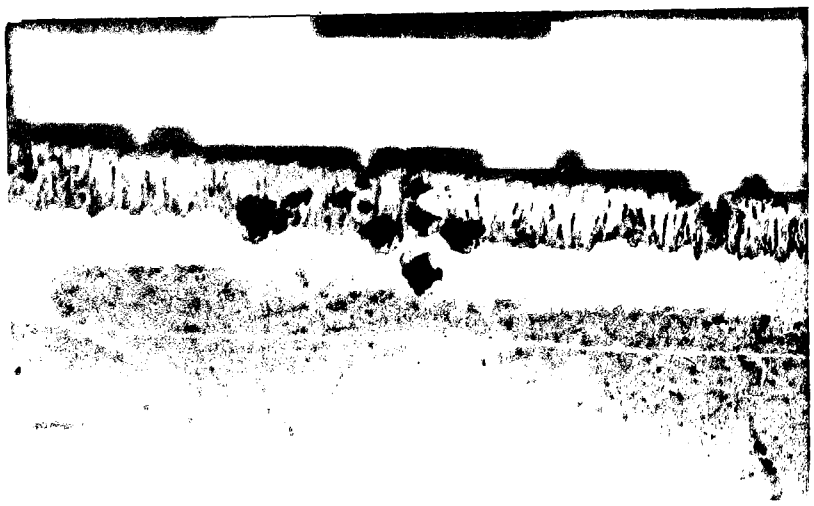
olarak tanımlanır. Bu durum tabaka derinliğine işlem sıcaklığının süreden çok daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Malzemenin çekirdek sertliğinin %10 fazlası olarak belirlenen sertlik değerine karşılık gelen derinlik sertleşen tabaka derinliği olarak alınır [60]. Buna göre işlem süresi tabaka derinliğini artırıcı yönde rol oynamaktadır. Çünkü aynı sıcaklıkta olmasına rağmen daha uzun süre işlem gören çeliklerde tabaka derinliği daha fazladır. 930°C de 1.5 ve 3 saat borlanan her iki çelik cinsinde de elde edilen sertleşmiş tabaka derinlikleri bu durumu ortaya koymaktadır (Şekil 4.12 a ve b). Yine aynı şekillerden izlenebileceği üzere etkili sertlik derinlikleride aynı şekilde etkilenmektedir. Yani işlem sıcaklığı ve süresi arttıkça her iki çelik cinsi için de etkili sertlik derinlikleri artmaktadır.

Aynı şartlarda borlanmış her iki cins malzeme karşılaştırıldığında, genel olarak AISI 5115 çeliğinde daha yüksek yüzey sertliklerine ulaşıldığı görülür. Ancak burada artan sürenin AISI 5115 çeliğinde fazla bir sertlik kaybına sebep olmadığı ve AISI 1020 çeliği ile yaklaşık aynı sertliği verdiği söylenebilir. Yaklaşık aynı oranda karbon ihtiva etmelerine rağmen AISI 5115 çeliğinde, aynı şartlar için AISI 1020 çeliğine göre daha yüksek sertlik ve fakat daha ince etkili sertlik derinliği elde edilmesi, bu çelikteki alaşım elemanlarının borlamaya etkili olduğunu ortaya koymaktadır. AISI 5115 çeliğindeki alaşım elementlerinden Mn'ın tabaka oluşumuna etkisi yoktur, fakat Cr'un etkisi vardır (Şekil 3.15) [72,79]. Bu etki, tabaka kalınlığını azaltırken tabaka geometrisinide değişikliğe uğratır. Bu nedenlede aynı şartlarda borlanan her iki çelikten alaşımlı olanın tabaka kalınlığı daha azdır. Buna rağmen tabaka kalınlıklarındaki farkın çok az olması, sertliğin ön plana çıktığı yerlerde alaşımlı bir çeliğin yerine borlanmış sade bir çeliğin kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu ise borlamanın büyük bir avantajını vurgulamaktadır.

Şekil 4.13 a ve b den görülebileceği gibi yüzeyin oldukça sert ve tabakanın ince olması sebebiyle en üst kenardan ölçüm yapılamamıştır. Ancak yinede bu amaç için uğraş verilmiş fakat kenar tabakanın çatladığı görülmüştür (Şekil 4.14).

Şekil 4.15, 930°C sıcaklık ve 1.5 saat sürede borlanan AISI 1020 çeliğinin mikro yapısını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi borlanmış tabaka beyaz olarak görülen ve difüzyon bölgesi üzerinde girintili çıkıntılı (dişli) şekilde oluşmuş Fe_2B fazından ibaret borlu tabakadan oluşmuştur. Borlu tabakanın kalınlığı yaklaşık 68 µm olup hemen onun altında difüzyon bölgesi uzanmaktadır. Çok sert ve ince olan borlu tabaka dişli yapısıyla difüzyon bölgesine sıkıca tutunmuştur. Böylece mekanik zorlanmalar sonucu yüzeyden kaldırılması oldukça zordur. Çok sert olması dolayısıyla (2320 HV 0.08) aşınmaya oldukça dayanıklı ve fakat kırılgan bir özellik göstermektedir. Difüzyon bölgesi ise çok daha derin ve yumuşaktır. Borlu tabakayı desteklemesi açısından çekirdeğe göre daha sert oluşu geçişin ani olmamasını sağlar ve tabakayı daha güvenli kılar.



a: Borlu AISI 1020 çeliği



b: Borlu AISI 5115 çeliği

Şekil 4.13: Aşınmadan önceki mikro sertlik ölçüm bölgesinin görünümü (x50)

Şekil 4.16 da görüldüğü gibi borlu tabakanın altında uzanan difüzyon tabakası oldukça derin olup bölge iri tanelidir. Çünkü 1.5 saat, 950 °C gibi yüksek bir sıcaklığa maruz kalmıştır. Böylece temperleme ile taneler irileşmiştir. Ayrıca bünyeye difüze olan bor çelikteki alaşım elemanlarını (Cr, Mn) derinlere doğru yayınmaya zorlamıştır. Böylece bölge iri taneli olurken matrix'in (çekirdek malzemesi) tane yapısı incelmiştir.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ



Şekil 4.14: Borlu AISI 5115 çeliğinin mikrosertlik ölçümünde çatlayan tabaka (x100)

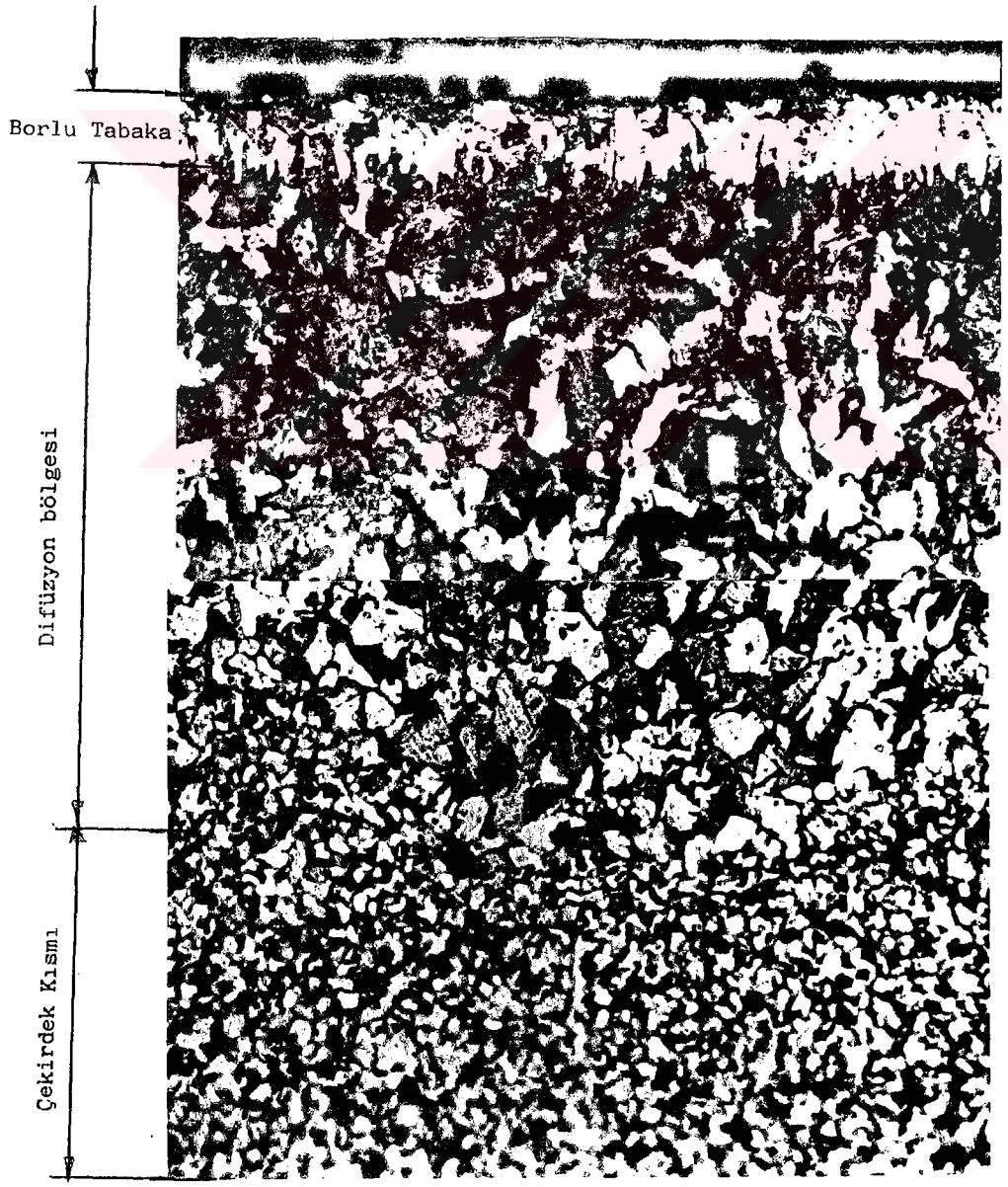


Şekil 4.15: Borlanmış AISI 1020 çeliğinin mikro yapısı (x50)930°C de 1.5 saat süreyle B_4C borlandı

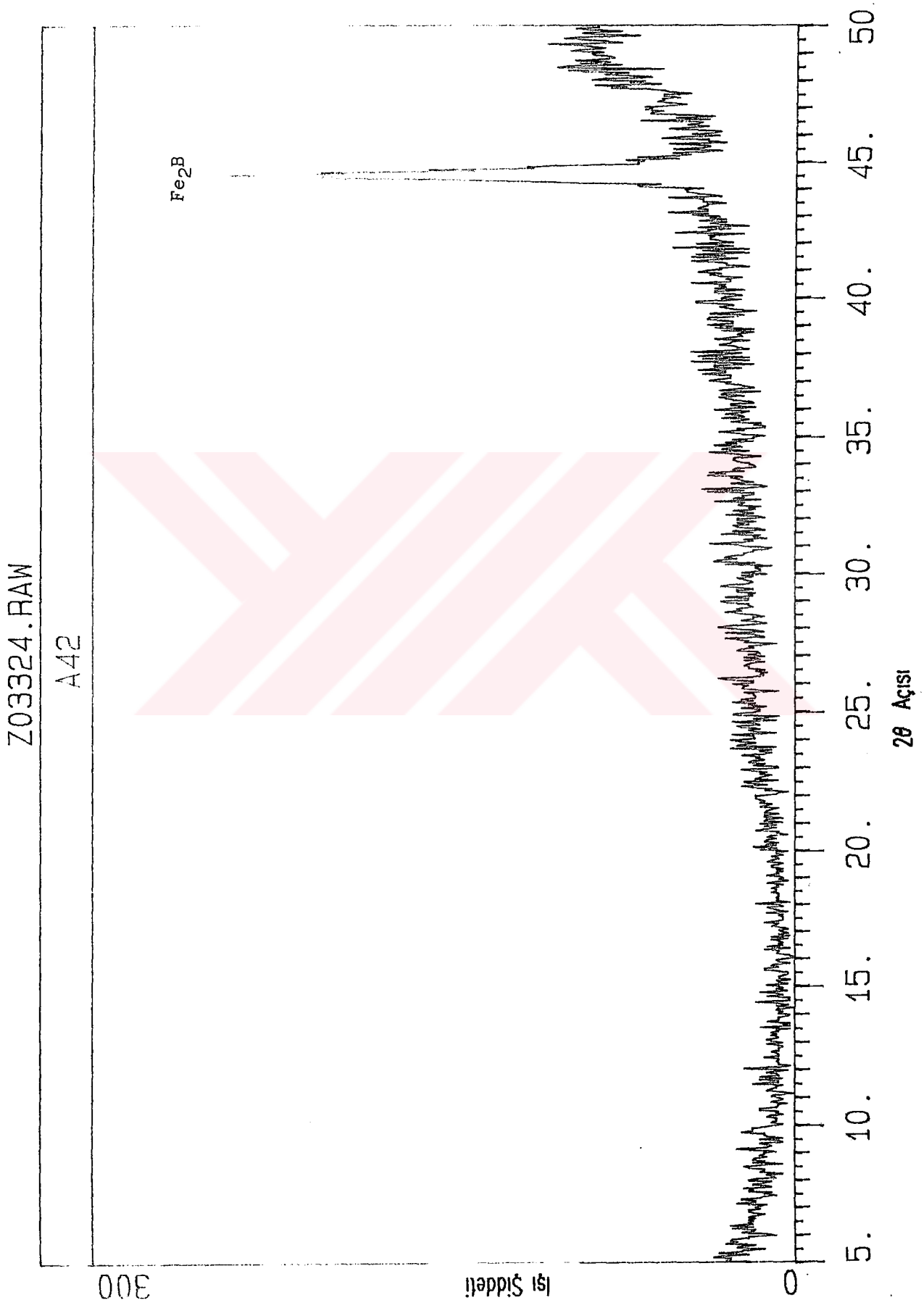
Şekil 4.17 de görüldüğü gibi borlanmış tabakanın faz yapısı X– ışını yardımıyla belirlenmiş ve bu fazın Fe_2B (demir borür) den ibaret tek fazlı bir yapı olduğu tesbit edilmiştir. Tek fazlı (Fe_2B) olan bu yapı çok fazlı (FeB+Fe_2B) yapılara göre daha sünek ve aşınmaya dayanıklıdır. Çünkü çok fazlı yapılarda farklı iç gerilmeler oluşmaktadır. Fe_2B fazı, mekanik özellikler açısından arzu edilen ideal fazdır [79]. Çünkü bu faz iç gerilmesizdir. Yapının tek fazlı Fe_2B şeklinde oluşmasında etken bor verici ortam sıcaklık ve süredir. Çünkü düşük sıcaklık ve kısa sürelerde B_4C toz ortamında yapılan borlama neticesinde

ortamdaki bor bileşiğinden ayrılan bor demirle birleşerek bu fazı oluşturur. Bor verici ortamın farklı bor bileşiği ihtiva etmesi tabaka fazında değiştirir. Yüksek sıcaklıklarda uzun süre yapılan borlama sonucu değişik fazlarda oluşur. Meselo DIN 90MnV8 çeliği 800°C de 8 saat borkarbürde borlanarak Fe_2B fazı elde edilmiştir. Ayrıca St 37 çeliği 900°C de 4 saat borlama sonucu FeB + Fe_2B fazlı borür tabakası elde edilmiştir. Aynı çeliğin 1000 °C de 6 saat borlanması sonucu 320 µm kalınlığında Fe_2B tabakası elde edilmiştir [Şekil 3.17]. 800°C de 2–3 saat sürelerde yapılan borlamada ise yaklaşık 40 µm lik Fe_2B fazı elde edilmiştir [72].

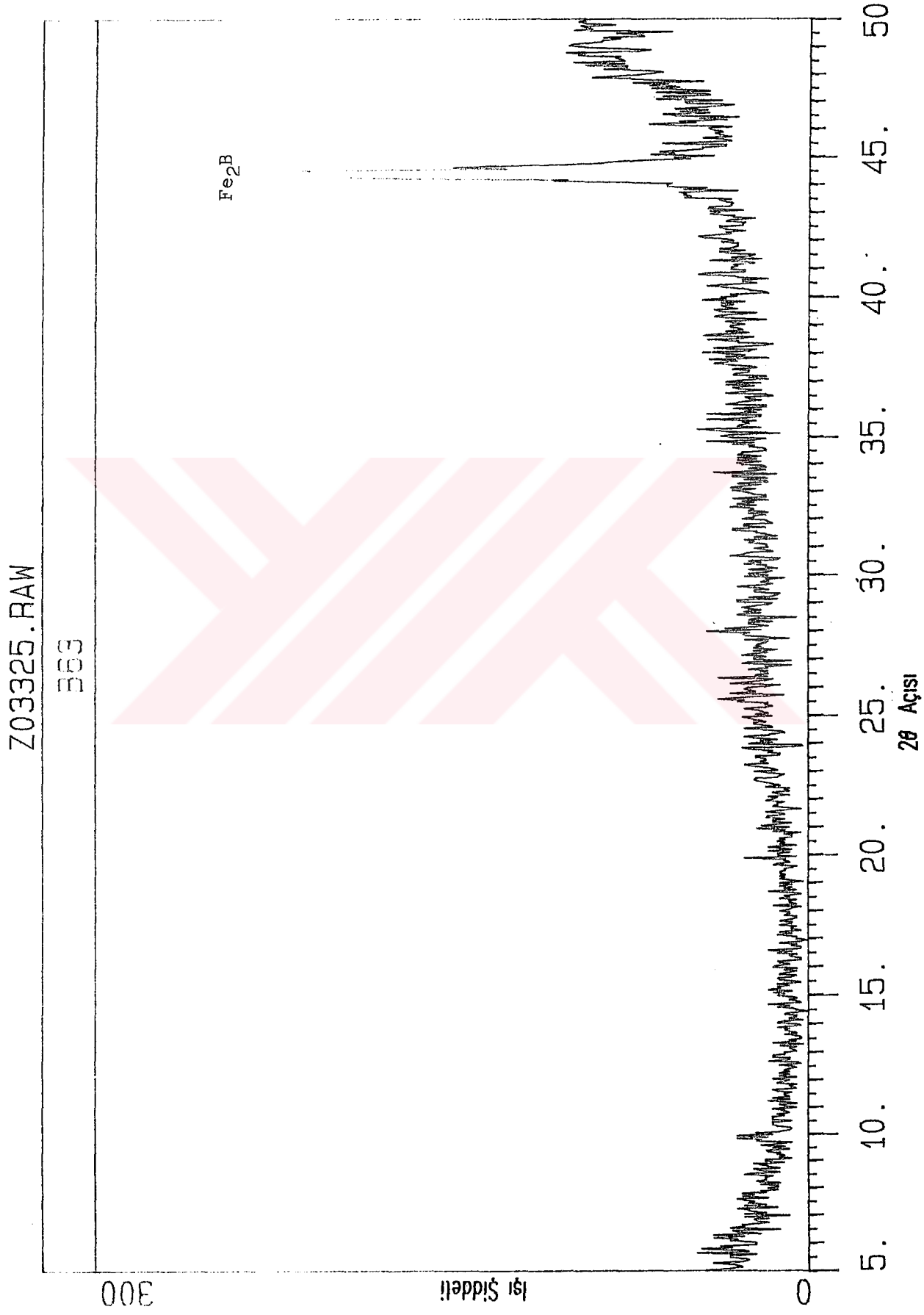
Şekil 4.17 a ve b den görülebileceği gibi AISI 1020 ve 5115 çelikleri bileşimlerine bağlı olmadan bor verici ortamın, borlama süresinin ve sıcaklığının etkisi ile aynı faz yapısını yani Fe_2B yi vermişlerdir.



Şekil 4.16: 950 °C 'de 1.5 saat B_4C içinde borlanmış AISI 5115 çeliğinin mikro yapısı (x50)



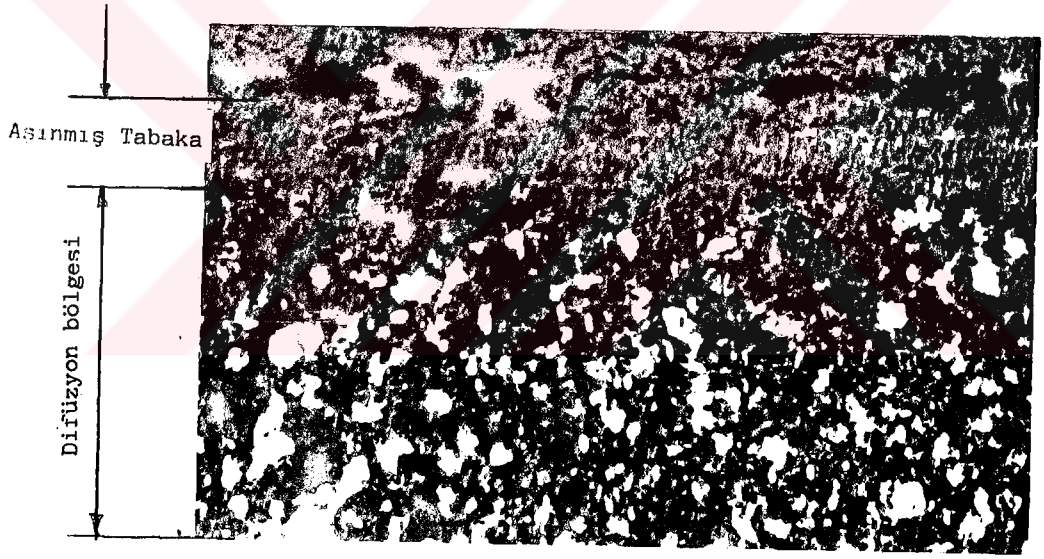
Şekil 4.17 a: X– ışınıyla belirlenen borlu tabakanın faz yapısı (AISI 1020)



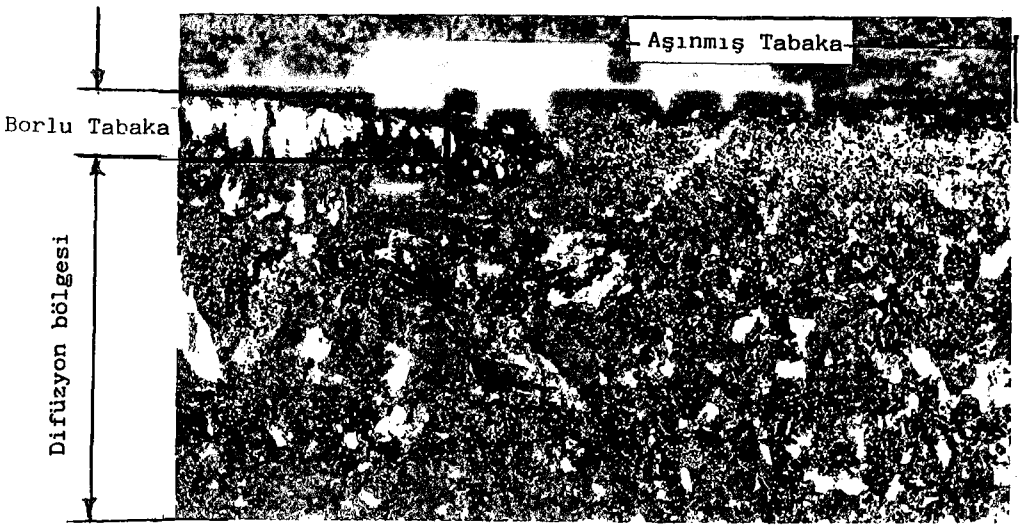
Şekil 4.17 b: X– ışınıyla belirlenen borlu tabakanın faz yapısı (AISI 5115)

4.6.2 Borlanmış Yüzeylerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları

Şekil 4.18 a ve b ile Şekil 4.19 a dan görüldüğü gibi borlu tabaka tamamen aşınmıştır. Şekil 4.19 b de ise düşük yük ve sürelerde tamamen aşınmamıştır. Bu şekillerdeki çeliklerde aşınmadan önceki tabaka sertlikleri AISI 1020 çeliği için 2320, 5115 için 2440 HV 0.08, tabaka kalınlıkları ise Şekil 4.18 a ve b için 70 μm iken Şekil 4.19 a ve b için 61 μm dir. Çünkü aşınmaya tabi tutulan çelikler 930°C sıcaklığında 3 saat süreyle borlanmış olanlardır. Aşınmadan sonra ise Şekil 4.18 a,b ve 4.19 a dan görüldüğü gibi borlu tabakalar tamamen aşınmış olup tabaka sertlikleri sırasıyla 550, 700 ve 500 HV 0.08 inmiştir. Şekil 4.19 b deki çelikte ise aşınmadan sonraki sertlik yaklaşık 2000 HV 0.08 olarak ölçülmüştür. Çünkü bu tabaka şekilden de görüldüğü gibi tamamen aşınmamıştır. Aynı durum Şekil 4.20 b'den de görülmektedir. Takriben tabaka kalınlığının yarıdan biraz fazlası aşınmıştır. Şekil 4.20 a ve b den görüldüğü gibi ilk değerlerin çoğunluğu takriben 90–100 μm derinliğe kadar difüzyon değerlerini vermektedir. Bu değerlerden sonra ise çekirdek malzemesinin sertliğine inilmektedir.

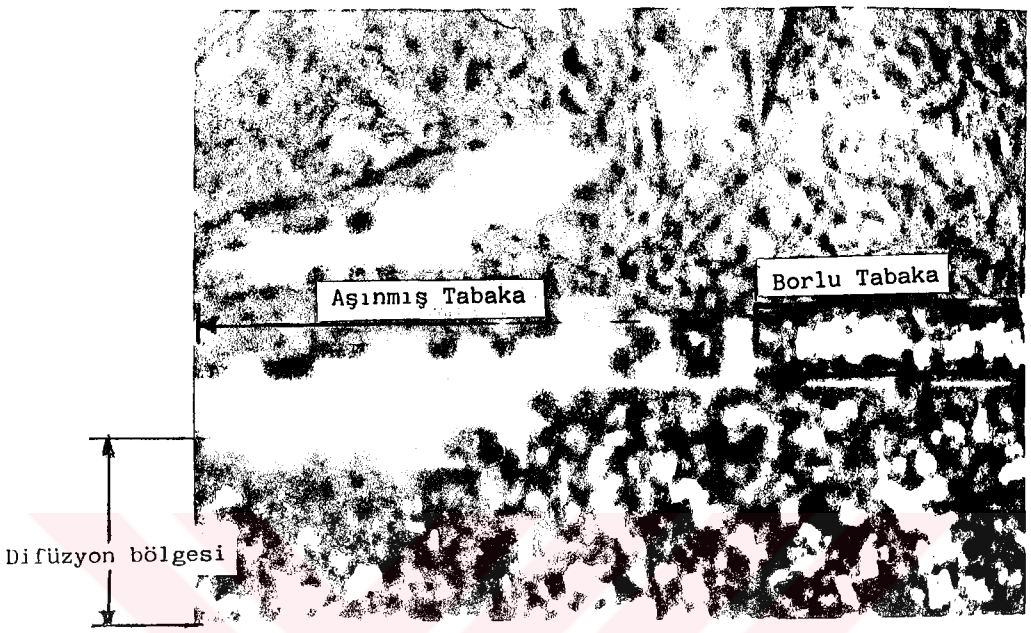


a) AISI 1020

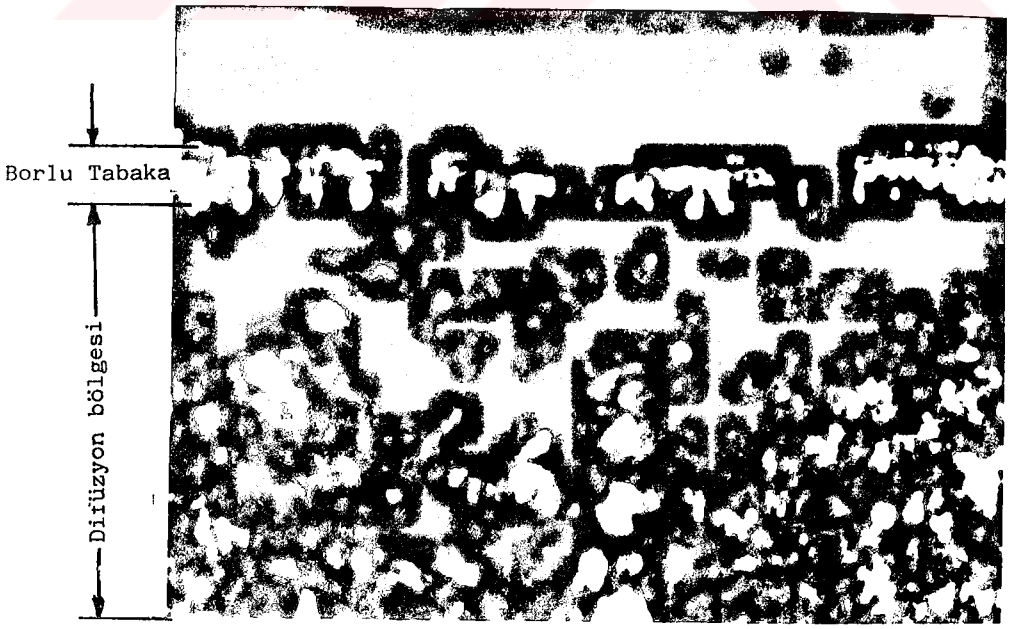


b) AISI 1020

Şekil 4.18: Borlanmış AISI 1020 çeliğinde tamamen aşınmış tabaka



a) AISI 5115



b) AISI 5115

Şekil 4.19: Borlanmış AISI 5115 çeliğinde aşınmış tabaka;
a) Tabaka tamamen aşınmış,
b) Tabakanın bir kısmı aşınmış

Şekil 4.20 deney malzemelerinin aşınma sonrası sertlik dağılımını göstermektedir. Şekil 4.20 a dan izlenebileceği gibi yaklaşık 300 HV 0.08 olan matrik sertliğine karşı 5.67 kg yük altında çalışmadan sonra max. yüzey sertliği 720 HV 0.08ye, 15.03 kg yük için 650 HV 0.08 ye ve 11.1 kg yük için 570 HV ye düşmüştür. Bu durum Şekil 4.20 b de gösterilen 5115 çeliği için sırasıyla 15.03 kg yükte 1980 HV 0.08, 5.67 kg yükte 600 HV 0.08 ve 11.1 kg yükte ise 510 HV 0.08 şeklinde gerçekleşmiştir. Gerçekte sertlik azalması söz konusu olmayıp yüzeyden aşınan tabaka nedeni ile tabaka kalınlığı azalmış ve bu azalış bahsedilen sertliklere karşılık gelen tabaka kalınlığına kadar olmuştur.

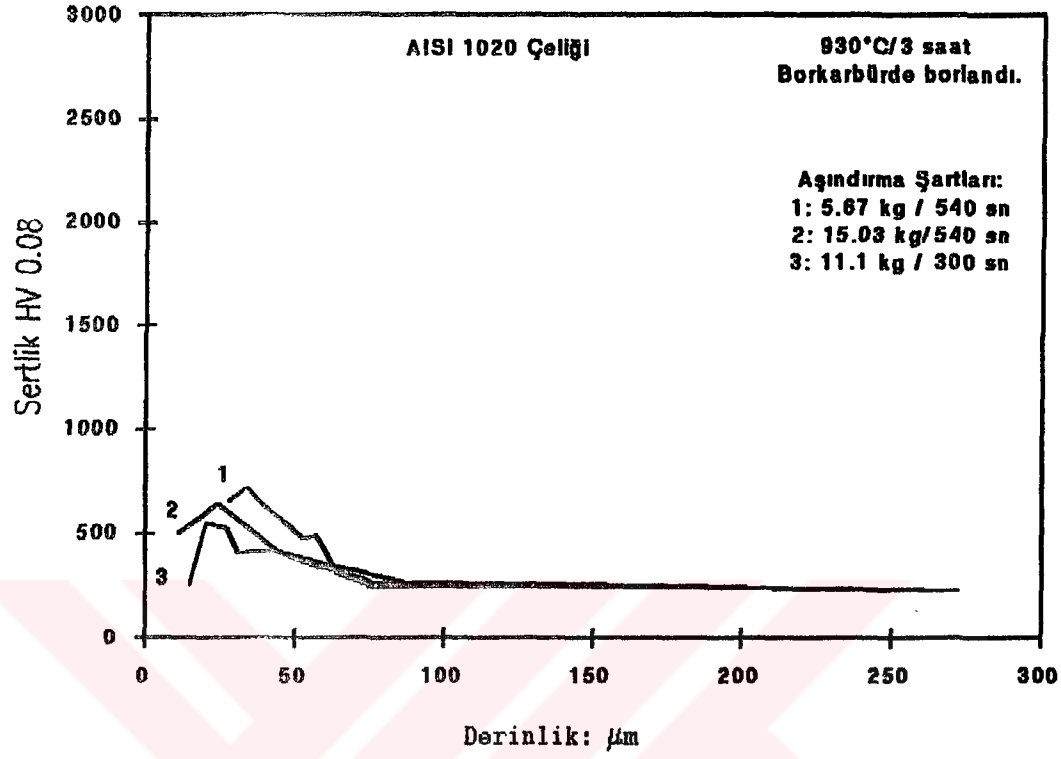
Şekil 4.18 a ve b aşınma sonucu borlanmış sert tabakasını kaybetmiş numunelerin mikro yapılarını göstermektedir. Buradanda görülebileceği gibi tabaka tamamen kaybolmuş ve difüzyon bölgesine gelinmiştir. 5.67 kg yükte 540 sn ve 11.1 kg yükte 300 sn süreyle sabit hızda aşındırılmış AISI 1020 çeliğinin sertlik dağılımına uygun olarak sertliği 720 HV 0.08 ve 570 HV 0.08 olan difüzyon tabakasına inilmiştir. 11.1 kg yükte 540 sn süreyle çalışma şartlarında ise AISI 5115 çeliğide borlu tabakasını tamamen kaybetmiştir (Şekil 4.19 a). Şekil 4.19 b incelendiğinde bir miktar Fe_2B fazının mevcudiyeti görülebilir. Borlanmış AISI 5115 çeliği olan bu numunenin sertliği yüksek olduğundan 15.03 kg yükte 180 sn çalışma şartları altında sert tabakasının tamamını kaybetmemiştir. Bu durum Şekil 4.20 b ile uyum içerisindedir. Buradan, aşınma direnci bakımından sertliğin önemi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca borlama şartlarından kalın sert tabaka verenler kuru şartlar altında çalışacak malzemeler için daha uygundur.

Bunun anlamı borlanan malzemelerin kuru sürtünme şartları ve ağır yükler altında aşınma dirençlerinin beklenen seviyede olmadığıdır. Yağlı sürtünme şartları mevcut malzemeleri daha dayanıklı kılacaktır.

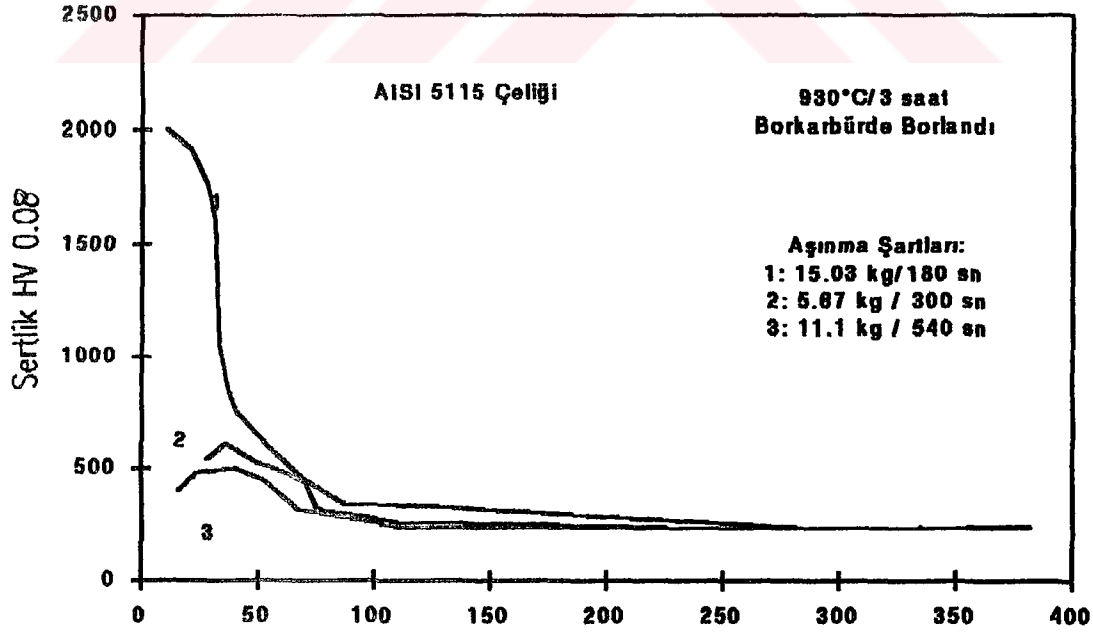
Diğer taraftan deney esnasında aşırı ısınma meydana gelmiştir. Bu nedenle 15.03 kg (147.5 N) luk yükle normalize ve semente edilmiş numunelerde pek çalışılmamıştır. Aşırı ısının etkisi ve özellikle borlu tabakalar ile difüzyon bölgesine geçiş yerlerindeki iç gerilmelerin etkisi ile tabakalarda belirli bir süre sonra çatlamalar meydana gelmiştir (Şekil 4.21 – 4.28).

Bu çatlaklar Şekil 4.21 – 28 dende görüldüğü gibi sadece AISI 5115 çeliğinde görülmüştür. Bu sebepten dolayı genelde alaşımlı çeliklerin borlamadan sonra sementasyon veya nitrürasyon yöntemleri ile tavlamaya tabi tutulmaları literatürde tavsiye edilmektedir.

Sürtünme yüzeylerinin belli yük altında etkileşimi sonucu borlanmış sert yüzeyler tabaka tabaka çatlamışlardır (Şekil 4.21, 22). Yüzeylerde tekrarlanan çekme ve basma gerilmeleri sebebi ile başlayan çatlaklar zamanla ilerlemiş ve tabakaların pullanması şeklinde yorulma ortaya çıkmıştır. Küçük bölgeler halinde birbirinden bağımsız ve sadece yüzeye tutunan sert tabakalar sürtünme kuvvetlerinin etkisi ile yüzeyden kopmuş ve ara yüzeye serbestce yayınarak aşınma mekanizmasını abrosive çevirmiştir. Serbest kalan bu sert parçacıklar yüzeyi çizerek derin izler bırakmış ve aşınmanın hızla artmasına yol açmışlardır (Şekil 4.23, 24). Burada tabakanın aşırı sert ve kırılgan oluşu etkili olmuştur. Bu durum borlanmış AISI 1020 çeliğinin aşınmış yüzeylerinden alınan fotoğraflarlada tesbit edilmiştir (Şekil 4.25–28). Buradaki aşınma izleri sürtünme yüzeyine paraleldir. Her ne kadar X–ışını ile belirlemede oksite rastlanmamış ise de (Şekil 4.29 a ve b) fotoğraflardan görülebileceği gibi, yüzeye yapışmış oksit tabakaları tesbit edilmiştir (Şekil 4.21–28). Oksit oluşumu sürtünme sıcaklığı sebebi ile hızlanmış ve parçalanarak yüzeyin çizilmesine sebep olmuştur.



a)

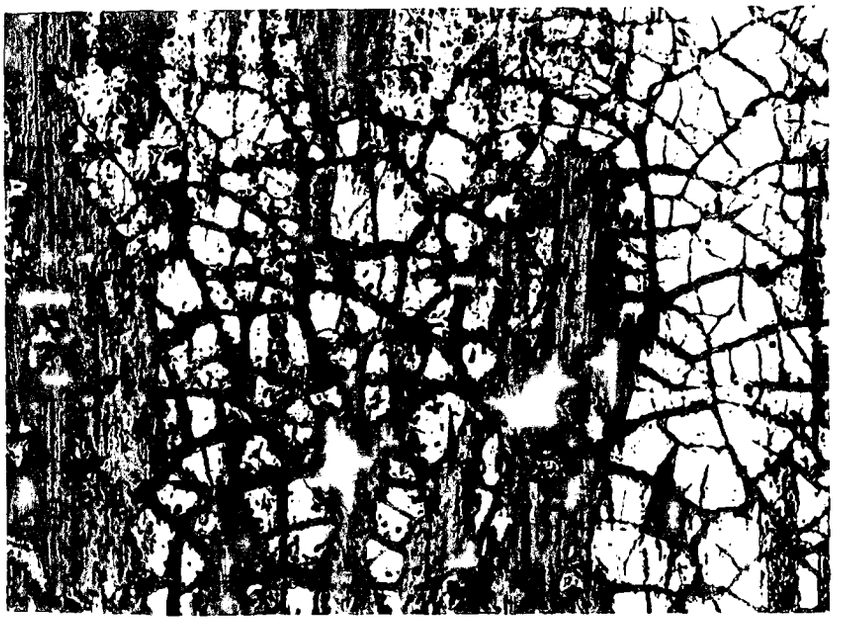


b)

Şekil 4.20: Deney malzemelerinin aşınma sonrası mikro sertlik dağılımı



Şekil 4.21: Borlu AISI 5115 Çeliğinini Aşınmış Yüzeyi
(147.5 N yük ve 420 saniyede)



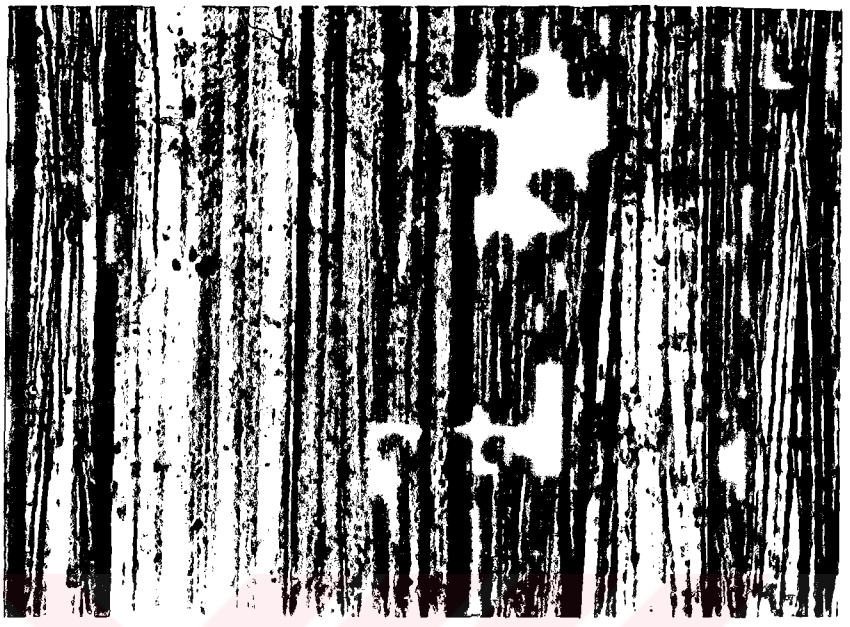
Şekil 4.22: Borlu AISI 5115 Çeliğinin Aşınmış Yüzeyi
(109 N yük ve 300 saniyede)



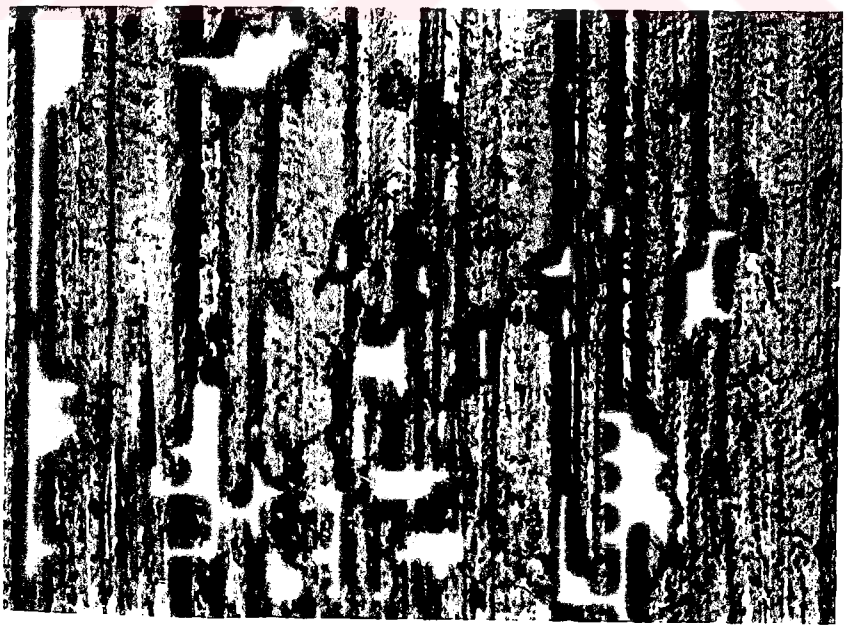
Şekil 4.23: Borlu AISI 5115 Çeliğinini Aşınmış Yüzeyi
(55.6 N yük ve 60 saniyede)



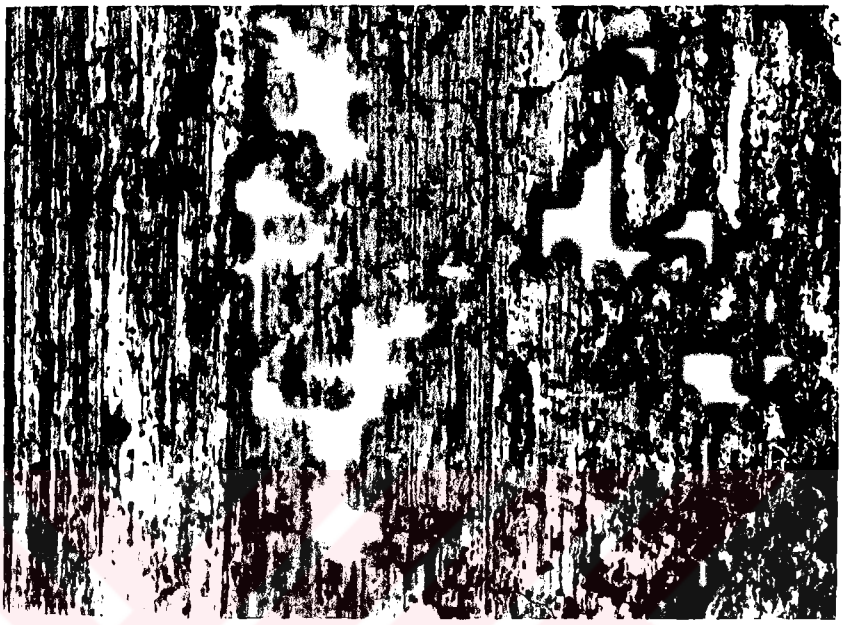
Şekil 4.24: Borlu AISI 5115 Çeliğinin Aşınmış Yüzeyi
(109 N yük ve 420 saniyede)



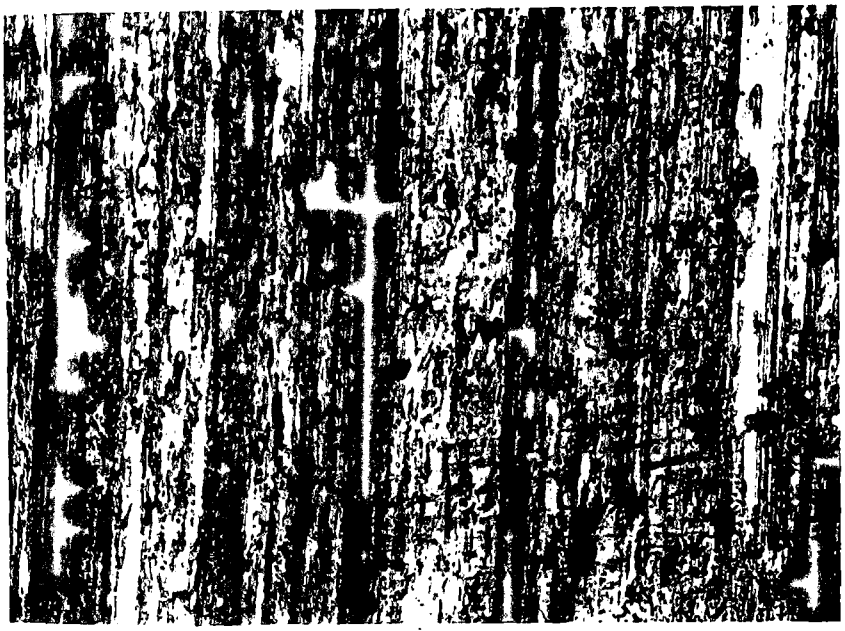
Şekil 4.25: Borlu AISI 1020 Çeliğinini Aşınmış Yüzeyi
(109 N yük ve 300 saniyede)



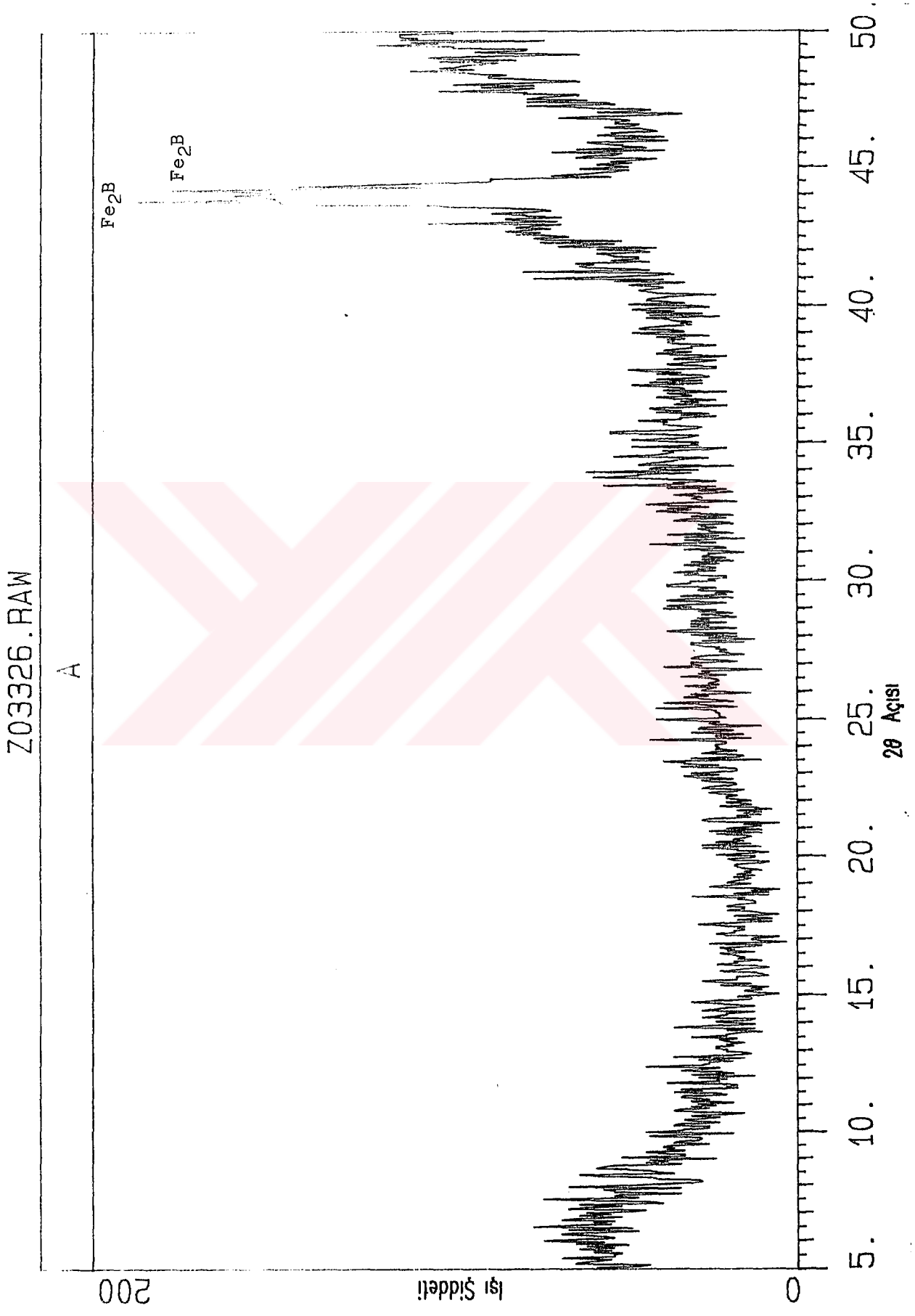
Şekil 4.26: Borlu AISI 1020 Çeliğinin Aşınmış Yüzeyi
(147.5 N yük ve 420 saniyede)



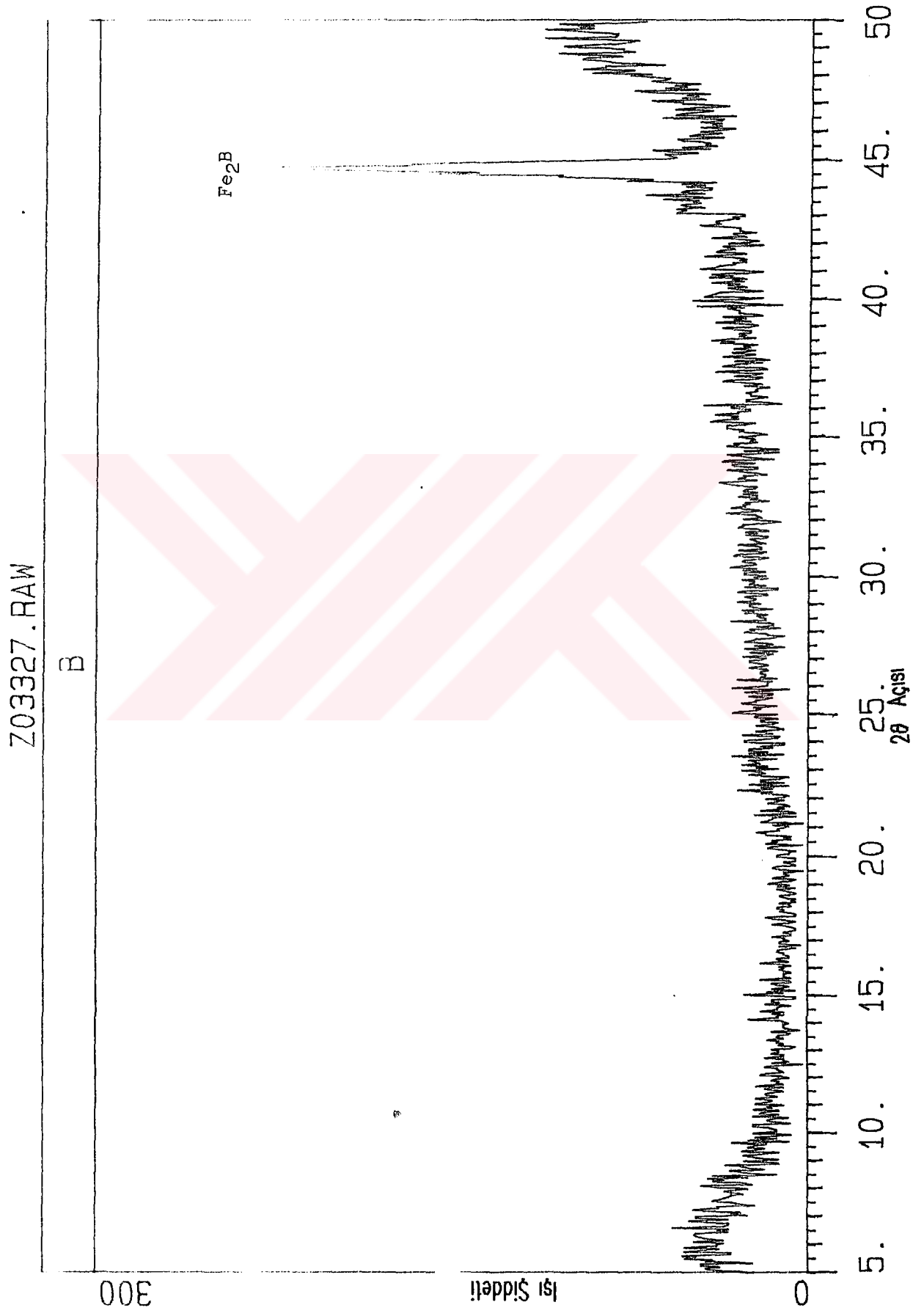
Şekil 4.27: Borlu AISI 1020 Çeliğinini Aşınmış Yüzeyi
(109 N yük ve 180 saniyede)



Şekil 4.28: Borlu AISI 1020 Çeliğinin Aşınmış Yüzeyi
(55.6 N yük ve 300 saniyede)



Şekil 4.29 a: Borlu tabakanın aşınma partiküllerinin X- ışını ile belirlenen faz yapısı (AISI 1020)



Şekil 4.29 b: Borlu tabakanın aşınma partiküllerinin X– ışını ile belirlenen faz yapısı (AISI 5115)

Ayrıca 930°C de 1.5 ve 3 saat sıvı ortamda Semente edilmiş olan AISI 5115 çeliğinin mikro sertlik taraması 25 saniye süreyle 200 gr lık yükte yapılmıştır ve etkili sertlik ile etkili derinlik tesbit edilmiştir (Grafik 1).

AISI 5115 çeliği 930°C de 3 saat semente edildikten sonraki sertliği 795 HV 0.20 iken aynı şartlarda borlandıktan sonra 2440 HV 0.08 olarak tesbit edilmiştir. Aynı çelikte 930°C de 1.5 saat yapılan sementasyon ile 744 HV 0.2 ve aynı şartlarda borlama sonucunda ise 2440 HV 0.08 sertliğe ulaşılmıştır. Bu sonuca göre borlama sonucu ulaşılan sertlik sementasyonla elde edilenin en az 3 katından daha fazladır.

930°C de 3 saatlik sementasyon ile ulaşılan etkili sertlik değeri 550 HV 0.2 iken aynı şartlarda borlama ile 328 HV 0.08 etkili sertlik derinliği ise semente edilmiş 0.487 mm, borlanmışta da 0.061 mm dir. 930°C de 1.5 saatlik sementasyon sonucu etkili sertlik değeri 550 HV 0.2 borlamada 260 HV 0.08 olarak tesbit edilirken etkili derinlik ise 0.230 mm ve 0.055 mm olarak belirlenmiştir.

Aynı sıcaklıkta (930°C) fakat farklı sürelerde (1.5 ve 3 saat) sementasyon sonucu elde edilenin sırası ile 4 ve 6 katı kadardır.

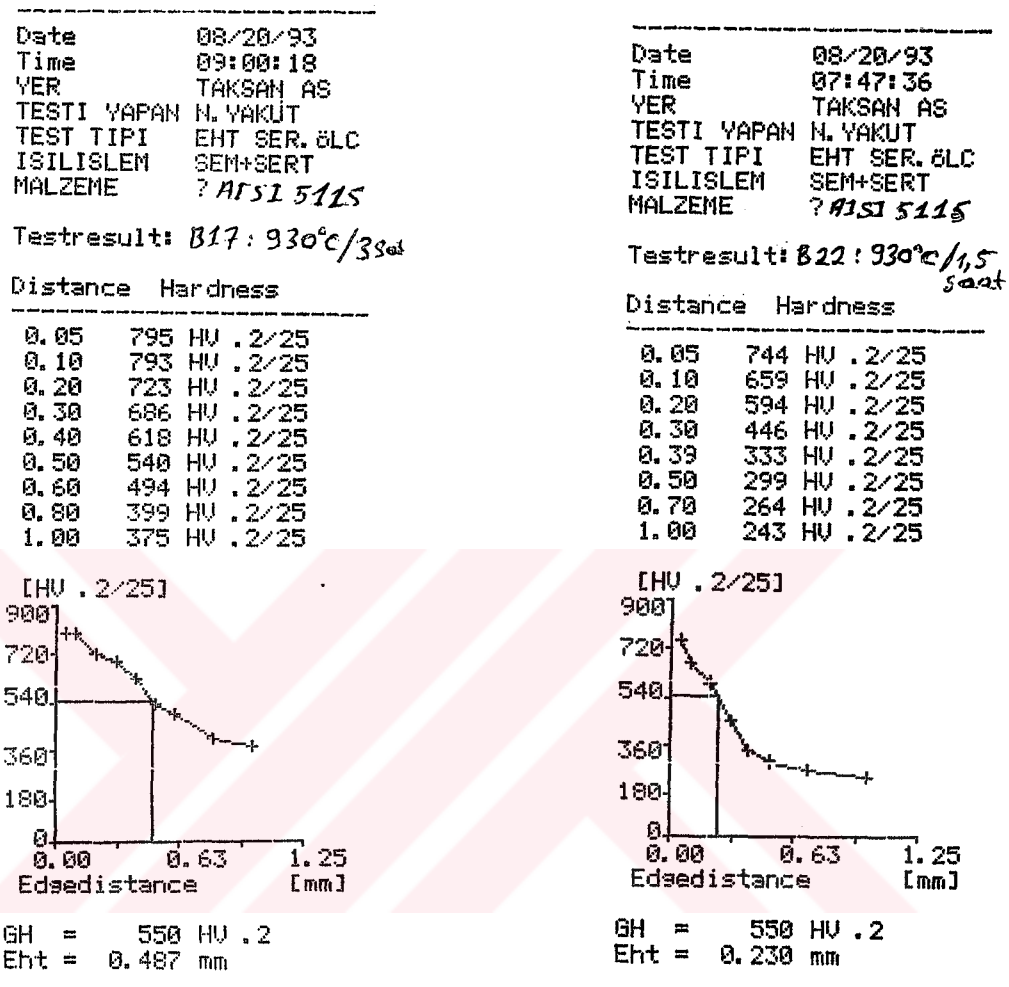
Bu sonuçlara göre ince ve sert borlu tabakaların kalın ve daha az sertlikteki semente tabakalardan daha fazla sürtünme ve aşınmaya karşı dayanıklıdırlar.

4.6.2.1. Sürtünme Kuvvetinin Normal Yük ve Kayma Mesafesi ile Değişimi

4.30 dan 4.47 ye kadar olan şekiller normal yük ve aşınma süresi veya kayma mesafesi ile sürtünme kuvveti değişimini göstermektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi iki farklı sürtünme ortaya çıkmaktadır. Bunlar alışma (kararsız) sürtünme ve kararlı sürtünmedir.

Başlangıçta sürtünme kuvvetinin hızla arttığı ve belirli bir değere ulaştıktan sonra küçük aralıklarla değiştiği gözlenmiştir. Ek Tablo 2 a da görülen sürtünme kuvveti değerleri sürekli değişen değerlerin ortalaması şeklinde elde edilmişlerdir. Şekillerden görüldüğü gibi sürtünme kuvvetleri AISI 1020 çeliğinde normalize durumunda 3–10 kg a (29.5–98 N), semente durumunda 2.5–9 kg (24.5– 89 N), borlu durumda 3–6 kg (29.5–59 N) ve AISI 5115 çeliğinde ise normalizede 1–9 kg (9.8–89 N), sementede 2–8 kg (19.6–78.5 N), borluda ise 0.5–3.5 kg (4.9–34.5 N) arasında değişmektedir.

En düşük sürtünme kuvveti 55.6 N yükte ve 3.6 m/sn hızda borlu 5115 çeliğinde 0.5 kg olarak görülmüştür. En yüksek sürtünme kuvveti ise 147.5 N'luk yükte ve 3.6 m/sn hızda normalize edilmiş 1020 çeliğinde 9.7 kg olarak elde edilmiştir. Borlu AISI 1020 çeliğinde ise en yüksek sürtünme kuvvetinin değeri 5.8 kg olarak 147.5 N'luk yükte gözlenmiştir (Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32).



a) 3 saat b) 1.5 saat

Grafik 1: 930°C de semente edilmiş AISI 5115 çeliğinin mikro sertlik dağılımı

Sürtünme kuvveti AISI 1020 çeliğinde 55.6 N yük altında ilk 75 saniye içinde hızla değişirken 75 sn'den sonra fazla artış göstermemektedir. Normalize durumda ilk 75 sn'de hızla azalmakta, semente durumunda ise hızla artmaktadır.75 sn'den sonra normalize, semente ve borlu durumunda kararlı sürtünme gözlenmektedir (Şekil 4.30 ve 4.45).

Sürtünme kuvveti AISI 5115 çeliğinde ise 55.6 N yükte normalize ve semente halinde ilk 90 sn'de hızla artmakta ve bu süreden sonra fazla değişmektedir. Aynı çeliğin borlu halinde ve aynı yükte 400 sn'ye kadar hızla azalmakta ve bu süreden sonra değişim azalmaktadır (Şekil 4.33 ve 4.45).

109 N yük altındaki 1020 çeliğinde ilk 90 sn içinde normalize ve semente durumunda hızla artış gösteren sürtünme kuvveti 90 sn'den sonra fazla bir artış göstermemekte ve kararlı sürtünme meydana gelmektedir. Sürtünme kuvveti borlu durumda ise yine fazla bir artış göstermeden kararlı sürtünme rejimine geçmektedir (Şekil 4.31 ve 4.46).

109 N yüke maruz kalan 5115 çeliğinde ise sürtünme kuvveti normalize ve semente halinde hızla artarken borlu durumda artış fazla değildir ve kararlı sürtünme gözlenmektedir (Şekil 4.34 ve 4.46). Sürtünme 147.5 N 'luk yük altındaki AISI 1020 çeliğinde normalize ve semente durumunda hızla artış, borlu halinde ise hızla azalış göstermektedir (Şekil 4.32). AISI 5115 çeliğine etki eden 147.5 N normal yük altında oluşan sürtünme kuvveti normalize ve semente halinde hızlı artış, borlu durumda ise hızlı azalma göstermektedir (Şekil 4.35 ve 4.47).

Sürtünme kuvveti 60 sn kayma süresinde normal yüke bağlı olarak normalize, semente ve borlu durumdaki 1020 çeliğinde 109 N'a kadar aynı oranda artışgösterir ve bu yükten sonra normalize ve semente halinde artış gösterirken borlude değişiklik görülmemekte (Şekil 4.36 ve 4.48) ve 5115 çeliğinde ise semente ve normalize durumunda hızla artış, borlu konumunda önce düşüş daha sonra hızla artış göstermektedir (Şekil 4.38 ve 4.40).

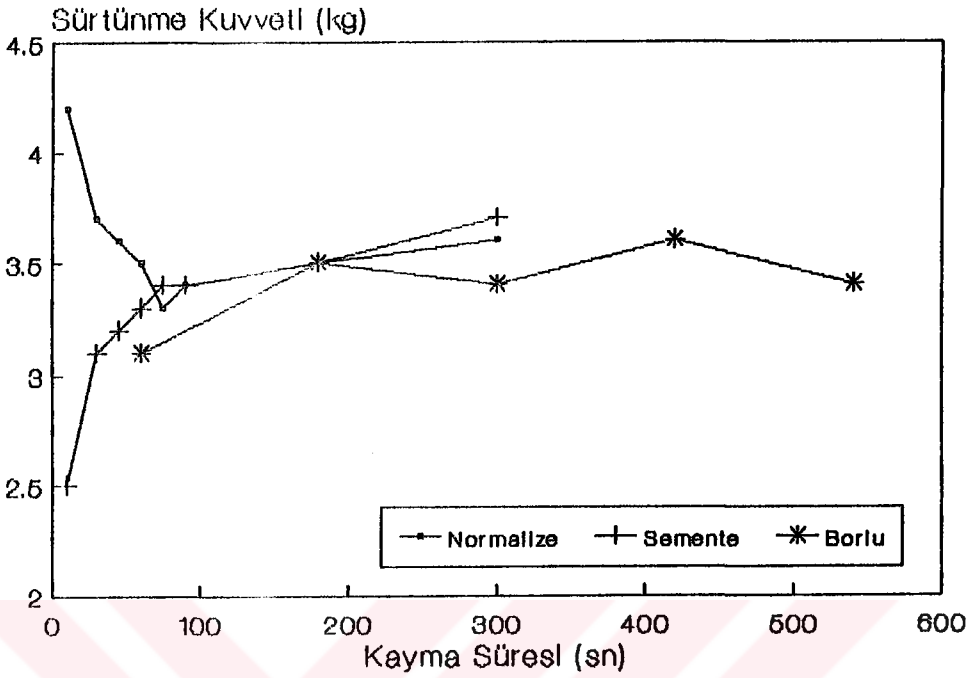
Sürtünme kuvveti 180 sn kayma süresinde normal yüke bağlı olarak normalize ve sementeli 1020 çeliğinde 109 N yüke kadar normal artış gösterirken bu yükten sonra hızla artmaktadır. Borlu durumunda ise daha azdır (Şekil 4.37 ve 4.41). Sürtünme kuvveti normalize, semente edilmiş AISI 5115 çeliğinde hızla artmakta borlanmış durumunda ise 109 N'a kadar değişmezken bu yükten sonra artış göstermektedir (Şekil 4.39 ve 4.41).

Sürtünme kuvveti normal yüke bağlı olarak normalize ve semente parçalarda oldukça artış gösterirken borlu parçalarda az bir artış göstermiştir (Şekil 4.36 ve 4.41).

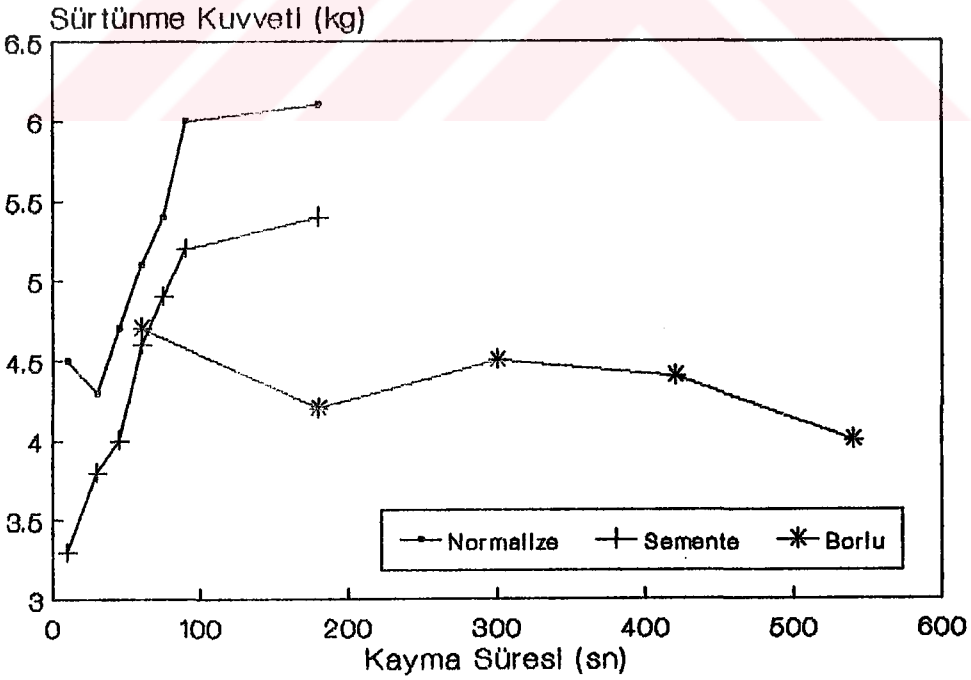
Sürtünme kuvveti 60 saniye kayma süresinde borlu 1020 çeliğinde 3.1 kg'dan 5.8 kg'a hızla artarken borlu 5115 çeliğinde önce azalma sonra artış göstermektedir (Şekil 4.40). 180 saniyede ise borlu 1020 çeliğinde 3.5 kg'dan 5.4 kg'a yükselirken 5115 çeliğinde 109 N'a kadar değişmediği, bu yükten sonrada arttığı Şekil 4.41'le görülmektedir.

Sürtünme kuvveti, borlu 1020 çeliğinde kayma süresine bağlı olarak 55.6 ve 109 N yükte artış fazla olmazken 147.5 yükte 5.8 kg olan 4.5 kg'a inmekte ve borlu 5115 çeliğinde ise 55.6 N yükte 2.1 kg olan 0.5 kg'a hızla azalırken 109 N yükte 300 saniyeye kadar fazla değişmezken bu süreden sonra artış hızlanmakta, 147.5 N yükte ise 3.4 kg ile 2.3 kg arasında azalmaktadır (Şekil 4.42, 43, 46).

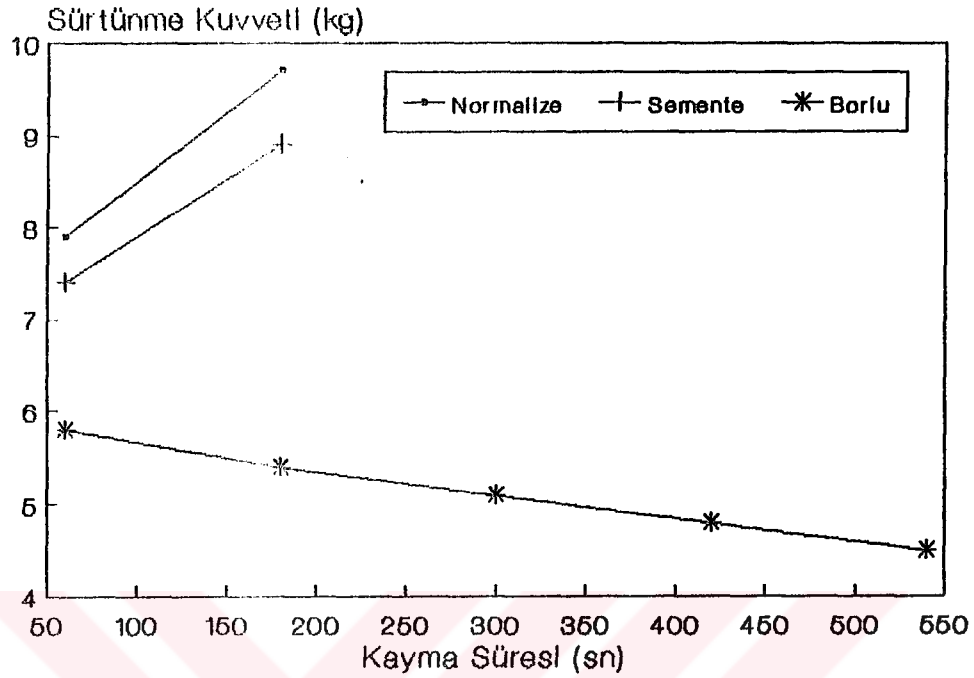
Sürtünme kuvvetlerindeki ani artışlar, yüzeylerin ilk temasında oluşan soğuk kaynak bağlarından kaynaklanmaktadır. İlk çalışma esnasında yüzeyler birbirine alışana kadar pürüzleriyle birbirini çizerler ve sürtünme kuvvetleri bu sırada artar. Çünkü bu durumda iki yüzeyin birbiri üzerinde kaymaları zorlaşır. Kararlı sürtünme durumunda, yüzeyde oluşan oksit partikülleri yağlayıcı bir malzeme gibi rol oynayarak sürtünme kuvvetinin azda olsa azalmasını sağlarlar. Ancak deneylerimizde bu durum sadece düşük yüklerde yüzeyi sertleştirilmiş numunelerde görülmüştür. Fakat sürtünme kuvvetindeki bu azalışın sebebinin oluşan oksitler olmadığı, sert iki yüzeyin düşük yük altında kolayca kayabildiği sonucunu çıkarmıştır. Çünkü deneyler sonunda dikkatlice toplanan aşınma partikülleri içinde oksit fazına rastlanmamıştır (Şekil 4.29 a ve b). Faz yapısı başlangıçta olduğu gibi Fe_2B den iborettir. Burodan hareketle bu şartlarda oksidasyonun kaymaya etkisi olmadığı söylenebilir. Maksimum yük ve sürelerde sürtünme kuvvetindeki hızlı artış ise yüzeyler arasında metal-metal teması meydana geldiğine işarettir. Ayrıca yüzeyden kopan sert parçacıklar abrasiv etkisi gösterdiğinden sürtünme kuvvetini artırmışlardır.



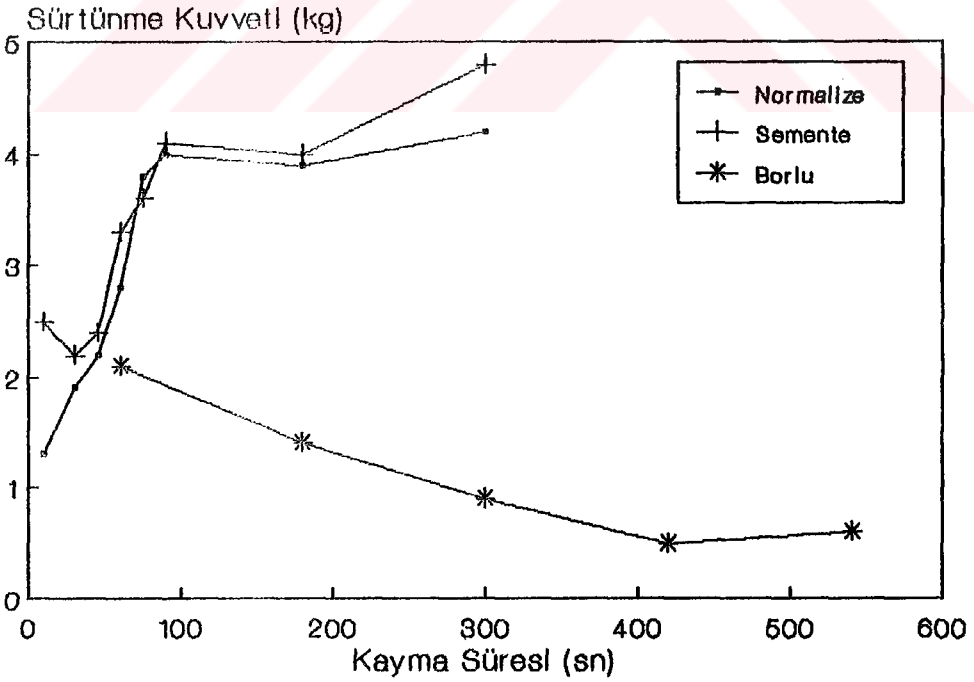
Şekil 4.30: 55.6 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 1020)



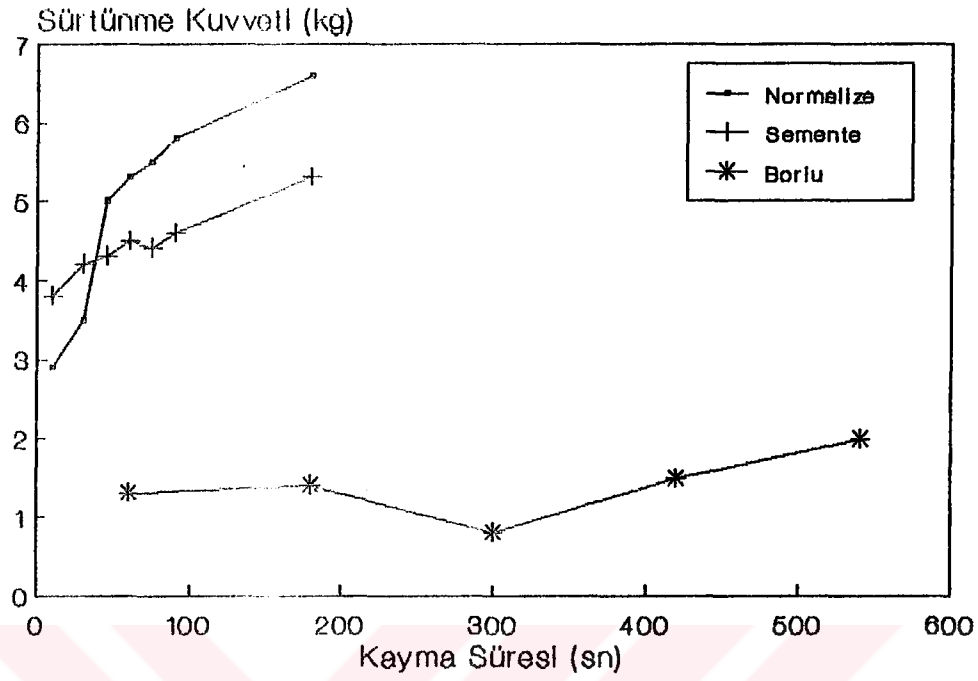
Şekil 4.31: 109 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 1020)



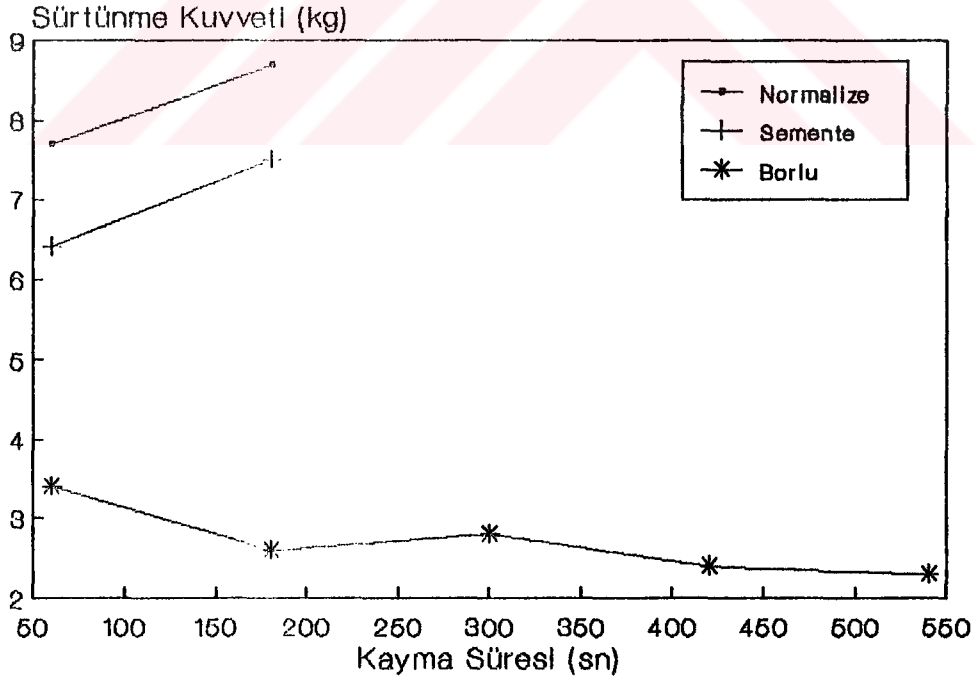
Şekil 4.32: 147.5 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 1020)



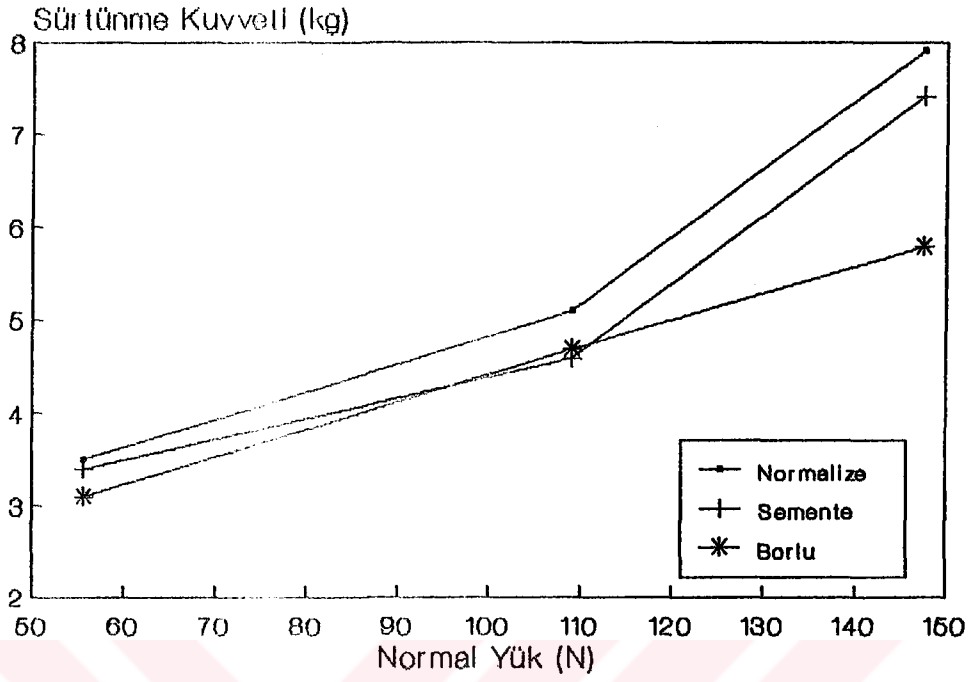
Şekil 4.33: 55.6 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 5115)



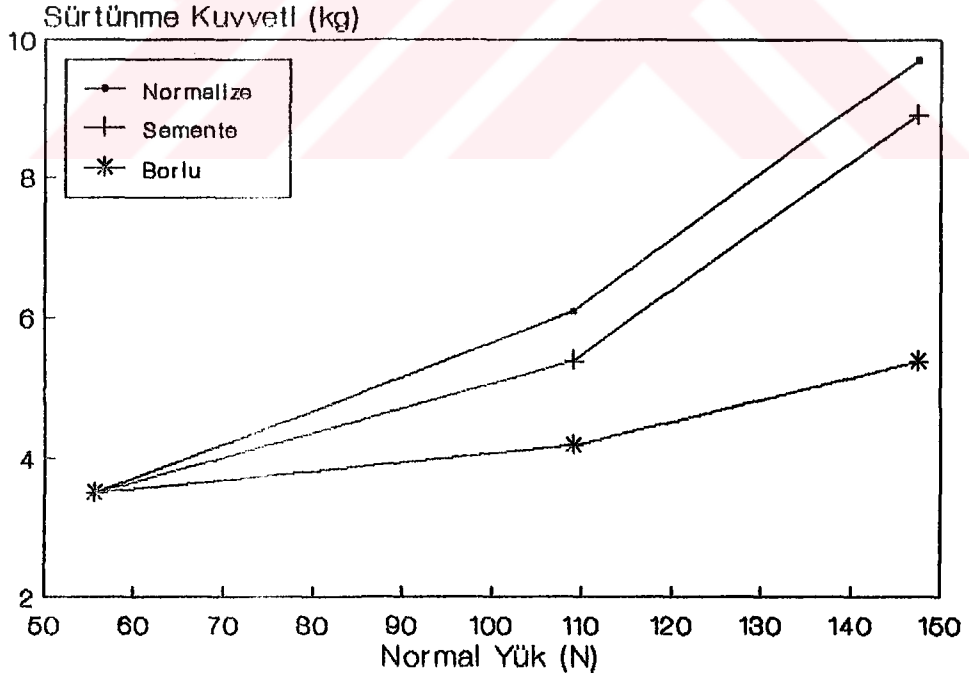
Şekil 4.34: 109 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 5115)



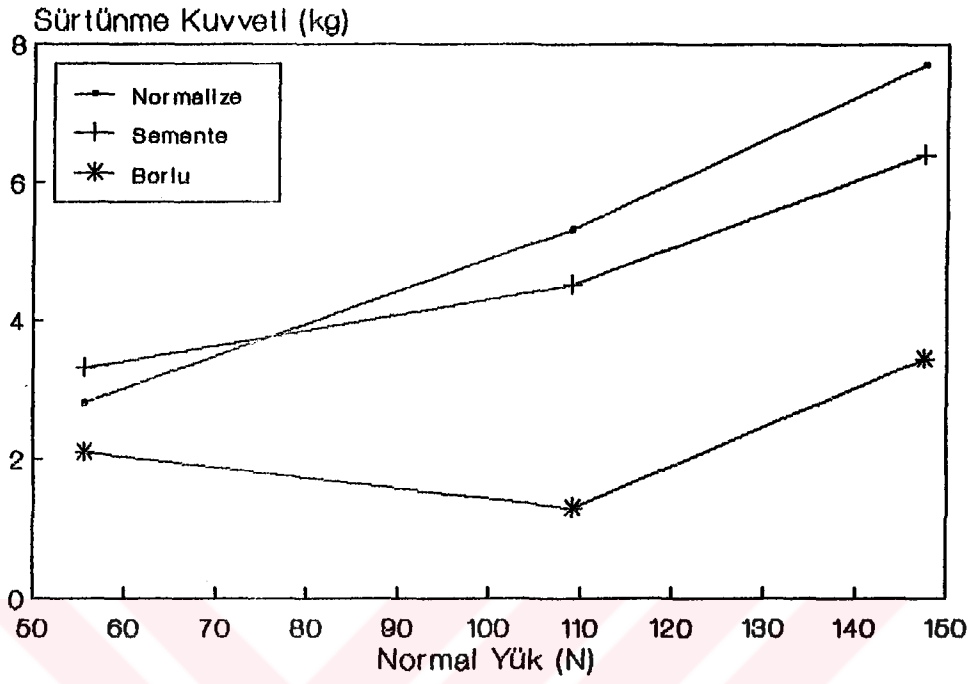
Şekil 4.35: 147.5 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 5115)



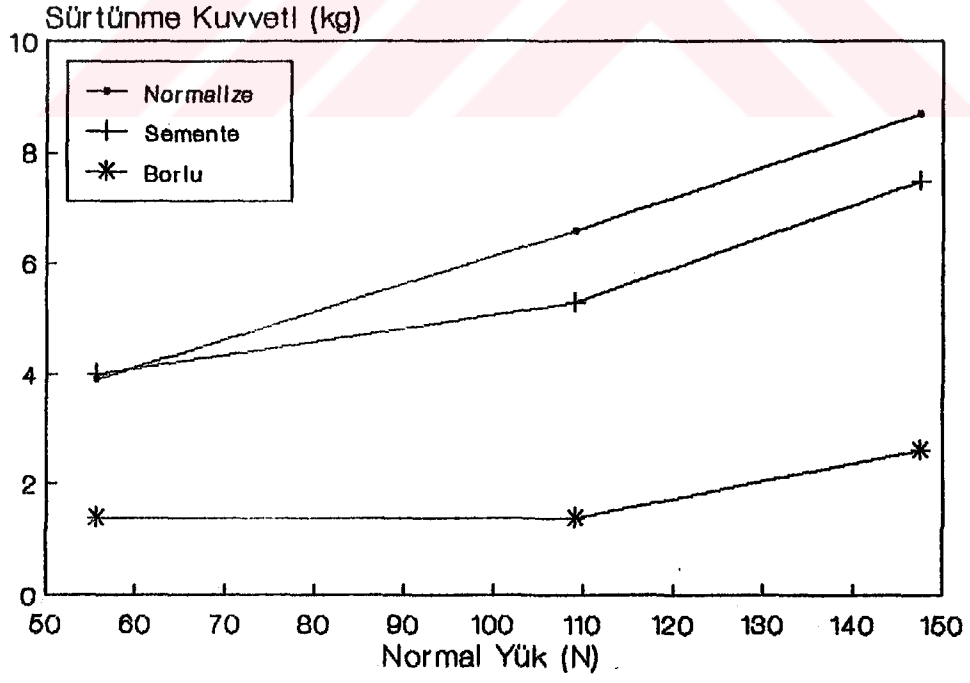
Şekil 4.36: 60sn kayma süresinde sürtünme kuvvetinin normal yükle değişimi (AISI 1020)



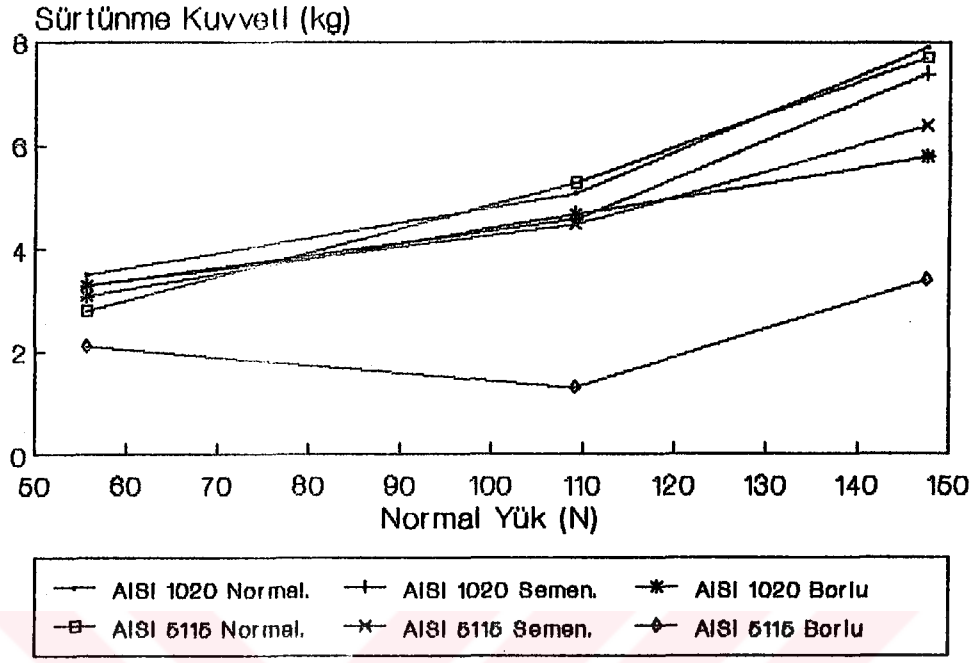
Şekil 4.37: 180 sn kayma süresinde sürtünme kuvvetinin normal yükle değişimi (AISI 1020)



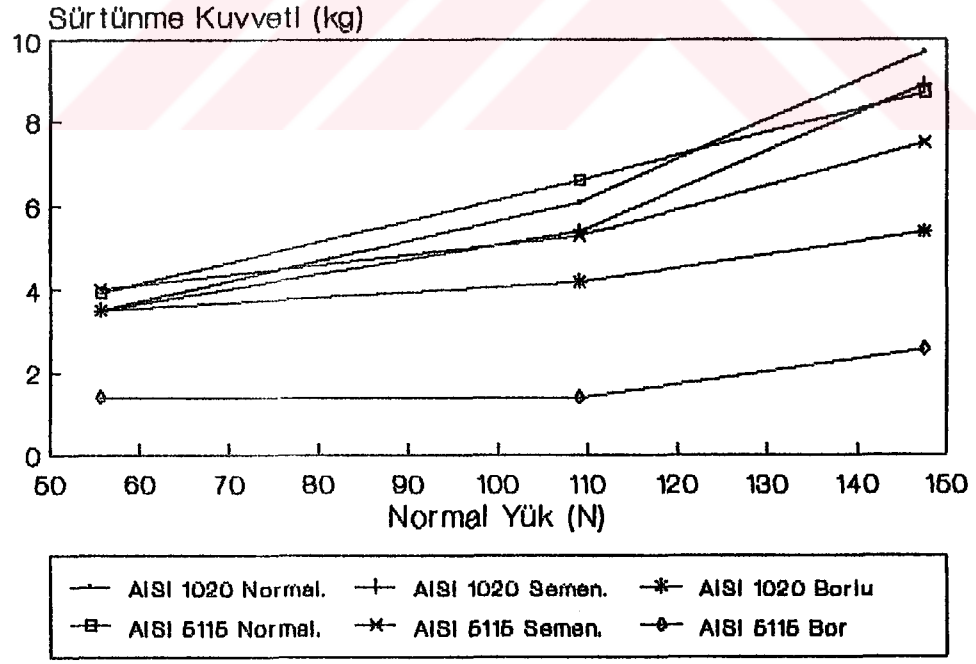
Şekil 4.38: 60sn kayma süresinde sürtünme kuvvetinin normal yükle değişimi (AISI 5115)



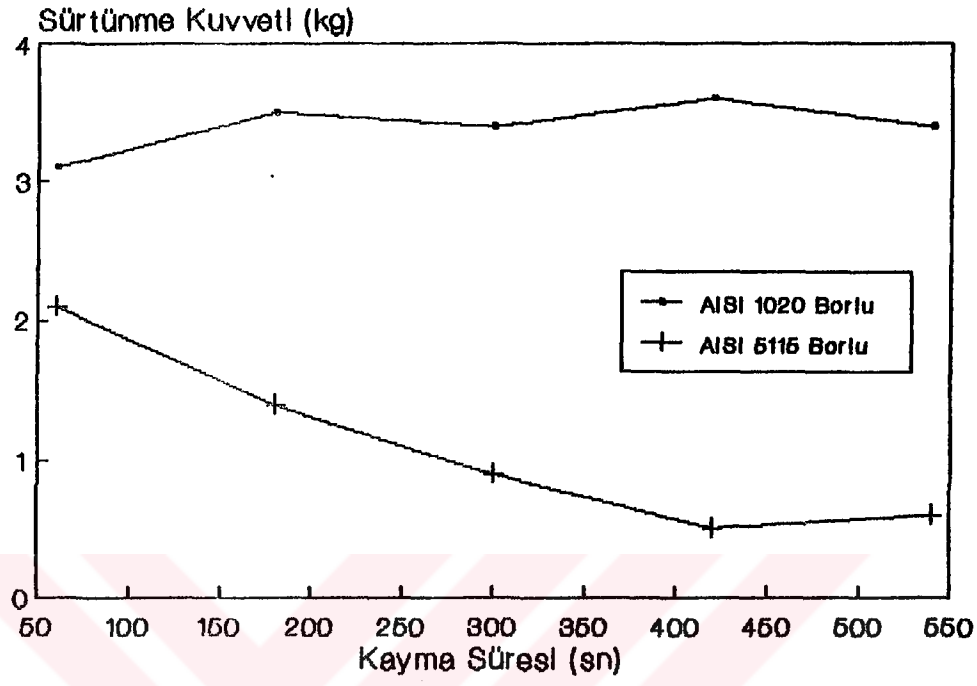
Şekil 4.39: 180 sn kayma süresinde sürtünme kuvvetinin normal yükle değişimi (AISI 5115)



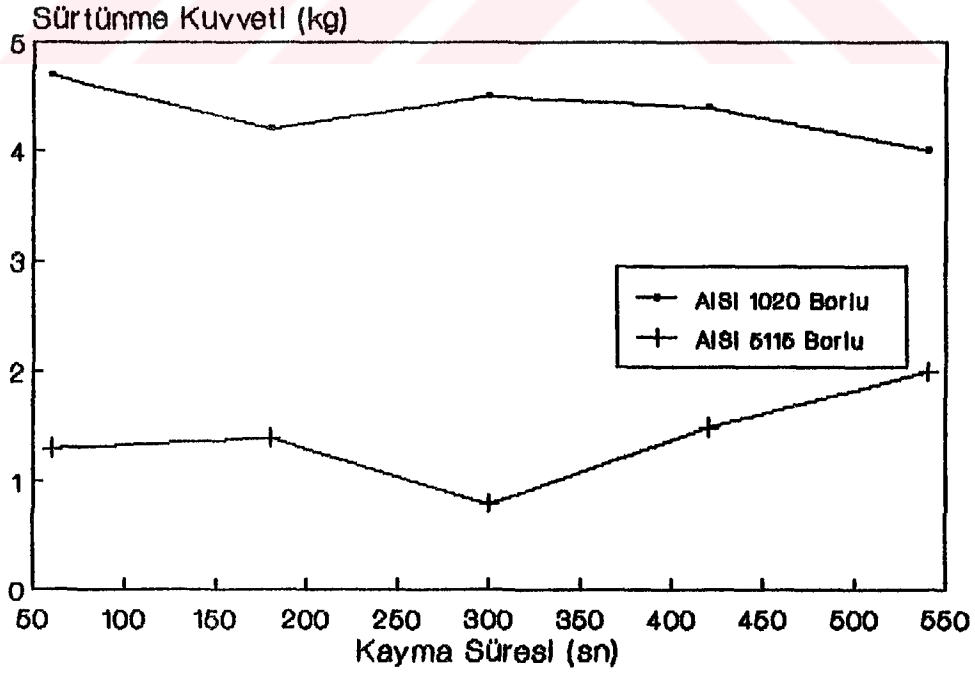
Şekil 4.40: 60sn kayma süresinde sürtünme kuvvetinin normal yükle değişimi (AISI 1020 ve 5115)



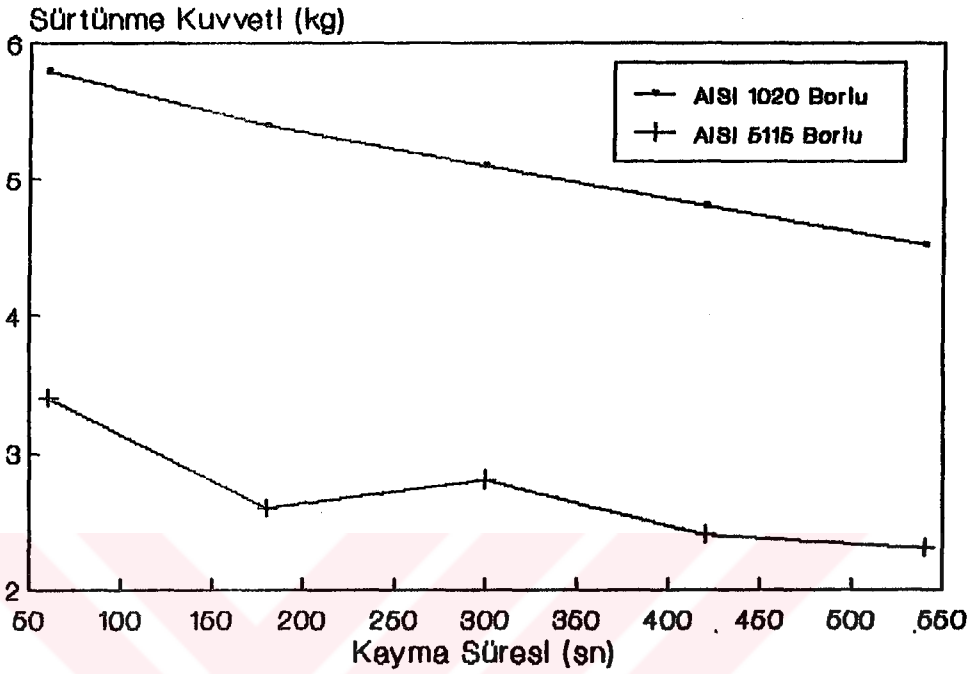
Şekil 4.41: 180 sn kayma süresinde sürtünme kuvvetinin normal yükle değişimi (AISI 1020 ve 5115)



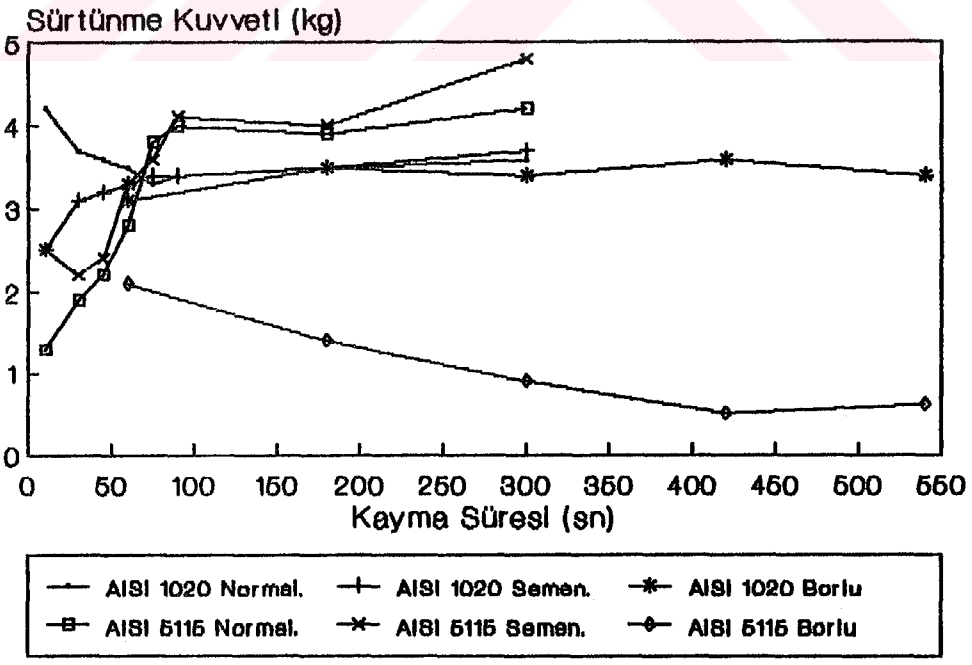
Şekil 4.42: 55.6 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 1020 ve 5115)



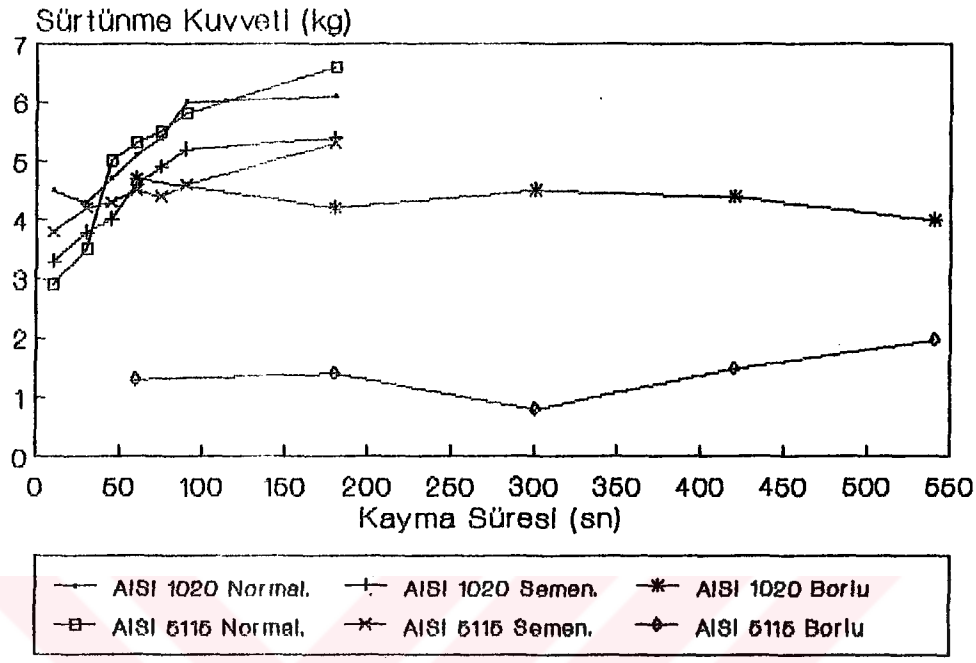
Şekil 4.43: 109 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 1020 ve 5115)



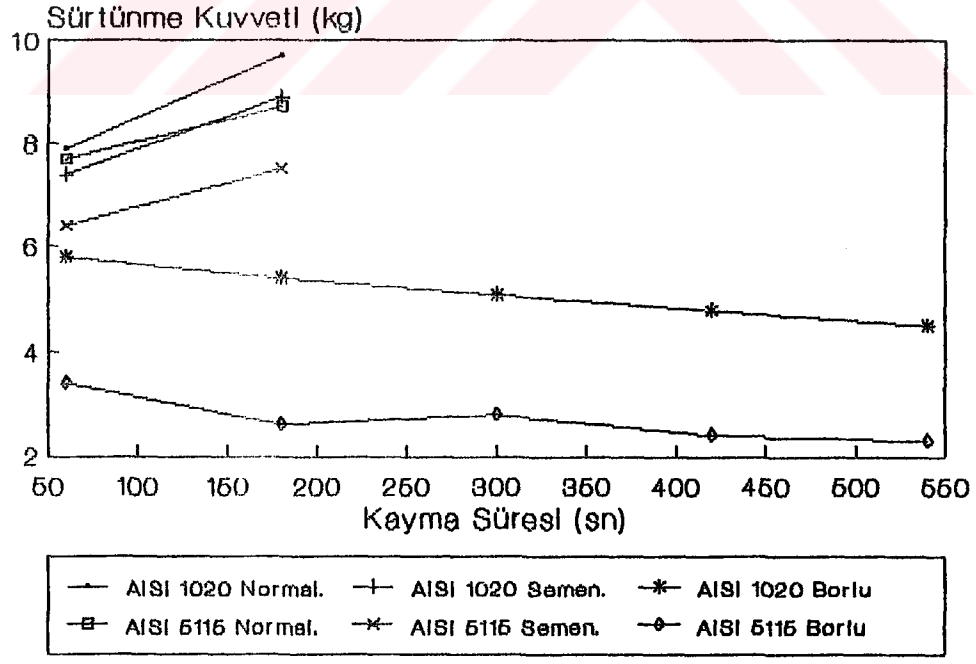
Şekil 4.44: 147.5 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 1020 ve 5115)



Şekil 4.45: 55.6 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma süresi ile değişimi (AISI 1020 ve 5115)



Şekil 4.46: 109 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma mesafesi ile değişimi (AISI 1020 ve 5115)



Şekil 4.47: 147.5 N yükte sürtünme kuvvetinin kayma mesafesi ile değişimi (AISI 1020 ve 5115)

4.6.2.2. Aşınma Miktarı

Daha önce belirtilen şartlarda yapılan aşınma deney sonuçları Şekil 4.48'den 4.65 e kadar olan grafiklerde verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilerek, deney numunelerinin aşınma davranışları mukayese edilmiştir. Şekil 4.48'den Şekil 4.59'e kadar kütlesel kayıpların kayma mesafesi ile değişimi, Şekil 4.60'tan Şekil 4.65'e kadar olanlar ise kütlesel kayıpların normal yükle değişimini göstermektedir. Bu şekillerde aşınma, kayma süresi veya kayma mesafesi ile normal yükün fonksiyonu şeklinde tesbit edilmiştir. Aşınmayı bu değişkenlere göre ayrı ayrı değerlendirmek daha faydalı olacaktır.

4.6.2.2.1. Aşınmanın Kayma Süresi (Kayma Mesafesi) ile Değişimi

4.48'den 4.59'a kadar olan şekiller, kayma hızı ve yük sabit tutularak, test süresi ile aşınma miktarının kütlesel (mg) ve hacımsal (mm^3) olarak değişimini göstermektedir. Şekil 4.65' ye kadar olanlar ise sabit test süresi ve hızdaki kütlesel (hacımsal) aşınma miktarlarını göstermektedir.

Genel olarak yüzeyi sertleştirilmiş numunelerin aşınma karakteri işlem görmemiş numunelere göre çok farklı seyretmektedir. İşlem görmemiş numunelerin aşınması her durumda oldukça fazladır. Yükün ve kayma süresinin artışı ile işlem görmemiş numunelerin ve aynı zamanda semente edilmiş numunelerin aşınması hızla artmıştır. Bu nedenle normalize ve semente edilmiş numunelerin deneyleri, yüksek yüklerde devam ettirilmemiştir. Borlanmış numunelerin aşınmasındaki artış oldukça az olmuştur. Deney esnasında meydana gelen aşınma kayıpları, kayma süresinin artışı ile artmaktadır. Fakat bu artış kayma süresince orantılı olmamıştır. Aşınma, kayma başlangıcında normalize ve semente edilmiş numuneler için daha hızlı, sonra yavaş yavaş gelişmektedir. Bu durum kayma başlangıç süresinin 0–90 sn arasına tekabül etmektedir.

İşlem görmemiş ve semente edilmiş numuneler 0–90 sn arasında aynı aşınma karakteri göstermelerine rağmen sementasyon işleminin işlem görmemiş numunelere göre aşınmayı azalttığı tahmin edildiği gibi tesbit edilmiştir. Bu süre zarfında aşınma hızla artar. Bu ise yüzeylerin alışıncaya kadar birbirini kazımalarından kaynaklanmaktadır.

Aşınma hızı özellikle normalize ve semente edilmiş numunelerde 90–300 sn arasında azalmaktadır. Bu sürede ise kararlı aşınma söz konusu olur. Borlu parçalarda ise 60–540 sn arasında normalize ve semente numunelere göre artmamaktadır. İşlem görmemiş ve semente edilmiş numunelerin kararlı aşınma süresi borlanmış numunelere göre daha kısa sürmüştür. 300 sn'den sonra bu numunelerin aşınması tekrar hızlanmıştır. Bu artış yükün artması halinde çok daha şiddetli meydana gelmiş ve bu nedenle 147.5 N 'luk yükte deneye daha fazla devam edilmemiştir. (Şekil 4.48 ve 4.56).

Gerek Ek Tablo 1a, b 'den gerekse 4.48'den 4.65'e kadar olan şekillerden görüldüğü gibi (55.6 N) normal yük altında 10–300 sn arasındaki kayma sürelerinde 1020 çeliğinde meydana gelen aşınma kayıpları normalize edilmiş numunelerde (50–340) mg, semente edilmiş numunelerde 40–290 mg arasında değişirken borlu numunelerde 60–540 sn arasındaki kayma

sürelerinde 10–20 mg kadar olmuştur (Şekil 4.48 ve 4.54). 5115 çeliğinde ise meydana gelen aşınma miktarları aynı zaman aralığında normalize edilmiş numunelerde (30–270) mg, sementelilerde (30–225) mg, borlularda ise 60–540 sn arasında 5–20 mg arasında oluşmuştur (Şekil 4.51 ve 4.54).

109 N normal yük altında meydana gelen aşınma kayıpları ise 1020 çeliğinde 10–180 sn kayma sürelerinde normalizelerde (60–340) mg, semente edilmişlerde (30–280) mg, borlularda ise 60–540 sn kayma sürelerinde (10–30) mg arasında değişmektedir (Şekil 4.49 ve 4.55). 5115 çeliğinde ki aşınma kayıpları 10–180 sn kayma sürelerindeki normalizelerde (70–330) mg sementelilerde (60–260) mg, borlularda ise 60–540 sn arasında (5–30) mg arasında değişmektedir (Şekil 4.52 ve 4.55).

147.5 N yük altındaki aşınma kayıpları 60–540 sn arasında borlu 1020 çeliğinde (10–60) mg, borlu 5115 çeliğinde ise (5–30) mg arasında değişmektedir. 60 sn kayma süresinde normalize edilmiş 1020 çeliğinde 570 mg, normalize edilmiş 5115 çeliğinde 530 mg, semente edilmiş 1020 çeliğinde 510 mg, semente edilmiş 5115 çeliğinde ise 490 mg ve borlu 1020 çeliğinde 10 mg, borlu 5115 çeliğinde ise 5 mg aşınma meydana gelmiştir. 180 sn kayma süresinde 1020 çeliğinde normalizede 810 mg, sementede 700 mg, borluda 20 mg'iken 5115 çeliğinde normalizede 740 mg, sementede 660 mg ve borluda 10 mg aşınma meydana gelmiştir (Şekil 4.50, 4.53 ve 4.56).

55.6 N yükte 60–300 sn ve 420–540 sn kayma süreleri arasında borlu 1020 çeliğinin aşınma kayıpları sabit kalırken 300–420 sn arasında hızla artmaktadır. Borlu 5115 çeliğinde ise 60–180 ve 420–540 sn'ler arası hızla artarken 180–300 ve 420–540 sn arasında sabit karakterli aşınma meydana gelmektedir (Şekil 4.54 ve 4.57).

109 N yükteki aşınma kayıpları, borlu 1020 çeliğinde 60–180 sn ve 300–420 sn arasında sabit kalırken 180–300 sn ve 420–540 sn arasında hızla artmakta, borlu 5115 çeliğinde ise 180–300 sn arasında sabit olup 60–180 sn, 300–540 sn arasında hızla artmaktadır (Şekil 4.55 ve 4.58). 147.5 N yükte borlu 1020 çeliğindeki aşınma kayıpları sürekli artarken borlu 5115 çeliğinde 180–300 sn ve 420–540 sn arasında sabit kalmakta 60–180 sn ve 300–420 sn arasında artmaktadır (Şekil 4.56 ve 4.59).

Şekillerden görüldüğü gibi yüzeyi sertleştirilmiş numunelerin normal yük altında ve kayma hızlarında aşınma karakterleri ve değerleri birbirinden çok farklıdır. Borlanmış 1020 çeliğinin aşınma direncinin borlu 5115 çeliğininkinden azda olsa fazla olduğu görülmüştür. Semente edilmiş 1020 çeliğinin aşınması ise oldukça fazladır. Düşük yüklerde her iki malzemenin borlu durumdaki aşınma direnci hemen hemen aynı iken artan yük ve kayma sürelerinde aralarındaki fark azda olsa değişmektedir. Borlu malzemelerin aşınma direnci sementelere göre çok yüksektir. Bu fark Ek Tablo 1a ve 1b 'den ve grafiklerden görüldüğü gibi en az 10 katı kadardır.

4.6.2.2.2. Aşınmanın Normal Yük ile Değişimi

4.60'dan 4.65'e kadar olan şekiller aşınma miktarının normal yük ile değişimini göstermektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi sabit kayma hızı ve kayma süresinde yükün artması ile aşınma miktarıda artmaktadır. Değişim numunelere göre

farklılıklar göstermektedir. Düşük yükte normalize ve semente edilmiş numunelerin aşınma miktarı az, yüksek yüklerde ise hızla artmaktadır. Borlu numunelerdeki aşınma miktarları ise oldukça azdır. Gerek normalize ve semente edilmiş 1020 çeliğinin gerekse 5115 çeliğinin aşınma miktarları 109 N'a kadar olan yüklerde birbirlerine çok yakın ve az bir artış gösterirken 109 N'dan sonraki yüklerde yine birbirlerine yakın değerlerde fakat hızla artmaktadır. Borlu 1020 çeliğinin aşınma miktarı sabit kayma hızı ve süresinde değişen yüke göre artış göstermemişlerdir.

Semente edilmiş 1020 çeliğinin aşınması, borlanmış 1020 çeliğininkinden ve semente edilmiş 5115 çeliğinde aşınma miktarı borlu halinden çok fazladır. Fakat her iki çeliğin borlu konumdaki aşınma kayıpları birbirine çok yakındır.

Aşınma teorisine göre, aşınma sonucu plastik şekil değiştirme nedeni ile sertliklerde kısmen artışlar beklenebilir. Bu durum deneylerde görülmemiştir. Bunun sebebi yüzeyi sertleştirilmiş numunelerin aşınma esnasında plastik şekil değiştirmedikleri veya yüksek sertliğe sahip numunelerin sertliklerini etkileyecek oranda olmadığı düşünülebilir. Bunun aksine sertliklerindeki azalma ise sürtünme sonucu meydana gelen ısının tavlama etkisindendir.

Yapılan aşınma deneylerinde toplanan aşınma partiküllerinin ve aşınmadan önce yüzeylerden alınan partiküllerin X-ışını analizi ile analiz edildiğinde oksit bileşiklerine rastlanmamıştır.

Makina elemanlarının sürtünme ve aşınmasından dolayı meydana gelen ekonomik kayıplar (Meselo 10 Milyar DM'ın üzerinde [89]) milyarlarca Liraya mal olmaktadır. Bunu azaltmak içinde çok yoğun bir şekilde tribolojik çalışmalar, sürmektedir. Son 10 yılda endüstriyel uygulamalarla borlama ile yüzeyi sertleştirilen makina elemanları kullanılmaya başlanmış ve büyük gelişmeler sağlanmıştır. Borlama, çeliklere sürtünme ve aşınmaya karşı en az 5 kat ömür sağladığı literatürlerde belirtilmektedir. Bu çalışmada bulunan ömürde o doğrultudadır. Bu ise makina elemanlarının kullanılmadan önceki geçirdiği aşamalarda yapılan bir takım masrafların azaltılması anlamına gelir. Bu tasarruflar ise şöyle sıralanabilir:

1) İş parçasının aşınmaya zorlanan kısmı borlu tabaka olması nedeni ile yüksek alaşımlı çeliklerin yerine düşük alaşımlı veya sade çelikler kullanılabilir [87]. Çünkü düşük kaliteli çeliğin malzeme masrafı azdır.

2) Düşük kaliteli çelikten olan malzeme daha basit işlenir.

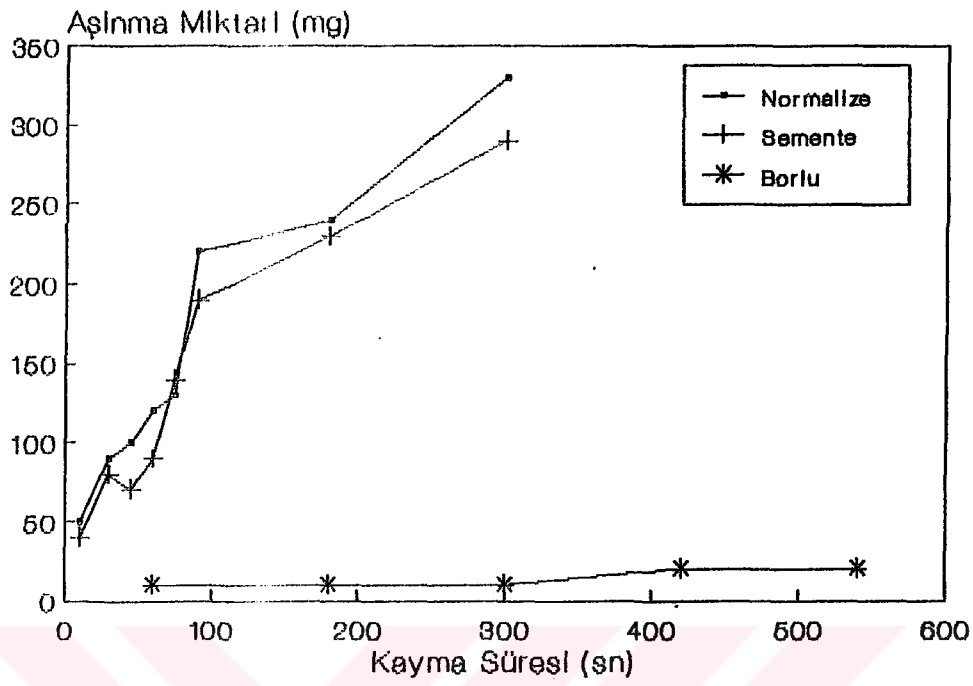
3) Düşük kaliteli çeliğin işlenmesi esnasında kullanılan takımların (kesici uçlar, takım tezgahları) ömürleri artar.

4) Basit işlemden dolayıda az enerji harcanır.

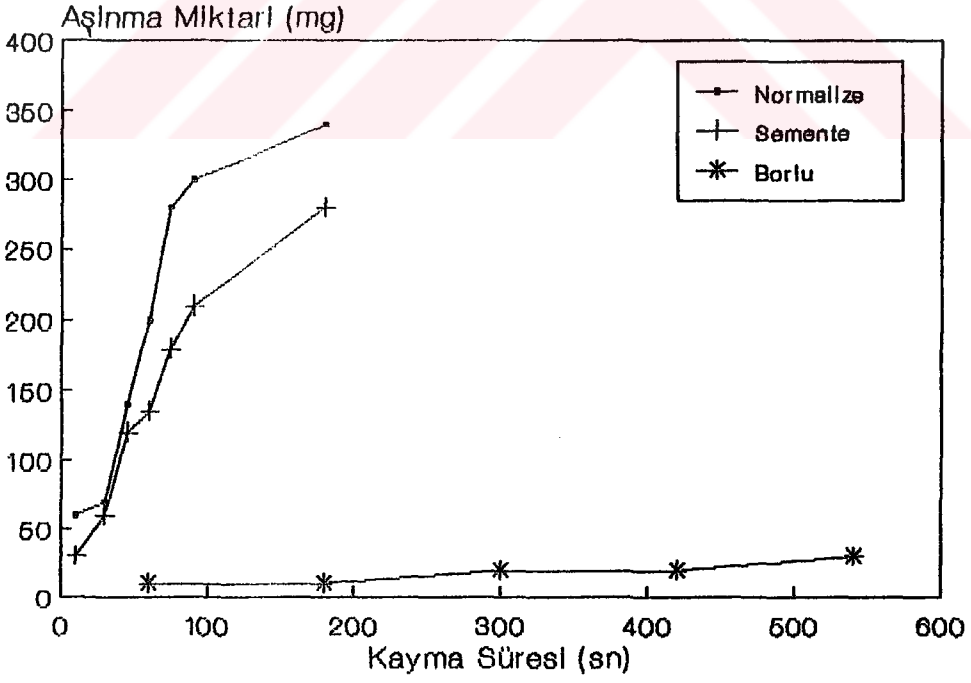
5) Daha yüksek verimler alınır.

6) Sürtünerek aşınan parçaların değişmesi yani sökülüp takılması esnasında harcanan süreden tasarruf sağlanır. Bu ise fazla üretim ve fazla kazanç demektir.

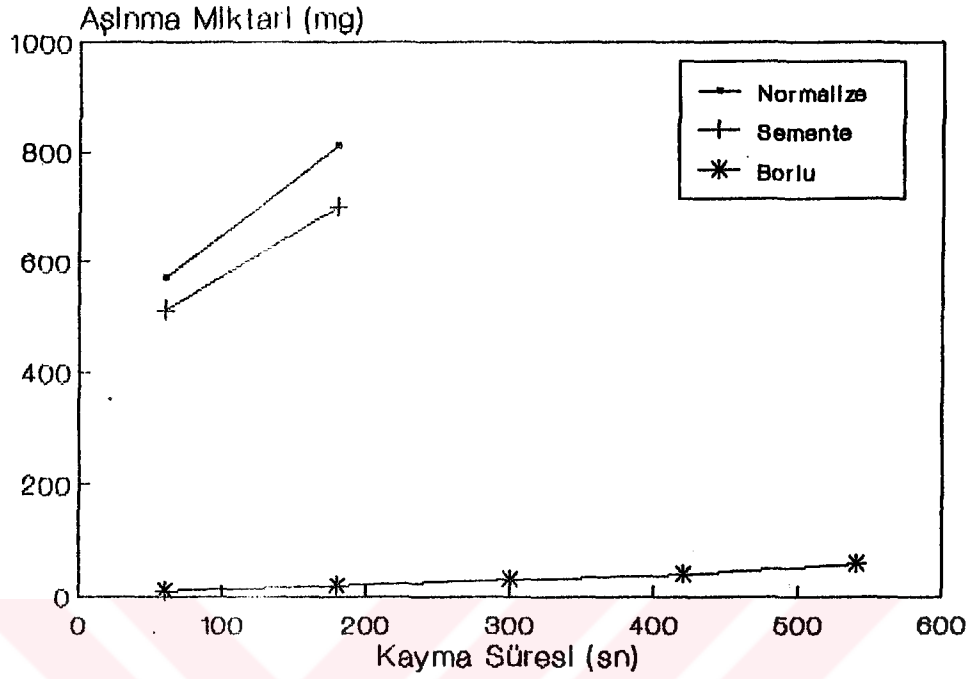
Bu duruma göre çelik alınımında veya seçiminde artık kalite ve imalatından ziyade fiyatlara dikkat edilmesi gerekir.



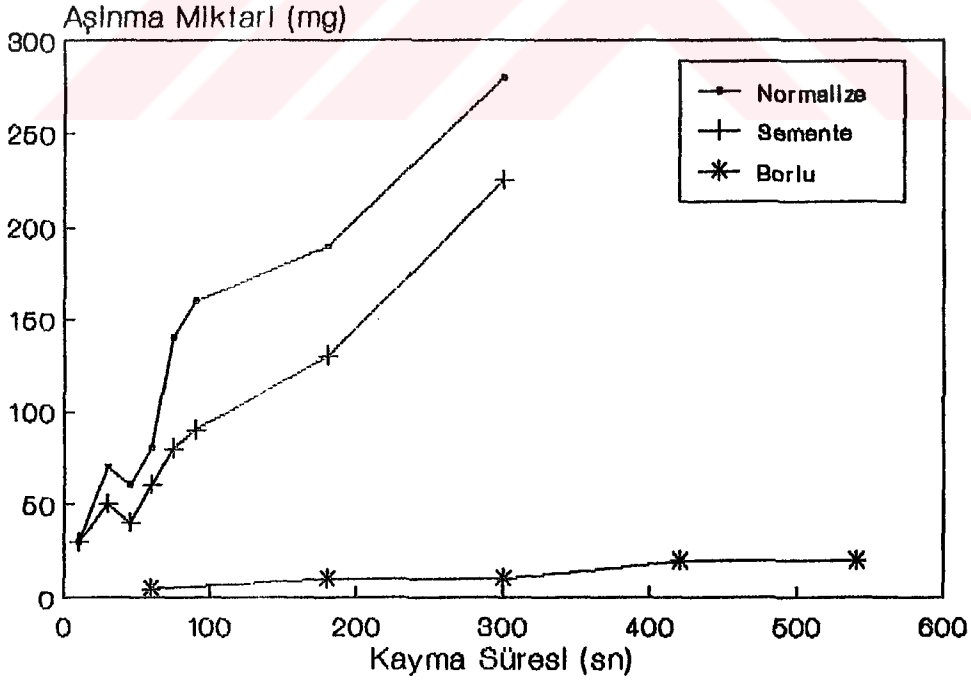
Şekil 4.48: 55.6 N yükte aşınma miktarının kayma süresi ile değişimi (AISI 1020)



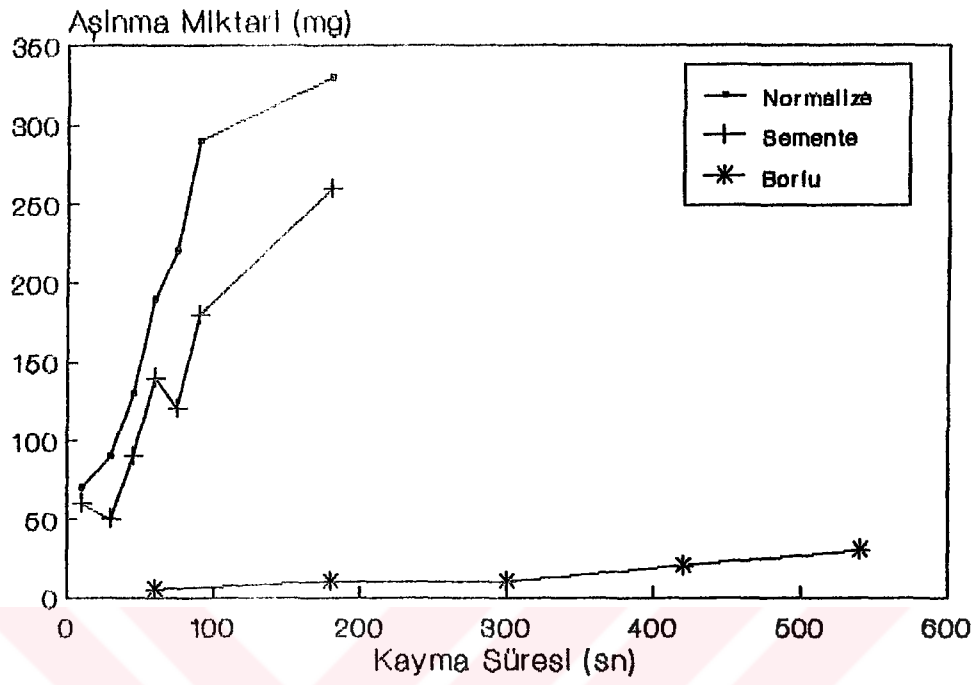
Şekil 4.49: 109 N yükte aşınma miktarının kayma süresi ile değişimi (AISI 1020)



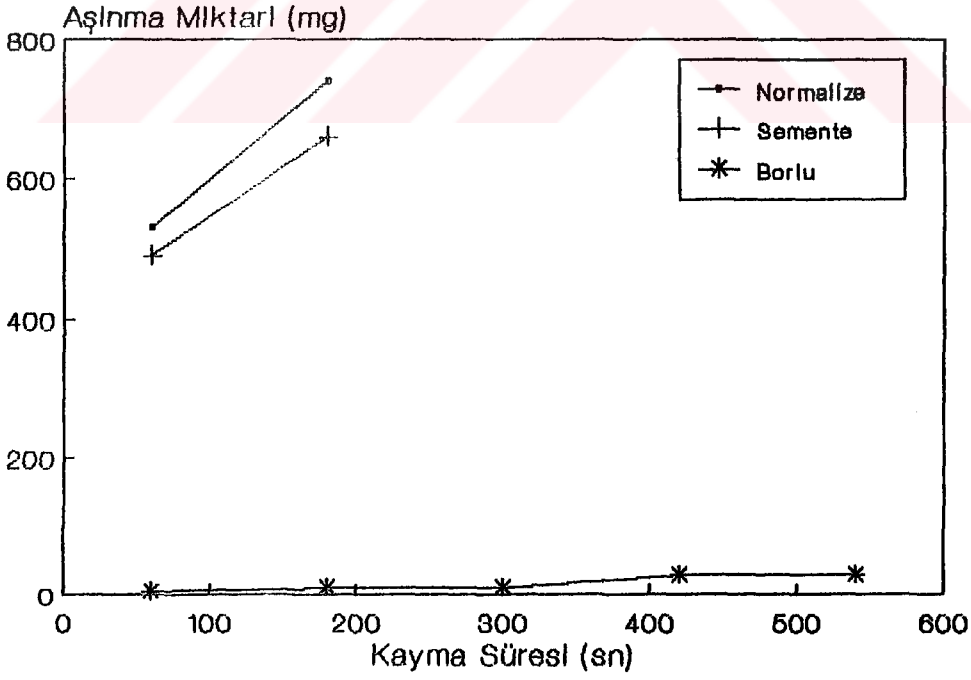
Şekil 4.50: 147.5 N yükte aşınma miktarının kayma süresi ile değişimi (AISI 1020)



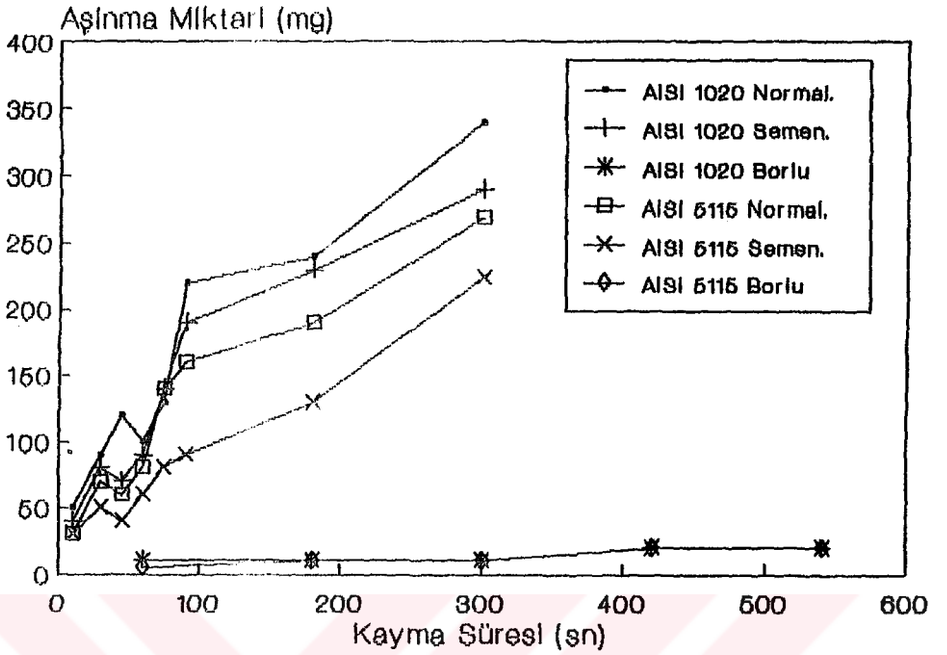
Şekil 4.51: 55.6 N yükte aşınma miktarının kayma süresi ile değişimi (AISI 5115)



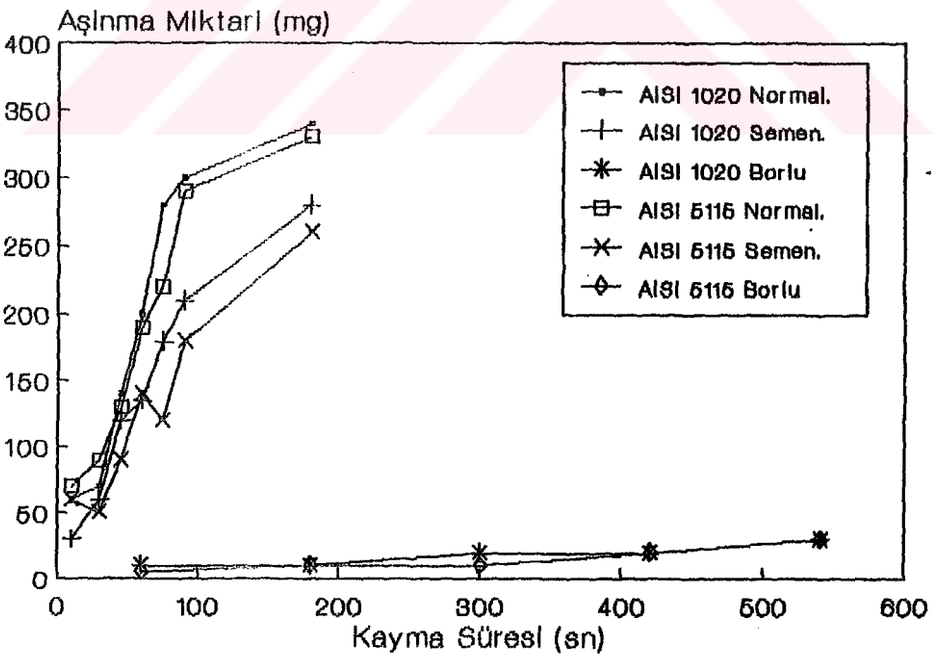
Şekil 4.52: 109 N yükte aşınma miktarının kayma süresi ile değişimi (AISI 5115)



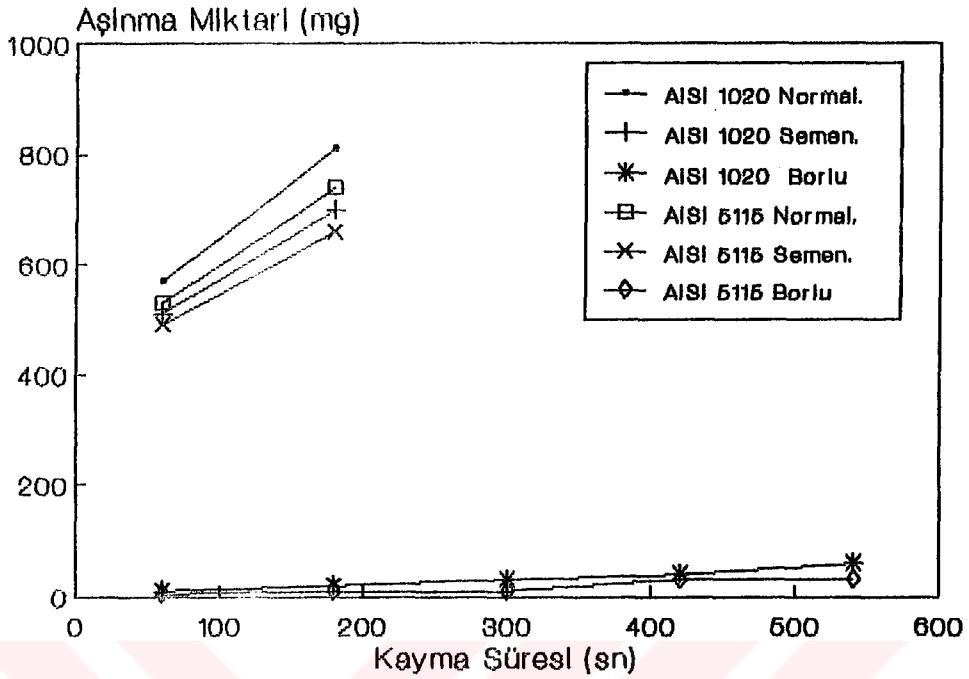
Şekil 4.53: 147.5 N yükte aşınma miktarının kayma süresi ile değişimi (AISI 5115)



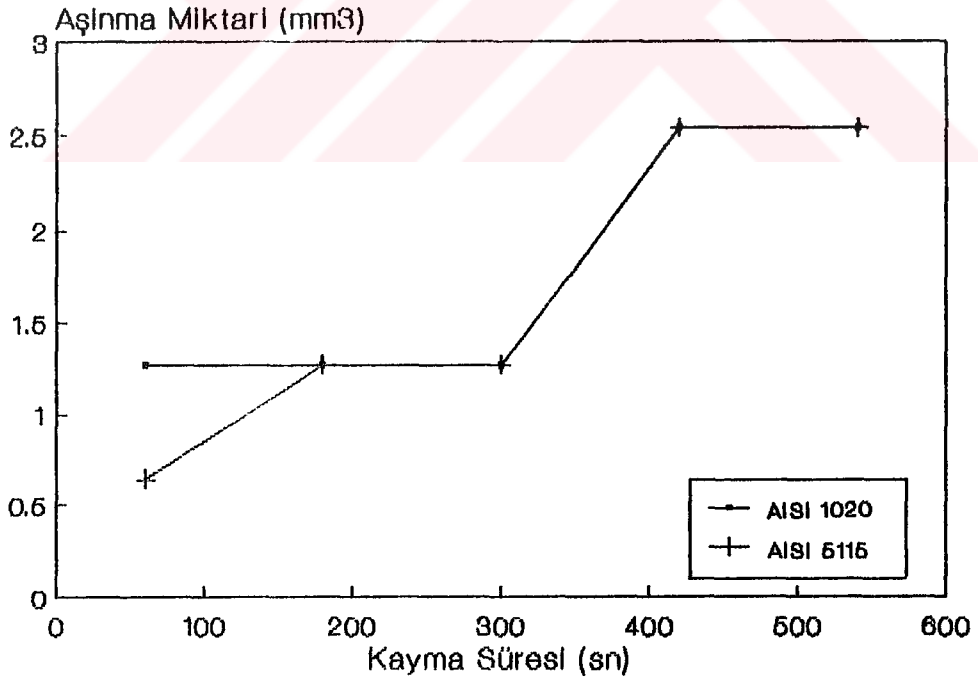
Şekil 4.54: 55.6 N yükte kayma süresine bağlı olarak aşınma kayıpları değişimi (AISI 1020 ve 5115)



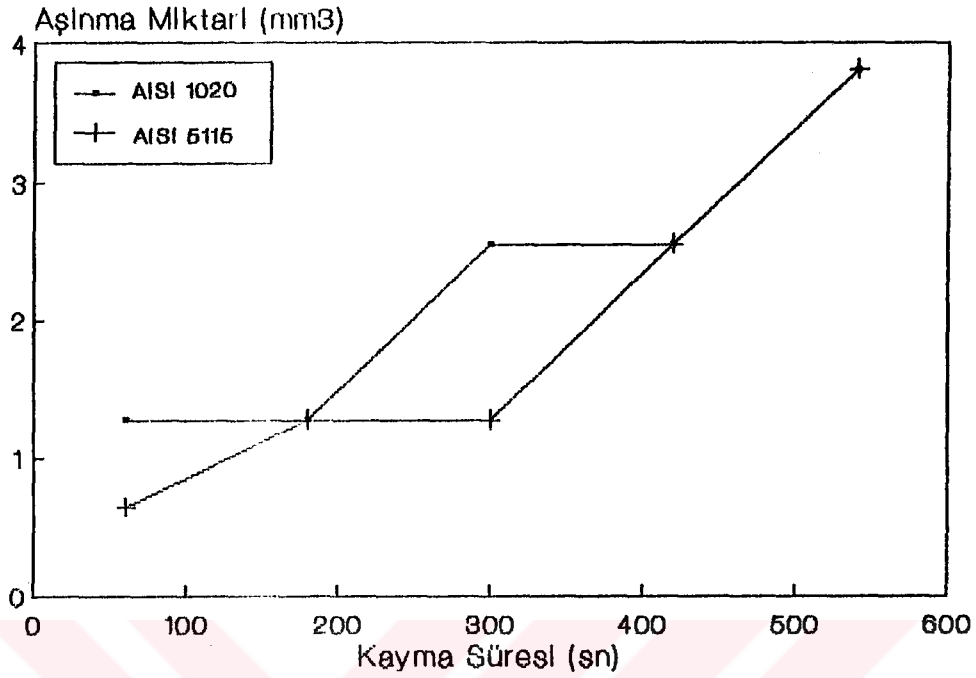
Şekil 4.55: 109 N yükte kayma süresine bağlı olarak aşınma kayıplarının değişimi (AISI 1020 ve 5115)



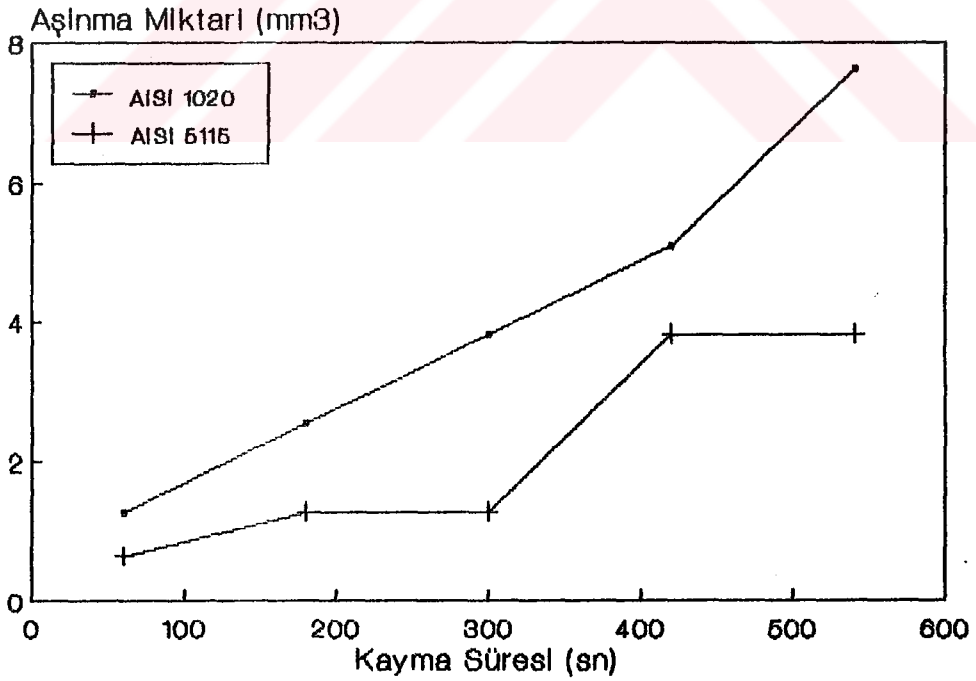
Şekil 4.56: 147.5 N yükte kayma süresine bağlı olarak aşınma kayıplarının değişimi (AISI 1020 ve 5115)



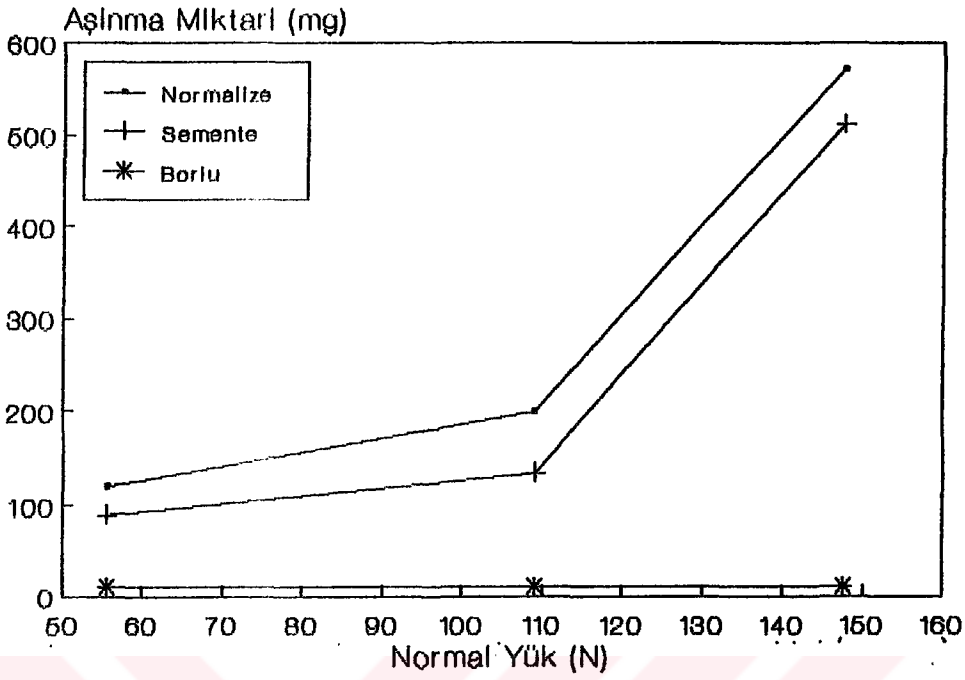
Şekil 4.57: 55.6 N yükte iki borlu malzemenin kayma süresine bağlı aşınma kayıplarının değişimi



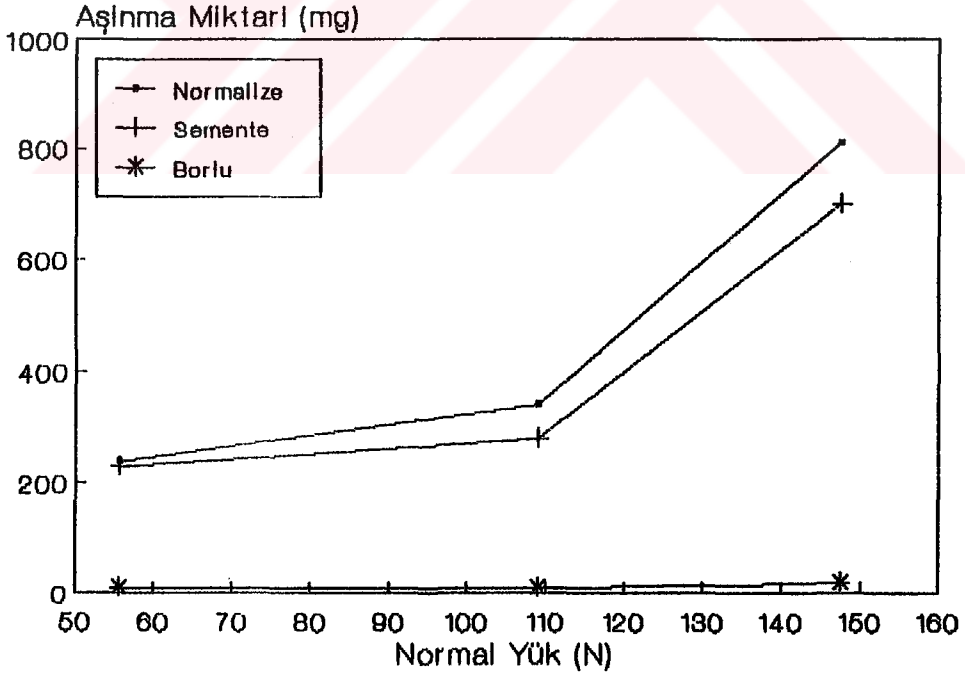
Şekil 4.58: 109 N yükte borlu iki malzemenin kayma süresine bağlı olarak aşınma kayıplarının değişimi



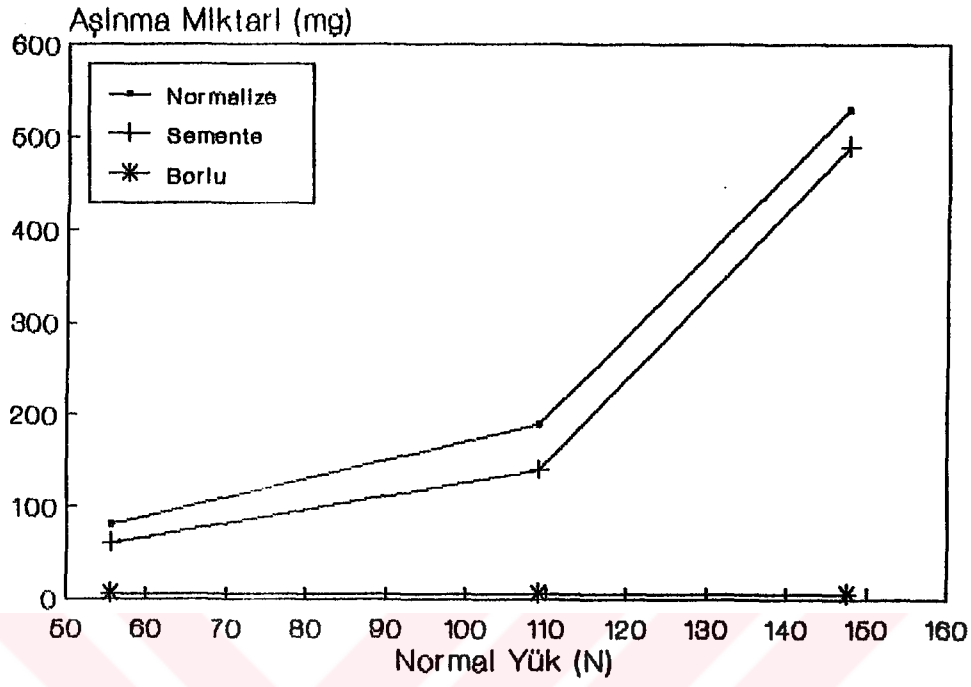
Şekil 4.59: 147.5 N yükte borlu iki malzemenin kayma süresine bağlı olarak aşınma kayıplarının değişimi



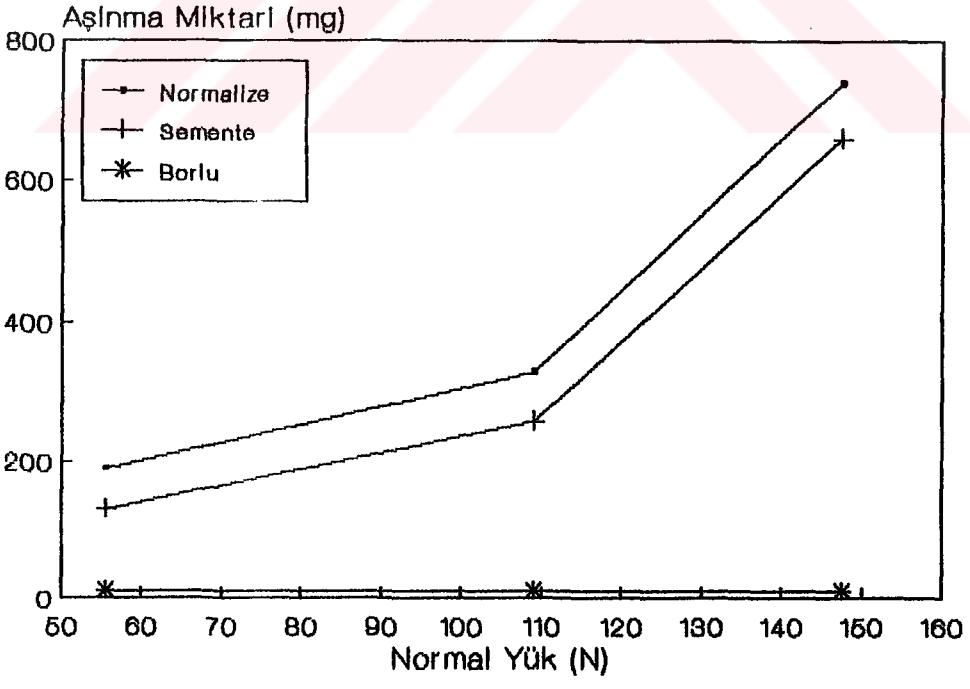
Şekil 4.60: 60 sn kayma süresinde aşınma miktarının normal yükle değişimi (AISI 1020)



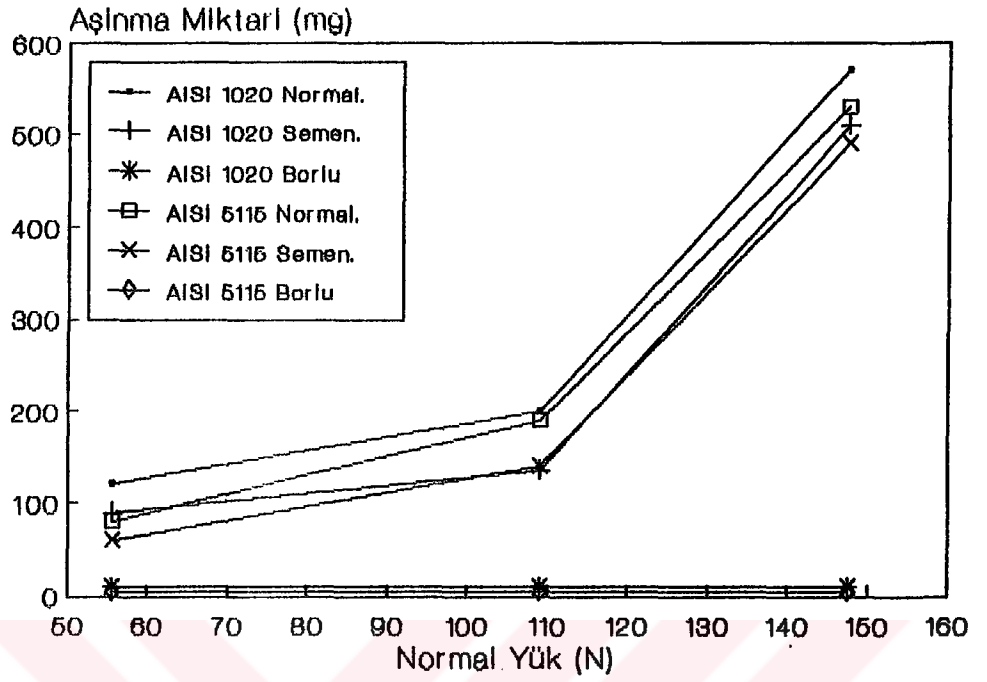
Şekil 4.61: 180 sn kayma süresinde aşınma miktarının normal yükle değişimi (AISI 1020)



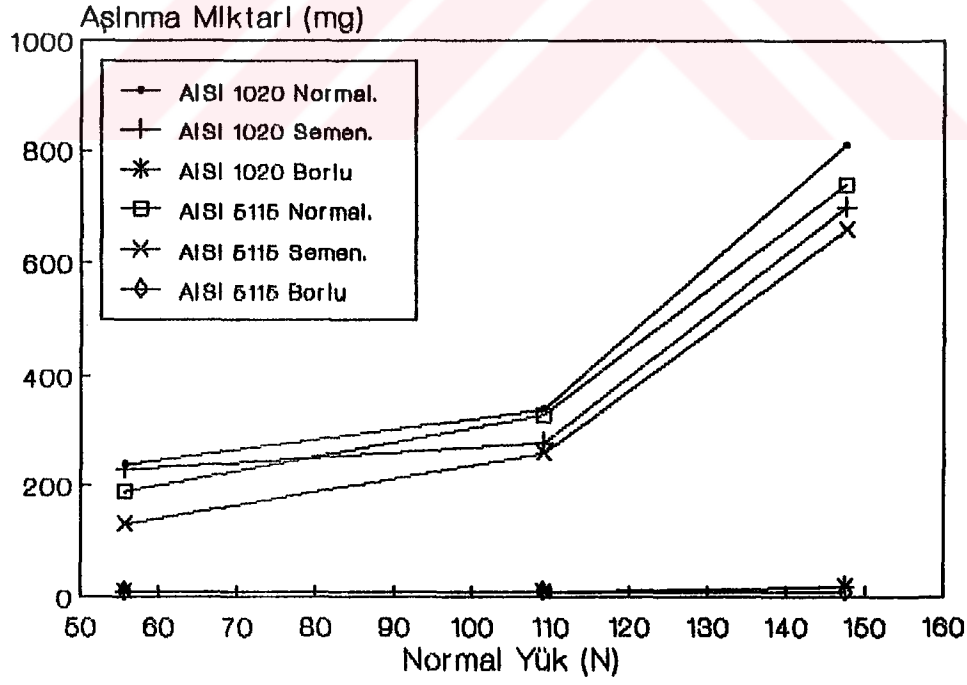
Şekil 4.62: 60 sn kayma süresinde aşınma miktarının normal yükle değişimi (AISI 5115)



Şekil 4.63: 180 sn kayma süresinde aşınma miktarının normal yükle değişimi (AISI 5115)



Şekil 4.64: 60 sn kayma süresinde aşınma miktarının normal yükle değişimi (AISI 1020 ve 5115)



Şekil 4.65: 180 sn kayma süresinde aşınma miktarının normal yükle değişimi (AISI 1020 ve 5115)

BÖLÜM V

5.1.TARTIŞMA

Sürtünme özellikleri açısından oldukça avantajlı olduğu tesbit edilen borlama işlemi çok zor şartlar altında gerçekleştirilmektedir. Hele ülkemizde yaygın olmayışı ve işlemin pek tanınmayışı uygulamayı daha da zorlaştırmaktadır. Oysa bor minerali açısından oldukça zengin olan ülkemizin bu potansiyeli değerlendirmesi ve sertliğin önem arzettiği makina elemanlarının sertleştirilmesinde kullanılması arzu edilen bir olgu olmalıdır.

Aşınma deneyleri sonucunda borlamanın çok etkili bir yüzey sertleştirme işlemi olduğu anlaşılmıştır. Çünkü işlem görmemiş numunelerle, borlanmış numunelerin aynı şartlardaki aşınma testleri borlanmış lehine gelişmiştir. Isıl işlem görmüş numuneler karşılaştırıldığında borlamanın sementasyondan çok daha avantajlı sürtünme özellikleri kazandırdığı gerçeği yakalanmıştır. Bu çerçevede yüksek sertlik ve derin borlanmış tabakalar daha iyi aşınma direnci vermişlerdir (Şekil 4.19b). Artan kalınlıkla aşınmanın azaldığı, ancak bu azalmanın hangi kalınlığa kadar devam edeceği test edilememiştir. Belkide, belli kalınlıktan sonra aşınma artışı hızlanacaktır. Çünkü yüzeylerde oluşan yorulma çatlamaları kalın tabakaların dökülmesine ve aşınma kayıplarının fazlalaşmasına neden olacaktır. Böylece optimum bir kalınlık ve sertlik tesbit edilebilir.

Yapılan yüzey sertleştirme işlemleri her iki metalinde mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Bu iyileşme her iki metalde aynı oranda olmamıştır. Deney şartları aynı olduğu kabul edilirse bu duruma malzemelerin kimyasal terkiplerinden kaynaklandığı söylenebilir.

Deneylerde kullanılan numunelerin sertlik taramalarında bazı farklı değerler bulunmuştur. Bu değerlerden çok farklı olanlar dikkate alınmamıştır. Aşınma testi esnasında zaman zaman titreşimlerin arttığı belirlenmiştir. Bu durum sürtünme kuvveti değerlerinin sapmasına neden olmuştur. Bazan deneyin başlangıcında bazan deney süresinin ortalarında titreşimler daha da şiddetlenmiştir. Titreşimlerin arttığı bölgelerde sürtünme ve aşınma hızla artmıştır. Aşınmanın şiddetini, deneyler sırasında artan titreşimlerin belirlediği kabul edilebilir.

Ayrıca aşınma deneyi sırasında sürtünmeden kaynaklanan ısınma meydana gelmiştir ve bu ısı ile karşı eleman ve numune ısınmıştır. Hatta bu ısı motora kadar ulaşmıştır. Bu durumun ise malzemenin iç yapısına etkide bulunabileceği sanılmaktadır. Isının anormal arttığı durumlarda numunelerin renginin değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durumu önlemek için karşı eleman ve numune soğuk hava üfleyici ile soğutulmuştur.
Metalografik muayenelerde çok sayıda fotoğraf çekilmiş, ancak bunların bir çoğunda elde edilen görüntüler arasında fark görülememiştir. Özellikle farklı olanlar bu çalışmada kullanılmışlardır.

Aşınma esnasında özellikle borlu numunelerden aşınma partikülleri toplanmıştır. Bu partiküller ve aşınmadan önce yüzeyden mekanik yolla kaldırılan yüzey partikülleri ayrı ayrı X-ışını analizi metodu ile analiz edilmiştir. Bu grafikler incelenmiş ancak aşınma esnasında meydana gelmesi beklenen oksitler hakkında bir fikir elde edilememiştir. Bu ise partiküllerin daha geniş ölçüde taranmamasındandır. Sürtünme ve aşınma deney sonuçlarının genel olarak aşınma teorisine uygun olduğu görülmüştür.

5.2. SONUÇLAR

Bu çalışmanın sonuçlarını şöyle özetleyebiliriz;

1- Yüzey sertleştirme işlemleri ile her iki metolinde yüzey sertliği, aşınma dirençleri artmıştır. Aşınma direnci sertlik artışı ile orantılıdır.

2- Borlanmış yüzey sertliği semente edilmiş yüzeye göre çok daha fazladır.

3- Borlanmış çeliklerin sertleştirilmiş taboka derinliği çok düşüktür (yaklaşık 70 μm)

4- Sürtünme kuvveti yükün ve hızın artışı ile artmaktadır.

5- Sırası ile aşınma direnci en yüksek borlanmış AISI 5115 ve AISI 1020 çeliğinde, en düşükte işlem görmemiş AISI 1020 çeliğinde görülmüştür.

6- Yükün, koyma hızının ve özellikle koyma süresinin artması ile borlu çeliklerin aşınma direnci semente edilmiş numunelere göre daha fazladır.

7- Borlanmış AISI 5115 çeliği semente edilmiş durumuna göre daha yüksek aşınma direnci gerektiren konstruksiyonlarda kullanılabilir. Borlu AISI 1020 çeliği yüksek aşınma direnci ile borlanmış ve semente edilmiş AISI 5115 çeliğinin yerine kullanılabilinir. Ancak özellikle darbesiz ve sürtünmeli konstruksiyonlarda uygundur.

8- Borlama ile elde edilen taboka ve diffüzyon bölgesi arasında özellikle alaşımlı çeliklerde çatlak oluşabilmektedir. Çatlağa iç gerilmeler neden olmaktadır. Bunu önlemek için bu tip malzemeler borlamadan sonra ikinci bir ısıl işlemle, mesela sementasyon ile gerilme giderme tavına tabi tutulabilir.

9- Bu çalışmada yüksek devir kullanılmıştır. Bu nedenlede aşınma esnasında yüzeylerde ısınma meydana gelmiştir. Bu ısınmanın ve iç gerilmelerinde etkisi ile yüzeylerde çatlamalar meydana gelmiştir. Yüzeydeki bu çatlamayı önlemek için daha düşük devirlerde çalışılması gerekir ve kuru sürtünmeden kaçınılmalıdır.

5.3. ÖNERİLER

Bu çalışmada düşük mukavemetli ve şekillendirilmesi kolay olan AISI 1020 çeliğinin borlama ile aşınma özelliklerinin nasıl değiştiği deneysel olarak incelenmiştir. Bu özellik işlem görmemiş AISI 1020, semente edilmiş AISI 1020, işlem görmemiş AISI 5115, semente edilmiş AISI 5115 ve borlanmış AISI 5115 ile aynı şartlarda mukayese edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre borlanmış AISI 1020 çeliği sürtünmeli aşınmaya maruz konstruksiyonlarda kullanılabileceği kanaatine varılmıştır. Bu konuda kesin karara varabilmek için borlanmış AISI 1020 çeliğinin değişik şartlarda diğer mekanik özellikleri (yorulma, çentik darbe, çekme ve boyut kontrolü) araştırılmalıdır. Aynı zamanda bu çelik değişik sıcaklık ve zamanlarda borlanarak mekanik özellikleri araştırılmalıdır. Bunun yanısıra korozyon özellikleride araştırılmalıdır. Bu çalışmada genel olarak kuru sürtünme uygulanmıştır. Borlu AISI 1020 çeliğinin yağlı ortamdaki aşınma direncininde araştırılması tavsiye edilir.

EKLER:

Ek Tablo 1a: AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin ağırlıksal aşınma kayıpları

Normal Yük [kg(N)]	Kayma Hızı [m/sn]	Kayma Süresi [sn]	Kayma Yolu [m]	AŞINMA MIKTARI [mg]					
				AISI 1020			AISI 5115		
				Normalize	Semente	Borlu	Normalize	Semente	Borlu
5.67 (55.6)	3.60	10	35.4	50	40	—	30	30	—
		30	106.2	90	80	—	70	50	—
		45	159.3	120	70	—	60	40	—
		60	212.4	100	90	10	80	60	5
		75	265.5	130	140	—	140	80	—
		90	318.6	220	190	—	160	90	—
		180	637.2	240	230	10	190	130	10
		300	1062.0	340	290	10	270	225	10
		420	1486.8	—	—	20	—	—	20
		540	1911.6	—	—	20	—	—	20
11.1 (109)	3.60	10	35.4	60	30	—	70	60	—
		30	106.2	70	60	—	90	50	—
		45	159.3	140	120	—	130	90	—
		60	212.4	200	135	10	190	140	5
		75	265.5	280	180	—	220	120	—
		90	318.6	300	210	—	290	180	—
		180	637.2	340	280	10	330	260	10
		300	1062.0	—	—	20	—	—	10
		420	1486.8	—	—	20	—	—	20
		540	1911.6	—	—	30	—	—	30
15.03 (147.5)	3.60	10	35.4	—	—	—	—	—	—
		30	106.2	—	—	—	—	—	—
		45	159.3	—	—	—	—	—	—
		60	212.4	570	510	10	530	490	5
		75	265.5	—	—	—	—	—	—
		90	318.6	—	—	—	—	—	—
		180	637.2	810	700	20	740	660	10
		300	1062.0	—	—	30	—	—	10
		420	1486.8	—	—	40	—	—	30
		540	1911.6	—	—	60	—	—	30

EKLER:

Ek Tablo 1b: AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin hacimsel aşınma kayıpları

Normal Yük [kg(N)]	Kayma Hızı [m/sn]	Kayma Süresi [sn]	Kayma Yolu [m]	AŞINMA MIKTARI [mm³]					
				AISI 1020			AISI 5115		
				Normalize	Semente	Borlu	Normalize	Semente	Borlu
5.67 (55.6)	3.60	10	35.4	6.36	5.083	—	3.812	3.812	—
		30	106.2	11.44	10.165	—	8.895	6.353	—
		45	159.3	12.71	8.895	—	7.624	5.083	—
		60	212.4	15.25	11.440	1.271	10.165	7.624	0.635
		75	265.5	16.52	17.790	—	17.800	10.165	—
		90	318.6	28.00	24.142	—	20.330	11.436	—
		180	637.2	30.50	29.225	1.271	24.142	16.518	1.271
		300	1062.0	43.20	36.850	1.271	34.308	28.600	1.271
		420	1486.8	—	—	2.541	—	—	2.541
		540	1911.6	—	—	2.541	—	—	2.541
11.1 (109)	3.60	10	35.4	7.624	3.812	—	8.895	7.624	—
		30	106.2	8.895	7.624	—	11.436	6.353	—
		45	159.3	17.800	15.250	—	16.518	11.436	—
		60	212.4	25.413	17.154	1.271	24.142	17.800	0.635
		75	265.5	35.600	22.872	—	27.954	15.248	—
		90	318.6	38.120	28.684	—	36.849	22.872	—
		180	637.2	43.202	35.578	1.271	41.932	33.037	1.271
		300	1062.0	—	—	2.541	—	—	1.271
		420	1486.8	—	—	2.541	—	—	2.541
		540	1911.6	—	—	3.812	—	—	3.812
15.03 (147.5)	3.60	10	35.4	—	—	—	—	—	—
		30	106.2	—	—	—	—	—	—
		45	159.3	—	—	—	—	—	—
		60	212.4	72.43	64.81	1.271	67.345	62.26	0.635
		75	265.5	—	—	—	—	—	—
		90	318.6	—	—	—	—	—	—
		180	637.2	102.92	88.95	2.541	94.028	83.87	1.271
		300	1062.0	—	—	3.812	—	—	1.271
		420	1486.8	—	—	5.083	—	—	3.812
		540	1911.6	—	—	7.624	—	—	3.812

EKLER:

Ek Tablo 2a: AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin aşınma esnasındaki sürtünme kuvvetleri

Normal Yük [kg(N)]	Kayma Hızı [m/sn]	Kayma Süresi [sn]	Kayma Yolu [m]	SURTUNME KUVVETI [kg]					
				AISI 1020			AISI 5115		
				Normalize	Semente	Borlu	Normalize	Semente	Borlu
5.67 (55.6)	3.60	10	35.4	4.2	2.5	—	1.3	2.5	—
		30	106.2	3.7	3.1	—	1.9	2.2	—
		45	159.3	3.6	3.2	—	2.2	2.4	—
		60	212.4	3.5	3.3	3.1	2.8	3.3	2.1
		75	265.5	3.3	3.4	—	3.8	3.6	—
		90	318.6	3.4	3.4	—	4.0	4.1	—
		180	637.2	3.5	3.5	3.5	3.9	4.0	1.4
		300	1062.0	3.6	3.7	3.4	4.2	4.8	0.9
		420	1486.8	—	—	3.6	—	—	0.5
		540	1911.6	—	—	3.4	—	—	0.6
11.1 (109)	3.60	10	35.4	4.5	3.3	—	2.9	3.8	—
		30	106.2	4.3	3.8	—	3.5	4.2	—
		45	159.3	4.7	4.0	—	5.0	4.3	—
		60	212.4	5.1	4.6	4.7	5.3	4.5	1.3
		75	265.5	5.4	4.9	—	5.5	4.4	—
		90	318.6	6.0	5.2	—	5.8	4.6	—
		180	637.2	6.1	5.4	4.2	6.6	5.3	1.4
		300	1062.0	—	—	4.5	—	—	0.8
		420	1486.8	—	—	4.4	—	—	1.5
		540	1911.6	—	—	4.0	—	—	2.0
15.03 (147.5)	3.60	10	35.4	—	—	—	—	—	—
		30	106.2	—	—	—	—	—	—
		45	159.3	—	—	—	—	—	—
		60	212.4	7.9	7.4	5.8	7.7	6.4	3.4
		75	265.5	—	—	—	—	—	—
		90	318.6	—	—	—	—	—	—
		180	637.2	9.7	8.9	5.4	8.7	7.5	2.6
		300	1062.0	—	—	5.1	—	—	2.6
		420	1486.8	—	—	4.8	—	—	2.4
		540	1911.6	—	—	4.5	—	—	2.3

EKLER:

Ek Tablo 2b: AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin aşınma esnasındaki sürtünme katsayıları

Normal Yük [kg(N)]	Kayma Hızı [m/sn]	Kayma Süresi [sn]	Kayma Yolu [m]	SURTUNME KATSAYISI [-]					
				AISI 1020			AISI 5115		
				Normalize	Semente	Borlu	Normalize	Semente	Borlu
5.67 (55.6)	3.60	10	35.4	0.741	0.441	—	0.230	0.441	—
		30	106.2	0.653	0.547	—	0.335	0.388	—
		45	159.3	0.635	0.545	—	0.388	0.424	—
		60	212.4	0.618	0.582	0.547	0.494	0.582	0.370
		75	265.6	0.582	0.600	—	0.670	0.635	—
		90	318.6	0.600	0.600	—	0.706	0.723	—
		180	637.2	0.618	0.618	0.618	0.688	0.706	0.247
		300	1062.0	0.635	0.653	0.600	0.741	0.647	0.159
		420	1486.8	—	—	0.635	—	—	0.090
		540	1911.6	—	—	0.600	—	—	0.106
11.1 (109)	3.60	10	35.4	0.406	0.298	—	0.261	0.343	—
		30	106.2	0.388	0.343	—	0.316	0.379	—
		45	159.3	0.424	0.361	—	0.451	0.388	—
		60	212.4	0.460	0.415	0.424	0.478	0.406	0.117
		75	265.5	0.487	0.442	—	0.496	0.397	—
		90	318.6	0.541	0.470	—	0.523	0.415	—
		180	637.2	0.550	0.487	0.380	0.595	0.478	0.126
		300	1062.0	—	—	0.406	—	—	0.072
		420	1486.8	—	—	0.397	—	—	0.135
		540	1911.6	—	—	0.361	—	—	0.180
15.03 (147.5)	3.60	10	35.4	—	—	—	—	—	—
		30	106.2	—	—	—	—	—	—
		45	159.3	—	—	—	—	—	—
		60	212.4	0.526	0.492	0.386	0.512	0.426	0.226
		75	265.5	—	—	—	—	—	—
		90	318.6	—	—	—	—	—	—
		180	637.2	0.646	0.592	0.360	0.560	0.500	0.173
		300	1062.0	—	—	0.340	—	—	0.186
		420	1486.8	—	—	0.320	—	—	0.160
		540	1911.6	—	—	0.300	—	—	0.153

EKLER:

Ek Tablo 3a: Borlu AISI 1020 çeliğinin sertleşmiş tabakasında mikro sertlik dağılımı

Numune Nr.	Mesafe [µm]	Köşegen [µm]	Sertlik [kg/mm²]	
A42 AISI 1020	16.2	8.2	2206.31	A42 Numunesi 930°C 1.5 saat süreyle borkarbürde borlandı
	22.4	8.0	2318.00	
	24.8	8.4	2102.50	
	25.6	9.2	1752.74	
	26.4	10.4	1371.60	
	28.0	11.4	1141.50	
	32.8	14.2	735.73	
	44.4	16.8	525.60	
	60.0	21.6	317.96	
	76.8	25.0	237.40	
	97.2	25.2	233.61	
A67 AISI 1020	16.8	8.4	2102.50	A67 Numunesi 930°Cde 3 saat süreyle borkarbürde borlandı
	24.2	8.0	2318.00	
	31.2	8.4	2102.50	
	33.6	8.8	1915.70	
	36.4	12.0	1030.22	
	38.4	13.2	851.42	
	42.0	15.4	625.54	
	47.2	16.8	525.62	
	49.6	18.8	419.74	
	64.2	20.2	363.60	
	80.0	22.8	285.40	
	88.2	23.2	280.44	
A62 AISI 1020	15.6	7.6	2568.40	A62 Numunesi 950°C de 1.5 saat süreyle borkarbürde borlandı
	27.2	7.4	2709.10	
	36.4	7.6	2568.40	
	38.8	8.0	2318.00	
	41.2	9.6	1609.72	
	45.0	14.8	677.30	
	53.6	17.4	490.00	
	60.8	19.6	386.20	
	67.2	19.0	411.00	
	76.6	20.8	343.00	
	86.2	21.2	330.10	
	99.6	21.2	330.10	

EKLER

Ek Tablo 3b: Borlu AISI 5115 çeliğinin sertleşmiş tabakasında mikro sertlik dağılımı

Numune Nr.	Mesafe [µm]	Köşegen [µm]	Sertlik [kg/mm²]	
B70 AISI5115	12.8	7.8	2438.40	B70 Numunesi 930°C 1.5 saat süreyle borkarbürde borlandı
	21.4	7.8	2438.40	
	24.0	8.4	2102.50	
	24.8	9.2	1752.74	
	26.4	11.2	1182.70	
	30.2	12.8	905.50	
	34.8	14.4	715.43	
	40.8	17.0	513.33	
	46.8	21.0	336.40	
	55.6	22.4	295.70	
	62.2	22.8	285.40	
	68.8	25.2	233.61	
	75.4	24.8	241.21	
	82.2	25.0	237.40	
B63 AISI5115	16.8	8.0	2318.00	B63 Numunesi 930°C de 3 saat süreyle borkarbürde borlandı
	22.8	7.8	2438.40	
	28.0	7.8	2438.40	
	32.4	8.4	2102.50	
	33.4	8.8	1915.70	
	34.4	9.6	1609.72	
	36.0	10.4	1371.60	
	38.2	12.0	1030.22	
	41.0	14.6	696.00	
	47.0	17.6	479.00	
	59.4	18.8	419.74	
	70.4	20.4	356.50	
	80.4	22.2	301.00	
	87.2	25.0	237.40	
B73 AISI5115	23.2	7.4	2709.10	B73 Numunesi 950°C 1.5 saat süreyle borkarbürde borlandı
	29.8	7.2	2861.73	
	36.2	7.4	2709.10	
	38.0	8.4	2102.50	
	40.0	9.2	1752.74	
	41.6	11.0	1226.10	
	43.2	12.0	1030.22	
	47.2	14.0	756.90	
	55.4	15.6	609.60	
	64.0	18.2	448.00	
	78.0	19.4	394.20	
	103.2	20.8	343.00	
	118.4	21.6	318.00	
	126.4	22.4	296.00	

EKLER:

Ek Tablo 4a: Borlu AISI 1020 çeliğinin aşınmadan sonra tabaka altı mikro sertlik dağılımı

Numune Nr.	Mesafe [µm]	Köşegen [µm]	Sertlik [kg/mm²]
A40 AISI1020	11.2	17.2	501.46
	24.0	15.2	642.11
	44.0	18.8	419.74
	62.0	20.6	349.60
	74.4	21.8	312.16
	86.4	23.4	270.94
	154.0	24.4	249.18
	272.0	25.4	229.94
A41 AISI1020	14.8	18.0	457.87
	20.2	16.4	551.57
	27.2	16.8	525.62
	30.8	19.0	410.95
	43.0	18.8	419.74
	57.6	20.8	343.00
	65.4	21.6	318.00
	75.6	23.4	270.94
	90.2	23.8	261.90
	154.0	24.0	257.56
	249.2	25.4	229.95
A48 AISI1020	28.0	15.0	659.34
	34.2	14.4	715.43
	39.6	15.4	625.53
	46.0	16.2	565.30
	52.8	17.6	478.93
	57.2	17.4	490.00
	59.2	18.2	448.00
	64.2	21.8	312.16
	74.6	24.2	253.32
	150.0	24.4	249.18
	272.0	25.4	229.95

EKLER:

Ek Tablo 4b: Borlu AISI 5115 çeliğinin aşınmadan sonra tabaka altı mikro sertlik dağılımı

Numune Nr.	Mesafe [µm]	Köşegen [µm]	Sertlik [kg/mm²]
B72 AISI5115	16.0	19.2	402.43
	23.4	17.6	478.93
	40.4	17.2	501.46
	52.0	18.2	447.86
	67.4	21.6	317.96
	87.2	22.8	285.38
	110.4	24.8	241.21
	242.0	25.2	233.61
	334.8	25.0	237.40
B66 AISI5115	28.0	16.6	538.40
	36.4	15.6	609.60
	49.6	16.8	525.63
	56.4	17.2	501.46
	64.4	22.2	468.22
	70.4	21.2	438.20
	74.8	17.8	330.10
	78.2	18.4	312.20
	87.4	21.8	301.00
	110.0	23.8	261.90
	209.6	24.8	241.21
	230.4	25.2	233.61
	355.2	25.0	237.40
	381.6	25.0	237.40
B64 AISI5115	10.8	8.6	2005.84
	21.2	8.8	1915.70
	28.4	9.2	1752.74
	31.2	9.6	1609.72
	33.0	11.8	1065.44
	37.2	13.2	851.42
	40.2	14.0	757.00
	54.4	15.8	594.26
	70.4	18.2	447.86
	87.2	20.8	342.90
	118.4	21.0	336.40
	284.8	25.2	233.61
	381.6	25.0	237.40

KAYNAKLAR

1) Selçuk, B., "Civatalı Bağlantılarda Sürtünmenin İncelenmesi", E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 1991

2) Karamış, M.B., Odabaş, D., İpek, R. "Tren Fren Papuçlarında Aşınma Davranışının Etüdü", 3. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, S. 175-183, 21-23 Eylül 1988, ODTÜ, Ankara

3) İpek, Rasim,"AISI 1020 Çeliğinin, Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5115 Çeliğinin Yerine Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması", E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Kayseri, 1992

4) Akkurt, Mustafa "Makina elemanları Cilt 2", İTÜ. İstanbul. 1992

5) İpek, Rasim "Tren Fren Papuçlarının Aşınmasının Deneysel İncelenmesi", E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisas Tezi, Kayseri, 1987

6) Odabaş, D.,"Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerin Teorik ve Deneysel Araştırılması", E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Kayseri, 1991

7) Karamış, M.B., Odabaş, D., "Ötektoidaltı Çeliklerin Kayma Sürtünmesinde Adhesiv Aşınma Katsayısının Araştırılması "3. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, S. 155-163, 21-23 Eylül 1988, ODTÜ, Ankara

8) Grosh, J. "Allgemeine Systematik für die Auswahl von Werkstoffen Verschleißbeanspruchter Bauteile VDI.-Berichte Nr.194, S 70-71, 1973

9) Gürleyik, M.Y. "Soğuk Deformasyonla, Aşınma Direnci Artırılabilir", 2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, S. 501-510, 17-19 Eylül 1986, ODTÜ, Ankara

10) Gürleyik, M.Y. "Makina Mühendisliğinde Aşınma Olayları", Mühendis ve Makina, Cilt 27, Sayı 323, S.3-14, Aralık 1986

11) Brozeit, E. Modell-Verschleißprüftechnik, VDI-Berichte Nr.194, S.45, 1973

12) Portakal, A. "Kaymalı Düz Yataklarda Yüzey Pürüzlülüğü ve Aşınma Hızı" Mühendis ve Makina Cilt 18, Sayı 213, S.400-408, Ekim 1974

13) Pigors, O. "Abrasiv Verschleißverhalten von Stählen bei Gleit- und Wälzbewegungen", Schmierungstechnik 10, 1979, H.9

14) Onaran, Kaşif, "Malzeme Bilgisi", İTÜ, Çağlayan basımevi, İstanbul, 1985

15) Kloos, K.H. "Werkstoffoberflüche und Verschleißverhalten in Fertigung und konstruktiven Anwendungen", VDI-Berichte Nr.194, S.7, 1973

16) Lülsdorf, P."Verschleißprobleme mit Zylinder und Schnecke beim Extrudieren", VDI-Bildungswerk, BW 3019, Troisdorf

17) Akkurt, M., Tevroz, Talat. "Dişli Çarklarda Yenme Olayının Deneysel İncelenmesi", 3. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, S.165-173, 21-23 Eylül, ODTÜ, Ankara

18) Akkurt, S. " Poliasetalin Kuru ve Su ile Yağlama Koşullarında Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Bakımından İncelenmesi", 4.Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi S.585-594, 19-21 Eylül 1990, ODTÜ, Ankara

19) de Haller, P. "Erosion und Kovitations-Erosion", In E. Siebel Handbuch der Werkstoffprüfung Band 2, insbes. S.471/88, Berlin 1939,

20) Gürleyik, M.Y. "Yıkama Aşındırması", Mühendis ve Makina Cilt 311 Sayı 368, S.25-34, Eylül 1990

21) Gürleyik, M.Y. "Püskürtme Aşındırması", 3.Ulusal Mühendis ve Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, S.185-193, 21-23 Eylül 1988, ODTÜ, Ankara

22) Karamış, M.B. "Abrasiv Aşınma Mekanizmasında Yüzey Basıncının Aşınmaya Etkisi", 2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, S.493-500, 17-19 Eylül 1986, ODTÜ, Ankara

23) Karamış, M.B."Traktör Hızı ve Pulluk Çalışma Derinliğinin Uç Demiri Aşınma Hızına Etkileri ve Optimizasyonu", Tübitak, 2ci Ulusal Makina Teorisi Simpozyumu, S.668-677, 22-24 Eylül 1986, ODTÜ, Gaziantep

24) Gürleyik, M.Y. "Katı Cisimlerin Maksimum Aşınma Mukavemeti için, Yapılan Araştırmalar", Mühendis ve Makina Cilt 33 Sayı 384, S.23-28, Von Jan Sadowski'den çeviri, Ocak 1992

25) Tekin, Erdoğan "Madencilikte Kullanılan Aşınma Dayançlı Demir Alaşımları", 2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, S.401-409, 17-19 Eylül 1986, ODTÜ, Ankara

26) Arıkan, R., "MoS_2 ilaveli Çinko-Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Yapımı ve Aşınma Özellikleri", 3. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, S.537-547, 21-23 Eylül 1988, ODTÜ, Ankara

27) Winkelmann, U. "Anwendung von Verschleiß-Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Lebensdauer von Gelenklagern", Schmierungstechnik 9, S.103-106, 1978

28) Habig, K.H. "Verschleiß und Härte von Werkstoffen", Hanser- Verlag, München-Wien, 1980

29) Demirci, A.H.,"Perlitaltı Alaşımsız Çeliklerde Isıl İşlemlerle Aşınma Mukavemeti Değişiminin İncelenmesi", 1. Ulusal Makina Tas. ve İmal. Kong., S.539-547, 19-21 Eylül 1984, ODTÜ, Ankara

30) Gerçekçioğlu, Eyyüb, "Alaşımlı Çeliklerde Aşınma", Makina Bülteni, Sayı 3, S.18-20, Kasım 1992, Kayseri

31) Kaya, Halil, "Malzeme", Ankara Erkek Teknik Öğretmen Okulu Yayınları 1,Gün Matbaası, İstanbul, 1961

32) Anık, Selahaddin, "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", W.Weissbach'ın Werkstoffkundeund Werkstoffprüfung adlı eserinden çeviri, Kurtuluş Matbaası, İstanbul,1977

33) Domke, Wilhelm, "Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung", Verlag W. Girardet, Essen, 1977

34) Hougardy, H. P., "Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle", Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1990

35) Baydur, Galip, "Malzeme", M.E.V. Yay. Flaş Mat., İstanbul,1988

36) Güleç, Şefik, "Malzeme Bilgisi Ders Notları", İTÜ, Mak. Fak. Ofset Atölyesi, Sayı 33, İstanbul, 1985

37) Yıldırım, M. "Malzeme Bilgisi I,II", F.Ü. Tek. Eğit. Fak. Metalurji Eğ. Böl. Ders Notları", Elazığ, 1985

38) TS. 1112 ,"Metal Malzemenin Isıl İşlemleriyle İlgili Terimler" TSE, Nisan 1982

39) TS. 1381, "Jomini Deneyleri", Haziran 1974

40) Tekin, Adnan, "Çelik ve Isıl İşlemi", Bofors Elkitabı, K-E. Thelning' ten çeviri, İstanbul, 1984

41) Karamış, M.B., Odabaş D., "Ç 1020 Çeliğinin Katı Sementasyonu ve Mekanik Özelliklerinin Değişiminin İncelenmesi", II. Ulusal Üniversite Sanayi İşbirliği Sempozyumu,E.Ü.,S.1-8, Kayseri,1988

42) Sönmez, N., "Elektron Işını ile Yüzey Sertleştirme", Mühendis ve Makina, Cilt 29, Sayı 336, Ocak 1988

43) Yıldırım, M. Mustafa "Laserle Yapılan Yüzeysel İşlemlerde Son Uygulama Teknikleri", 5.Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Cilt 2, 7-8-9 Nisan 1993, S.561-570, Pamukkale Üni., Denizli

44) Schiller, S., Heisig, U., Panzer, S., "Elektronenstrahl technologie", VEB Verlag Technik, Berlin, 1976

45) Beitz, W., Küttner, K.H., "Taschenbuch für den Maschinenbau", Dubbel, Springer Verlag, 16. Auflage, im Sommer, Berlin, 1987

46) Bor, Ş., "Çelikler ve Yüzey Sertleştirme İşlemleri", Mühendis ve Makina, Cilt 25, Sayı 292, S.25-31, Nisan 1984

47) Tekin, Erdoğan "Mühendisler için Çelik Seçimi" TMMOB, Makina Mühendisleri Odası, Yayın No 119, Ankara, 1986

48) Edenhofer, Bernd, "Vergleich Verschiedener Nitrierverfahren unter besonderer Berücksichtigung des Ionitrierens", Fachber. für Oberflächentechnik 12, Heft 4, S.2-7, 1974

49) Edenhofer,B.,"Anwendungen und Vorteile von Nitrierbehandlungen außerhalb des gewöhnlichen Temperaturbereichs, Teil II: Behandlungen bei hohen Temperaturen (oberhalb von 580°C)", HTM 30, Heft 4, S. 204-208, 1975

50) Edenhofer,B.,"Anwendungen und Vorteile von Nitrierbehandlungen außerhalb des gewöhnlichen Temperaturbereiches Teil I: Behandlungen bei niedrigen Temperaturen (unterhalb von 500°C)" HTM 30, Heft 1, S.21-25, 1975

51) Karamış, M. Baki, Gerçekçioğlu, Eyyup, "Plazma-Nitrürlenmiş Paslanmaz Çeliklerin Yüzey Tabaka Özellikleri", 5. Denizli Malzeme Sempoyumu, Bildiriler Cilt 2, 7-8-9 Nisan 1993, S.541- 550, Pamukkale Üni., Denizli

52) Keller, Klaus, "Hochfeste Maschinenteile durch Ionitrieren von martensit aushärtendem Stahl", Klöckner Ionon Sonderdruch aus Fachbereichte für Oberflächentechnik 9, Heft 3, 1971

53) Frank, E.,"Untersuchungen zum Einfluss von Nitrierbehandlungen auf das Ermüdungsverhalten der Stähle Ck 15 und 42 CrMo4 bei niedrigen Spamurgsamplitude, Dissertation, Berlin, 1982

54) Çelik, A. ve Karadeniz, S., "Tuz Nitrürasyonunun Yorulma Mukavemetine Etkisi", 5.Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Cilt 2, 7-8-9 Nisan 1993, S.527-530, Pamukkale Üni., Denizli

55) Kubalek,E."Isothermische Zeit-Temperatur Entmischungsschaubild als Grundlagenuntersuchung zur Erklärung der Entmischungsvor-gänge im system Eisen-Stickstoff", HTM 23, S 177-197, 1968

56) Demirkol, Mehmet, "İyon Nitrürlemeyle Yüzey Sertleştirme", 4. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 19-21 Eylül 1990, S. 255-264, ODTÜ, Ankara

57) Edenhofer, Bernd "Steigerung der Werkeuge-Stadmenge durch Ionitrieren", Köln

58) Keller, Klaus, "Ionitrierung von Gußeisenwerkstoffen", HTM 25, Heft 2, Seite 106-107, 1970

59) Çelik, A., Karadeniz S., "İon-Nitrürasyonunda, Gaz-Karışım Oranının ve Sıcaklığın İçyapıya Etkisinin İncelenmesi", 5. Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Cilt 2, 7-8-9 Nisan 1993, S.518-524, Pamukkale Üni., Denizli

60) Karamış, M. Baki, "Tribological behaviour of plasma nitrided 722M24 material under dry sliding conditions", Wear, 147, pp 385-399, 1991

61) Tur, Kazım,"İyon İmplantasyonu Teknolojisinin Metallerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesinde Kullanımı", 5.Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Cilt 2, 7-8-9 Nisan 1993, S.531-540, Pamukkale Üni., Denizli

62) Sidan, H., "Nitrieren von rost- und säurebeständigen Stählen" Techn. Rundschau, H 24, S.9, 1965

63) Keller, Klaus, "Maßänderung an Zahnädern durch Nitrieren Möglichkeiten der Maßbeein flussung durch Ionitrieren", Antriebs-Technik 10, Nr 3, S.91, 1971

64) Keller, Klaus, "Ionitrier bedingungen für Maschinenteile aus Kugelgrafitguß höherer Festigkeit", Techn. Rundschau 63, Nr. 13, S.41, 1971

65) Schreiner, Alexander, "Einfluss des Oberflächenzustandes und des Randkohlenstoffgehaltes auf Nitrocarburiershichten aus der Gasphase",Tehnische Universität München, Instut für Werkstoff- und Verarbeitungswissenschaften Lehrstuhl für Metallurgie und Metalkunde, Dissertation, Münih, 1984

66) Kolozsváry, Z., Tirgu-Mureş (SR Rumänien), "Einflus des Oberflächenzustandes auf Bildung und Eigenschaften von Karbonitridschichten", Neue Hütte 31. Jahrgang, Heft 1, Januar 1986

67) Keller, Klaus, "Vergleichsuntersuchungen an gas-, bad- und ionitrierten Mashinenteilen", Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr.2244

68) İpek, R. ve Karamış M.B., "Sementasyonla ve Karbonitrürasyonla Sertleştirilmiş AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi", 5. Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Cilt 2, 1993, S.551-560, Pamukkale Üni.

69) Zysk, J., "Gefüge von ε-Schichten carbonitrierter unlegierter Stähle in Abhängigkeit von ihrer Kohlenstoffkonzentration", Härterei-Technishe Mitteilungen 31, Nr.6, S.319-324, 1976

70) Zysk, J., "Aufbau und Nutzeigenschaften von ε-Schichten nitrierter Stähle", HTM 31, Nr.3, S.137-144, 1976

71) Zysk, J., "Praktische Bedeutung des Kohlenstoffs in Carbonitridschichten auf unlegierte Stähle", Härterei-Technische Mitteilungen 32,, Nr.1, S.1-7, 1977

72) Graf von Matuschka, A, "Borieren", Carl Hanser Verlg München-Wien, 1977

73) Bazille, P., "Connaissances Actuelles sur La Boruration" Science et Profession, Traitment Thermique, S.31-38, 1977

74) Fichtl, W, "Über neue Erkenntnisse auf dem Gebiet des Oberflächenborierens", Sonderdruck aus Härterei-Technische Mitteilungen 29, Heft 2, juni, S.113-119, 1974

75) Ming-Jiong, Lu, "Die Bildung-und Wachstumskinetik monophasiger Boridschten", HTM 38, Heft 4, S.156-169, 1983

76) Wahl, V. Georg, "Borieren-ein Verfahren zur Erzeugung harter Oberflächen bei extremer Verschleißbeanspruchung", Sonderdruck aus VDI-Z 117, Nr.17, S.785-789, 1975

77) DEGUSSA, "Borieren von Eisenwerkstoffen", Ekabor Borier- Mitteilungen 1, Nr 1/74 aus ZwF 69, Heft 3, S.1-2, 1974

78) Schaaber, O; Fischer-Chattergee, R; "Zur Frage des Borierens ven Eisenwerksoffen", 18th. International Conference on Heat Treatment of Materials, Stiftung Institut für Härterei-Technik S.1-12

79) Bozkurt, Nazım,"Bor Yayınmıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme" İstanbul Teknik Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1984, İstanbul

80) Fichtl, Walter, "Das Oberflächenborieren and seine technische Anwendung", Sonderdruck aus Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft, Band 52, Nr.4, S.79-83, 1975

81) Fischer-Chattergee, R. "Schutzschichten auf Sinterwerkstoffen, Wärmebehandlungs-und Werkstofftechnik", ZwF 74, H. 2, S.93-97, 1979

82) Özmen, Yılmaz; Can, A.Çetin, "Borlamanın Çeliklerde Aşınma Dayanımına Etkisi" 5. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 16-18 Eylül 1992, S.583-591, ODTÜ, Ankara

83) Kunst, H., Schaaber O, "Beobachtungen beim Oberflächenborieren von Stahl II, über Wachstumsmechanismus und Aufbau der bei der Eindiffusion von Bor in Eisen bei Gegenwart von Kohlenstoff entsbehenden Verbindungs - und Diffüsionschitten", Härterei - Tech. Mitt. 22, Helf 1, S.1-25, 1967

84) Richter, M; v Simscher Elle, "Untersuchung der Diffusionszone unglegierter borierter Stähle", Neue Hütte 22, Heft 1, S.18-21, 1977

85) Bozkurt, N.; Geçkinli, A.E., "Autoradiographic Study on Boronized Steel", Materials Science And Engineering, 00- 1983 00-00, Montréal, Canada

86) Zöllner, von H., "Verminderung des Adhäsiv-und Abrasiv- Verschluiβes durch Anwendung des Bориerverfahrens, Ein Bericht über praxiserproble Serienteile aus der Industrie", Carl Hanser Verlag, München 86

87) Finnern, B.,"Borieren von metallen in einem borkarbidhaltigen Granulat", Degussa, Durferrit-technische mitteilungen,

88) ESK Mitteilung, "Borieren", Elektroschmelzwerk Kempten 6 MBH, München

89) Fichtl, W., "Aus der Praxis des Oberflächenborierens", Sonderdruch aus HTM, 33, Heft 1, S.1-7, 1978

90) ESK Mitteilung, "Borieren mit Ekabor-Paste", Elektroschmelz werk Kempten, GMBH, 01/88-0,5, München

91) ESK Mittelung, "Borieren in Schutzgazen", Elektroschmelzwerk Kempten GMBH, 01/88-0.5, München

92) Kunst, H., Schaaber, O., "Beobachtungen beim Oberflächen borieren von Stahl III", HTM.22, Heft 4, S.275-292, 1967

93) Trausner, Norbert, "Fehlerquellen, Ursachen und Folgen beim Borieren", Fachberichte Hüttenpraxis Metallweiterverarbeitung Vol.25, No 9, 1987

94) DEGUSSA, "Boriermittel und Verfahren", Ekabor-Borier- Mitteilungen 2, DX 621.785.539, Hanau

95) Fichtl, N, Trawner, N., Von Matuschka, Garf, "Borieren mit Ekabor", ESK-Unterlagen, München

96) Hegewaldt, F., Singheiser, L., Türk, M., "Gasborieren", HTM 39, H. 1, S.7-14, 1984

97) Wierzchón, T., Pokrosen, S., Karpiński, T., "Plasmaborieren- Faktoren, die die Keimbildung der Boridschicht auf Stahl bedingen", HTM, Band 38, Heft 2, S.57-102, 1983

98) Wierzchón, T., Bogacki, J, Karpiński,T., "Ion boriding from view point of applied gaseous medium", Proc. International Conference on Heat Treatment of Materials, Detroit, 6-8, 05, 1980, S.13-24, U.S.A.

99) Cosodesus, P., Gontois, M., "Über das Borieren von Eisen- Legienungen mittel Ionenbeschuß mit Diboran", Härteri techni. Mitt. 33, H. 4, S.202-208, 1978

100) Fichtl, Wolter, "Fortschritte auf dem Gebiet des Oberflächen borierens", Mitteilung aus dem Elektroschmelzwerk Kempten GmbH, Sonderdruck aus Berichte der Deutschen keramischen Gesellschaft, Band 53, Nr.5, S.156-157, 1976

101) ESK-Mitteilung, "Borieren in der Kaltumformtechnick" Elektroschmelzwerk Kempten GMBH, 07/86-0.5, München

102) ESK-Mitteilung, "Borieren von Schmiedegesenken und Werkzeugen zur Wormumformung", Elektroschmelzwerk Kempten GMBH, 01/88-0.5, München

103) ESK-Mitteilung, "Hartmetall-Borieren" Elektroschmelzwerk Kempten GMBH, München

104) Deger, Riehle, M., Schatt, W., "Untersuchung des Bildungs-und Wachstumsmechanismus von Boridschichten auf Stahl", Neue Hütte 17, S.463-470, 1972

105) ESK-Mitteilung, "Borieren in der Glasindustrie", Elektroschmelzwerk, Kempten GMBH, 9/82, München

106) DEGUSSA, "Eingenschaften borierter Werkstücke", Ekobor-Borier Mitteilungen 3, DK 621.785.539: 546.27: 620.17

107) Bensinger, Wolf-Dieter, "Motor Konstrüksiyonu (Gaz Kumondo Elemonları)", çeviren Mesut Yalçınkoyo, Güven Kitobevi, Ankara, 1974

108) Öztuna, M., Öztuna, Ali, "Motor Teknolojisi", Çaba Matbaası, Ankara, 1979

109) GLENN, Harold T., "Otomobil Motorlarının Yenileştirimesi ve Bakımı", Çevirenler; Necati Anameriç, Fikret Özçelik ve Fikret Yolaçan, Yüksek Teknik Öğretmen Okulu, Yayın No:25, Ankara, 1975

110) Krieg, K.G., "Klein Einführung in die DIN-Normen" B.G. Teubner Stuttgart und Beuth Verlag Berlin und Köln, 1977

111) Danilvsky, V., "İmalat Mühendisliği", TMMOB, Makina Mühendis. Odası Yayın No:121, Çeviren Emin Bahadır Kantaroğlu, Ocak,1987

112) Demirci, A. Halim, "Teknik Kuru Sürtünmeli Bir Aşınma Deney Düzeneği ve İmalatı", Mühendis ve Makina, Cilt 29, Sayı 330, S.24-29, Temmuz 1987

113) Roloff, H., Matek, W.,"Maschinenelemente", Viewegs Fachbücher der Technik, Braunschweig, 1976f

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ